

目 录

前言

第一章 常用资料	1
一、汉语拼音字母	1
二、希腊字母	1
三、常用数学符号	2
四、平面和立体图形计算公式	3
1. 平面图形计算公式	3
2. 立体图形计算公式	7
五、小角求对边表	11
六、三角函数表	15
七、法定计量单位	23
1. 常用法定计量单位	23
2. 用于构成十进倍数和分数单位的词头	25
3. 应淘汰的计量单位	25
八、光学零件重量计算	27
九、公差与配合	27
1. 术语及定义	27
2. 基本规定	33
十、形状和位置公差	37
1. 形状和位置公差各项的符号	37
2. 附加要求符号	38
3. 形位公差带的定义和示例	39
十一、表面粗糙度与光学零件表面疵病	50
1. 表面粗糙度符号	50
2. 部分术语与定义	50
3. 表面粗糙度标注方法	53
4. 光学零件表面粗糙度	55
5. 光学零件表面疵病	56

十二、光学零件的技术要求	60
十三、光学零件图	61
十四、光学零件的倒角	63
1. 圆形光学零件的倒角	63
2. 非圆形光学零件的倒角	64
十五、光圈识别	65
1. 高低光圈的识别	65
2. 光圈的度量	67
十六、光学样板	69
1. 型式和尺寸	69
2. 技术要求	72
3. 验收规则	74
4. 标记、包装、运输和保管	74
十七、莫氏硬度标准材料	75
十八、部分常用材料莫氏硬度	76
十九、擦布脱脂	77
1. 材料	77
2. 脱脂操作	77
第二章 光学知识	78
一、光波 光线 折射率	78
二、几何光学基本定律	79
三、单个球面近轴象	80
1. 物象位置关系式	80
2. 物象大小关系式	80
四、共轴球面系统的基点	81
五、单个折射球面和透镜的主平面及焦点	82
1. 单个折射球面的主平面和焦点	82
2. 位于空气中的单透镜的主平面和焦点	82
3. 典型单透镜主平面位置	83
六、用作图法求理想象	85
七、用解析法求理想象	87
八、透镜组成象	88
九、平面镜和棱镜成象	90

十、反射棱镜的光学平行差	93
十一、象差概念	94
十二、眼睛和光学仪器工作原理	97
1. 眼睛	97
2. 望远镜的工作原理	101
3. 放大镜和显微镜的工作原理	103
4. 照相机和幻灯机的工作原理	105
十三、光的干涉	106
1. 光的干涉现象及相干条件	106
2. 平板(薄膜)干涉	107
3. 多光束干涉	112
十四、光的衍射	113
十五、光的偏振	118
1. 偏振光的特点和获得方法	118
2. 波片	123
3. 偏振光的干涉	124
4. 物质的旋光性	126
十六、激光	126
十七、全息照相	130
第三章 常用材料和辅料	132
一、无色光学玻璃	132
1. 系列和分类	132
2. 牌号	132
3. 质量指标	132
4. 耐辐射光学玻璃	133
5. 部分光学玻璃的物理、化学特性	133
二、有色光学玻璃	138
1. 按特性分类	138
2. 牌号	138
3. 按质量指标分类、分级	139
4. 有色光学玻璃的物理、化学性质	139
5. 有色光学玻璃的折射率、反射修正值、化学稳定性和密度的数据	140

三、其他技术玻璃	144
1. 光学石英玻璃	144
2. 硬质玻璃	145
3. 微晶玻璃(超低膨胀玻璃)	146
四、光学晶体	146
1. 晶体和非晶体	146
2. 晶体的一般特性	147
3. 单晶和多晶	148
4. 晶体的内部结构	148
5. 七大晶系	149
6. 晶面指数和面间距	151
7. 晶体的解理面和解理程度	153
8. 部分光学晶体性能	153
五、磨料和磨具	163
1. 磨料的种类和性能	163
2. 磨料粒度及其组成	164
3. 人造金刚石	168
4. 磨具	169
5. W50以下磨料新旧标号对照	172
六、抛光粉	173
1. 抛光粉的种类与性能	173
2. 添加剂	174
七、粘结胶	174
1. 配制粘结胶常用材料特性	174
2. 部分粘结胶配方	184
八、抛光脂	186
九、常用有机溶剂	189
十、擦拭材料	190
1. 擦布	190
2. 脱脂棉	191
十一、保护涂料	192
第四章 模具	195
一、平模	195

VIII

1. 圆形平模上圆形零件的粘结数	195
2. 镜盘和粘结模的直径	196
3. 计算圆形零件粘结数的综合表	197
4. 圆平模材料和结构参数	199
二、球模	203
1. 粘结模	203
2. 研磨模	216
3. 倒边模	224
4. 抛光模	225
5. 球模材料和结构参数	227
6. 球模的工作面制造公差及检验	246
7. 球面镜盘参数表	246
三、夹模	351
四、圆弧样板	354
附录 I 磨料粒度与磨料层厚度	357
附录 II 各号刚玉对 K9 玻璃的毛面深度及与其他牌号 玻璃的换算系数	357
第五章 光学冷加工工艺	359
一、开料	359
1. 手工切割	359
2. 外圆切割机切割	361
3. 内圆切割机切割	362
4. 静压切割	363
5. 毛玻璃板划切	363
6. 窗玻璃划圆	364
二、磨外圆	365
1. 手工滚圆	365
2. 机器磨外圆	366
3. 外圆加工余量及公差	371
4. 外圆加工常见的问题	372
三、粗磨平面	372
1. 散粒磨料多片加工	372
2. 散粒磨料单件加工	373

3. 环形工件加工	373
4. 双面加工	374
5. 铣磨加工	374
6. 粗磨平面疵病产生原因	379
四、粗磨棱镜及斜面	379
1. 夹模	379
2. 平模	379
3. 铣磨棱镜	379
4. 磨斜面	380
5. 磨椭圆反射镜斜面	380
五、粗磨球面	380
1. 单件手工加工	380
2. 沟槽模加工	382
3. 整盘粗磨球面	382
4. 铣磨球面	382
5. 铣磨冷却液	389
6. 铣磨中常见的问题	390
7. 面形检验	390
8. 砂轮轴倾斜角 α 表	391
六、打孔	408
1. 硬质合金钻头	408
2. 空心钻头	408
3. 金刚石空心钻头	410
4. 台钻打孔	410
5. 超声波打孔	410
6. 打孔余量	411
7. 打孔常见的问题	412
七、铣槽及磨圆弧	412
1. 铣槽	412
2. 铣刀	413
3. 磨圆弧	414
八、粗磨加工余量及公差	416
1. 粗磨余量	416

X

2. 开球面余量	416
3. 粗磨尺寸公差	416
九、上盘	417
1. 平行平面上盘	417
2. 透镜上盘	421
3. 棱镜上盘	423
十、散粒磨料细磨(精磨)	428
1. 细磨抛光机	428
2. 磨料	429
3. 模具	430
4. 注意事项	430
5. 常见疵病产生原因及克服办法	431
十一、固着磨料精磨	431
1. 机床	431
2. 精磨片	431
3. 磨盘	435
4. 冷却液	443
5. 主要工艺参数	443
6. 常见疵病产生原因及克服办法	445
十二、平面摆动式抛光	446
1. 抛光机	446
2. 抛光辅料	446
3. 抛光模	449
4. 修改光圈要领	449
5. 常见疵病产生原因及克服办法	449
6. 平行薄片的双面抛光	453
7. 环形抛光模抛光	454
十三、固着磨料抛光	455
1. 抛光机	455
2. 抛光片	455
3. 抛光模	455
4. 冷却液	456
5. 主要工艺参数	456

6. 常见疵病产生原因及克服办法	457
7. 国内首批生产线加工透镜技术要求和加工指标	458
十四、下盘和清洗	458
1. 加热法下盘	458
2. 冷冻法下盘	460
3. 局部加热法下盘	460
4. 敲击法下盘	460
5. 清洗	460
十五、定心和磨边	462
1. 定心方法	462
2. 磨边接头	468
3. 砂轮	468
4. 冷却液	471
5. 粘结胶	472
6. 倒角	472
7. 磨边机	473
8. 定心磨边余量	473
9. 磨边常见疵病及产生原因	476
十六、样板制造	476
1. 球面样板	476
2. 平面样板	481
十七、非球面加工	482
1. 二次曲面	482
2. 曲线样板	484
3. 最接近比较球面和最大非球面度	485
4. 非球面加工	487
5. 抛光模	490
6. 检验	491
7. 柱面镜制造	491
十八、晶体加工	501
1. 定向	504
2. 切割	512
3. 研磨	517

4. 抛光	519
5. 劳动保护	522
十九、光学零件的复制	523
1. 复制工艺	525
2. 常见疵病	529
第六章 加工过程中的测量	531
一、面形偏差测量	531
1. 干涉法	531
2. 阴影法	535
二、曲率半径测量	538
1. 机械法	538
2. 自准直法	541
3. 干涉法	543
4. 阴影法	544
三、平行度测量	545
1. 玻璃平板平行度测量	545
2. 棱镜光学平行差测量	550
四、角度测量	562
1. 直接测量法	562
2. 比较测量法	563
五、焦距测量	564
1. 放大率法	564
2. 附加透镜法	566
六、象质检验	567
1. 分辨率测量	567
2. 层点检验	573
参考文献	576

第一章 常用资料

一、汉语拼音字母

表 1-1 汉语拼音字母

大 写	小 写	名 称		大 写	小 写	名 称		大 写	小 写	名 称		大 写	小 写	名 称	
		拼音	汉字 注音			拼音	汉字 注音			拼音	汉字 注音			拼音	汉字 注音
A	a	a	阿	H	h	ha	哈	O	o	o	喔	V	v	vê	物
B	b	bê	玻	I	i	i	衣	P	p	pê	坡	W	w	wo	蛙
C	c	cê	雌	J	j	je	街	Q	q	qu	邱	X	x	xi	希
D	d	dê	得	K	k	kê	科	R	r	or	阿儿	Y	y	ya	呀
E	e	e	鹅	L	l	él	埃勒	S	s	ês	埃思	Z	z	zê	资
F	f	êf	埃佛	M	m	êm	埃摸	T	t	tê	特				
G	g	gê	哥	N	n	nê	纳	U	u	u	乌				

注：1. 字母的手写体依照拉丁字母的一般书写习惯。
2. 名称栏内的汉字注音是按普通话的近似音，二字以上的要连续读。
3. “V”只用来拼写外来语、少数民族语言和方言。

二、希腊字母

表 1-2 希腊字母

正体		斜体		名 称 (汉语拼音注音)	正体		斜体		名 称 (汉语拼音注音)	正体		斜体		名 称 (汉语拼音注音)
大写	小写	大写	小写		大写	小写	大写	小写		大写	小写	大写	小写	
A	α	Α	α	alfa	I	ι	Ι	ι	yota	Ρ	ρ	Ρ	ρ	rou
B	β	Β	β	beta	Κ	κ	Κ	κ	kapa	Σ	σ	Σ	σ	sigma
Γ	γ	Γ	γ	gama	Λ	λ	Λ	λ	lamda	Τ	τ	Τ	τ	tao
Δ	δ	Δ	δ	dêlta	Μ	μ	Μ	μ	mlu	Υ	υ	Υ	υ	yupsilon
E	ε, ε	Ε	ε	êpsilon	Ν	ν	Ν	ν	nlu	Φ	φ, φ	Φ	φ, φ	foi
Z	ζ	Ζ	ζ	zita	Ξ	ξ	Ξ	ξ	ksai	Χ	χ	Χ	χ	kai
H	η	Η	η	yita	Ο	ο	Ο	ο	omikron	Ψ	ψ	Ψ	ψ	psai
Θ	θ, θ	Θ	θ θ	sita	Π	π	Π	π	pai	Ω	ω	Ω	ω	omlga

0110151

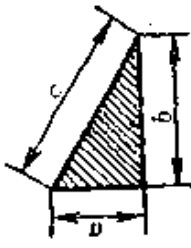
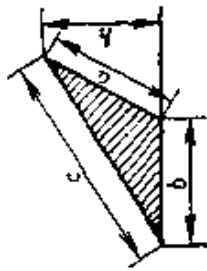
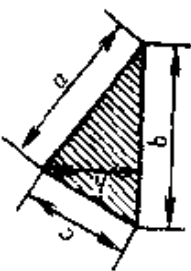
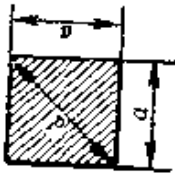
三、常用数学符号
表 1-3 常用数学符号

符 号	意 义	符 号	意 义
+	加, 正号	L	直角
-	减, 负号	\triangle	三角形
\pm	加或减, 正或负	\square	正方形
\mp	减或加, 负或正	\square	矩形
\times 或 \cdot	乘 ($a \times b = a \cdot b = ab$)	\square	平行四边形
+ 或 /	除 ($a \div b$ 或 $\frac{a}{b}$ 或 a/b 即 b 除 a 或 a 除以 b)	\odot	圆
=	等于	\perp	垂直
\equiv	恒等于	//	平行
\neq 或 \neq	不等于	π	圆周率
<	小于	\sim	相似
>	大于	\cong	全等
\leq	小于或等于(不大于)	\because	因为
\geq	大于或等于(不小于)	\therefore	所以
\ll	远小于	\cdot	度
\gg	远大于	'	分
\approx	约等于	"	秒
.	小数点(如3.14)	$\sin x$	x 的正弦
:	比($a:b$)	$\cos x$	x 的余弦
\propto	成正比	$\operatorname{tg} x$	x 的正切
∞	无穷大	$\operatorname{ctg} x$	x 的余切
%	百分比	$\operatorname{sec} x$	x 的正割
()	圆括号	$\operatorname{csc} x$	x 的余割
[]	方括号	$\operatorname{arcsin} x$	x 的反正弦
{}	花括号	$\operatorname{arccos} x$	x 的反余弦
\sim	数字范围 (如5~10表示由5到10)	$\operatorname{arctg} x$	x 的反正切
Σ	总和	$\operatorname{arccctg} x$	x 的反余切
a^c	a 的 c 次方 (c 不限定是正整数)	$\operatorname{arcsec} x$	x 的反正割
\sqrt{a}	a 开平方	$\operatorname{arccsc} x$	x 的反余割
$\sqrt[n]{a}$	a 开 n 次方	$\log_a x$	以 a 为底的 x 的对数
$ a $	a 的绝对值	$\ln x$	以 e 为底的 x 的对数(自然对数)
\angle	角	$\lg x$	以10为底的 x 的对数
		\lim	极限
		\max	最大
		\min	最小

四、平面和立体图形计算公式

1. 平面图形计算公式

表 1-4 平面图形计算公式

图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
直角三角形 	$A = \frac{ab}{2}$ $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ $a = \sqrt{c^2 - b^2}$ $b = \sqrt{c^2 - a^2}$ (A——面积)	钝角三角形 	$A = \frac{bh}{2}$ $= \frac{b}{2} \sqrt{a^2 - \left(\frac{c^2 - a^2 - b^2}{2b}\right)^2}$ 设 $S = \frac{1}{2}(a+b+c)$ 则 $A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$
锐角三角形 	$A = \frac{bh}{2}$ $= \frac{b}{2} \sqrt{a^2 - \left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2b}\right)^2}$ 设 $S = \frac{1}{2}(a+b+c)$ 则 $A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$	正方形 	$A = a^2$ $A = \frac{1}{2}d^2$ $a = 0.7071d$ $d = 1.414a$

(续)

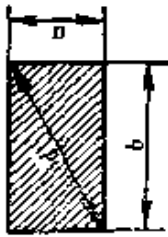
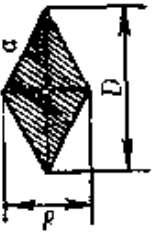

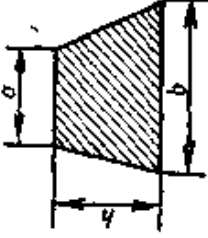
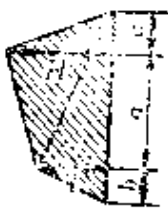
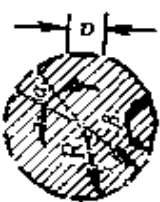
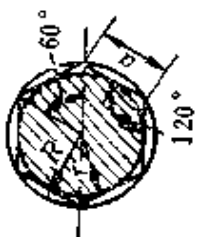

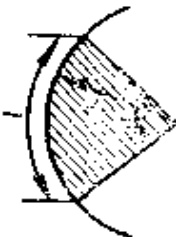
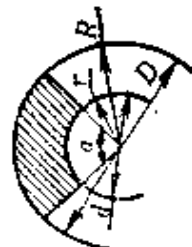

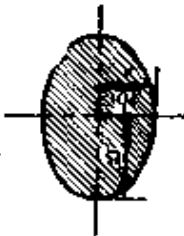
图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
<p>矩形</p> 	$A = ab$ $A = a\sqrt{d^2 - b^2} = b\sqrt{d^2 - a^2}$ $d = \sqrt{a^2 + b^2}$ $a = \sqrt{d^2 - b^2}$ $b = \sqrt{d^2 - a^2}$	<p>菱形</p> 	$A = \frac{Dd}{2}$ $D^2 + d^2 = 4a^2$
<p>平行四边形</p> 	$A = bh$	<p>梯形</p> 	$A = \frac{(a+b)h}{2}$

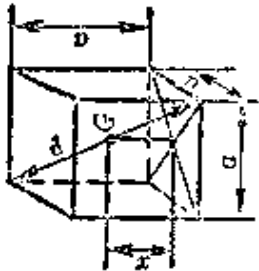
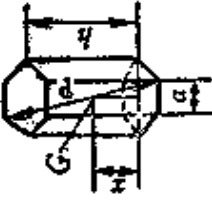
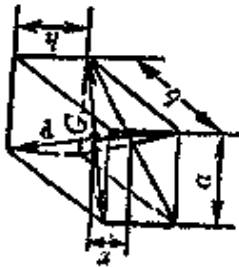
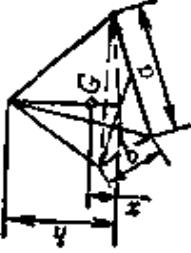
图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
任意四边形 	$A = \frac{(H+h)a + bh + cH}{2}$ 任意四边形的面积也可分成二个三角形，将其面积相加得出	正多角形 	$A = \frac{n a r}{2} = \frac{n a}{2} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}$ $R = \sqrt{r^2 + \frac{a^2}{4}} \quad r = \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}$ $a = 2\sqrt{R^2 - r^2}$ (n—边数) $\alpha = 360^\circ/n \quad \beta = 180^\circ - \alpha$
正六角形 	$A = 2.598 a^2 = 2.598 R^2$ $r = 0.866 a = 0.866 R$ $a = R = 1.155 r$	圆 	圆周长 = C $A = \pi r^2 = 3.1416 r^2 = 0.7854 d^2$ $C = 2\pi r = 6.2832 r = 3.1416 d$

(续)

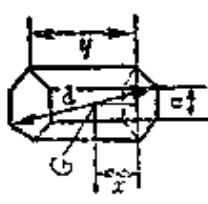
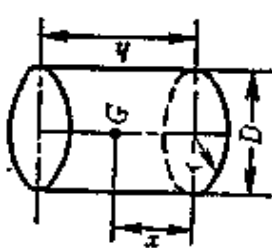
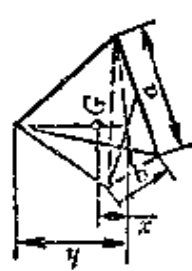
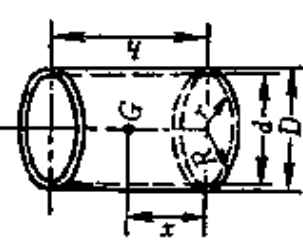
图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
扇形 	$A = \frac{1}{2} \pi r^2 = 0.008727 \alpha r^2$ $S = \frac{3.1416 r \alpha}{180} = 0.01745 r \alpha$ α 以度为单位	环式扇形 	$A = \frac{\alpha \pi}{360} (R^2 - r^2)$ $= 0.00873 \alpha (R^2 - r^2)$ $= \frac{\alpha \pi}{4 \times 360} (D^2 - d^2)$ $= 0.00218 \alpha (D^2 - d^2)$ α 以度为单位
环形 	$A = \pi (R^2 - r^2)$ $= 3.1416 (R^2 - r^2)$ $= 3.1416 (R + r) (R - r)$ $= 0.7854 (D^2 - d^2)$ $= 0.7854 (D + d) (D - d)$	椭圆 	$A = \pi ab = 3.1416 ab$ $P = \pi (a + b) \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{a-b}{a+b} \right)^2 + \frac{1}{64} \left(\frac{a-b}{a+b} \right)^4 + \dots \right]$ 或 $P \approx 3.1416 \sqrt{2(a^2 + b^2)}$ (当 a 与 b 相差很小时可用此公式) (P —椭圆周长)

2. 立体图形计算公式

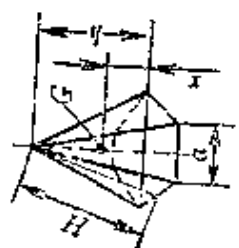
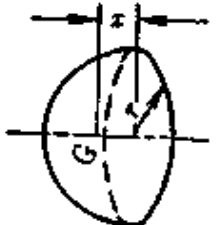
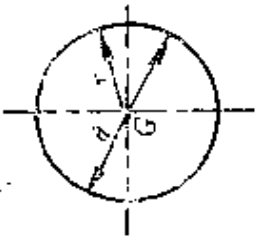
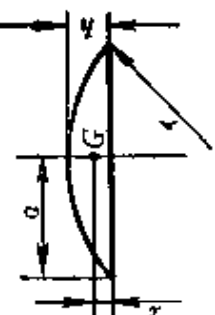
表 1-5 立体图形计算公式

图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
<p>正方体</p>  <p>(图中 O - 重心的位置)</p>	$V = a^3$ $A_s = 6a^2$ $A_0 = 4a^2$ $A = A_s = a^2$ $x = a/2$ $d = \sqrt{3}a = 1.7321a$ (V - 容积 A_s - 全面积 A_0 - 侧面积 A - 顶面积)	<p>正六角体</p> 	$V = 2.598a^2h$ $A_s = 5.1963a^2 + 6ah$ $A_0 = 6ah$ $x = \frac{h}{2}$ $d = \sqrt{h^2 + 4a^2}$
<p>长方体</p> 	$V = abh$ $A_s = 2(ab + ah + bh)$ $A_0 = 2h(a + b)$ $x = \frac{h}{2}$ $d = \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}$	<p>四面体</p> 	$V = \frac{1}{6}abh$ $A_s = \text{四个三角形面积之和}$ $x = \frac{1}{4}h$ $a \perp b$

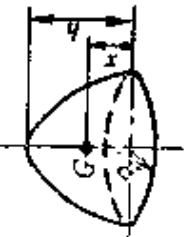
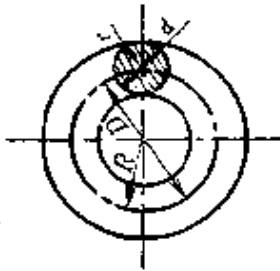
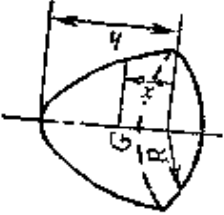
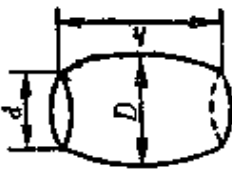
(续)

图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
<p>正六角体</p> 	$V = \frac{hA_0}{3}$ $A_0 = \frac{1}{2} PH = \frac{1}{2} naH$ $x = \frac{h}{4}$ <p>(P—底面周长, n—侧面的面数, A₀—底面积)</p>	<p>圆柱体</p> 	$V = \frac{\pi}{4} D^2 h = \pi r^2 h$ $= 0.785 D^2 h$ $A_0 = \pi D h = 2\pi r h$ $x = \frac{h}{2}$ $A_s = 2\pi r(r+h)$
<p>四面体</p> 	$V = \frac{bh}{6}(2a+a_1)$ <p>A₀—二个梯形面积加二个三角形面积加底面积</p> $x = \frac{h(a+a_1)}{2(2a+a_1)}$ <p>(底为矩形)</p>	<p>空心圆柱</p> 	$V = \frac{\pi}{4} h(D^2 - d^2)$ $A_0 = \pi h(D+d)$ $= 2\pi h(R+r)$ $x = \frac{h}{2}$

(续)

图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
<p>正角锥体</p> 	$V = \frac{\pi R^2 h}{3}$ $A_0 = \pi R L$ $= \pi R \sqrt{R^2 + h^2}$ $s = \frac{h}{4}$ $L = \sqrt{R^2 + h^2}$	<p>半球体</p> 	$V = \frac{2}{3} \pi r^3$ $A_0 = 3 \pi r^2$ $s = \frac{3}{8} r$
<p>圆球</p> 	$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{\pi d^3}{6}$ $= 0.5236 d^3$ $A_0 = 4 \pi r^2 = \pi d^2$	<p>缺球体</p> 	$V = \frac{\pi h}{6} (3a^2 + h^2) = \frac{\pi h^2}{3} (3r - h)$ $A_0 = \pi (2a^2 + h^2) = \pi (2r^2 + a^2)$ $A_0 = 2 \pi r h = \pi (a^2 + h^2)$ $x = \frac{h(2a^2 + h^2)}{2(3a^2 + h^2)}$ <p>或 $x = \frac{h(4r - h)}{4(3r - h)}$</p>

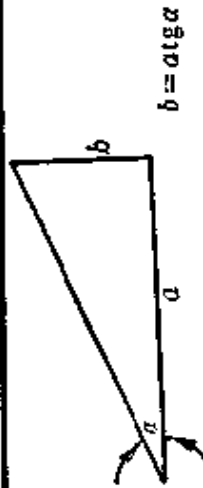
(续)

图 形	计 算 公 式	图 形	计 算 公 式
抛物线体 	$V = \frac{\pi R^2 h}{2}$ $A_0 = \frac{2\pi}{3} P \left[\sqrt{(R^2 + P^2)^2 - P^2} \right]$ 其中 $P = \frac{R^2}{2h}$ $x = \frac{1}{3} h$	圆环体 	$V = 2\pi^2 R r^2$ $= \frac{1}{4} \pi^2 D d^2$ $= 2.4674 D d^2$ $A_0 = 4\pi^2 R r = \pi^2 D d$
半椭圆球体 	$V = \frac{2}{3} \pi h R^2$ $A_0 = \pi R^2 + \frac{\pi h R}{e} \arcsine$ $\approx \pi h \left(h + R + \frac{h^2 - R^2}{6h} \right)$ $e = \sqrt{\frac{h^2 - R^2}{h}}$ $x = \frac{3}{8} h$ (h—长半轴, R—短半轴, e—离心率)	桶形体 	对于抛物线形桶, $V = \frac{\pi h}{15} \left(2D^2 + Dd + \frac{3}{4}d^2 \right)$ 对于圆形桶: $V = \frac{1}{12} \pi h (2D^2 + d^2)$

* 此公式也适用于底面积为任意多边形的角锥体。

五、小角求对边表

表 1-6 小角求对边表



α	0.5"	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"
$\operatorname{tg} \alpha$	0.000 00243	0.000 00485	0.000 00970	0.000 01454	0.000 01939	0.000 02424	0.000 02909	0.000 03394	0.000 03879	0.000 04363
a	b									
40	0.000097	0.00019	0.00039	0.00058	0.00078	0.00097	0.00116	0.00136	0.00155	0.00175
50	0.000122	0.00024	0.00048	0.00073	0.00097	0.00121	0.00145	0.00170	0.00194	0.00218
60	0.000146	0.00029	0.00058	0.00087	0.00116	0.00145	0.00175	0.00204	0.00233	0.00262
70	0.000170	0.00034	0.00068	0.00102	0.00136	0.00170	0.00204	0.00238	0.00272	0.00305
80	0.000194	0.00039	0.00078	0.00116	0.00155	0.00194	0.00233	0.00272	0.00310	0.00349
90	0.000219	0.00044	0.00087	0.00131	0.00175	0.00218	0.00262	0.00305	0.00349	0.00393
100	0.000243	0.00048	0.00097	0.00145	0.00194	0.00242	0.00291	0.00339	0.00388	0.00436
110	0.000267	0.00053	0.00107	0.00160	0.00213	0.00267	0.00320	0.00373	0.00427	0.00480
120	0.000292	0.00058	0.00116	0.00175	0.00233	0.00291	0.00349	0.00407	0.00465	0.00524
130	0.000316	0.00063	0.00126	0.00189	0.00252	0.00315	0.00378	0.00441	0.00504	0.00567

(续)

α	0.5"	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"
140	0.000340	0.00068	0.00136	0.00204	0.00272	0.00339	0.00407	0.00475	0.00543	0.00611
150	0.000365	0.00073	0.00145	0.00218	0.00291	0.00364	0.00436	0.00509	0.00582	0.00655
160	0.000389	0.00078	0.00155	0.00233	0.00310	0.00388	0.00465	0.00543	0.00621	0.00698
170	0.000413	0.00082	0.00165	0.00247	0.00330	0.00412	0.00495	0.00577	0.00659	0.00742
180	0.000437	0.00087	0.00175	0.00262	0.00349	0.00436	0.00524	0.00611	0.00698	0.00785
190	0.000462	0.00092	0.00184	0.00276	0.00368	0.00461	0.00553	0.00645	0.00737	0.00829
200	0.000486	0.00097	0.00194	0.00291	0.00388	0.00485	0.00582	0.00679	0.00776	0.00873
220	0.000535	0.00107	0.00213	0.00320	0.00427	0.00533	0.00640	0.00747	0.00853	0.00960
240	0.000583	0.00116	0.00233	0.00349	0.00465	0.00582	0.00698	0.00815	0.00931	0.01047
260	0.000632	0.00126	0.00252	0.00378	0.00504	0.00630	0.00756	0.00882	0.01008	0.01134
280	0.000680	0.00136	0.00272	0.00407	0.00543	0.00679	0.00815	0.00950	0.01086	0.01222
300	0.000729	0.00145	0.00291	0.00436	0.00582	0.00727	0.00873	0.01018	0.01164	0.01309
325	0.000790	0.00158	0.00315	0.00473	0.00630	0.00788	0.00945	0.01103	0.01261	0.01418
350	0.000851	0.00170	0.00339	0.00509	0.00679	0.00848	0.01018	0.01188	0.01358	0.01527
375	0.000911	0.00182	0.00364	0.00545	0.00727	0.00909	0.01091	0.01273	0.01454	0.01636
400	0.000972	0.00194	0.00388	0.00582	0.00776	0.00970	0.01164	0.01357	0.01551	0.01745

b

(续)

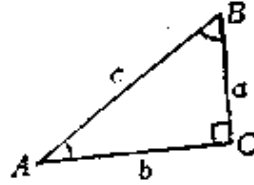
α	10"	15"	20"	25"	30"	45"	1'	2'	3'	4'	
$\lg \alpha$	0.000 0.4848	0.000 0.7272	0.000 0.9696	0.000 1.2120	0.000 1.4544	0.000 2.1817	0.000 2.9089	0.000 5.8178	0.000 8.7266	0.000 10.3355	
α	b										
40	0.00194	0.00291	0.00388	0.00485	0.00582	0.00679	0.00776	0.00873	0.00970	0.01067	0.01164
50	0.00242	0.00364	0.00485	0.00606	0.00727	0.00848	0.00970	0.01091	0.01212	0.01333	0.01454
60	0.00291	0.00436	0.00582	0.00727	0.00873	0.01018	0.01164	0.01309	0.01454	0.01600	0.01745
70	0.00339	0.00509	0.00679	0.00848	0.01018	0.01164	0.01309	0.01454	0.01600	0.01745	0.01891
80	0.00388	0.00582	0.00776	0.00970	0.01164	0.01309	0.01454	0.01600	0.01745	0.01891	0.02036
90	0.00436	0.00655	0.00873	0.01091	0.01309	0.01527	0.01745	0.01964	0.02182	0.02400	0.02618
100	0.00485	0.00727	0.00970	0.01212	0.01454	0.01699	0.01944	0.02189	0.02434	0.02679	0.02924
110	0.00533	0.00800	0.01067	0.01333	0.01600	0.01867	0.02133	0.02400	0.02667	0.02933	0.03200
120	0.00582	0.00873	0.01164	0.01454	0.01745	0.02036	0.02327	0.02618	0.02909	0.03200	0.03491
130	0.00630	0.00945	0.01261	0.01576	0.01891	0.02206	0.02521	0.02836	0.03151	0.03466	0.03781
140	0.00679	0.01018	0.01358	0.01697	0.02036	0.02375	0.02714	0.03053	0.03392	0.03731	0.04070
150	0.00727	0.01091	0.01454	0.01818	0.02182	0.02546	0.02909	0.03272	0.03635	0.03998	0.04361
160	0.00776	0.01164	0.01551	0.01939	0.02327	0.02714	0.03101	0.03488	0.03875	0.04262	0.04649
170	0.00824	0.01236	0.01648	0.02061	0.02473	0.02885	0.03297	0.03709	0.04121	0.04533	0.04945
180	0.00873	0.01309	0.01745	0.02182	0.02618	0.03053	0.03488	0.03923	0.04358	0.04793	0.05228
190	0.00921	0.01382	0.01842	0.02303	0.02763	0.03223	0.03683	0.04143	0.04603	0.05063	0.05523
200	0.00970	0.01454	0.01939	0.02424	0.02909	0.03392	0.03875	0.04358	0.04841	0.05324	0.05807
220	0.01067	0.01600	0.02133	0.02667	0.03200	0.03733	0.04266	0.04800	0.05333	0.05866	0.06400
240	0.01164	0.01745	0.02327	0.02909	0.03491	0.04073	0.04655	0.05236	0.05818	0.06400	0.06981
260	0.01261	0.01891	0.02521	0.03151	0.03782	0.04413	0.05043	0.05672	0.06302	0.06931	0.07561
280	0.01358	0.02076	0.02715	0.03394	0.04073	0.04752	0.05431	0.06110	0.06789	0.07468	0.08147
300	0.01454	0.02182	0.02909	0.03636	0.04363	0.05090	0.05817	0.06544	0.07271	0.08000	0.08727
325	0.01576	0.02363	0.03151	0.03939	0.04727	0.05515	0.06302	0.07090	0.07878	0.08665	0.09453
350	0.01697	0.02545	0.03394	0.04242	0.05091	0.05938	0.06785	0.07632	0.08479	0.09326	0.10173
375	0.01818	0.02727	0.03636	0.04545	0.05454	0.06363	0.07272	0.08181	0.09090	0.09999	0.10908
400	0.01939	0.02909	0.03879	0.04848	0.05818	0.06787	0.07757	0.08727	0.09696	0.10666	0.11635

(续)

α	5'	6'	7'	8'	9'	10'	15'	30'	1°
$\lg \alpha$	0.001 45444	0.001 74533	0.002 03622	0.002 32711	0.002 61800	0.002 90889	0.004 36335	0.008 72687	0.017 45506
α	b								
40	0.05818	0.06981	0.08145	0.09308	0.10472	0.1164	0.1745	0.3941	0.6982
50	0.07272	0.08727	0.10181	0.11636	0.13090	0.1454	0.2182	0.4363	0.8728
60	0.08727	0.10472	0.12217	0.13963	0.15708	0.1745	0.2618	0.5236	1.0473
70	0.1018	0.12217	0.14254	0.16289	0.18326	0.2036	0.3054	0.6109	1.2219
80	0.1164	0.13963	0.16290	0.18617	0.20944	0.2327	0.3491	0.6982	1.3964
90	0.1309	0.15708	0.18326	0.20944	0.23562	0.2618	0.3927	0.7854	1.5710
100	0.1454	0.17453	0.20382	0.23271	0.26180	0.2909	0.4364	0.8727	1.7455
110	0.1600	0.19199	0.22398	0.25598	0.28798	0.3200	0.4800	0.9600	1.9200
120	0.1745	0.20944	0.24435	0.27925	0.31416	0.3491	0.5236	1.0472	2.0946
130	0.1891	0.22689	0.26471	0.30252	0.34034	0.3782	0.5672	1.1345	2.2691
140	0.2036	0.24435	0.28507	0.32580	0.36652	0.4073	0.6109	1.2218	2.4437
150	0.2182	0.26180	0.30543	0.34907	0.39270	0.4363	0.6545	1.3090	2.6182
160	0.2327	0.27925	0.32580	0.37234	0.41888	0.4654	0.6981	1.3963	2.7928
170	0.2473	0.29671	0.34616	0.39561	0.44506	0.4945	0.7418	1.4836	2.9674
180	0.2618	0.31416	0.36632	0.41888	0.47124	0.5236	0.7854	1.5708	3.1419
190	0.2763	0.33161	0.38698	0.44215	0.49742	0.5527	0.8290	1.6581	3.3146
200	0.2909	0.34907	0.40724	0.46542	0.52360	0.5818	0.8727	1.7454	3.4910
220	0.3200	0.38397	0.44797	0.51196	0.57596	0.6400	0.9599	1.9199	3.8401
240	0.3491	0.41888	0.48869	0.55851	0.62332	0.6981	1.0470	2.0945	4.1892
260	0.3782	0.45379	0.52942	0.60495	0.68068	0.7563	1.1345	2.2690	4.5383
280	0.4073	0.48869	0.57014	0.65159	0.73304	0.8145	1.2217	2.4435	4.8874
300	0.4363	0.52360	0.61087	0.69813	0.78540	0.8727	1.3090	2.6181	5.2366
325	0.4727	0.56723	0.66177	0.75631	0.85085	0.9454	1.4181	2.8362	5.6728
350	0.5091	0.61087	0.71268	0.81449	0.91630	1.0181	1.5272	3.0544	6.1093
375	0.5454	0.65450	0.76358	0.87267	0.98175	1.0908	1.6363	3.2726	6.5456
400	0.5818	0.69813	0.81449	0.93084	1.04720	1.1635	1.7453	3.4908	6.9820

六、三角函数表

表 1-7 三角函数表



$$\text{正弦 } \sin A = \frac{a}{c} = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}} (= \cos B \text{余弦})$$

$$\text{余弦 } \cos A = \frac{b}{c} = \frac{\text{邻边}}{\text{斜边}} (= \sin B \text{正弦})$$

$$\text{正切 } \operatorname{tg} A = \frac{a}{b} = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}} (= \operatorname{ctg} B \text{余切})$$

$$\text{余切 } \operatorname{ctg} A = \frac{b}{a} = \frac{\text{邻边}}{\text{对边}} (= \operatorname{tg} B \text{正切})$$

正弦 (sin)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
0°	0.0000	0017	0035	0052	0070	0087	0105	0122	0140	0157	0.0175	90°			
1°	0.0175	0192	0209	0227	0244	0262	0279	0297	0314	0332	0.0349	89°	3	6	9
2°	0.0349	0366	0384	0401	0419	0436	0454	0471	0488	0506	0.0523	88°	3	6	9
3°	0.0523	0541	0558	0576	0593	0610	0628	0645	0663	0680	0.0698	87°	3	6	9
4°	0.0698	0715	0732	0750	0767	0785	0802	0819	0837	0854	0.0872	86°	3	6	9
5°	0.0872	0889	0906	0924	0941	0958	0976	0993	1011	1028	0.1045	85°	3	6	9
6°	0.1045	1063	1080	1097	1115	1132	1149	1167	1184	1201	0.1219	84°	3	6	9
7°	0.1219	1236	1253	1271	1288	1305	1323	1340	1357	1374	0.1392	83°	3	6	9
8°	0.1392	1409	1426	1444	1461	1478	1495	1513	1530	1547	0.1564	82°	3	6	9
9°	0.1564	1582	1599	1616	1633	1650	1668	1685	1702	1719	0.1736	81°	3	6	9
10°	0.1736	1754	1771	1788	1805	1822	1840	1857	1874	1891	0.1908	80°	3	6	9
11°	0.1908	1925	1942	1959	1977	1994	2011	2028	2045	2062	0.2079	79°	3	6	9
12°	0.2079	2096	2113	2130	2147	2164	2181	2198	2215	2233	0.2250	78°	3	6	9
13°	0.2250	2267	2284	2300	2317	2334	2351	2368	2385	2402	0.2419	77°	3	6	8
14°	0.2419	2436	2453	2470	2487	2504	2521	2538	2554	2571	0.2588	76°	3	6	8
15°	0.2588	2605	2622	2639	2656	2672	2689	2706	2723	2740	0.2756	75°	3	6	8
16°	0.2756	2773	2790	2807	2823	2840	2857	2874	2890	2907	0.2924	74°	3	6	8
17°	0.2924	2940	2957	2974	2990	3007	3024	3040	3057	3074	0.3090	73°	3	6	8
18°	0.3090	3107	3123	3140	3156	3173	3190	3206	3223	3239	0.3256	72°	3	6	8
19°	0.3256	3272	3289	3305	3322	3338	3355	3371	3387	3404	0.3420	71°	3	6	8
	60'	54'	48'	42'	36'	30'	24'	18'	12'	6'	0'	A	1'	2'	3'

余弦 (cos)

正弦 (sin)

(续)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
20°	0.3420	3437	3453	3469	3486	3502	3518	3535	3551	3567	0.3584	69°	3	5	8
21°	0.3584	3600	3616	3633	3649	3665	3681	3697	3714	3730	0.3746	68°	3	5	8
22°	0.3746	3762	3778	3795	3811	3827	3843	3859	3875	3891	0.3907	67°	3	5	8
23°	0.3907	3923	3939	3955	3971	3987	4003	4019	4035	4051	0.4067	66°	3	5	8
24°	0.4067	4083	4099	4115	4131	4147	4163	4179	4195	4210	0.4226	65°	3	5	8
25°	0.4226	4242	4258	4274	4289	4305	4321	4337	4352	4368	0.4384	64°	3	5	8
26°	0.4384	4399	4415	4431	4446	4462	4478	4493	4509	4524	0.4540	63°	3	5	8
27°	0.4540	4555	4571	4586	4602	4617	4633	4648	4664	4679	0.4695	62°	3	5	8
28°	0.4695	4710	4726	4741	4756	4772	4787	4802	4818	4833	0.4848	61°	3	5	8
29°	0.4848	4863	4879	4894	4909	4924	4939	4955	4970	4985	0.5000	60°	3	5	8
30°	0.5000	5015	5030	5045	5060	5075	5090	5105	5120	5135	0.5150	59°	3	5	8
31°	0.5150	5165	5180	5195	5210	5225	5240	5255	5270	5284	0.5299	58°	2	5	7
32°	0.5299	5314	5329	5344	5358	5373	5388	5402	5417	5432	0.5446	57°	2	5	7
33°	0.5446	5461	5476	5490	5505	5519	5534	5548	5563	5577	0.5592	56°	2	5	7
34°	0.5592	5606	5621	5635	5650	5664	5678	5693	5707	5721	0.5736	55°	2	5	7
35°	0.5736	5750	5764	5779	5793	5807	5821	5835	5850	5864	0.5878	54°	2	5	7
36°	0.5878	5892	5906	5920	5934	5948	5962	5976	5990	6004	0.6018	53°	2	5	7
37°	0.6018	6032	6046	6060	6074	6088	6101	6115	6129	6143	0.6157	52°	2	5	7
38°	0.6157	6170	6184	6198	6211	6225	6239	6252	6266	6280	0.6293	51°	2	5	7
39°	0.6293	6307	6320	6334	6347	6361	6374	6388	6401	6414	0.6428	50°	2	4	7
40°	0.6428	6441	6455	6468	6481	6494	6508	6521	6534	6547	0.6561	49°	2	4	7
41°	0.6561	6574	6587	6600	6613	6626	6639	6652	6665	6678	0.6691	48°	2	4	7
42°	0.6691	6704	6717	6730	6743	6756	6769	6782	6794	6807	0.6820	47°	2	4	6
43°	0.6820	6833	6845	6858	6871	6884	6896	6909	6921	6934	0.6947	46°	2	4	6
44°	0.6947	6959	6972	6984	6997	7009	7022	7034	7046	7059	0.7071	45°	2	4	6
45°	0.7071	7083	7096	7108	7120	7133	7145	7157	7169	7181	0.7193	44°	2	4	6
46°	0.7193	7206	7218	7230	7242	7254	7266	7278	7290	7302	0.7314	43°	2	4	6
47°	0.7314	7325	7337	7349	7361	7373	7385	7396	7408	7420	0.7431	42°	2	4	6
48°	0.7431	7443	7455	7466	7478	7490	7501	7513	7524	7536	0.7547	41°	2	4	6
49°	0.7547	7559	7570	7581	7593	7604	7615	7627	7638	7649	0.7660	40°	2	4	6
50°	0.7660	7672	7683	7694	7705	7716	7727	7738	7749	7760	0.7771	39°	2	4	6
51°	0.7771	7782	7793	7804	7815	7826	7837	7848	7859	7869	0.7880	38°	2	4	5
52°	0.7880	7891	7902	7912	7923	7934	7944	7955	7965	7976	0.7986	37°	2	4	5
53°	0.7986	7997	8007	8018	8028	8039	8049	8059	8070	8080	0.8090	36°	2	3	5
54°	0.8090	8100	8111	8121	8131	8141	8151	8161	8171	8181	0.8192	35°	2	3	5
	60'	54'	48'	42'	36'	30'	24'	18'	12'	6'	0'	A	1'	2'	3'

余弦 (cos)

正弦 (sin)

(续)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
55°	0.8192	8202	8211	8221	8231	8241	8251	8261	8271	8281	0.8290	34°	2	3	5
56°	0.8290	8300	8310	8320	8329	8339	8348	8358	8368	8377	0.8387	33°	2	3	5
57°	0.8387	8396	8406	8415	8425	8434	8443	8453	8462	8471	0.8480	32°	2	3	5
58°	0.8480	8490	8499	8508	8517	8526	8536	8545	8554	8563	0.8572	31°	2	3	5
59°	0.8572	8581	8590	8599	8607	8616	8625	8634	8643	8652	0.8660	30°	1	3	5
60°	0.8660	8669	8678	8686	8695	8704	8712	8721	8729	8738	0.8746	29°	1	3	4
61°	0.8746	8755	8763	8771	8780	8788	8796	8805	8813	8821	0.8829	28°	1	3	4
62°	0.8829	8838	8846	8854	8862	8870	8878	8886	8894	8902	0.8910	27°	1	3	4
63°	0.8910	8918	8926	8934	8942	8949	8957	8965	8973	8980	0.8988	26°	1	3	4
64°	0.8988	8996	9003	9011	9018	9026	9033	9041	9048	9056	0.9063	25°	1	3	4
65°	0.9063	9070	9078	9085	9092	9100	9107	9114	9121	9128	0.9135	24°	1	2	4
66°	0.9135	9143	9150	9157	9164	9171	9178	9184	9191	9198	0.9205	23°	1	2	3
67°	0.9205	9212	9219	9225	9232	9239	9245	9252	9259	9265	0.9272	22°	1	2	3
68°	0.9272	9278	9285	9291	9298	9304	9311	9317	9323	9330	0.9336	21°	1	2	3
69°	0.9336	9342	9348	9354	9361	9367	9373	9379	9385	9391	0.9397	20°	1	2	3
70°	0.9397	9403	9409	9415	9421	9426	9432	9438	9444	9449	0.9455	19°	1	2	3
71°	0.9455	9461	9466	9472	9478	9483	9489	9494	9500	9505	0.9511	18°	1	2	3
72°	0.9511	9516	9521	9527	9532	9537	9542	9548	9553	9558	0.9563	17°	1	2	3
73°	0.9563	9568	9573	9578	9583	9588	9593	9598	9603	9608	0.9613	16°	1	2	2
74°	0.9613	9617	9622	9627	9632	9636	9641	9646	9650	9655	0.9659	15°	1	2	2
75°	0.9659	9664	9668	9673	9677	9681	9686	9690	9694	9699	0.9703	14°	1	1	2
76°	0.9703	9707	9711	9715	9720	9724	9728	9732	9736	9740	0.9744	13°	1	1	2
77°	0.9744	9748	9751	9755	9759	9763	9767	9770	9774	9778	0.9781	12°	1	1	2
78°	0.9781	9785	9789	9792	9796	9799	9803	9806	9810	9813	0.9816	11°	1	1	2
79°	0.9816	9820	9823	9826	9829	9833	9836	9839	9842	9845	0.9848	10°	1	1	2
80°	0.9848	9851	9854	9857	9860	9863	9866	9869	9871	9874	0.9877	9°	0	1	1
81°	0.9877	9880	9882	9885	9888	9890	9893	9895	9898	9900	0.9903	8°	0	1	1
82°	0.9903	9905	9907	9910	9912	9914	9917	9919	9921	9923	0.9925	7°	0	1	1
83°	0.9925	9928	9930	9932	9934	9936	9938	9940	9942	9943	0.9945	6°	0	1	1
84°	0.9945	9947	9949	9951	9952	9954	9956	9957	9959	9960	0.9962	5°	0	1	1
85°	0.9962	9963	9965	9966	9968	9969	9971	9972	9973	9974	0.9976	4°	0	0	1
86°	0.9976	9977	9978	9979	9980	9981	9982	9983	9984	9985	0.9986	3°	0	0	0
87°	0.9986	9987	9988	9989	9990	9990	9991	9992	9993	9993	0.9994	2°	0	0	0
88°	0.9994	9995	9995	9996	9996	9997	9997	9997	9998	9998	0.9998	1°	0	0	0
89°	0.9998	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	1.0000	0°	0	0	0
90°	1.0000														
	60'	51'	48'	42'	36'	30'	24'	18'	12'	6'	0'	A	1'	2'	3'

余弦 (cos)

正切 (tg)

(续)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
0°	0.0000	0017	0035	0052	0070	0087	0105	0122	0140	0157	0.0175	90°			
1°	0.0175	0192	0209	0227	0244	0262	0279	0297	0314	0332	0.0349	89°	3	6	9
2°	0.0349	0367	0384	0402	0419	0437	0454	0472	0489	0507	0.0524	88°	3	6	9
3°	0.0524	0542	0559	0577	0594	0612	0629	0647	0664	0682	0.0699	87°	3	6	9
4°	0.0699	0717	0734	0752	0769	0787	0805	0822	0840	0857	0.0875	86°	3	6	9
5°	0.0875	0892	0910	0928	0945	0963	0981	0998	1016	1033	0.1051	85°	3	6	9
6°	0.1051	1069	1086	1104	1122	1139	1157	1175	1192	1210	0.1228	84°	3	6	9
7°	0.1228	1246	1263	1281	1299	1317	1334	1352	1370	1388	0.1405	83°	3	6	9
8°	0.1405	1423	1441	1459	1477	1495	1512	1530	1548	1566	0.1584	82°	3	6	9
9°	0.1584	1602	1620	1638	1655	1673	1691	1709	1727	1745	0.1763	81°	3	6	9
10°	0.1763	1781	1799	1817	1835	1853	1871	1890	1908	1926	0.1944	80°	3	6	9
11°	0.1944	1962	1980	1998	2016	2035	2053	2071	2089	2107	0.2126	79°	3	6	9
12°	0.2126	2144	2162	2180	2199	2217	2235	2254	2272	2290	0.2309	78°	3	6	9
13°	0.2309	2327	2345	2364	2382	2401	2419	2438	2456	2475	0.2493	77°	3	6	9
14°	0.2493	2512	2530	2549	2568	2586	2605	2623	2642	2661	0.2679	76°	3	6	9
15°	0.2679	2698	2717	2736	2754	2773	2792	2811	2830	2849	0.2867	75°	3	6	9
16°	0.2867	2886	2905	2924	2943	2962	2981	3000	3019	3038	0.3057	74°	3	6	9
17°	0.3057	3076	3096	3115	3134	3153	3172	3191	3211	3230	0.3249	73°	3	6	10
18°	0.3249	3269	3288	3307	3327	3346	3365	3385	3404	3424	0.3443	72°	3	6	10
19°	0.3443	3463	3482	3502	3522	3541	3561	3581	3600	3620	0.3640	71°	3	6	10
20°	0.3640	3659	3679	3699	3719	3739	3759	3779	3799	3819	0.3839	70°	3	7	10
21°	0.3839	3859	3879	3899	3919	3939	3959	3979	4000	4020	0.4040	69°	3	7	10
22°	0.4040	4061	4081	4101	4122	4142	4163	4183	4204	4224	0.4245	68°	3	7	10
23°	0.4245	4265	4286	4307	4327	4348	4369	4390	4411	4431	0.4452	67°	3	7	10
24°	0.4452	4473	4494	4515	4536	4557	4578	4599	4621	4642	0.4663	66°	3	7	10
25°	0.4663	4684	4706	4727	4748	4770	4791	4813	4834	4856	0.4877	65°	4	7	11
26°	0.4877	4899	4921	4942	4964	4986	5008	5029	5051	5073	0.5095	64°	4	7	11
27°	0.5095	5117	5139	5161	5184	5206	5228	5250	5272	5295	0.5317	63°	4	7	11
28°	0.5317	5340	5362	5384	5407	5430	5452	5475	5498	5520	0.5543	62°	4	7	11
29°	0.5543	5566	5589	5612	5635	5658	5681	5704	5727	5750	0.5774	61°	4	8	11
	60'	54'	46'	42'	36'	30'	24'	18'	12'	6'	0'	A	1'	2'	3'

余切 (ctg)

正切 (tg)

(续)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
30°	0.5774	5797	5820	5844	5867	5890	5914	5938	5961	5985	0.6009	59°	4	8	12
31°	0.6009	6032	6056	6080	6104	6128	6152	6176	6200	6224	0.6249	58°	4	8	12
32°	0.6249	6273	6297	6322	6346	6371	6395	6420	6445	6469	0.6494	57°	4	8	12
33°	0.6494	6519	6544	6569	6594	6619	6644	6669	6694	6720	0.6745	56°	4	8	13
34°	0.6745	6771	6796	6822	6847	6873	6899	6924	6950	6976	0.7002	55°	4	9	13
35°	0.7002	7028	7054	7080	7107	7133	7159	7186	7212	7239	0.7265	54°	4	9	13
36°	0.7265	7292	7319	7346	7373	7400	7427	7454	7481	7508	0.7536	53°	5	9	14
37°	0.7536	7563	7590	7618	7646	7673	7701	7729	7757	7785	0.7813	52°	5	9	14
38°	0.7813	7841	7869	7898	7926	7954	7983	8012	8040	8069	0.8098	51°	5	9	14
39°	0.8098	8127	8156	8185	8214	8243	8273	8302	8332	8361	0.8391	50°	5	10	15
40°	0.8391	8421	8451	8481	8511	8541	8571	8601	8632	8662	0.8693	49°	5	10	15
41°	0.8693	8724	8754	8785	8816	8847	8878	8910	8941	8972	0.9004	48°	5	10	16
42°	0.9004	9036	9067	9099	9131	9163	9195	9228	9260	9293	0.9325	47°	6	11	16
43°	0.9325	9358	9391	9424	9457	9490	9523	9556	9590	9623	0.9657	46°	6	11	17
44°	0.9657	9691	9725	9759	9793	9827	9861	9896	9930	9965	1.0000	45°	6	11	17
45°	1.0000	0035	0070	0105	0141	0176	0212	0247	0283	0319	1.0355	44°	6	12	18
46°	1.0355	0392	0428	0464	0501	0538	0575	0612	0649	0686	1.0724	43°	6	12	18
47°	1.0724	0761	0799	0837	0875	0913	0951	0990	1028	1067	1.1106	42°	6	13	19
48°	1.1106	1145	1184	1224	1263	1303	1343	1383	1423	1463	1.1504	41°	7	13	20
49°	1.1504	1544	1585	1626	1667	1708	1750	1792	1833	1875	1.1918	40°	7	14	21
50°	1.1918	1960	2002	2045	2088	2131	2174	2218	2261	2305	1.2349	39°	7	14	22
51°	1.2349	2393	2437	2482	2527	2572	2617	2662	2708	2753	1.2799	38°	8	15	23
52°	1.2799	2846	2892	2938	2985	3032	3079	3127	3175	3222	1.3270	37°	8	16	24
53°	1.3270	3319	3367	3416	3465	3514	3564	3613	3663	3713	1.3764	36°	8	16	25
54°	1.3764	3814	3865	3916	3968	4019	4071	4124	4176	4229	1.4281	35°	9	17	26
55°	1.4281	4335	4390	4442	4496	4550	4605	4659	4715	4770	1.4826	34°	9	18	27
56°	1.4826	4882	4938	4994	5051	5108	5166	5224	5282	5340	1.5399	33°	10	19	29
57°	1.5399	5458	5517	5577	5637	5697	5757	5818	5880	5941	1.6003	32°	10	20	30
58°	1.6003	6066	6128	6191	6255	6319	6383	6447	6512	6577	1.6643	31°	11	21	32
59°	1.6643	6709	6775	6842	6909	6977	7045	7113	7182	7251	1.7321	30°	11	23	34
	60'	54'	48'	42'	36'	30'	24'	18'	12'	6'	0'	A	1'	2'	3'

余切 (ctg)

正切 (tg)

(度)

A	0'	6'	12'	18'	24'	30'	36'	42'	48'	54'	60'		1'	2'	3'
60°	1.732	1.739	1.746	1.753	1.760	1.767	1.775	1.782	1.789	1.797	1.804	29°	1	2	4
61°	1.804	1.811	1.819	1.827	1.834	1.842	1.849	1.857	1.865	1.873	1.881	28°	1	3	4
62°	1.881	1.889	1.897	1.905	1.913	1.921	1.929	1.937	1.946	1.954	1.963	27°	1	3	4
63°	1.963	1.971	1.980	1.988	1.997	2.006	2.014	2.023	2.032	2.041	2.050	26°	1	3	4
64°	2.050	2.059	2.069	2.078	2.087	2.097	2.106	2.116	2.125	2.135	2.145	25°	2	3	5
65°	2.145	2.154	2.164	2.174	2.184	2.194	2.204	2.215	2.225	2.236	2.246	24°	2	3	5
66°	2.246	2.257	2.267	2.278	2.289	2.300	2.311	2.322	2.333	2.344	2.356	23°	2	4	5
67°	2.356	2.367	2.379	2.391	2.402	2.414	2.426	2.438	2.450	2.463	2.475	22°	2	4	6
68°	2.475	2.488	2.500	2.513	2.525	2.539	2.552	2.565	2.578	2.592	2.605	21°	2	4	6
69°	2.605	2.619	2.633	2.646	2.660	2.675	2.689	2.703	2.718	2.733	2.747	20°	2	5	7
70°	2.747	2.762	2.778	2.793	2.808	2.824	2.840	2.856	2.872	2.888	2.904	19°	3	5	8
71°	2.904	2.921	2.937	2.954	2.971	2.989	3.006	3.024	3.042	3.060	3.078	18°	3	6	9
72°	3.078	3.096	3.115	3.133	3.152	3.172	3.191	3.211	3.230	3.251	3.271	17°	3	6	10
73°	3.271	3.291	3.312	3.333	3.354	3.376							3	7	10
							3.398	3.420	3.442	3.465	3.487	16°	4	7	11
74°	3.487	3.511	3.534	3.558	3.582	3.606							4	8	12
							3.630	3.655	3.681	3.706	3.732	15°	4	8	13
75°	3.732	3.758	3.785	3.812	3.839	3.867							4	9	13
							3.895	3.923	3.952	3.981	4.011	14°	5	10	14
76°	4.011	4.041	4.071	4.102	4.134	4.165									
							4.198	4.230	4.264	4.297	4.331	13°	5	10	15
77°	4.331	4.366	4.402	4.437	4.474	4.511									
							4.548	4.586	4.625	4.665	4.705	12°	6	12	18
													6	13	19
78°	4.705	4.745	4.787	4.829											
					4.872	4.915	4.959	5.005							
									5.050	5.097	5.145	11°	7	14	21
													7	15	22
79°	5.145	5.193	5.242												
				5.292	5.343										
						5.396	5.449	5.503							
									5.558	5.614	5.671	10°	8	16	24
													8	17	26
													9	18	27
													9	19	28
80°	5.671	5.730	5.789												
				5.850	5.912	5.976									
							6.041	6.107							
									6.174	6.243	6.314	9°	10	20	30
													11	21	32
													11	22	33
													12	23	35

余切 (ctg)

正切 (tg)

(续)

A	0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
81°00'	6.314	6.326	6.338	6.350	6.362	6.374	6.386	6.398	6.410	6.423	6.435	50'
10'	6.435	6.447	6.460	6.472	6.485	6.497	6.510	6.522	6.535	6.548	6.561	40'
20'	6.561	6.573	6.586	6.599	6.612	6.625	6.638	6.651	6.665	6.678	6.691	30'
30'	6.691	6.704	6.718	6.731	6.745	6.758	6.772	6.786	6.799	6.813	6.827	20'
40'	6.827	6.841	6.855	6.869	6.883	6.897	6.911	6.925	6.940	6.954	6.968	10'
50'	6.968	6.983	6.997	7.012	7.026	7.041	7.056	7.071	7.085	7.100	7.115	8°00'
82°00'	7.115	7.130	7.146	7.161	7.176	7.191	7.207	7.222	7.238	7.253	7.269	50'
10'	7.269	7.284	7.300	7.316	7.332	7.348	7.364	7.380	7.396	7.412	7.429	40'
20'	7.429	7.445	7.462	7.478	7.495	7.511	7.528	7.545	7.562	7.579	7.596	30'
30'	7.596	7.613	7.630	7.647	7.665	7.682	7.700	7.717	7.735	7.753	7.770	20'
40'	7.770	7.788	7.806	7.824	7.842	7.861	7.879	7.897	7.916	7.934	7.953	10'
50'	7.953	7.972	7.991	8.009	8.028	8.048	8.067	8.086	8.105	8.125	8.144	7°00'
83°00'	8.144	8.164	8.184	8.204	8.223	8.243	8.264	8.284	8.304	8.324	8.345	50'
10'	8.345	8.366	8.386	8.407	8.428	8.449	8.470	8.491	8.513	8.534	8.556	40'
20'	8.556	8.577	8.598	8.621	8.643	8.665	8.687	8.709	8.732	8.754	8.777	30'
30'	8.777	8.800	8.823	8.846	8.869	8.892	8.915	8.939	8.962	8.986	9.010	20'
40'	9.010	9.034	9.058	9.082	9.106	9.131	9.156	9.180	9.205	9.230	9.255	10'
50'	9.255	9.281	9.306	9.332	9.357	9.383	9.409	9.435	9.461	9.488	9.514	6°00'
84°00'	9.514	9.541	9.568	9.595	9.622	9.649	9.677	9.704	9.732	9.760	9.788	50'
10'	9.788	9.816	9.845	9.873	9.902	9.931	9.960	9.989	10.02	10.05	10.08	40'
20'	10.08	10.11	10.14	10.17	10.20	10.23	10.26	10.29	10.32	10.35	10.39	30'
30'	10.39	10.42	10.45	10.48	10.51	10.55	10.58	10.61	10.64	10.68	10.71	20'
40'	10.71	10.75	10.78	10.81	10.85	10.88	10.92	10.95	10.99	11.02	11.06	10'
50'	11.06	11.10	11.13	11.17	11.20	11.24	11.28	11.32	11.35	11.39	11.43	5°00'
85°00'	11.43	11.47	11.51	11.55	11.59	11.62	11.66	11.70	11.74	11.79	11.83	50'
10'	11.83	11.87	11.91	11.95	11.99	12.03	12.08	12.12	12.16	12.21	12.25	40'
20'	12.25	12.29	12.34	12.38	12.43	12.47	12.52	12.57	12.61	12.66	12.71	30'
30'	12.71	12.75	12.80	12.85	12.90	12.95	12.99	13.05	13.10	13.15	13.20	20'
40'	13.20	13.25	13.30	13.35	13.40	13.46	13.51	13.56	13.62	13.67	13.73	10'
50'	13.73	13.78	13.84	13.89	13.95	14.01	14.07	14.12	14.18	14.24	14.30	4°00'
86°00'	14.30	14.36	14.42	14.48	14.54	14.61	14.67	14.73	14.80	14.86	14.92	50'
10'	14.92	14.99	15.06	15.12	15.19	15.26	15.33	15.39	15.46	15.53	15.60	40'
20'	15.60	15.68	15.75	15.82	15.89	15.97	16.04	16.12	16.20	16.27	16.35	30'
30'	16.35	16.43	16.51	16.59	16.67	16.75	16.83	16.92	17.00	17.08	17.17	20'
40'	17.17	17.26	17.34	17.43	17.52	17.61	17.70	17.79	17.89	17.98	18.07	10'
50'	18.07	18.17	18.27	18.37	18.46	18.56	18.67	18.77	18.87	18.98	19.08	3°00'
	10'	9'	8'	7'	6'	5'	4'	3'	2'	1'	0'	A

余切 (ctg)

正切 (tg)

(续)

A	0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	
87°00'	19.08	19.19	19.30	19.41	19.52	19.63	19.74	19.85	19.97	20.09	20.21	50'
10'	20.21	20.33	20.45	20.57	20.69	20.82	20.95	21.07	21.20	21.34	21.47	40'
20'	21.47	21.61	21.74	21.88	22.02	22.16	22.31	22.45	22.60	22.75	22.90	30'
30'	22.90	23.06	23.21	23.37	23.53	23.69	23.86	24.03	24.20	24.37	24.54	20'
40'	24.54	24.72	24.90	25.08	25.26	25.45	25.64	25.83	26.03	26.23	26.43	10'
50'	26.43	26.64	26.84	27.06	27.27	27.49	27.71	27.94	28.17	28.40	28.61	2°00'
88°00'	28.64	28.88	29.12	29.37	29.62	29.88	30.14	30.41	30.68	30.96	31.24	50'
10'	31.24	31.53	31.82	32.12	32.42	32.73	33.05	33.37	33.69	34.03	34.37	40'
20'	34.37	34.72	35.07	35.43	35.80	36.18	36.56	36.96	37.36	37.77	38.19	30'
30'	38.19	38.62	39.06	39.51	39.97	40.44	40.92	41.41	41.92	42.43	42.96	20'
40'	42.96	43.51	44.07	44.64	45.23	45.83	46.45	47.09	47.74	48.41	49.10	10'
50'	49.10	49.82	50.55	51.30	52.08	52.88	53.71	54.66	55.44	56.35	57.29	1°00'
89°00'	57.29	58.26	59.27	60.31	61.38	62.50	63.66	64.86	66.11	67.40	68.75	50'
10'	68.75	70.15	71.62	73.14	74.73	76.39	78.13	79.94	81.85	83.84	85.94	40'
20'	85.94	88.14	90.46	92.91	95.49	98.22	101.1	104.2	107.4	110.9	114.6	30'
30'	114.6	118.5	122.8	127.3	132.2	137.5	143.2	149.5	156.3	163.7	171.9	20'
40'	171.9	180.9	191.0	202.2	214.9	229.2	245.6	264.4	286.5	312.5	343.8	10'
50'	343.8	382.0	429.7	491.1	573.0	687.5	859.4	1146	1719	3438		0°00'
	10'	9'	8'	7'	6'	5'	4'	3'	2'	1'	0'	A

余切 (ctg)

【注】 本表分两部分:

第一部分载列从0°到90°每差6'各角的正弦和余弦的值。表中标有“A”的直栏指明角的度数,横行指明分数。左边直栏和表眉横行是查正弦用的,靠右边的直栏和表底横行是查余弦用的。表的最右边三栏是修正值。查表的方法:例如查 $\sin 70^\circ 30'$ 。先在表中左边直栏中查出70°,横着向右查到表眉标有“30'”的一栏,就得 $\sin 70^\circ 30' = 0.9426$;又如查 $\sin 70^\circ 32'$,先查到70°30'(即比要查的角度小2')的正弦,得0.9426,再在同一行中向右查到最右边三栏中标有“2'”的一栏得2,这是0.0002,所以 $\sin 70^\circ 32' = 0.9426 + 0.0002 = 0.9428$;若查 $\sin 70^\circ 34'$,先查出70°,横着向右查到表眉标有“36'”(即大2')的一栏,得0.9432,再向右查到末三栏中标有“2'”的一栏得2,即0.0002,所以 $\sin 70^\circ 34' = 0.9432 - 0.0002 = 0.9430$ 。又如查 $\cos 18^\circ 39'$,先由表中靠右边标有“A”(在表底)的一栏查出18°,横着向左查到表底标有“36'”(即小3')的一栏得0.9478,或在标有“42'”(即大3')的一栏中得0.9472,再回向右查到修正值三栏中标有“3'”的一栏得3,即0.0003,所以 $\cos 18^\circ 39' = 0.9478 - 0.0003 = 0.9475$,或 $0.9472 + 0.0003 = 0.9475$ 。

第二部分首先载列从0°到80°每差6'各角的正切值,以及各角的余角的余切值,表中最右边的三栏也是修正值,但接着,从81°到90°各角的正切值和余切值,表中是按每差1'载列的,没有修正值。这部分表的查法,和正弦、余弦部分相同。

七、法定计量单位

1. 常用法定计量单位

见表 1-8。

表 1-8

量的名称	单位名称	单位符号	说 明
长 度	米 海里*	m n mile	SI 基本单位 1 n mile = 1852 m
时 间	秒 分* [小时]* 天(日)*	s min h d	SI 基本单位 1 min = 60 s 1 h = 3 600 s 1 d = 86 400 s
质 量	千克(公斤) 吨* 原子质量单位*	kg t u	SI 基本单位 1 t = 10^3 kg 1 u $\approx 1.66 \times 10^{-27}$ kg
热力学温度	开[尔文]	K	SI 基本单位
电 流	安[培]	A	SI 基本单位
发光强度	坎[德拉]	cd	SI 基本单位
物质的量	摩[尔]	mol	SI 基本单位
[平面]角	弧度 [角]秒* [角]分* 度*	rad ($^{\circ}$) ($'$) ($^{\circ}$)	SI 辅助单位 $1^{\circ} = (\pi/648 000)$ rad $1' = (\pi/10 800)$ rad $1^{\circ} = (\pi/180)$ rad
立 体 角	球面度	sr	SI 辅助单位
面 积	平方米	m ²	SI 导出单位
体 积	立方米 升*	m ³ L(l)	SI 导出单位 1 L = 1 dm ³ = 10^{-3} m ³
速 度	米每秒 节*	m/s kn	SI 导出单位 1 kn = 1 n mile/h = 0.514 44 m/s
加 速 度	米每二次方秒	m/s ²	SI 导出单位

(续)

量的名称	单位名称	单位符号	说 明
频 率	赫[兹]	Hz	SI 导出单位
[旋]转速[度] 旋转频率	每秒 转每分*	S^{-1} r/min	SI 导出单位 $1 r/min = (1/60)s^{-1}$
级 差	分贝*	dB	无量纲量
线 密 度	千克每米	kg/m	SI 导出单位
力, 重 力	牛[顿]	N	SI 导出单位
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	SI 导出单位
[动力]粘度	帕[斯卡]秒	Pa·s	SI 导出单位
运 动 粘 度	二次方米每秒	m^2/s	SI 导出单位
功 能 [量]	焦[耳] 电子伏[特]* 千瓦小时*	J eV kW·h	SI 导出单位 $1 eV \approx 1.6021892 \times 10^{-19} J$ $1 kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 J$
功 率	瓦[特]	W	SI 导出单位
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	SI 导出单位
热 [量]	焦[耳]	J	SI 导出单位
电 荷 [量]	库[仑]	C	SI 导出单位
电 位 电 压 电 动 势	伏[特]	V	SI 导出单位
电 容	法[拉]	F	SI 导出单位
磁 场 强 度	安[培]每米	A/m	SI 导出单位
磁通[量]密度 磁感应强度	特[斯拉]	T	SI 导出单位
磁 通 [量]	韦[伯]	Wb	SI 导出单位
电 感	亨[利]	H	SI 导出单位
电 阻	欧[姆]	Ω	SI 导出单位

(续)

量的名称	单位名称	单位符号	说 明
电 导	西[门子]	S	SI 导出单位
光 通 量	流[明]	lm	SI 导出单位
[光] 亮 度	坎[德拉] 每平方米	cd/m ²	SI 导出单位
[光] 照 度	勒[克斯]	lx	SI 导出单位
物质 B 的浓度	摩[尔]每立方米	mol/m ³	SI 导出单位
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	SI 导出单位
吸 收 剂 量	戈[瑞]	Gy	SI 导出单位
剂 量 当 量	希[沃特]	Sv	SI 导出单位
照 射 量	库[仑]每千克	C/kg	SI 导出单位

注：1. 有 * 者为非国际单位制单位。

2. [] 内的字，是在不致混淆的情况下，可以省略的字。

3. () 内的字与圆括号前的字同义。

4. 角度单位度、分、秒的符号不处于数字后时，用括弧。

5. 升的符号中，小写字母 l 为备用符号。

6. r 为“转”的符号。

7. 人民生活 and 贸易中，质量习惯称为重量。

8. SI 为国际单位制国际简称。

2. 用于构成十进倍数和分数单位的词头 (见表 1-9)。

3. 应淘汰的计量单位

表 1-10 列出了一部分过去曾使用过的长度计量单位名称与符号，并与法定计量单位进行了对照。

表 1-9

所表示的因素	词头名称	词头符号
10^{16}	艾[可萨]	E
10^{15}	拍[它]	P
10^{12}	太[拉]	T
10^9	吉[咖]	G
10^9	兆	M
10^3	千	k
10^2	百	h
10^1	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳[诺]	n
10^{-12}	皮[可]	p
10^{-15}	飞[母托]	f
10^{-18}	阿[托]	a

注： 10^4 称为万， 10^8 称为亿， 10^{12} 称为万亿，这类数词的使用不受词头名称的影响，但不应与词头混淆。

表 1-10

名 称	符 号	用法定计量单位表示
公 尺	M	m, 米
公寸, 分米	dm	0.1m
公 分		cm, 厘米
公 厘	m/m	mm, 毫米
丝 米	dmm	0.1 mm
忽 米	cmm	0.01 mm
公 忽	μ , m μ	μ m, 微米
毫微米	m μ m	nm, 纳米
埃	Å	0.1 nm
英尺, 呎	ft	30.48 cm
英寸, 吋	in	25.4 mm
码	yd	9.144×10^{-2} m

八、光学零件重量计算

光学零件的重量等于该零件的体积乘玻璃的密度，即

$$W = dV(\text{g}) \quad (1-1)$$

式中 d ——玻璃密度(g/cm^3)；

V ——零件体积(cm^3)。

对于形状简单的棱镜，可直接应用上节求体积的公式。对于形状复杂的棱镜，可将其分解成多块简单的形状，先求每块的体积，再相加求总体积。

对于透镜，可应用下式求体积：

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \left(t \pm \frac{h_1}{2} \pm \frac{h_2}{2} \right) + \frac{\pi}{6} (\pm h_1^3 \pm h_2^3) \quad (1-2)$$

式中 D ——透镜的外径；

t ——边缘厚度；

h_1 —— R_1 表面的矢高；

h_2 —— R_2 表面的矢高。

正负号的取法：凸面取“+”号，凹面取“-”号。

九、公差与配合

(摘自 GB 1800—79)

1. 术语及定义

(1) 尺寸 用特定单位表示长度值的数字。

(2) 孔 主要指圆柱形的内表面，也包括其他内表面中由单一尺寸确定的部分。

(3) 轴 主要指圆柱形的外表面，也包括其他外表面中由单一尺寸确定的部分。

(4) 基本尺寸 设计给定的尺寸。

(5) 实际尺寸 通过测量所得的尺寸。

由于存在测量误差，所以实际尺寸并非尺寸的真值。

(6) 极限尺寸 允许尺寸变化的两个界限值，它以基本尺寸

为基数来确定。

两个界限值中较大的一个称为最大极限尺寸；较小的一个称为最小极限尺寸。

(7) 尺寸偏差(简称偏差) 某一尺寸减其基本尺寸所得的代数差。

最大极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为上偏差；最小极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为下偏差；上偏差与下偏差统称为极限偏差。实际尺寸减其基本尺寸所得的代数差称为实际偏差。偏差可以为正、负或零值。

(8) 尺寸公差(简称公差) 允许尺寸的变动量。

公差等于最大极限尺寸与最小极限尺寸之代数差的绝对值；也等于上偏差与下偏差之代数差的绝对值。

(9) 零线 在公差与配合图解(简称公差带图)中，确定偏差的一条基准直线，即零偏差线。通常零线表示基本尺寸。

(10) 尺寸公差带(简称公差带) 在公差带图中，由代表上、下偏差的两条直线所限定的一个区域。

图 1-1 是用来说明上述术语及其相互关系的。为简化起见，在实用中，一般以公差带图(图 1-2)来表示。

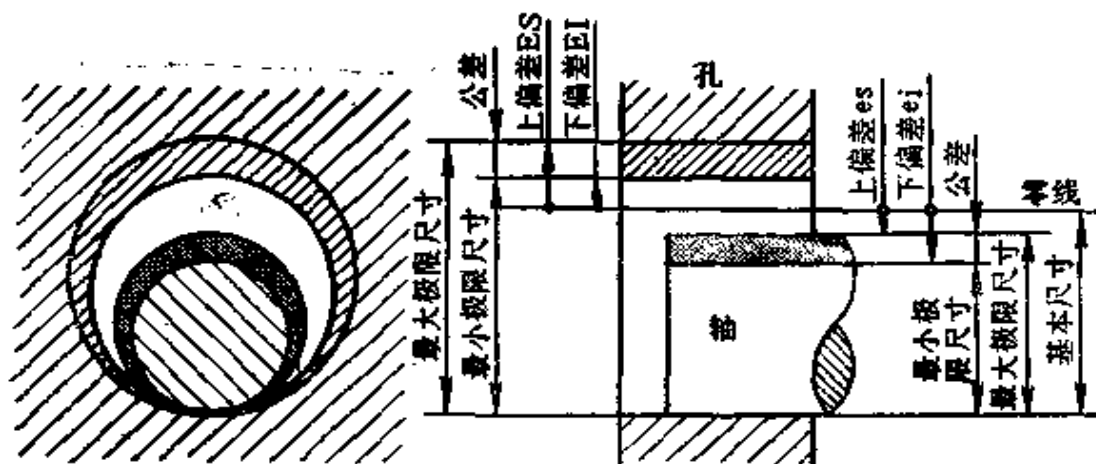
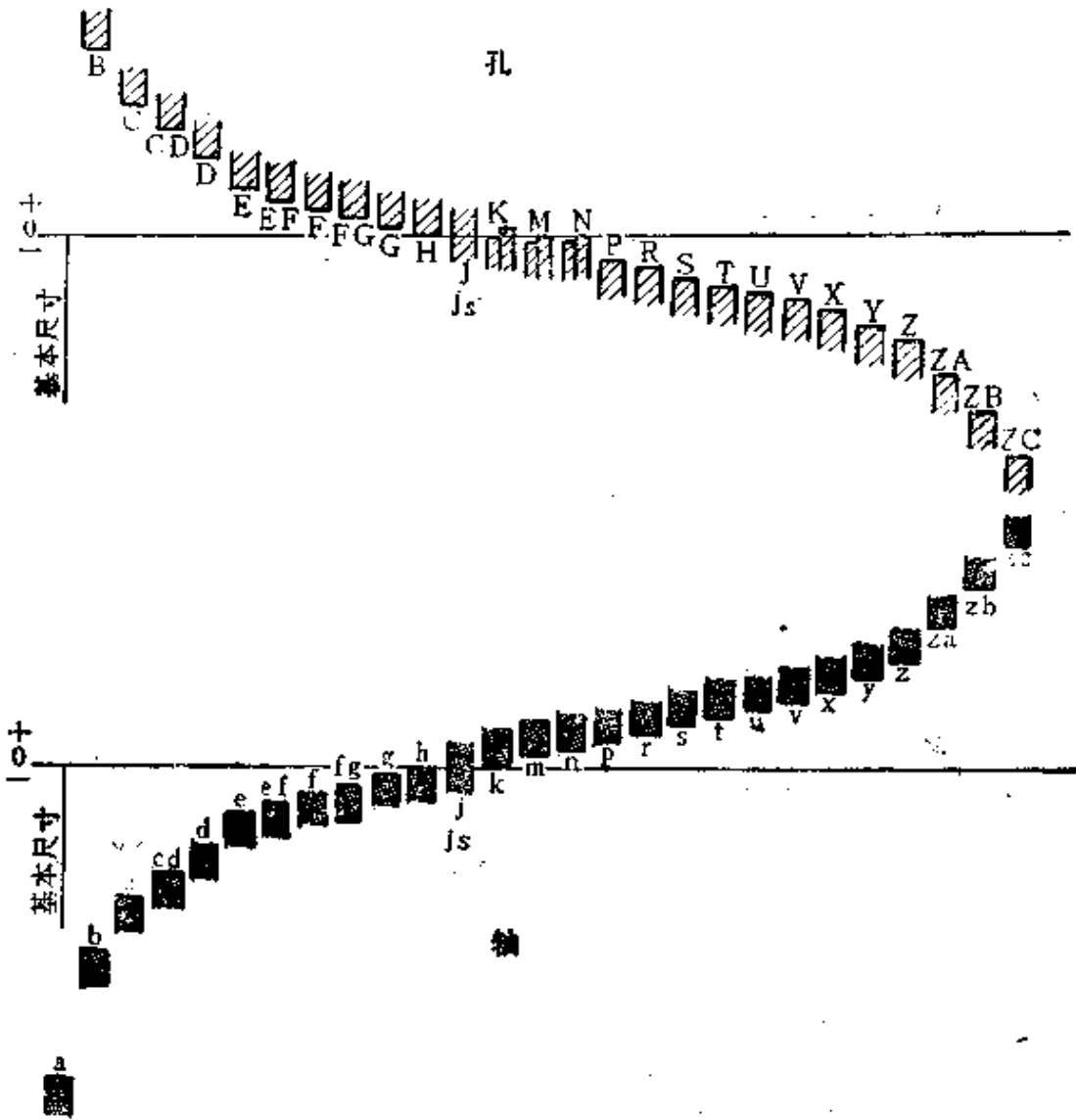
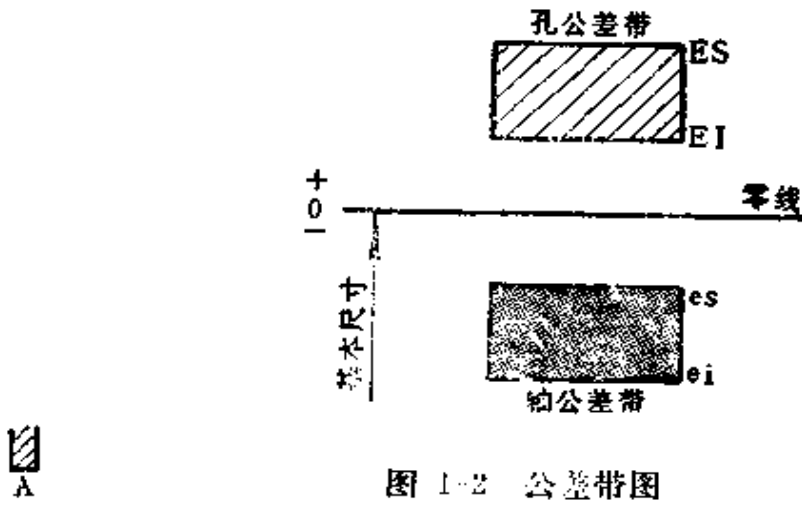


图 1-1 公差与配合示意图

(11) 标准公差 国家标准表列的，用以确定公差带大小的任一公差。



(12) 公差单位 计算标准公差的基本单位，它是基本尺寸的函数。

(13) 公差等级 确定尺寸精确程度的等级。

属于同一公差等级的公差，对所有基本尺寸，虽数值不同，但被认为具有同等的精确程度。

(14) 基本偏差 国家标准表列的，用以确定公差带相对于零线位置的上偏差或下偏差，一般为靠近零线的那个偏差(图 1-3)。

(15) 配合 基本尺寸相同的，相互结合的孔和轴公差带之间的关系。

(16) 间隙或过盈 孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸所得的代数差。此差值为正时是间隙；为负时是过盈。

(17) 间隙配合 具有间隙(包括最小间隙等于零)的配合。此时，孔的公差带在轴的公差带之上(图 1-4)。

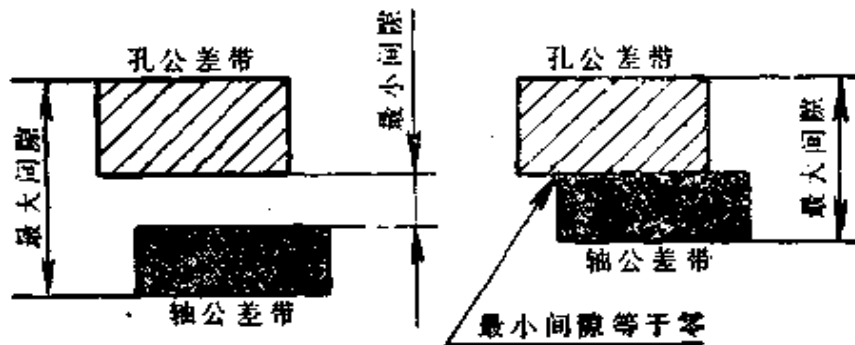


图 1-4 间隙配合

(18) 过盈配合 具有过盈(包括最小过盈等于零)的配合。此时，孔的公差带在轴的公差带之下(图 1-5)。

(19) 过渡配合 可能具有间隙或过盈的配合。此时，孔的公差带与轴的公差带相互交叠(图 1-6)。

(20) 最小间隙 对间隙配合，孔的最小极限尺寸减轴的最大极限尺寸所得的代数差(见图 1-4)。

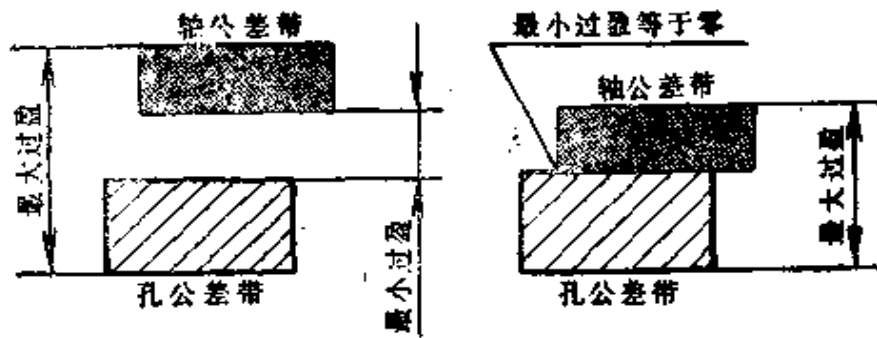


图 1-5 过盈配合

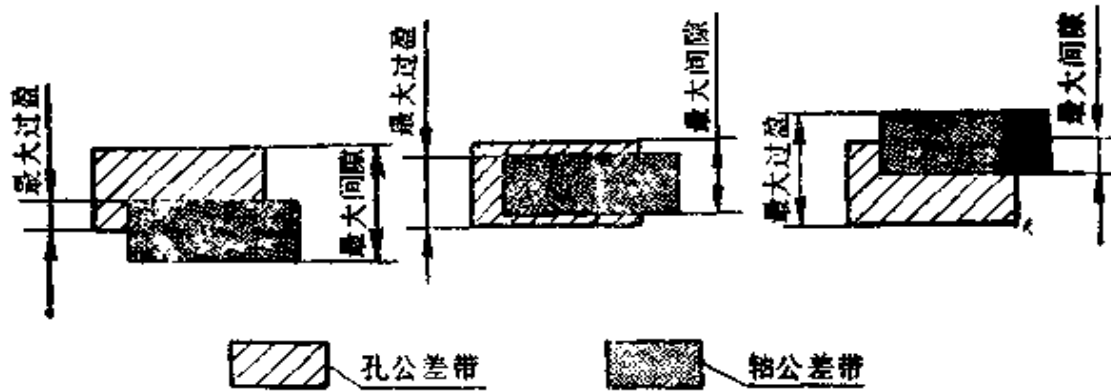


图 1-6 过渡配合

(21) 最大间隙 对间隙配合或过渡配合, 孔的最大极限尺寸减轴的最小极限尺寸所得的代数差(图 1-4 和图 1-6)。

(22) 最小过盈 对过盈配合, 孔的最大极限尺寸减轴的最小极限尺寸所得的代数差(图 1-5)。

(23) 最大过盈 对过盈配合或过渡配合, 孔的最小极限尺寸减轴的最大极限尺寸所得的代数差(图 1-5 和图 1-6)。

(24) 配合公差 允许间隙或过盈的变动量。

配合公差对间隙配合, 等于最大间隙与最小间隙之代数差的绝对值; 对过盈配合, 等于最小过盈与最大过盈之代数差的绝对值; 对过渡配合, 等于最大间隙与最大过盈之代数差的绝对值。

配合公差又等于相互配合的孔公差与轴公差之和。

(25) 基孔制 基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差的轴的公差带形成各种配合的一种制度。

基孔制的孔为基准孔，国家标准规定的基准孔，其下偏差为零(图 1-7)。

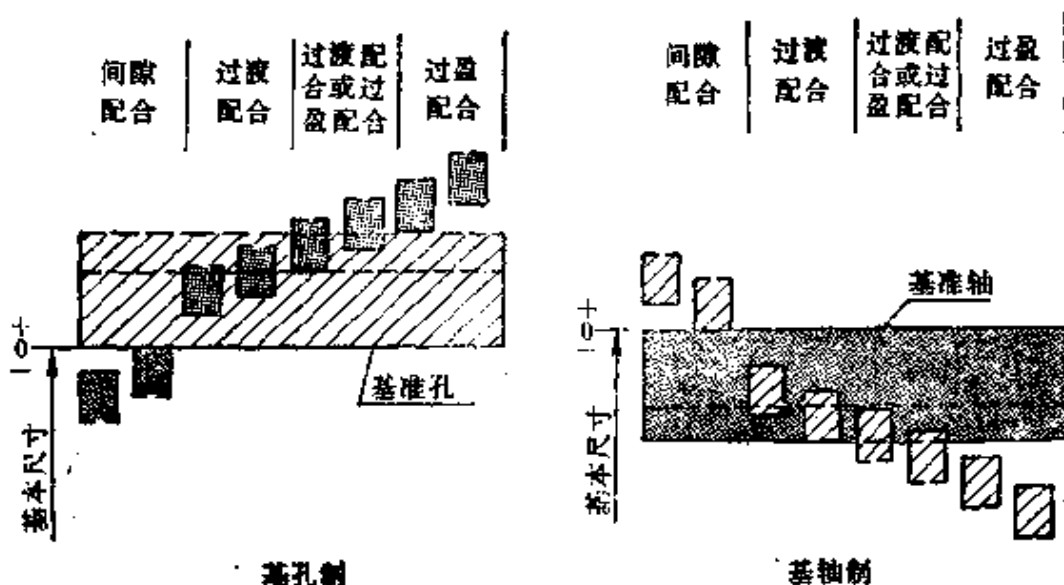


图 1-7 基孔制和基轴制

(26) 基轴制 基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度。

基轴制的轴为基准轴，国家标准规定的基准轴，其上偏差为零(图 1-7)。

(27) 最大实体状态(简称 MMC)和最大实体尺寸 孔或轴具有允许的材料量为最多时的状态，称为最大实体状态(MMC)。在此状态下的极限尺寸，称为最大实体尺寸，它是孔的最小极限尺寸和轴的最大极限尺寸的统称。

(28) 最小实体状态(简称 LMC)和最小实体尺寸 孔或轴具有允许的材料量为最少时的状态，称为最小实体状态(LMC)。在此状态下的极限尺寸，称为最小实体尺寸，它是孔的最大极限

尺寸和轴的最小极限尺寸的统称。

(29) 孔或轴的作用尺寸 在配合面的全长上, 与实际孔内接的最大理想轴的尺寸, 称为孔的作用尺寸; 与实际轴外接的最小理想孔的尺寸, 称为轴的作用尺寸(图 1-8)。

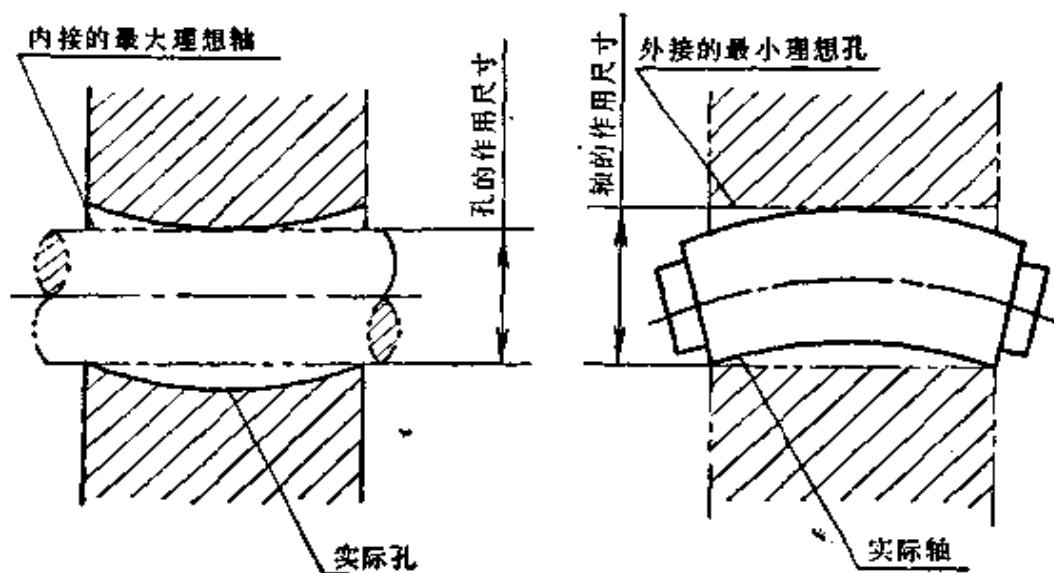


图 1-8 孔或轴的作用尺寸

2. 基本规定

(1) 基本尺寸分段 对基本尺寸的分段规定于 GB1800—79 表 1。

(2) 标准公差的等级、代号及数值 标准公差分 20 级, 即: IT01、IT0、IT1 至 IT18。IT 表示标准公差, 公差等级的代号用阿拉伯数字表示。从 IT01 至 IT18 等级依次降低, 各级标准公差的数值规定于 GB1800—79 表 2。

(3) 基本偏差的代号 基本偏差的代号用拉丁字母表示, 大写为孔, 小写为轴, 各 28 个。

孔: A, B, C, CD, D, E, EF, F, FG, G, H, J, Js, K, M, N, P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC。

轴: a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, g, h, js, k, m, n, p, r, s, t, u, v, x, y, z, za, zb, zc。

其中, H 代表基准孔, h 代表基准轴。

(4) 偏差代号 偏差代号规定如下:

孔的上偏差 ES;

孔的下偏差 EI;

轴的上偏差 es;

轴的下偏差 ei。

(5) 轴的极限偏差 轴的基本偏差:

从 a 到 h 为上偏差;

从 j 到 zc 为下偏差;

js 为上偏差 $\left(+\frac{IT}{2}\right)$ 或下偏差 $\left(-\frac{IT}{2}\right)$ 。

轴的基本偏差数值规定于 GB1800—79 表 3。

轴的另一个偏差(下偏差或上偏差), 根据轴的基本偏差和标准公差, 按以下代数式计算:

$$ei = es - IT$$

或

$$es = ei + IT$$

(6) 孔的极限偏差 孔的基本偏差: 从 A 到 H 为下偏差;

从 J 到 ZC 为上偏差;

Js 为上偏差 $\left(+\frac{IT}{2}\right)$ 或下偏差 $\left(-\frac{IT}{2}\right)$ 。

孔的基本偏差数值规定于 GB1800—79 表 4。

孔的另一个偏差(上偏差或下偏差), 根据孔的基本偏差和标准公差, 按以下代数式计算:

$$ES = EI + IT$$

或

$$EI = ES - IT$$

(7) 公差带代号 孔、轴公差带代号用基本偏差代号与公差等级代号组成。

例如: H8、F8、K7、P7 等为孔的公差带代号;

h7、f7、k6、p6 等为轴的公差带代号。

表示方法可用以下示例之一:

孔: $\phi 50H8$, $\phi 50_{0}^{+0.039}$, $\phi 50H8(\frac{+0.039}{0})$;

轴: $\phi 50f7$, $\phi 50_{-0.025}^{0}$, $\phi 50f7(\frac{-0.025}{0})$ 。

(8) 基准制 国家标准规定有基孔制和基轴制。在一般情况下, 优先采用基孔制。如有特殊需要, 允许将任一孔、轴公差带组成配合。

(9) 配合代号 用孔、轴公差带的组合表示, 写成分数形式, 分子为孔的, 分母为轴的。

例如: $H8/f7$ 或 $\frac{H8}{f7}$ 。

表示方法可用以下示例之一:

$\phi 50H8/f7$ 或 $\phi 50 \frac{H8}{f7}$;

$10H7/n6$ 或 $10 \frac{H7}{n6}$ 。

(10) 配合分类 国家标准的配合有三类, 即间隙配合、过渡配合和过盈配合。属于哪一类配合取决于孔、轴公差带的相互关系。

基孔制(基轴制)中:

a 到 h(A 到 H)用于间隙配合;

j 到 zc(J 到 ZC)用于过渡配合和过盈配合。

注: 以基孔制为例, 轴的基本偏差(此时为下偏差)的绝对值大于或等于孔的标准公差时为过盈配合; 反之, 则为过渡配合。如 $\phi 30H7/p6$ 、 $\phi 30 H6/n5$ 均为过盈配合, $\phi 30H8/p7$ 、 $\phi 30H7/n6$ 则为过渡配合。

(11) 公差带及配合的选用原则 孔、轴公差带及配合, 首先采用优先公差带及优先配合; 其次采用常用公差带及常用配合, 再次采用一般用途公差带。

必要时, 可按国家标准所规定的标准公差(见 GB1800—79 表 2)与基本偏差(见 GB1800—79 表 3、4)组成孔、轴公差带及配合。

(12) 极限尺寸判断原则(即泰勒原则) 孔或轴的作用尺寸不允许超过最大实体尺寸。即对于孔, 其作用尺寸应不小于最小极限尺寸; 对于轴, 则应不大于最大极限尺寸。

在任何位置上的实际尺寸不允许超过最小实体尺寸。即对于孔, 其实际尺寸应不大于最大极限尺寸; 对于轴, 则应不小于最小极限尺寸。

在孔的极限尺寸中, 例如 $\phi 20_{-0.021}^{+0.021}$, 形状误差可能的极端情况见图 1-9。在轴的极限尺寸中, 例如 $\phi 20_{-0.013}^0$, 形状误差可能的极端情况见图 1-10。

(13) 温度条件 国家标准规定的数值均以标准温度(20°C)时的数值为准。

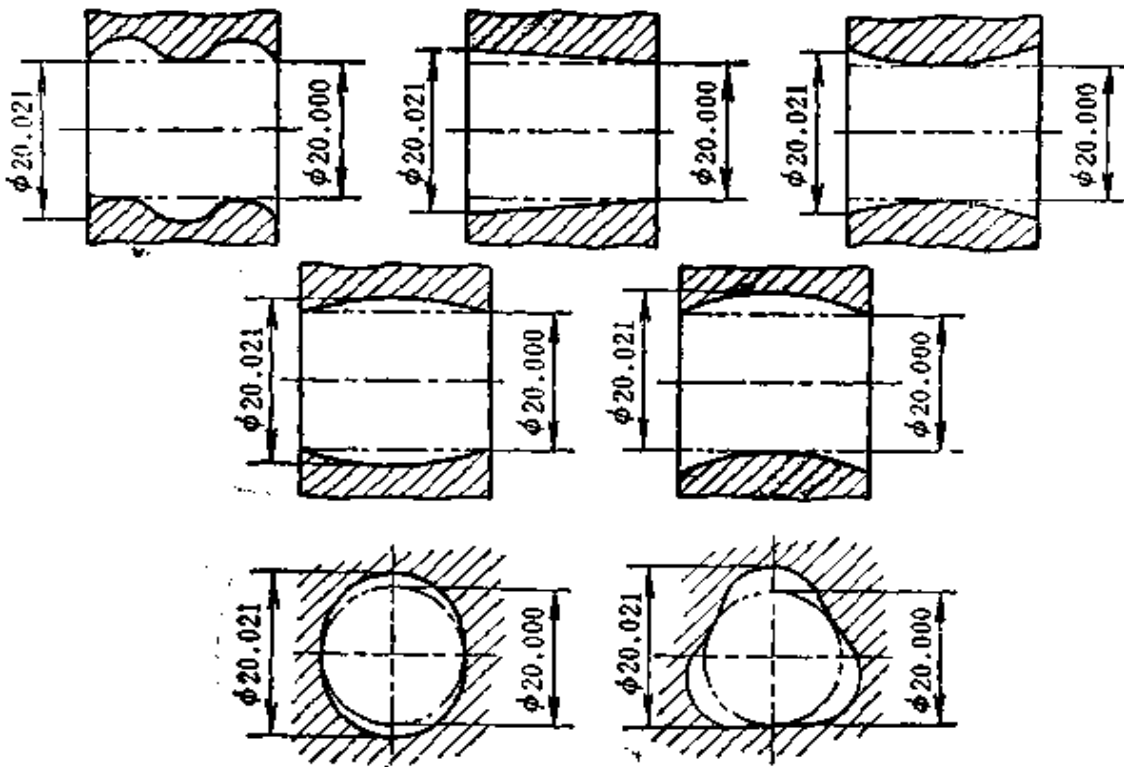


图 1-9 在孔的极限尺寸中, 形状误差可能的极端情况

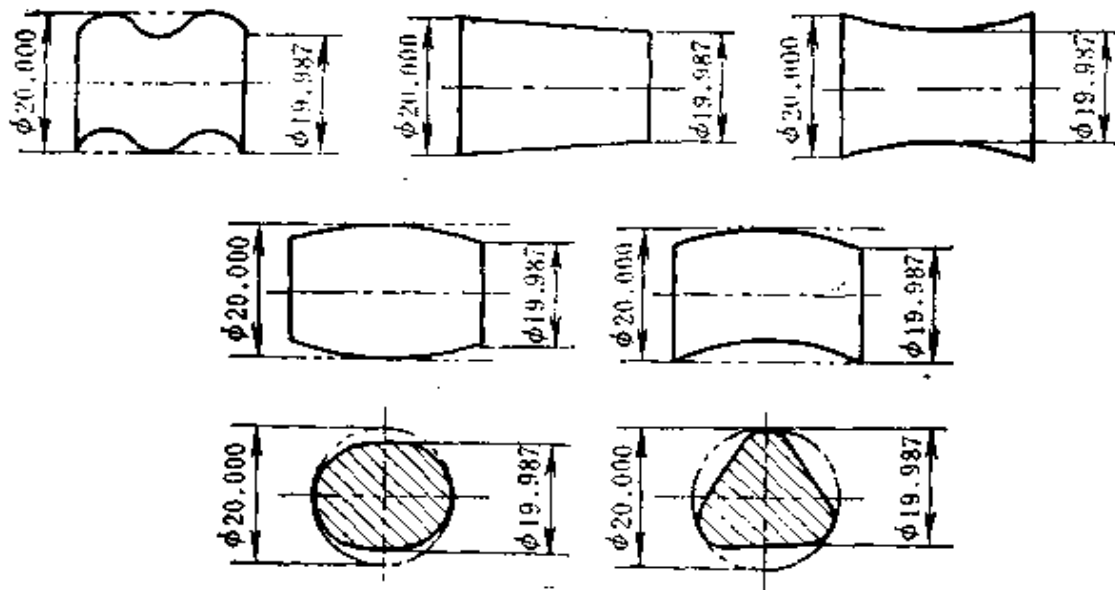


图 1-10 在轴的极限尺寸中，形状误差可能的极端情况

十、形状和位置公差 (摘自 GB1182~1183—80)

1. 形状和位置公差各项目的符号

形状和位置公差简称形位公差，各项目符号见表 1-11。

表 1-11

分类	项 目	符 号	分类	项 目	符 号
形 状 公 差	直 线 度	—	形 状 公 差	圆 柱 度	⌀
	平 面 度	\square		线 轮 廓 度	⌒
	圆 度	\bigcirc		面 轮 廓 度	D

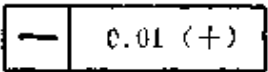
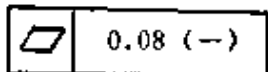
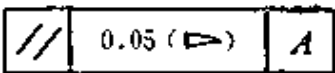
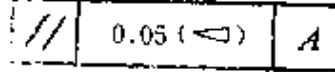
(续)

分类	项目	符号	分类	项目	符号
位置公差	定向	平行度	位置公差	定向	对称度
	向	垂直度		位置度	
		倾斜度		圆跳动	
	定位	同轴度		全跳动	

2. 附加要求符号

对形位公差有附加要求时，应在相应的公差数值后面加注有关的符号，如表 1-12。

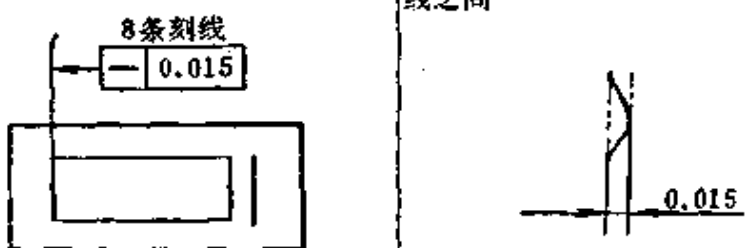
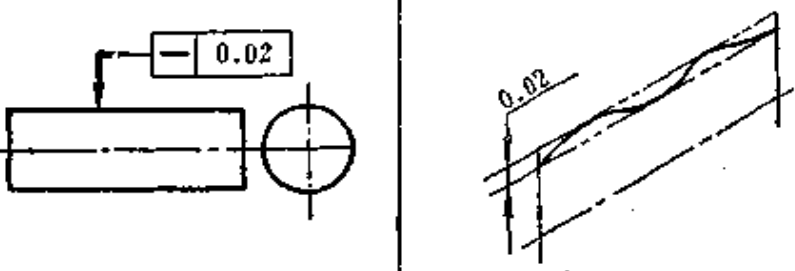
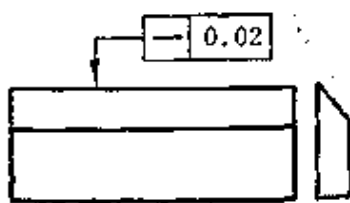

表 1-12

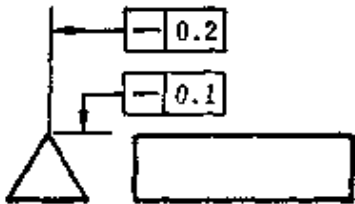

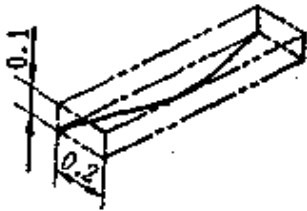
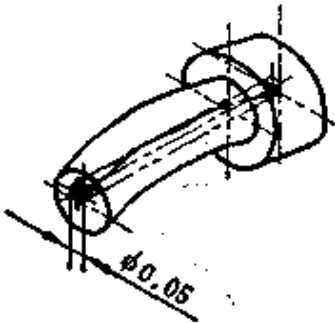
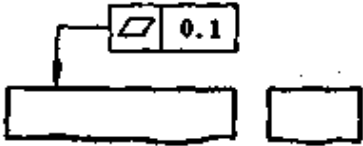

符号	解 释	标注示例
(+)	若被测要素有误差，则只许中间向材料外凸起	
(-)	若被测要素有误差，则只许中间向材料内凹下	
(∇)	若被测要素有误差，则只许按符号的(小端)方向逐渐减小	 

3. 形位公差带的定义和示例

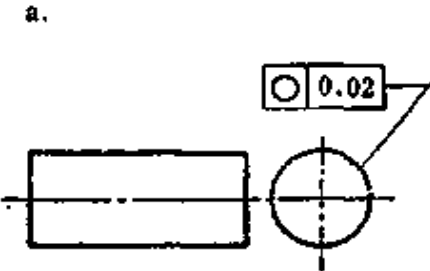
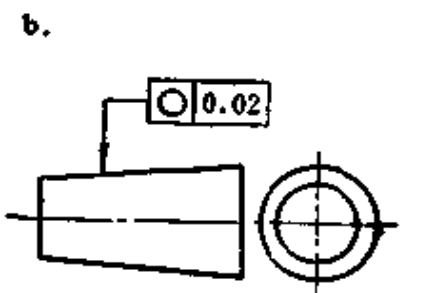
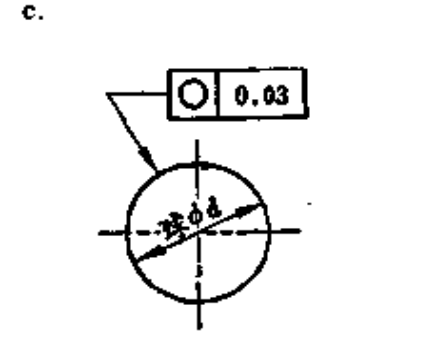
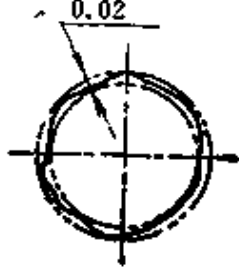
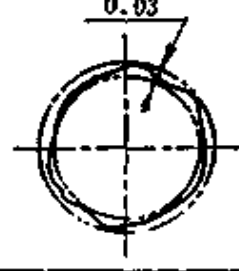
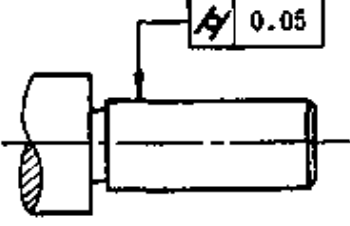
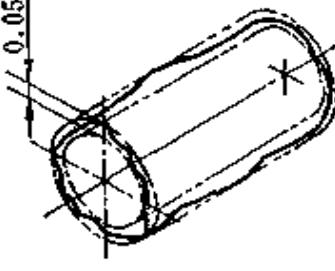
说明如表 1-13。

表 1-13

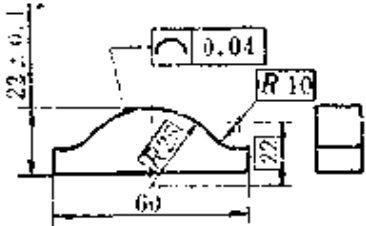
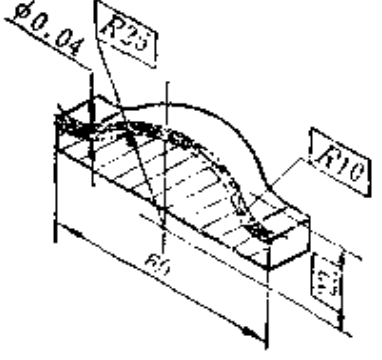
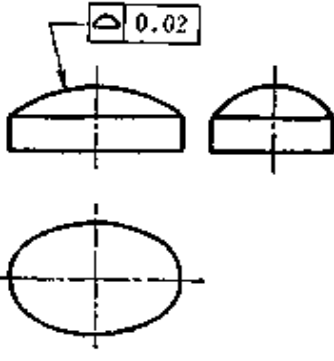

		形 状 公 差		
项目	公差带定义	示 例	说 明	
一、 直线度	1. 在给定向上公差带是距离为公差值的两平行直线之间的区域	a.	<p>a. 每条刻线必须位于该表面上距离为公差值 0.015 的两条平行直线之间</p> 	
		b.	<p>b. 圆柱表面上任一素线必须位于轴向平面内，距离为公差值 0.02 的两平行直线之间</p> 	
	2. 在给定向上公差带是距离为公差值的两平行平面之间的区域；当给定的两个公差带的平面互相垂直时，公差带是正负公差值的四分之一棱柱区	(1) 一个方向		<p>(1) 棱线必须位于箭头所示方向距离为公差值 0.02 的两平行平面内</p> 

形 状 公 差			
项目	公差带定义	示 例	说 明
	3. 在任意方向上公差带是直径为公差值 ϕ 的圆柱面内的区域	<p>(2) 互相垂直的两个方向</p>  	<p>(2) 棱线必须位于水平方向距离为公差值 0.2, 垂直方向距离为公差值 0.1 的四棱柱内</p>  <p>整个零件的轴线必须位于直径为公差值 0.05 的圆柱面内</p> 
二、平面度	公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域		<p>上表面必须位于距离为公差值 0.1 的两平行平面内</p> 

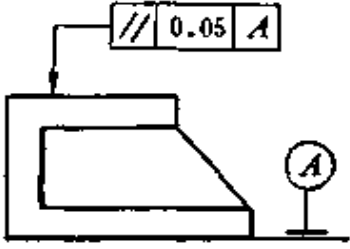
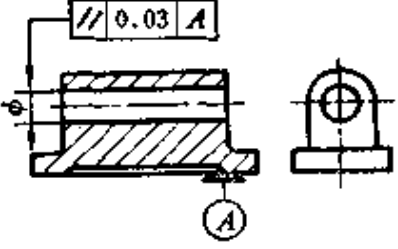
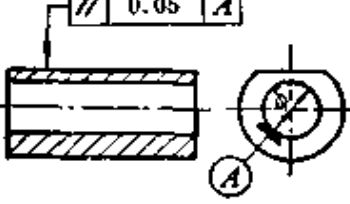
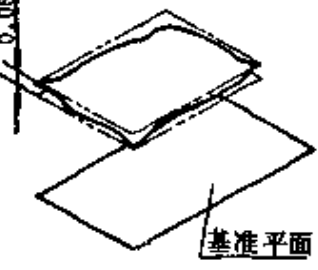
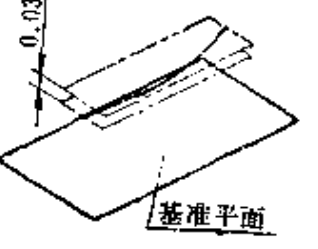
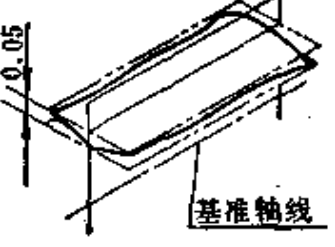
(续)

形 状 公 差			
项目	公差带定义	示 例	说 明
三、圆 度	公差带是在同一正截面上半径差为公差值 t 的两同心圆之间的区域	<p>a.</p>  <p>b.</p>  <p>c.</p> 	<p>a. b. 在垂直于轴线的任一正截面上, 该圆必须位于半径差为公差值 0.02 的两同心圆之间</p>  <p>c. 在通过球心的任一截面上, 该圆必须位于相应截面上半径差为公差值 0.03 的两同心圆之间</p> 
四、圆 柱 度	公差带是半径差为公差值 t 的两同轴圆柱面之间的区域		<p>圆柱面必须位于半径差为公差值 0.05 的两同轴圆柱面之间</p> 

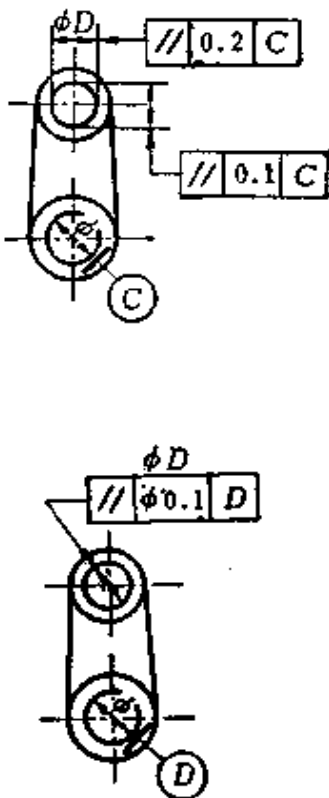
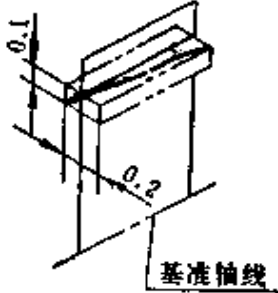
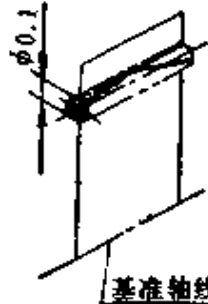
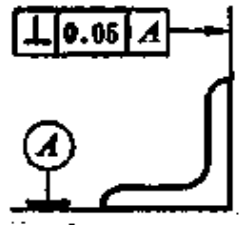
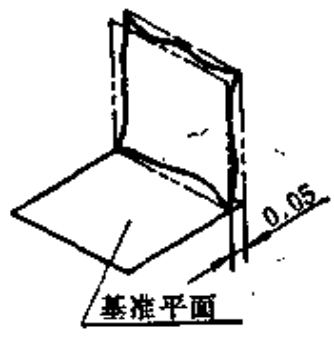
形 状 公 差

项目	公差带定义	示 例	说 明
五、线轮廓度	<p>公差带是列差之区域，应位于理想轮廓上。 (注：当被测轮廓有相对位置要求时，其基准为理想轮廓线)</p>		<p>在平行于正投影面的任一截面上，实际轮廓线必须位于包络一系列直径为公差值0.04，且圆心在理想轮廓线上的圆的两包络线之间</p> 
六、面轮廓度	<p>公差带是列差之球面区域，应位于理想面上。 (注：当被测面有相对位置要求时，其基准为理想面)</p>		<p>实际轮廓面必须位于包络一系列球的包络面之间；诸球的直径为公差值0.02，且球心在理想轮廓面上</p> 

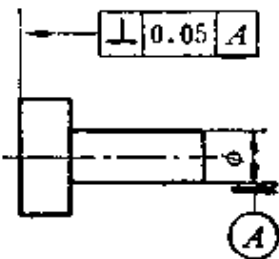
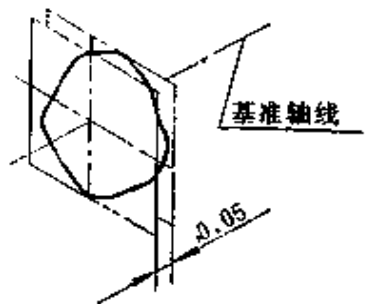
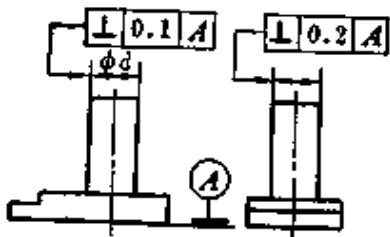
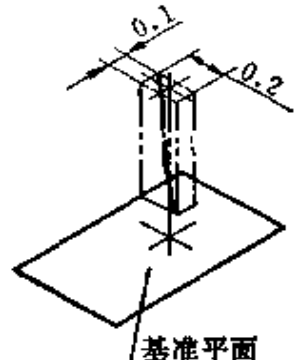
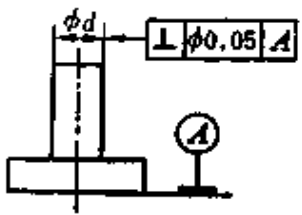
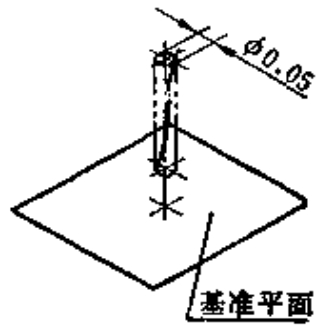
(续)

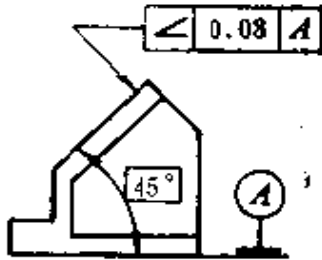
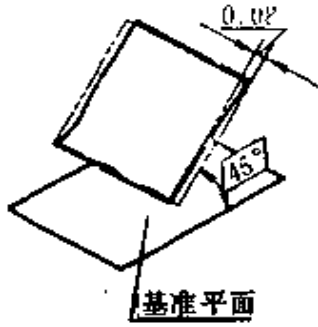
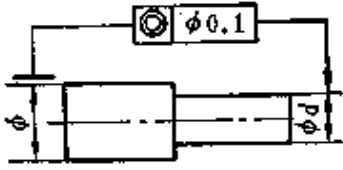
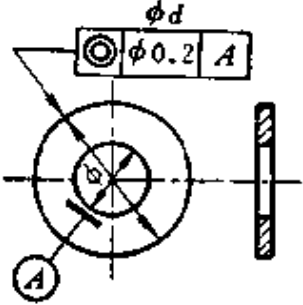
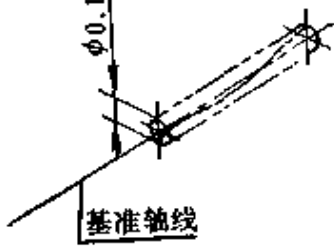

位 置 公 差			
项 目	公差带定义	示 例	说 明
七、平行度	<p>1. 在给定方向上，当给定一个方向时，公差带是距离为公差值t，且平行于基准平面（或直线、轴线）的两平行平面之间的区域；当给定的两个垂直方向时，公差带是正负公差值$t/2$，且平行于基准轴线的四棱柱内的区域。</p>	<p>(1) 一个方向</p> <p>a. 面对面</p>  <p>b. 线对面</p>  <p>c. 面对线</p> 	<p>a. 上表面必须位于距离为公差值0.05，且平行于基准平面的两平行平面之间</p>  <p>b. 孔的轴线必须位于距离为公差值0.03，且平行于基准平面的两平行平面之间</p>  <p>c. 上表面必须位于距离为公差值0.05，且平行于基准轴线的两平行平面之间</p> 

位 置 公 差

项目	公差带定义	示 例	说 明
	<p>2. 在任意方向上公差带是直径为公差值t，且平行于基准轴线的圆柱面内的区域</p>	<p>(2) 互相垂直的两个方向</p> 	<p>(2) ϕD 的轴线必须位于正截面为公差值0.1×0.2，且平行于基准轴线的四棱柱内</p>  <p>基准轴线</p> <p>ϕD 的轴线必须位于直径为公差值0.1，且平行于基准轴线的圆柱面内</p>  <p>基准轴线</p>
<p>八、垂直度</p>	<p>1. 在给定的一个方向上，当给定一个方向时，距离为公差值t，且垂直于基准平面（或直线、轴线）的两平行平面（或两直线）之间的区域，当给定两个互相垂直的方向时，是正截面为公差值$t_1 \times t_2$，且垂直于基</p>	<p>(1) 一个方向</p> <p>a. 面对面</p> 	<p>a. 右侧表面必须位于距离为公差值0.05，且垂直于基准平面的两平行平面之间</p>  <p>基准平面</p>

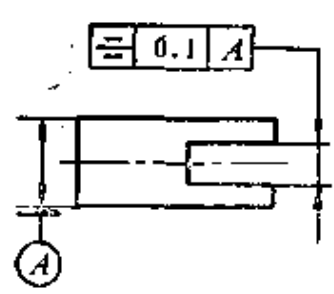
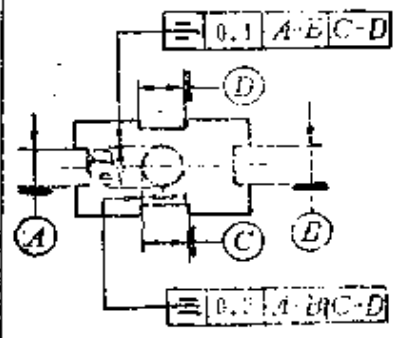
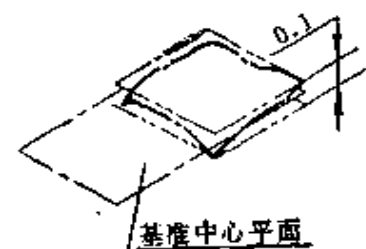
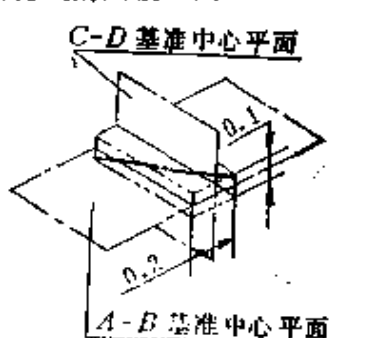
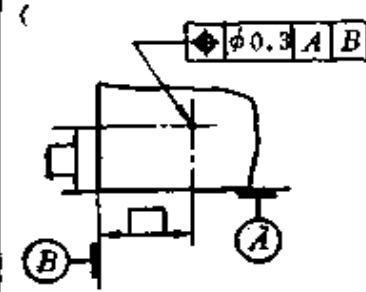
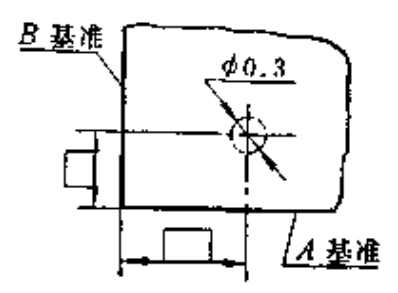
(续)

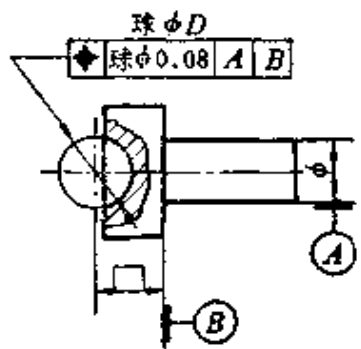
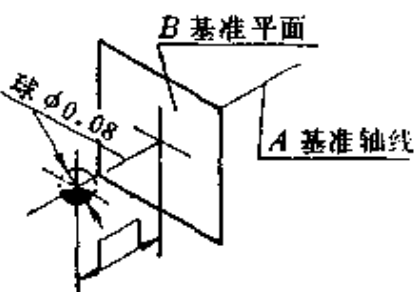
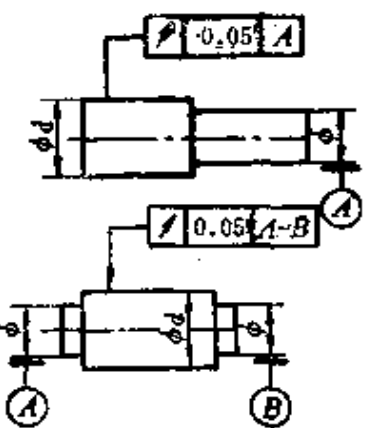
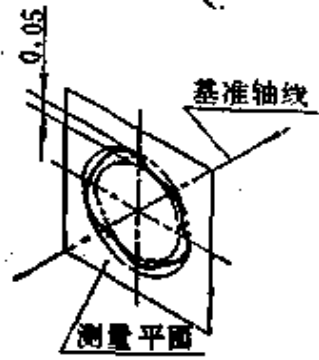
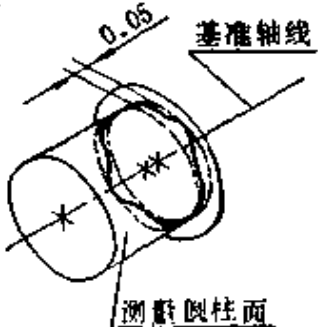
位置公差			
项目	公差带定义	示 例	说 明
	垂直于基准轴线的四棱柱内的区域	<p>b. 面对线</p> 	<p>b. 左侧端面必须位于距离为公差值0.05, 且垂直于基准轴线的两平行平面之间</p> 
		<p>(2) 互相垂直的两个方向</p> 	<p>(2) ϕd 的轴线必须位于正截面为公差值 0.2×0.1, 且垂直于基准平面的四棱柱内</p> 
	2. 在任意方向上公差带是垂直于基准平面的直径为公差值 t , 且垂直于基准平面的圆柱面内的区域	<p>线对面</p> 	<p>ϕd 的轴线必须位于直径为公差值0.05, 且垂直于基准平面的圆柱面内</p> 

位 置 公 差			
项 目	公 差 带 定 义	示 例	说 明
九、 倾 斜 度	在给定方向上公差带是距离为公差值 t ，且与基准平面(或直线、轴线)成理论正确角度的两平行平面(或直线)之间的区域	<p style="text-align: center;">面对面</p> 	<p>斜表面必须位于距离为公差值0.08，且与基准平面成45°角的两平行平面之间</p> 
十、 同 轴 度	公差带是直径为公差值 t ，且与基准轴线同轴的圆柱面内的区域	<p>a.</p>  <p>b.</p> 	<p>a. ϕd 的轴线必须位于直径为公差值0.1，且与基准轴线同轴的圆柱面内</p>  <p>b. ϕd 的圆心必须位于直径为公差值0.2，且与基准圆心同心的圆内</p> 

(续)

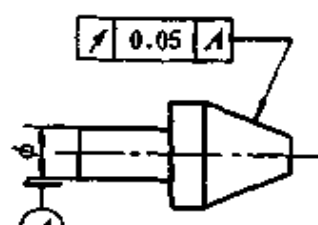
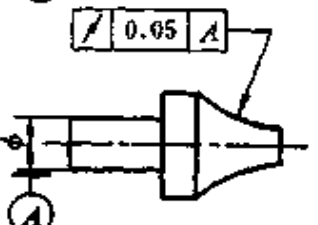
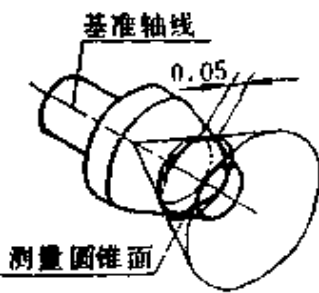
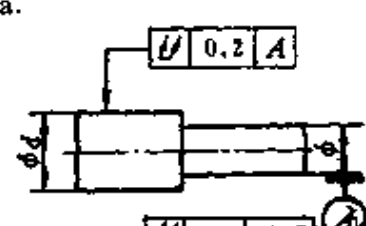
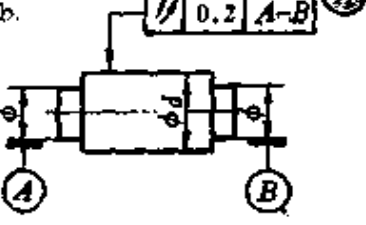
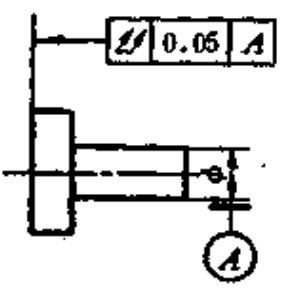
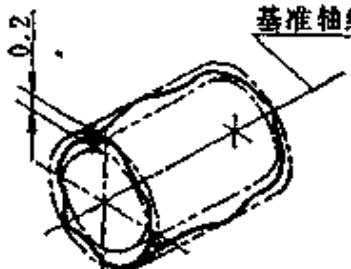

位 置 公 差

项目	公差带定义	示 例	说 明
十一、对称度	<p>公差带是距离为公差值 t，且相对基准中心平面（或中心线、轴线）对称配置的两平行平面（或直线）之间的区域。若给定两个互相垂直的方向，则是正截面为公差值 $t_1 \times t_2$ 的四棱柱内的区域。</p>	<p>a. 面对面</p>  <p>b. 线对线</p> 	<p>a. 槽的中心面必须位于距离为公差值 0.1，且相对基准中心平面对称配置的两平行平面之间</p>  <p>基准中心平面</p> <p>b. ϕD 的轴线必须位于正截面为公差值 0.2×0.1，且相对公共中心平面 $A-B$ 和 $C-D$ 分别对称配置所构成的四棱柱内</p>  <p>$C-D$ 基准中心平面</p> <p>$A-B$ 基准中心平面</p>
十二、位置度	<p>点的位置公差带是直径为公差值 t，且以理想位置为圆心的区域。</p>	<p>a.</p> 	<p>a. 该点必须位于直径为公差值 0.3 的圆内。该圆的圆心位于相对基准 A、B 所确定的点的理想位置上</p>  <p>B 基准</p> <p>A 基准</p>

		位 置 公 差	
项目	公差带定义	示 例	说 明
		<p>b.</p> 	<p>b. 球 ϕD 的球心必须位于直径为公差值 0.08, 并以相对基准 A, B 所确定的理想位置为球心的球内</p> 
十三、圆跳动	<p>1. 径向跳动 公差带是在垂直于基准轴线的任一测量平面内半径差为公差值 t, 且圆心在基准轴线的两个同心圆之间的区域</p> <p>2. 端面圆跳动 公差带是与基准轴线同轴的位置圆柱面上沿母线方向的宽度为 t 的圆柱面区域</p>	<p>a. b.</p> 	<p>a. b. ϕd 圆柱面绕基准轴线作无轴向移动回转时, 在任一测量平面内的径向跳动量均不得大于公差值 0.05</p>  <p>当零件绕基准轴线作无轴向移动回转时, 在左端面上任一测量直径处的轴向跳动量均不得大于公差值 0.05</p> 

(续)

位 置 公 差




项目	公差带定义	示 例	说 明
	<p>3. 斜向圆跳动公差带是轴上任圆锥面沿母线宽度除特殊规定测量方向外，其测量方向为法线方向。</p>	<p>a. </p> <p>b. </p>	<p>a. b. 圆锥表面绕基准轴线作无轴向移动回转时，在任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于公差值 0.05</p> 
<p>十四、全跳动</p>	<p>1. 径向全跳动公差带是公差值为 t，且与轴线的两圆柱面之间的区域。</p> <p>2. 端面全跳动公差带是公差值为 t，且与轴线的两平行平面之间的区域。</p>	<p>a. </p> <p>b. </p> <p></p>	<p>a. b. ϕd 表面绕基准轴线作无轴向移动地连续回转，同时，指示器作平行于基准轴线的直线移动。在 ϕd 整个表面上的跳动量不得大于公差值 0.2</p>  <p>端面绕基准轴线作无轴向移动地连续回转，同时，指示器作垂直于基准轴线的直线移动。此时，在整个端面上的跳动量不得大于 0.05</p> 

十一、表面粗糙度与光学零件表面疵病

1. 表面粗糙度符号(摘自GB 131—82)

图样上表示零件表面粗糙度的符号如表 1-14。

表 1-14

符 号	意 义
	基本符号, 单独使用这符号是没有意义的
	基本符号上加一短划, 表示表面粗糙度是用去除材料的方法获得。例如: 车、铣、钻、磨、剪切、抛光、腐蚀、电火花加工等
	基本符号上加一小圆, 表示表面粗糙度是用不去除材料的方法获得。例如: 铸、锻、冲压变形、热轧、冷轧、粉末冶金等或者是用于保持原供应状况的表面(包括保持上道工序的状况)

2. 部分术语和定义(摘自 GB 3505—83)

(1) 取样长度(l)

用于判别具有表面粗糙度特征的一段基准线长度(如图 1-11)。

规定和选择这段长度是为了限制和减弱表面波纹度对表面粗糙度测量结果的影响(取样长度在轮廓总的走向上量取)。

(2) 轮廓峰

在取样长度内轮廓与中线相交, 连接两相邻交点向外(从材料到周围介质)的轮廓部分(如图 1-12)。在取样长度始端或终端, 轮廓的向外部分也是轮廓峰。

(3) 轮廓谷

在取样长度内轮廓与中线相交, 连接两相邻交点向内(从周

围介质到材料)的轮廓部分(如图 1-13)。在取样长度的始端和终端,轮廓的向内部分也是轮廓谷。

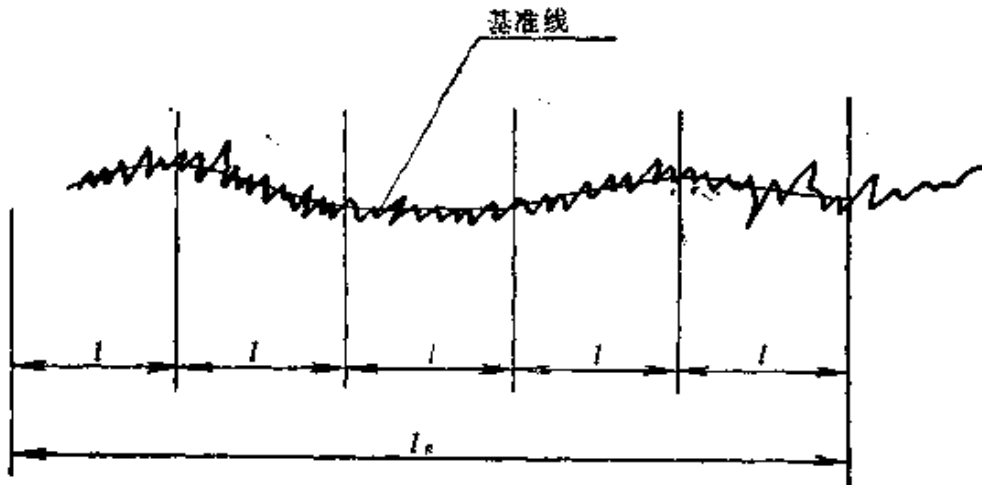


图 1-11 取样长度

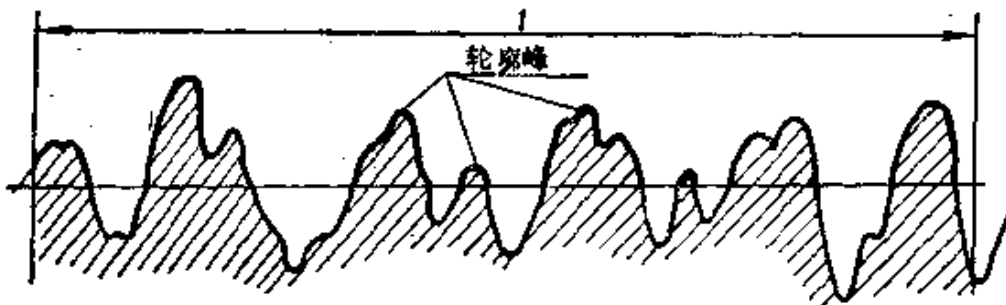


图 1-12 轮廓峰

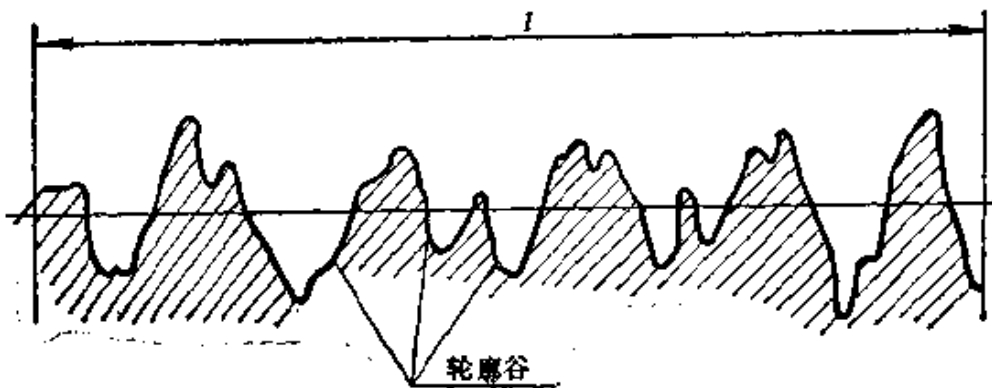


图 1-13 轮廓谷

(4) 轮廓微观不平度

轮廓峰与相邻轮廓谷的组合。

(5) 表面粗糙度

是指加工表面上具有的较小间距和峰谷所组成的微观几何形状特性。一般由所采用的加工方法和(或)其它因素形成。

(6) 轮廓最大高度(R_v)

在取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离(如图 1-14)。

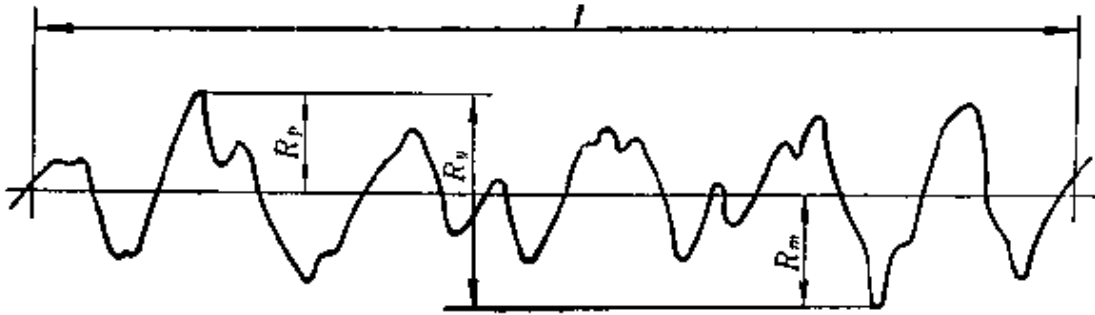


图 1-14 轮廓最大高度

(7) 微观不平度十点高度(R_z)

在取样长度内 5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个最大的轮廓谷深的平均值之和(如图 1-15)。

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5}$$

式中 y_{pi} ——第 i 个最大的轮廓峰高,

y_{vi} ——第 i 个最大的轮廓谷深。

(8) 轮廓算术平均偏差(R_a)

在取样长度 l 内轮廓偏距绝对值的算术平均值(如图 1-16)

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

或近似为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

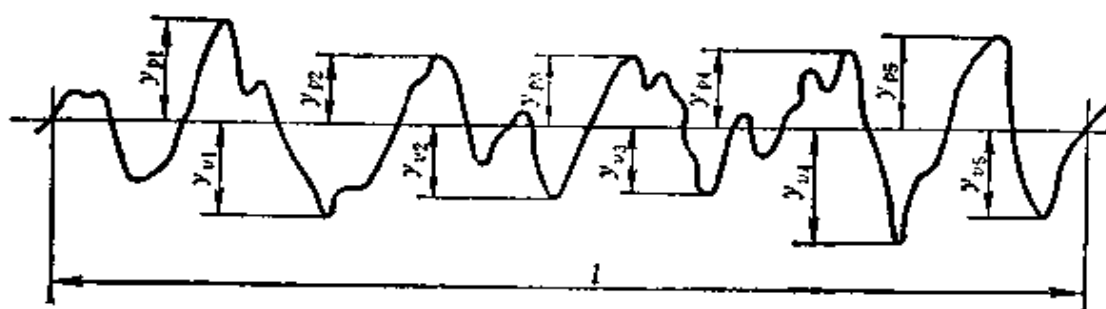


图 1-15 微观不平度十点高度

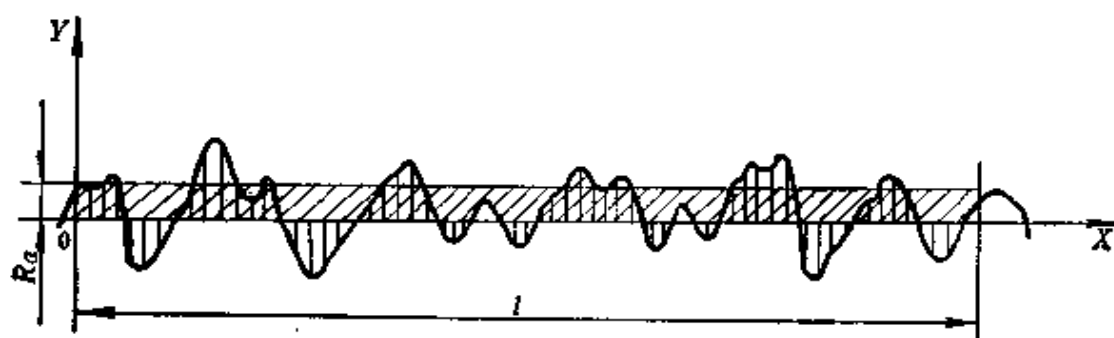


图 1-16 轮廓算术平均偏差




3. 表面粗糙度标注方法(摘自 GB 131—83)

(1) 表面粗糙度高度参数轮廓算术平均偏差 R_a 值的标注见表 1-15, R_a 在代号中用数值表示(单位为微米)。

表 1-15

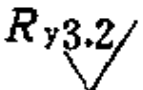
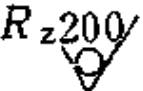
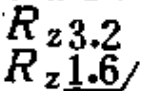
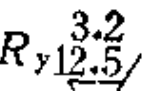
代 号	意 义
3.2/ √	用任何方法获得的表面, R_a 的最大允许值为 $3.2 \mu\text{m}$

(续)

代 号	意 义
	用去除材料方法获得的表面, R_a 的最大允许值为 $3.2 \mu\text{m}$
	用不去除材料方法获得的表面, R_a 的最大允许值为 $3.2 \mu\text{m}$
	用去除材料方法获得的表面, R_a 的最大允许值($R_{a\max}$)为 $3.2 \mu\text{m}$, 最小允许值($R_{a\min}$)为 $1.6 \mu\text{m}$

(2) 其他表面粗糙度高度参数, 轮廓微观不平度十点高度 R_s 、轮廓最大高度 R_z 值(单位为微米)的标注见表 1-16, 参数值前需标注出相应的符号。

表 1-16

代 号	意 义
	用任何方法获得的表面, R_y 的最大允许值为 $3.2 \mu\text{m}$
	用不去除材料方法获得的表面, R_z 的最大允许值为 $200 \mu\text{m}$
	用去除材料方法获得的表面, R_z 的最大允许值($R_{z\max}$)为 $3.2 \mu\text{m}$, 最小允许值($R_{z\min}$)为 $1.6 \mu\text{m}$
	用去除材料方法获得的表面, R_a 的最大允许值为 $3.2 \mu\text{m}$, R_z 的最大允许值为 $12.5 \mu\text{m}$

4. 光学零件表面粗糙度

表 1-17 列出了光学零件表面粗糙度 R_a 、 R_z 与加工方法的关系。

表 1-17

R_a (μm)	R_z (μm)	l (mm)	表面状况	加工方法	备注
—	—		压铸或铸造毛坯表面。玻璃板和玻璃管等零件不需继续加工的表面	压制、铸造、吹制、拉制、轧制	相当于旧标准~
>10~20	>40~80	8	粗加工表面	用粒度 $60^\circ \sim 150^\circ$ 的散粒磨料或 $30^\circ \sim 80^\circ$ 的金刚石锯片、铣刀和砂轮等加工所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 3$
>2.5~5	>10~20	2.5	零件粗磨后的表面。大型棱镜、平面镜和保护玻璃的侧表面与倒角。直径大于 18mm 和配合精度不高于 IT 9 级的透镜、滤光镜、分划板、保护玻璃及其他零件的圆柱面和倒角	用粒度 $240^\circ \sim W28$ 的散粒磨料或 $100^\circ \sim 180^\circ$ 的金刚石锯片、铣刀和砂轮加工所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 5$
>1.25~2.5	>6.3~10	0.8	零件精磨后的表面。中等尺寸的棱镜、平面镜和保护玻璃侧表面和倒角。直径到 18mm 的 IT 9 级配合和直径大于 18mm 的 IT 6 级配合的透镜、分划板、滤光镜、保护玻璃及其他零件的圆柱面和倒角	用粒度 W28~W14 的散粒磨料或 $180^\circ \sim 240^\circ$ 固着磨料加工 (锯、铣、磨等) 所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 6$
>0.63~1.25	>3.2~6.3	0.8	零件精磨后的表面。直径小于 18mm 的 IT 8 级配合精度的透镜和分划板的圆柱面	用粒度为 W14~W10 的散粒磨料或 $240^\circ \sim W50$ 固着磨料加工 (锯、铣、磨等) 所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 7$
>0.32~0.63	>1.6~3.2	0.8	零件精磨后的表面。IT 6 级以上配合精度的圆柱面	用 W10~W7 的散粒磨料或 W50~W40 固着磨料加工所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 8$
>0.16~0.32	>0.8~1.6	0.8	精磨后的表面	用 W14~W10 的固着磨料精磨所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 9$
>0.04~0.08	>0.2~0.4	0.25	精磨后的表面	用 W10~W7 的固着磨料精磨所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 11$

(续)

Ra (μm)	Rz (μm)	t (mm)	表面状况	加工方法	备注
$>0.01 \sim 0.02$	$>0.05 \sim 0.1$	0.08	要求不高的抛光面。在这些面上, 允许有不显著的未完全抛光的痕迹	用抛光粉在抛光模上抛光所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 13$
≥ 0.01	≥ 0.05	0.08	要求较高的抛光面。在这些抛光面上, 不允许有未完全抛光的痕迹	用抛光粉在抛光模上抛光所得表面	旧标准光洁度等级为 $\nabla 14$

5. 光学零件表面疵病(摘自 GB 1185—74)

光学零件抛光表面的疵病, 系指麻点、擦痕、开口气泡、破点及破边。

(1) 表面疵病分级

1) 根据光学零件表面允许疵病的尺寸和数量, 共分 10 级。

0~I—30 级适用于位于光学系统象平面上及其附近的光学零件, 其允许疵病尺寸和数量见表 1-18。

表 1-18

疵病等级	疵病的尺寸及数量						
	麻 点					擦 痕	
	麻 点 最大直径 (mm)	D_0 (mm)				最大宽度 (mm)	总长度 (mm)
		至 20	$>20 \sim 40$	$>40 \sim 60$	>60		
允许的麻点数量 (个)							
0	在规定的检验条件下, 不允许有任何疵病						
I—10	0.005	4	6	9	15	0.002	$0.5D_0$
I—20	0.01	4	6	9	15	0.004	$0.5D_0$
I—30	0.02	4	6	9	15	0.006	$0.5D_0$

注: 1. 直径小于 0.001 mm 的麻点和宽度小于 0.0005 mm 的擦痕, 均不作疵病考核。

2. 当 $D_0 \leq 60$ mm 时, 零件表面任意象限内麻点数量不得超过 3 个, $D_0 > 60$ mm 时, 不得超过 5 个, 任意两麻点内侧间距应 ≥ 0.2 mm。

3. D_0 为零件的有效孔径 (对于环形和非圆形零件, D_0 则是工作区面积的等效直径), 单位是 mm。

II~VII级适用于不位于光学系统象平面上的光学零件，其允许疵病的尺寸和数量见表 1-19。

表 1-19

疵病等级	疵病的尺寸及数量					
	麻点			擦痕		
	直径 (mm)	总数量 (个)	粗麻点直径 (mm)	宽度 (mm)	总长度 (mm)	粗擦痕宽度 (mm)
II	0.002~0.05	$0.5D_0$	0.03~0.05	0.002~0.008	$2D_0$	0.006~0.008
III	0.004~0.1	$0.8D_0$	0.05~0.1	0.004~0.01		0.008~0.01
IV	0.015~0.2	$1D_0$	0.1~0.2	0.006~0.02		0.01~0.02
V	0.015~0.4		0.2~0.4	0.006~0.04		0.02~0.04
VI	0.015~0.7		0.4~0.7	0.01~0.07		0.04~0.07
VII	0.1~1		0.7~1	0.01~0.1		0.07~0.1

注：各级表面粗麻点之数量不得超过允许麻点总数量的 10%，粗擦痕总长度不得超过允许擦痕总长度的 10%。计算粗麻点数量时，计算结果按四舍五入凑整。

2) 零件表面疵病的尺寸及数量虽未超过表 1-19 的规定，但发现有疵病密集在一起的现象时，还须补充测定表 1-20 各级所规定之限定区内疵病的尺寸及数量。

表 1-20

疵病等级	零件表面任何一部分限定区内疵病的尺寸及数量				
	限定区直径 (mm)	麻点		擦痕	
		总数量 (个)	其中粗麻点数量 (个)	总长度 (mm)	其中粗擦痕长度 (mm)
II	2	2	1	4	2
III	3	3	1	6	3
IV	6	5	1	10	5
V	10	10	2	20	10
VI	20	20	3	40	20

注：限定区内如没有粗麻点和粗擦痕，则限定区内细麻点的数量和细擦痕的长度允许按疵病面积换算后相应增加（麻点换算按表 1-21），但整个表面允许疵病的尺寸及总数量不得超过表 1-19 的规定。

表 1-21

ϕ_2	相当于细麻点个数													
	ϕ_1	1	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.06	0.04	0.025	0.015	0.01	0.004
0.004										100	39	14	6	1
0.01								100	36	16	6	2	1	
0.015								44	16	7	3	1		
0.025							64	16	6	3	1			
0.04				100	64	25	6	2	1					
0.06			70	46	25	11	3	1						
0.1	100	49	25	16	11	4	1							
0.2	25	12	6	4	4	1								
0.3	11	5	3	2	1									
0.4	6	3	2	1										
0.5	4	2	1											
0.7	2	1												

注： ϕ_1 指粗麻点直径， ϕ_2 指细麻点直径。

3) 在规定检验条件下，直径小于表 1-19 各级下限规定之麻点和宽度小于表 1-19 各级下限规定之擦痕，若能明显分开，则不考核，若不能明显分开，则按表 1-19 考核。

4) 开口气泡和破点，均当作麻点看待，长圆形麻点的直径以此麻点最大轴线和最小轴线长度的算术平均值来计算。

5) 擦痕宽度和长度的算术平均值如没有超过该零件表面允许之最大麻点直径时，则按麻点进行考核。

6) 破边大于 0.5 mm 时应磨毛，进入有效孔径部分的破边应按麻点进行考核。

7) 凡发展性的疵病均不允许存在。零件表面有效孔径以外疵病，若不影响零件在镜框中的牢固性和密封性，则不予考核。

8) 双擦痕和随麻点而来的擦痕均按单个分别计算。

9) 对表面疵病如有特殊要求, 可在技术文件中另行规定。

(2) 标注方法

1) 在图纸上零件表面疵病用字母 B 表示。

例如, $B=I-20$ 则表示该零件表面疵病等级为 $I-20$ 级。

2) 对于有分区要求的零件, 可分区表示。

圆形零件的区域划分, 一般按有效孔径的 $\frac{1}{3}$ 划分为中心区和边缘区。例如 $B=0+I-10$ 即表示该零件中心区的表面疵病等级为 0 级, 边缘区为 $I-10$ 级(疵病数量根据 D_0 按表 1-18 计算)。

对其他分区要求的圆形零件和非圆形零件, 则应在零件图上划出区域范围, 范围线用“双点划线”, 疵病的尺寸及数量根据各区域的 D_0 按表 1-18 或表 1-19 计算。

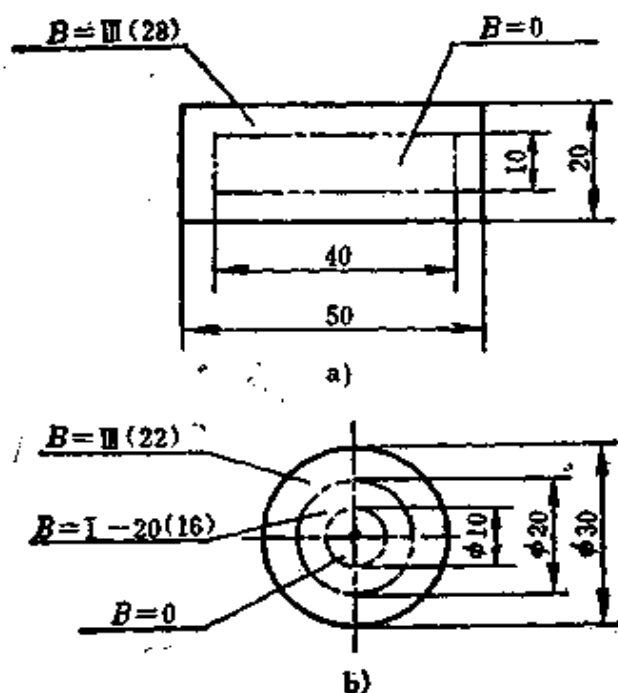


图 1-17

注: 图 1-17 a 中 $B=III(28)$ 表示该区域表面疵病为 III 级, 疵病的尺寸及数量根据该区域面积的等效直径 28 mm 按表 1-19 计算。

3) 检验时应以黑色屏幕为背景, 光源为 60~100 W (电压 36 V) 的普通白炽灯泡, 在透射光或反射光下观察。在检验零件

时, 为了便于发现疵病, 观察时允许朝任意方向转动零件, 但在确定疵病大小时, 应以透射光为准 (不包括棱镜和一面磨砂一面抛光的零件)。

4) 检验 0~I—30 级零件时, 用 $6\times\sim 10\times$ 放大镜观察。检验 II~V 级零件时, 用 $4\times\sim 6\times$ 放大镜观察。但对于直径小于 5 mm 的透镜, 允许用 $6\times\sim 8\times$ 放大镜观察。

检验 VI~VII 级零件时, 用肉眼观察。但对于零件直径小于 30 mm 的圆形零件和棱镜、超半球、圆柱体等特殊零件, 允许用 $4\times\sim 6\times$ 放大镜观察。

十二、光学零件的技术要求

光学零件的技术要求及其符号和含义如表 1-22。

表 1-22

术 语	符 号	说 明
光 圈	N	光波在被检光学表面与参考光学表面间由干涉所形成的条纹
光 圈 不规则度	ΔN	被检光学表面与参考光学表面间所产生的干涉条纹的不规则程度
标 准 样 板 精 度	ΔR	标准样板的曲率半径基本值与实际值的偏差
光学零件 表面疵病	B	光学零件抛光面上的麻点、擦痕、开口气泡、破点及破边等
气 泡 度	q	光学零件在一定范围内含有的气泡的大小和个数
透镜偏心差	c	透镜外圆的中心轴和光轴的偏离程度
塔 差	α	一般指在三棱镜中, 棱与其所对的光学平面间的夹角
平 行 度	θ	玻璃平板的两个表面的平行度
第一光学 平行差 第二光学 平行差	θ_1 θ_{11}	光线从反射棱镜的入射面垂直入射, 在出射前对出射面法线的偏差。在入射光轴截面方向的分量, 称做“第一光学平行差”; 在垂直于入射光轴截面方向的分量, 称做“第二光学平行差”

(续)

术 语	符 号	说 明
屋脊棱镜 双象差	S	由于屋脊角的误差, 当一束平行光经过屋脊棱镜后, 被分成二束平行光线间的夹角
平 板 最小焦距	f_{min}	加工玻璃平板、平面反射镜或反射棱镜时, 产生光学平面的球面性误差所允许的焦距最小值
零件中心 厚 度	d	
透镜边缘 厚 度	t	
零件直径	D	
零 件 有效孔径	D_0	
反射系数	ρ	表面反射光通量与入射光通量之比

十三、光学零件图

(摘自 GB 1331—77)

(1) 光学零件图, 应在左上角画出“对材料的要求”与“对零件的要求”专用表格。表中没有要求的项目, 画一短“—”线; 特殊要求的项目画星号“*”, 并加说明; 仅作工艺参考的要求加圆括弧。

(2) 光学零件曲率半径的标注按图1-18。曲率半径过大时, 其曲率允许夸大绘制, 如图1-18中的R 1028; 透镜的表面为平面时, 应标注 $R\infty$ 。

(3) 光学零件图上一般用图形和文字表明倒角要求 (如图1-19 a、b)。若倒角尺寸在图形上小于2 mm, 可不绘制倒角图形, 只需在倒角处引出细实线, 标注倒角尺寸 (图1-19 c) 或用文字说明。不允许倒角的棱应用细实线引出, 并注明“尖棱”字样 (图1-19 d)。

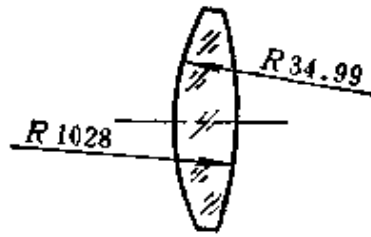


图 1-18

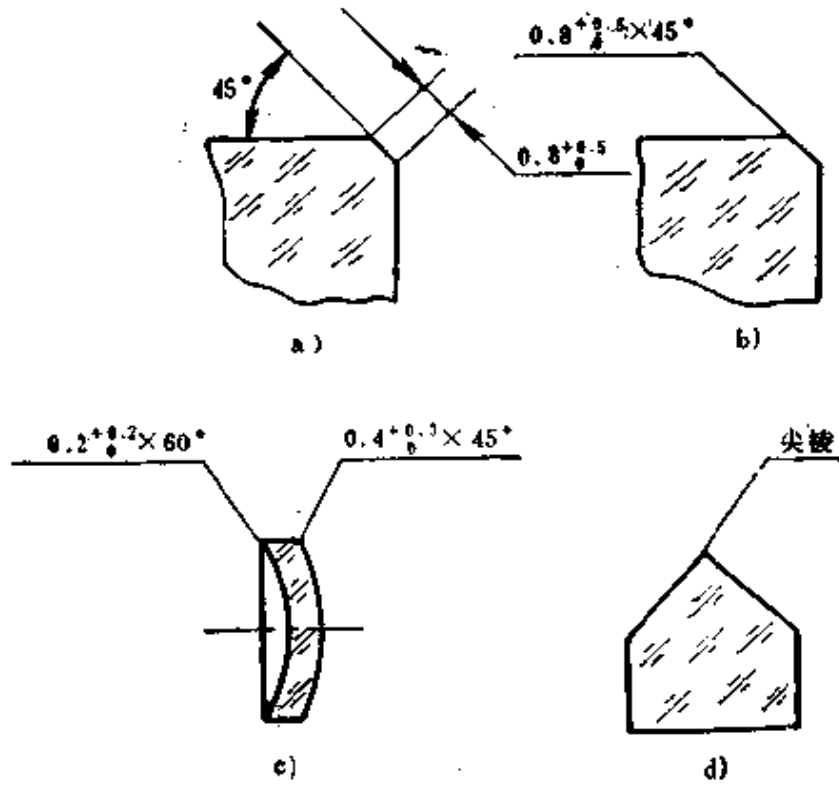


图 1-19

(4) 棱镜零件图上若未画棱的倒角图形，则所标注尺寸一律为倒尖棱尺寸(如图 1-20 中尺寸 21.22 ± 0.1)

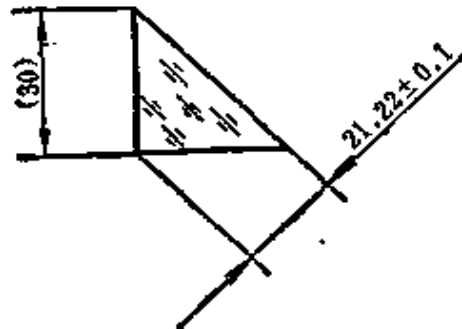


图 1-20

(5) 光学零件图上可根据需要标注参考尺寸,如图1-20中的尺寸(30)及图1-21中的尺寸。

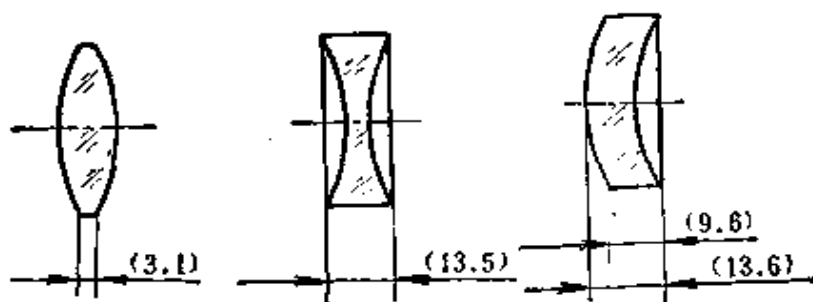


图 1-21

(6) 非球面光学零件图上,应根据需要列出曲线方程式,必要时亦可用表格列出坐标值。

(7) 在光学零件图上,零件的有效孔径若对称于表面形状分布,则应在所列表格的 D_c 栏内标明,圆形注“ ϕ 直径”,例如“ $\phi 30$ ”;矩形注“ \square 长 \times 宽”,例如“ $\square 30 \times 20$ ”;卵形注“卵半圆直径 \times 总长”,例如“卵 20×30 ”等字样。

十四、光学零件的倒角

1. 圆形光学零件的倒角

光学零件的倒角,可以分为保护性倒角和设计性倒角两种。


保护性倒角是为了防止零件在装配时,尖锐的边缘被碰破,也免得划破工人的手。透镜在磨边后边缘总是有些微小的崩边,倒角可以同时起到外形整齐美观的作用。

表1-23列出了零件直径与通常的保护性倒角宽度 b 的关系,其中胶合面的倒角应小些。这是因为装配时,容易碰破的是透镜外表面,而且胶合面的倒角太大,对胶合面不利。直径120mm以上的透镜一般不胶合,故表中仅规定到120mm。

倒角与圆柱面之间夹角 α 根据零件直径 D 与表面半径 R 的比值从表1-24中选取。

表 1-23

(mm)

零件直径 D	倒角宽度 b			倒角位置
	非胶合面	胶合面	滚边法固定	
3~6	$0.1^{+0.1}$	$0.1^{+0.1}$	$0.1^{+0.1}$	
>6~10	$0.1^{+0.1}$	$0.1^{+0.1}$	$0.3^{+0.2}$	
>10~18	$0.3^{+0.2}$	$0.2^{+0.1}$	$0.4^{+0.2}$	
>18~30	$0.3^{+0.2}$		$0.5^{+0.2}$	
>30~50	$0.4^{+0.2}$	$0.2^{+0.2}$	$0.7^{+0.2}$	
>50~80	$0.4^{+0.2}$		$0.8^{+0.4}$	
>80~120	$0.5^{+0.4}$	$0.3^{+0.2}$	—	
>120~150	$0.6^{+0.6}$	—	—	

注：零件倒角尺寸当为特殊要求时（例如：当通光口径与外径之比较大时，就当适当缩小倒角尺寸，以保证通光口径），则根据图纸规定倒角。

表 1-24

$\frac{D}{R}$	α		平 面
	凸 面	凹 面	
0.7以下	45°	45°	45°
>0.7~1.5	30°	60°	
>1.5~2	不倒角	90°	

2. 非圆形光学零件的倒角

- 1) 小于 135° 的二面角需倒角。
- 2) 棱镜倒角宽度按表 1-25。

表 1-25

(mm)

最短棱边长度	二面角倒角宽度	三面角倒角宽度	倒角位置
3~6	$0.1^{+0.1}$	$0.4^{+0.3}$	二面角: 倒角面垂直于二面角 的二等分面
>6~10	$0.2^{+0.2}$	$1.0^{+0.4}$	三面角: 倒角面垂直于三面角中 每个二面角的二等分面之 交线
>10~30	$0.4^{+0.3}$	$1.5^{+0.5}$	
>30~50	$0.6^{+0.4}$	$2^{+0.6}$	
>50	$0.8^{+0.6}$	$2.5^{+0.8}$	

注: 1. 根据设计要求, 可以改变倒角宽度或不倒角。

2. 三面角倒角宽度是指倒角后所得到的三角形倒角面中最长边的长度。

3. 在图样上应注明倒角宽度。如: 倒二面角 $0.2^{+0.2}$; 倒三面角 $1.0^{+0.4}$ 。

十五、光圈识别

(摘自 GB 2831—81)

1. 高低光圈的识别

(1) 一般情况下高低光圈的识别

低光圈: 当空气隙缩小时, 条纹从边缘向中心移动, 如图 1-22 a 所示。

高光圈: 当空气隙缩小时, 条纹从中心向边缘移动, 如图 1-22 b 所示。图中 p 为加力方向和加力点, d 表示条纹移动方向。

光圈正负号规定: 高光圈为“+”号; 低光圈为“-”号。

(2) 光圈数少时高低光圈的识别

低光圈: 当空气隙缩小时, 条纹弯曲方向和移动方向如图 1-23 b 所示。

高光圈: 当空气隙缩小时, 条纹弯曲方向和移动方向如图 1-23 a 所示。图中 p 为加力方向和加力点, d 表示条纹移动方向。

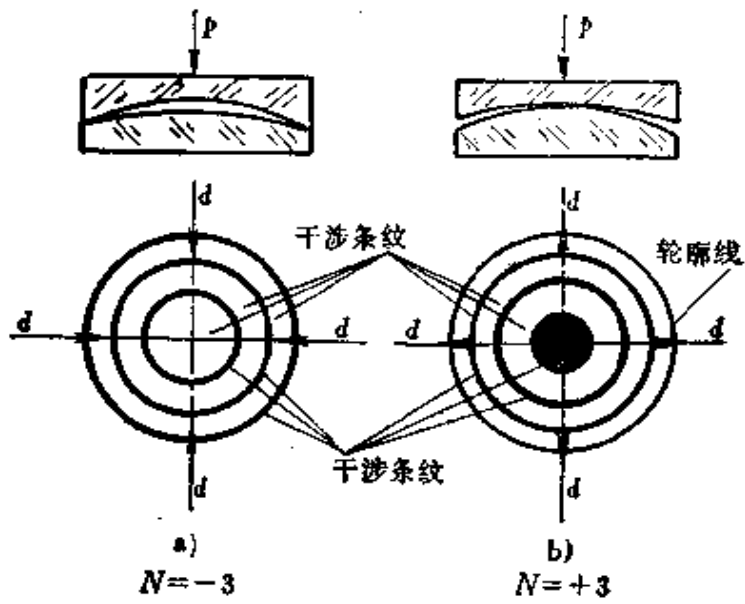


图 1-22 高低光圈的识别和度量

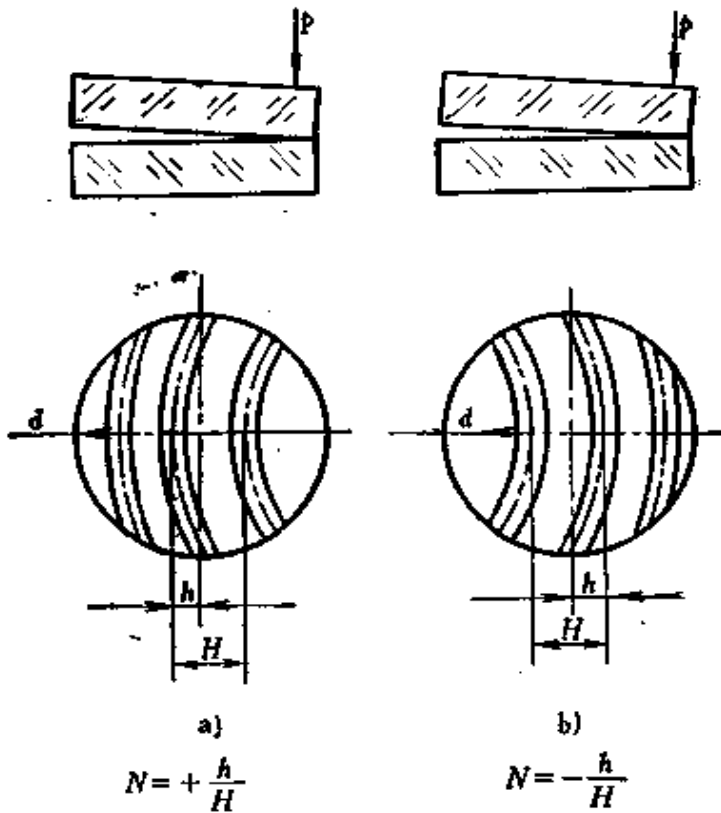


图 1-23 光圈数少时高低光圈的识别和度量

2. 光圈的度量

(1) 光圈数 N 的度量

1) 在光圈数多的情况下, 以有效检验范围内直径方向上最多条纹数的一半来度量, 如图 1-22 所示。

2) 在光圈数少的情况下, 以通过直径方向上干涉条纹的弯曲量 h 相对于条纹的间距 H 的比值来度量(参看图 1-23), 即

$$N = \frac{h}{H}$$

(2) 象散光圈数 $\Delta_1 N$ 的度量

$\Delta_1 N$ 以两个相互垂直方向上光圈数 N 的最大代数差的绝对值来度量, 如图 1-24 所示。图中 $X-X$ 方向 $N_x = -2$, $Y-Y$ 方向 $N_y = -3$, 则 $\Delta_1 N = |N_x - N_y| = 1$ 。图 1-25 为柱形象散。

(3) 局部光圈数 $\Delta_2 N$ 的度量

$\Delta_2 N$ 以局部不规则干涉条纹对理想平滑干涉条纹的偏离量 e 与两相邻条纹间距 H 的比值来度量(参看图 1-26), 即

$$\Delta_2 N = \frac{e}{H}$$

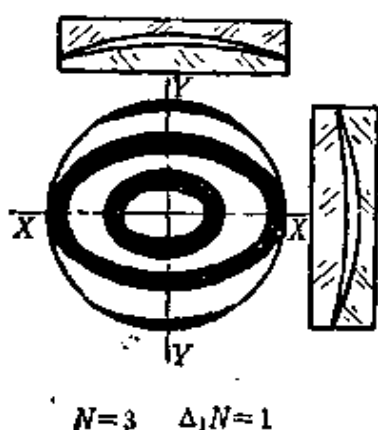


图 1-24 椭圆形象散光圈数 $\Delta_1 N$ 的度量

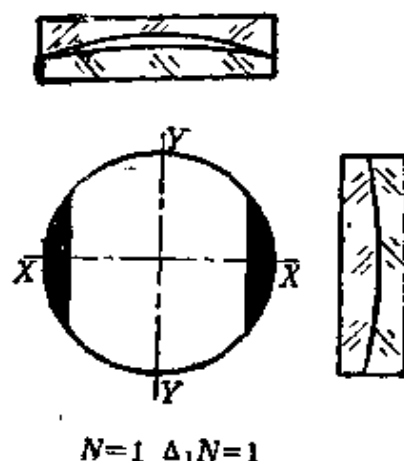


图 1-25 柱形象散光圈数 $\Delta_1 N$ 的度量

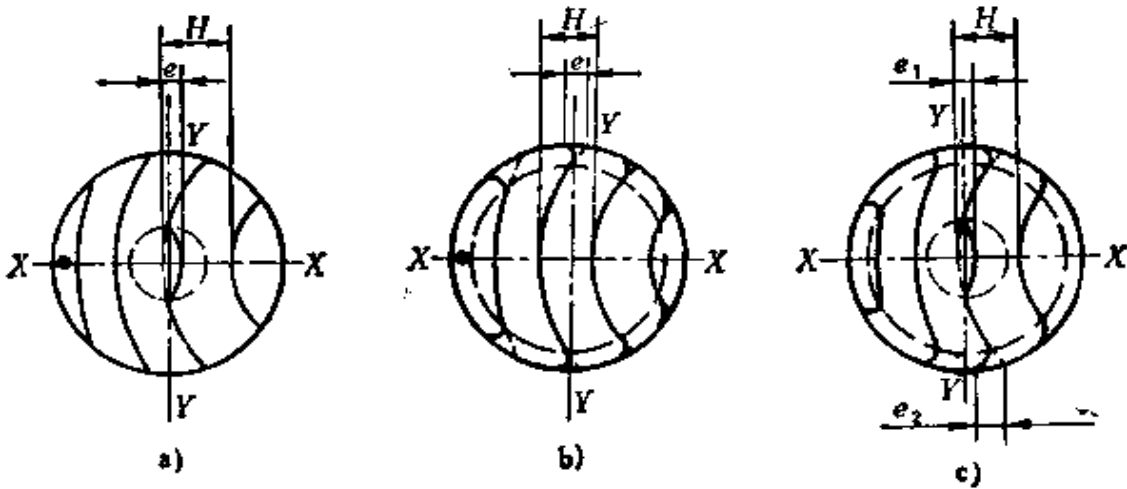


图 1-26 局部不规则 $\Delta_2 N$ 的度量

a) 中心局部不规则 b) 边缘局部不规则

c) 中心及边缘均有局部误差时, $\Delta_2 N$ 取 $\frac{e_1}{H}$ 和 $\frac{e_2}{H}$ 中的最大值

(4) 弓形光圈的光圈数 N 和局部光圈 $\Delta_2 N$ 的度量

参看图 1-27。

当被检测的光圈为弓形光圈而对 N 的取值方向有争议时, 则规定根据 $\Delta_2 N$ 为最小的原则来取值 N 和 $\Delta_2 N$ 。如在图 1-27 中, 如以边缘部分的干涉条纹为基准引出延伸线, 而其中心相对延伸的平滑干涉条纹的偏离量为 e_1 , 则 $\Delta_2 N' = \frac{e_1}{H_1} = \frac{3}{7.5} = 0.4$;

如果以中心部分的干涉条纹为基准引出延伸线作为平滑干涉条纹考虑, 而其边缘相对延伸条纹的偏离量为 e_2 , 则 $\Delta_2 N'' = \frac{e_2}{H_2} = \frac{4.5}{7.5} = 0.6$ 。比较两者, 得 $\Delta_2 N'' > \Delta_2 N'$, 所以该被检面的光

圈数 $N = \frac{h}{H_1} = \frac{4}{7.5} = 0.53$, $\Delta_2 N = 0.4$ 。

(5) 被检面光圈数少时, 如出现 S 形光圈 (参看图 1-28),

则该被检面的 $N = \frac{h}{H} = \frac{2}{5} = 0.4$

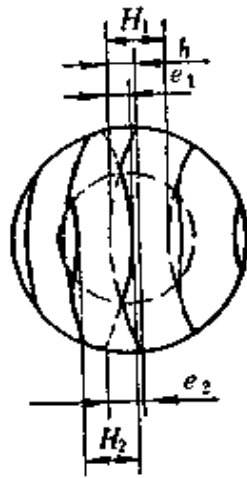
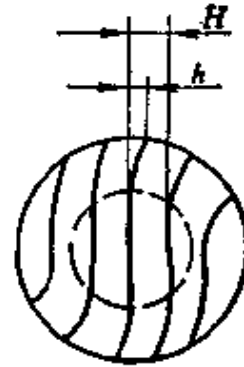


图 1-27 弓形光圈

图 1-28 S形光圈的光圈数 N 的度量

十六、光学样板

(摘自GB1240—76)

1. 型式和尺寸

1) 光学样板按用途分为以下两类：标准样板——复制工作样板用的光学样板；

工作样板——检验光学零件用的光学样板。

2) 球面标准样板的型式和尺寸应符合表1-26的规定。

当曲率半径小于35mm时，也可做成全球套制凸凹样板，其型式和尺寸应符合表1-27的规定。

表 1-26

(mm)

标准样板表面 曲率半径 R	凸 样 板			凹 样 板				
	D	H	型 式	D	H	h	b	型 式
0.5~5	$2R$	$1.2R$	图1-29	15	20	$0.9R$	—	图1-31
>5~10				$1.9R+6$				
>10~35				$R+2$	30	图1-32		

(续)

标准样板表面 曲率半径 R	凸 样 板			凹 样 板				
	D	H	型 式	D	H	h	b	型 式
$>35\sim50$	60	30	图1-30	60	30	—	2.5	图1-33
$>50\sim80$	80	35		80	35		3.0	
$>80\sim150$	100			100			3.0	
$>150\sim750$	130	30		130	2.0			
$>750\sim40000$		25			25		—	

注：根据需要，允许设计制造直径 D 大于 130mm 的标准样板。

3) 球面工作样板直径应大于光学零件被检验部分的直径，高度 H 应大于或等于 $D/6 + h$ ，其中 D 为样板直径， h 为矢高。

4) 平面标准样板和工作样板的型式与尺寸应符合图 1-34 及表 1-28 的规定。

5) 光学样板均需进行保护性倒角，其尺寸可参考表 1-23 和表 1-24。

表 1-27

(mm)

标准样板表面 曲率半径 R	凸 样 板			凹 样 板			
	D	H	型 式	D	H	h	型 式
0.5~5	1.9R	—	不规定	15	10	0.7R	图1-31
$>5\sim10$	1.7R	0.5R+15	图1-30	1.7R+6		25	0.5R
$>10\sim25$					35		
$>25\sim35$							

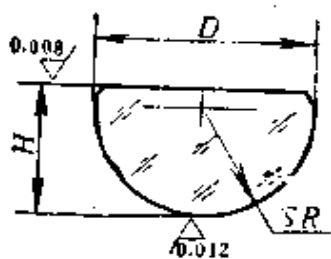


图 1-29

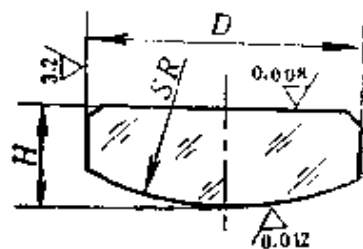


图 1-30

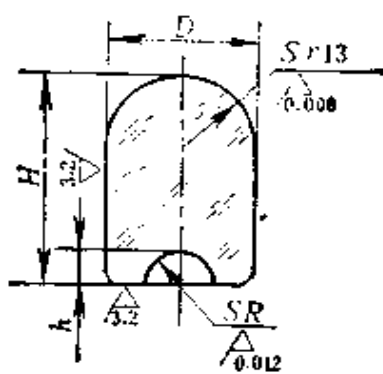


图 1-31

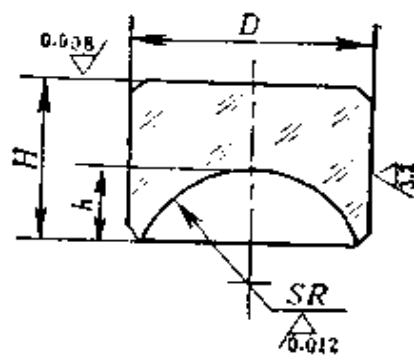


图 1-32

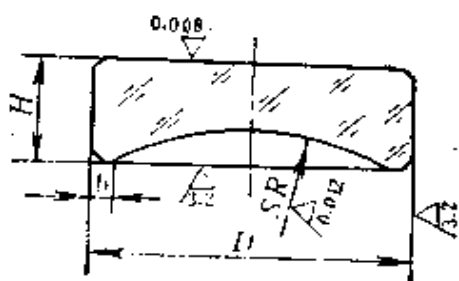


图 1-33

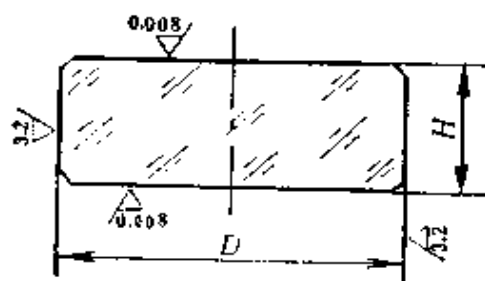


图 1-34

表 1-28

(mm)

标 准 样 板		工 作 样 板	
<i>D</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>H</i>
—	—	40	15
—	—	60	20
—	—	80	
100	25	100	25
—	—	130	
150	25	150	
200	30	—	—

2. 技术要求

1) 球面标准样板应凸凹成对制造，平面标准样板采用三块同时制造。

2) 标准样板的精度分为A、B两级，其允差应符合表1-29及表1-30规定。

表 1-29

精 度 等 级	球面标准样板曲率半径 <i>R</i> (mm)					
	0.5~5	>5~10	>10~35	>35~350	>350~1 000	>1 000~40 000
	允 差 (±)					
	微 米			样板曲率半径 <i>R</i> 的百分数		
A	0.5	1.0	2.0	0.02	0.03	$\frac{0.03 R}{1 000}$
B	1.0	3.0	5.0	0.03	0.05	$\frac{0.05 R}{1 000}$

表 1-30

曲率半径 $R(\text{mm})$	0.5~750		>750~40000		—	
	A	B	A	B	A	B
N	0.5	1.0	0.2	0.5	0.05	0.10
ΔN	0.1					

3) 球面工作样板的光圈数根据被检光学零件的要求按表 1-31 选取。

表 1-31

组 别	I	II	III
N	0.1	0.5	1.0
ΔN	0.1	0.1	0.1

4) 平面工作样板相对标准样板的偏差与平面标准样板的允差相同(参看表 1-30)。

5) 光学样板的测量表面和观察表面, 不允许有妨碍观察光圈的疵病存在。

6) 光学样板应用无色光学玻璃 K4、QK2 或硬质玻璃、石英玻璃等制造, 其技术要求应符合表 1-32 的规定。

表 1-32

样板直径 D (mm)	气 泡		条 纹		双 折 射 类 别
	类 别	级 别	类 别	级 别	
~30	4	D	2	C	1
>30~80	6				
>80	8				

注: 气泡、条纹、双折射的类别、级别的具体要求, 参看 GB903-65。

3. 验收规则

检验样板光圈时，室温应为 $20^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，定温时间不少于表1-33的规定。定温时间内允许室温温差为 0.5°C 。定温前样板的温度与检验室温度的允差为 5°C 。

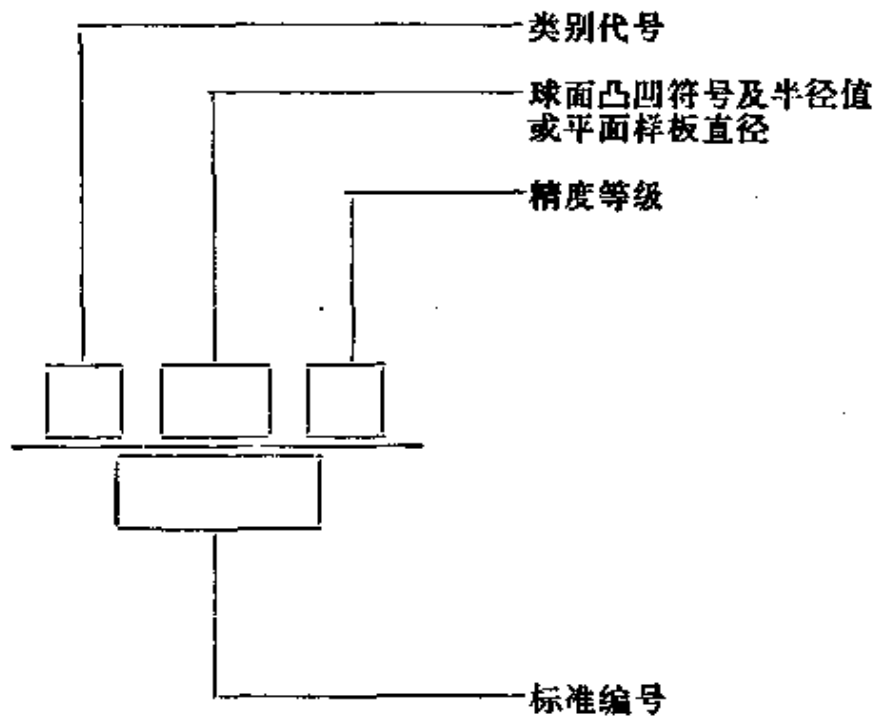
表 1-33

样板直径 D (mm)	<25	>25~40	>40~60	>60~80	>80~ 100	>100~ 130	>130~ 150	>150~ 200
连续定温时间 (min)	20	45	60	90	120	150	180	240

4. 标记、包装、运输和保管

1) 标记

组成形式如下：



对于球面工作样板，还应在精度等级后边加上光圈的组别号。

样板类别代号和凸凹符号按表1-34。

表 1-34

种 类	代 号	意 义
类 别 代 号	B	标准样板
	G	工作样板
凸 凹 符 号	+	凸 面
	-	凹 面

标记示例:

A级精度R100mm的凹球面标准样板标记为:

$$\frac{B-R100A}{GB1240-76}$$

B级精度直径为80mm的平面样板标记为:

$$\frac{G\phi 80B}{GB1240-76}$$

B级精度II组R120mm的凸球面工作样板标记为:

$$\frac{G+R120B_{II}}{GB1240-76}$$

- 2) 标记应制在样板非测量面的边缘上。
- 3) 样板应用软质材料包装在专用盒内,并保存在无酸碱蒸气的干燥处。
- 4) 运输时应根据运输精密玻璃器件的要求包装。

十七、莫氏硬度标准材料

见表1-35。

表 1-35 莫氏硬度标准材料

材料名称	分 子 式	莫 氏 硬 度	
		旧	新
金 刚 石	C	10	15
碳 化 硼	B ₄ C	(9.6)	14
碳 化 硅	SiC	(9.3)	13
金 刚 砂 (刚玉、红宝石)	Al ₂ O ₃	9	12

(续)

材料名称	分子式	莫氏硬度	
		旧	新
碳化锆	ZrC	(8.7)	11
石榴石	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	(7.5~8.3)	10
黄玉	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂	8	9
石英(水晶)	SiO ₂	7	8
熔融石英	SiO ₂	(6.5)	7
正长石	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	6	6
磷灰石	C ₂₄ (F,Cl) ₂ (PO ₄) ₃	5	5
萤石	CaF ₂	4	4
方解石	CaCO ₃	3	3
石膏	CaSO ₄	2	2
滑石	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	1	1

十八、部分常用材料莫氏硬度

见表1-36。表中莫氏硬度以金刚石硬度等于10为准。

表 1-36 部分常用材料莫氏硬度

材料名称	莫氏硬度	材料名称	莫氏硬度	材料名称	莫氏硬度
氯化硼	10	白云石	3.5~4	钛铂合金	6.5
碳化钛	9~9.5	大理石	3~4	镍	5.0
碳化钨	8.5	酚醛树脂	2.5~3	纯铁	4~5
金刚砂	8	岩盐	2~2.5	铂	4.3
尖晶石	8	丙烯酸树脂	2~2.3	黄铜	3~4.5
氧化硅	6.5~7	氧化铅	2	武德合金	2.5~3.5
氧化钛	6~7	赛璐珞	1.5~2	铜	3
光学玻璃	4~7	硅藻土	1~1.5	铝	2.2
氧化锡	6~7	木材	<1.5	银	2.7
氧化铈	6	抛光油	<1	金	2.5
氧化钴	5.5~6.5	石墨	0.5~1	锌	2.5
氧化铁	5~6.5	硬质钢	8	锡	1.8
氧化镍	5.5	铬	7	铅	1.5
平板玻璃	5.5	钢	5~8.5		
氧化锌	4~4.5	钨	6.5~7.5		

十九、擦布脱脂

1. 材料

工业碳酸钠；
日用肥皂；
醋酸(化学纯)；
普通乙醇。

2. 脱脂操作

(1) 碱性脱脂时，按 1 L 水加 2 g 碳酸钠和 6 g 肥皂的比例配制碱溶液于蒸煮锅内并加热溶液，使之充分溶解(为加速溶解，肥皂先切成小块)，然后将需脱脂的擦布放入碱溶液内(已用过有严重油污的擦布挑出另行处理)，煮沸 30 min。煮沸过程中应注意经常翻动和保持擦布淹没在溶液中。碱煮完毕后接着用清水冲洗，除去布上的碱和杂质，再放入含 0.2% 的醋酸水溶液蒸煮锅内煮沸 20 min，然后放入蒸气干燥箱内烘干。

(2) 乙醇脱脂时将经过碱性脱脂并烘干的擦布放入搪瓷桶内，加入经蒸馏过的普通乙醇，使擦布完全浸没于乙醇内，于常温下浸泡约 24 h。经在搪瓷桶各处取样分析合格后，取出擦布于甩干机内甩干，然后理平并放入蒸气干燥箱内烘干。整理擦布时应戴上洁净的白手套操作。

乙醇脱脂工房内，应隔绝火源，注意防火、防爆。工房应有良好的通风设备。

第二章 光学知识

一、光波 光线 折射率

光和一般无线电波一样，都是电磁波，只是光波的波长比无线电波短得多，如表 2-1 所示。

表 2-1

名 称	波 长		重 要 谱 线
宇宙射线	10^{-12} cm	nm	
γ 射线	10^{-11} 10^{-10}		
X 光	10^{-9} 10^{-8} 10^{-7} 10^{-6}	300— 400—	h 404.66 G 434.05 B 435.83
紫 外 线	10^{-8}	500—	F 486.13
可 见 光			e 546.07 d 587.57
红 外 线	10^{-3} 10^{-2}	600— 700—	D 589.29 C 656.28
超 短 波	10^{-1}	800— 900— 1000—	b 706.52 A 768.20
无 线 电 波	10^0 10^1 10^2 10^3 10^4		

光波在某一瞬间传播所到达的位置称为“波面”。我们利用波面的法线(如图 2-1)来代表波的传播方向，这样的波面法线，即几何线叫做“光线”。

光波在不同介质中的传播速度是不同的。我们把光在第一种

介质中的速度 v_1 和第二种介质中的速度 v_2 之比称为第二种介质对第一种介质的相对折射率，即



图 2-1 波面和光线

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2-1)$$

光在真空中的速度 c 和在某一种介质里的速度 v 之比称为绝对折射率 n

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-2)$$

二、几何光学基本定律

见表 2-2。

表 2-2

定 律	内 容
1. 直线传播定律	在均匀介质中，光沿直线传播
2. 独立传播定律	自不同方向或由不同物体发出的光线在某一点相交，对每一光线的独立传播不发生影响
3. 反射定律	1. 入射光线 AB 、法线 BN 和反射光线 BD 三者位于同一平面内(即纸面)； 2. $i = i'$
4. 折射定律	1. 入射光线 AB 、法线 BN 和折射光线 BD 三者位于同一平面内(即纸面)； 2. $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$

三、单个球面近轴象

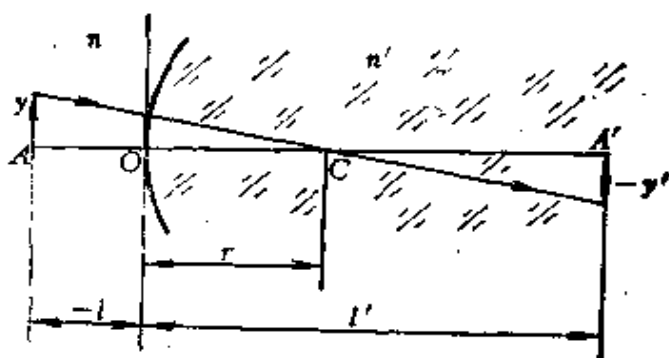


图 2-2

1. 物象位置关系式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (2-3)$$

线段符号规则：

沿轴线段：以球面顶点 O 为原点，线段在球面顶点右侧为正值，在左侧为负值(图 2-2)。

垂轴线段：以线段与光轴的交点为起始点，在光轴上方为正值，下方为负值。

若 $n' = -n$ ，即光线在同一介质内反射，则上式变为：

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r} \quad (2-4)$$

2. 物象大小关系式

垂轴放大率 β 为：

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{nl'}{n'l} \quad (2-5)$$

对于 $n' = -n$ ，则

$$\beta = -\frac{l'}{l} \quad (2-5')$$

四、共轴球面系统的基点

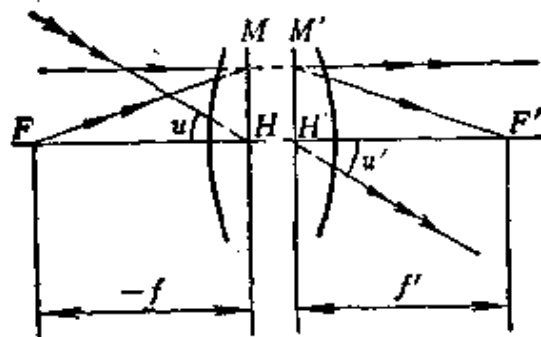


图 2-3 共轴球面系统基点

利用共轴球面系统的基点，可以使研究系统的成像特性大为简化，共轴球面系统的基点有焦点、主点和节点。

物方平行于系统光轴的平行光束，在系统象方的交点 F' 称为象方主焦点(或第二主焦点)，如图 2-3 所示。它与物方光轴上无限远点共轭。通过 F' 所作的垂直于光轴的平面，称为象方主焦平面(第二主焦平面)。物方平行光束的延长线与象空间相应的最后折射光线的反向延长线相交于 M' 点(参看图 2-3)，过 M' 点作垂直于光轴的平面 $M'H'$ ，称为系统的象方主平面(或第二主平面)， H' 称为象方主点(或第二主点)。从 H' 算起到 F' 的距离称为象方焦距 f' (或第二焦距)，当 F' 在 H' 右侧时， f' 为正值，反之为负。

如果轴上物点在 F 处，象点在无限远，那么，我们把 F 点叫做物方主焦点(第一主焦点)，过 F 垂直于光轴的平面叫物方主焦平面(第一主焦平面)。由 F 发出的光线的延长线，和象方相应的平行光线反向延长线相交于 M ，过 M 作垂直于光轴的平面 MH ，称为系统的物方主平面(第一主平面)， H 称为物方主点(第一主点)。从 H 算起到 F 的距离称为物方焦距 f (第一焦距)。当 F 在 H 左侧时， f 为负值，反之为正。

共轴球面系统中角放大率等于 1 (即 $\frac{u'}{u} = 1$) 参看图 2-3 的一对共轭面称为节平面，它们与光轴的交点称为节点，在物方的

称为物方节平面和物方节点；在象方的称为象方节平面和象方节点。通过节点的共轭光线，其出射方向和入射方向相互平行（但可以有旁向位移）。对于位于空气中的光学系统，节平面与主平面重合。

五、单个折射球面和透镜的主平面及焦点

1. 单个折射球面的主平面和焦点

单个折射球面的两个主平面重合，即为球面顶点的切平面（图 2-4）。焦距 f' 和 f 的计算如下：

$$f' = \frac{n'r}{n' - n} \quad (2-6)$$

$$f = -\frac{nr}{n' - n} \quad (2-7)$$

如果把反射看作 $n' = -n$ 的折射，并代入上式，则得到球面反射的焦距计算公式：

$$f' = f = \frac{r}{2} \quad (2-8)$$

2. 位于空气中的单透镜的主平面和焦点

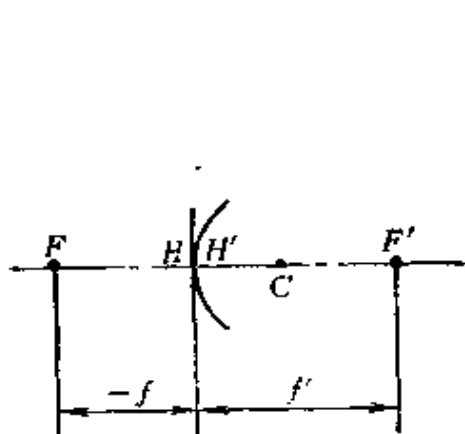


图 2-4 单个折射球面主平面和焦点

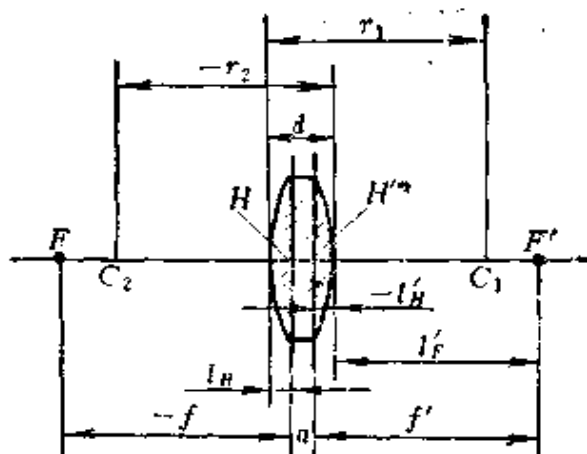


图 2-5 空气中的单透镜的主平面和焦点

图 2-5 中各线段值的计算起止点; 球面半径 r (图中为 r_1 、 r_2) 从球面顶点算起到球心; 厚度 d 由前一面顶点到下一面顶点; 球面顶点到主平面的距离 l_H 由球面顶点算起; 两主平面距离 a 由第一主点起到第二主点止。均是由左向右为正, 向左为负。

$$\begin{aligned} \frac{1}{f'} &= (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{n(r_2)} \\ &= -\frac{1}{f} \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-10)$$

$$l'_H = \frac{-r_2 d}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-11)$$

$$a = \frac{d(n-1)(r_2 - r_1 + d)}{n(r_2 - r_1) + (n-1)d} \quad (2-12)$$

当透镜厚度 d 较两半径之差 $(r_2 - r_1)$ 小得多时, 可认为 $d = 0$, 这时就得到所谓薄透镜公式:

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = -\frac{1}{f} \quad (2-13)$$

$$l_H = 0$$

$$l'_H = 0$$

3. 典型单透镜主平面位置

(1) 双凸透镜

$r_1 > 0$, $r_2 < 0$, 当 $d < \left| \frac{n(r_2 - r_1)}{n-1} \right|$ 时,

$f' > 0$, 为会聚透镜, 如图 2-6 所示。

(2) 双凹透镜

$r_1 < 0$, $r_2 > 0$, $f' < 0$, 为发散透镜, 如图 2-7 所示。

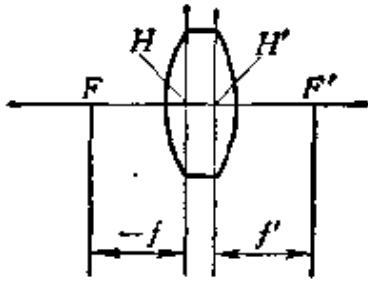


图 2-6 双凸透镜主平面

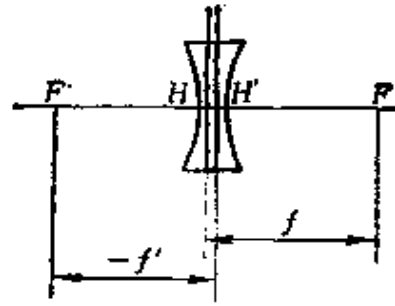


图 2-7 双凹透镜主平面

(3) 平凸透镜

$r_1 > 0, r_2 = \infty, f' = \frac{r_1}{n-1} > 0$, 为会聚透镜, 如图 2-8 所示。

(4) 平凹透镜

$r_1 = \infty, r_2 > 0, f' = \frac{-r_2}{n-1} < 0$, 为发散透镜, 如图 2-9 所示。

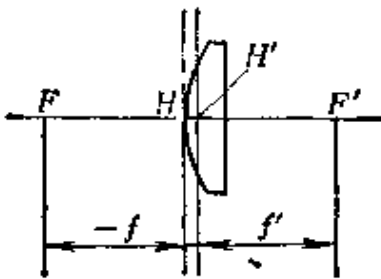


图 2-8 平凸透镜主平面

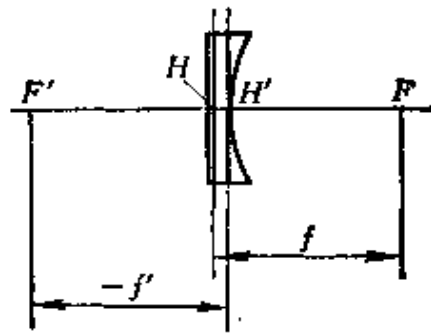


图 2-9 平凹透镜主平面

(5) 正弯月形透镜

$r_2 > r_1 > 0, f' > 0$, 为会聚透镜, 如图 2-10 所示。

(6) 负弯月形透镜

$r_1 > r_2 > 0$, 当 $d < \frac{n(r_1 - r_2)}{n-1}$ 时, $f' < 0$, 为发散透镜, 如图 2-11 所示。

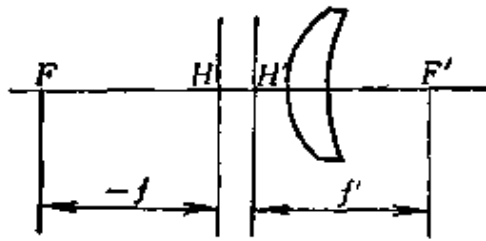


图 2-10 正弯月形透镜主平面

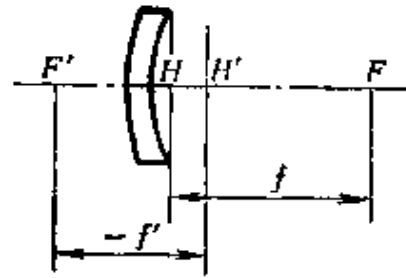


图 2-11 负弯月形透镜主平面

六、用作图法求理想象

用作图法求理想象是根据共轴球面系统基点的特性，利用下述三条特殊光线中两条的交点，求得象点。这三条特殊光线是（参看图 2-12）：

1) 通过物点经物方焦点入射的光线，它经系统后的出射光线平行于光轴；

2) 通过物点平行于光轴的入射光线，经系统后的出射光线通过象方焦点 F' 。

3) 由物点到物方节点（对于位于同一种介质中的系统，节点即主点）的入射光线，经过系统后的出射光线一定平行于入射光线。

表 2-3 是位于空气中的薄透镜的物象关系。由于薄透镜的两个主平面重合，故在此用一条直线表示。

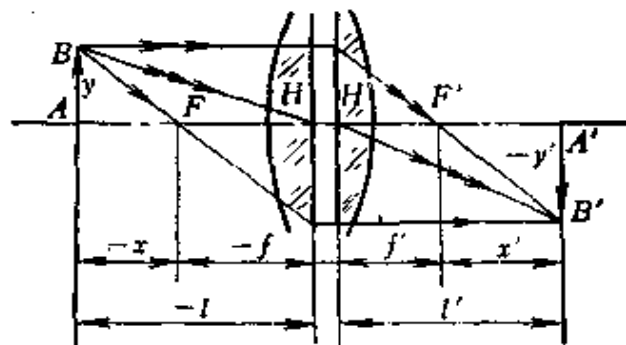
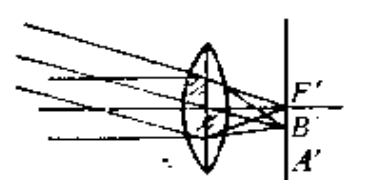
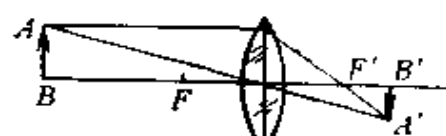
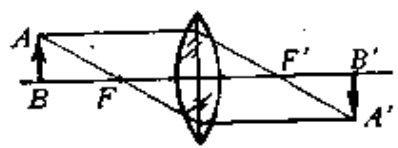
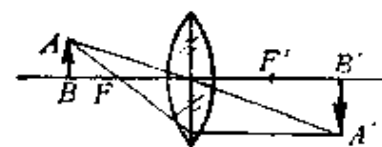

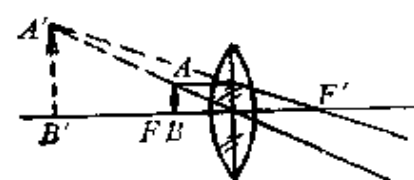
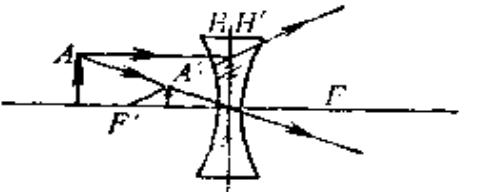
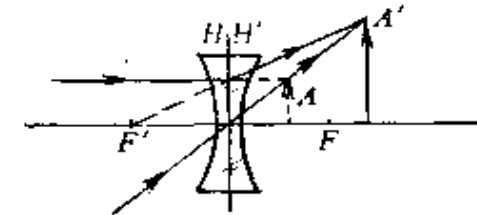
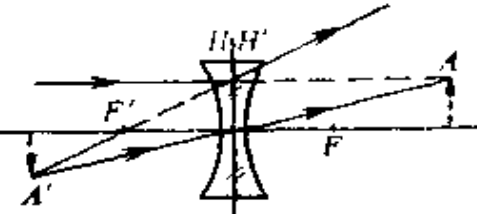


图 2-12 作图法求理想象

表 2-3

示 意 图	物 象 关 系
	<p>物体在无限远，象在焦平面上，为实象。</p>
	<p>物体在两倍焦距外，象在两倍焦距内，为缩小倒立实象</p>
	<p>物体在两倍焦距处，象在另一侧两倍焦距处，为大小相等的倒立实象</p>
	<p>物体在两倍焦距内和一倍焦距之外，象在两倍焦距外，为放大倒立实象</p>
	<p>物体在焦平面上，象在无穷远处</p>
	<p>物体在焦点内，象与物在同一侧，为正立放大虚象</p>

(续)

示意图	物象关系
	<p>物在主点到$-\infty$之间,象在主点到F'之间,为缩小的正立虚象</p>
	<p>虚物点A在主点到F点之间,象点A'在主点到$+\infty$之间,为放大的正立实象</p>
	<p>虚物点A在F点到$+\infty$之间,象点在$-\infty$到F'之间,为倒立的虚象</p>

七、用解析法求理想象

见表 2-4 并参看图 2-13。

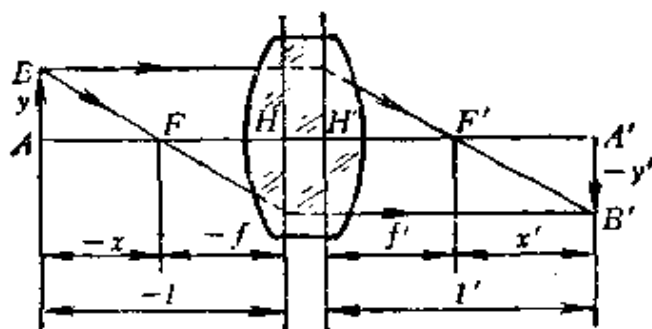


图 2-13

表 2-4

共轭点方程式	牛顿公式(以焦点为原点)		高斯公式(以主点为原点)	
	$n' \neq n$	$n' = n$	$n' \neq n$	$n' = n$
物象位置	$xx' = ff'$	$xx' = -f'^2$	$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$	$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$
物象大小 (垂轴放大率 β)	$\beta = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$	$\beta = \frac{f'}{x} = -\frac{x'}{f'}$	$\beta = -\frac{fl'}{f'l}$	$\beta = \frac{l'}{l}$
轴向放大率 α	$\alpha = -\frac{x'}{x}$	$\alpha = -\frac{x'}{x}$	$\alpha = -\frac{fl'^2}{f'l^2}$	$\alpha = -\frac{l'^2}{l^2}$
角放大率 γ	$\gamma = \frac{x}{f'} = \frac{f}{x'}$	$\gamma = \frac{x}{f'} = -\frac{f'}{x'}$	$\gamma = \frac{l}{l'}$	$\gamma = \frac{l}{l'}$
物象空间不变式	近轴公式		理想光学系统公式	
	$n'u'y' = nu y$		$n'tgU'y' = ntgUy$	
放大率之间关系	$n' \neq n$		$n' = n$	
	$\beta = \gamma\alpha$		$\beta\gamma = 1 \quad \alpha = \beta^2$	
无限远物体理想 象高公式	$y' = f' \lg \omega$		$y' = -f' \lg \omega$	
焦距之间关系	$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$		$f = -f'$	
薄透镜焦距公式	$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$			

八、透镜组成象

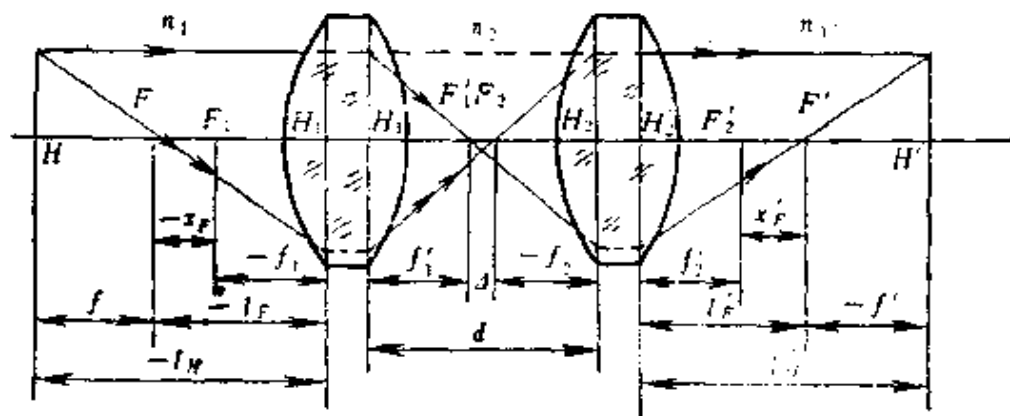


图 2-14

求两块以上透镜的物象关系，只要根据已知单透镜的基点，求出透镜组的基点，然后按前述的牛顿公式或高斯公式确定物象关系。

透镜组的焦点按下式求出：

$$x'_F = -\frac{f_2 f'_2}{\Delta} \quad (2-14)$$

$$x_F = \frac{f_1 f'_1}{\Delta} \quad (2-15)$$

式中 $f_1 f'_1$ 和 $f_2 f'_2$ 分别为两个单透镜的第一焦距、第二焦距； Δ 为第一个透镜的象方焦点 F'_1 到第二个透镜的物方焦点 F_2 的距离。 x'_F 以 F'_2 为计算起点到 F' 。 x_F 以 F_1 为计算起点到 F ，由左向右为正。

透镜组的焦距按下式计算：

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} \quad (2-16)$$

$$f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta} \quad (2-17)$$

透镜组的相对位置除以 Δ 表示外，还可以两个主平面之间的距离 d 表示。 d 的计算起点是第一个透镜的象方主点 H'_1 到第二个透镜的物方主点 H_2 。由左向右为正。

$$d = f'_1 + \Delta - f_2$$

$$\text{即} \quad \Delta = d - f'_1 + f_2 \quad (2-18)$$

把式(2-18)代入焦距式(2-16)并由

$$\frac{f_2}{f'_2} = -\frac{n_2}{n_3}$$

得到：

$$\frac{n_3}{f'} = \frac{n_2}{f'_1} + \frac{n_3}{f'_2} - \frac{n_3 d}{f'_1 f'_2} = -\frac{n_1}{f} \quad (2-19)$$

当透镜组位于同一种介质(如空气)中时， $n_1 = n_2 = n_3$ ，则得

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2} = -\frac{1}{f} \quad (2-20)$$

通常把 $\frac{1}{f}$ 称为光焦度，用 φ 表示，式(2-20)可写作：

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \quad (2-21)$$

当两个透镜的主平面间距离 $d = 0$ ，即密接薄透镜的情况：

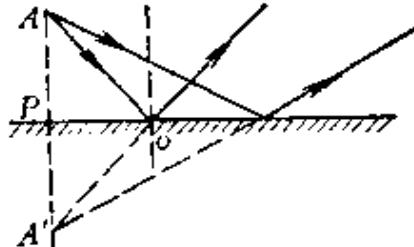
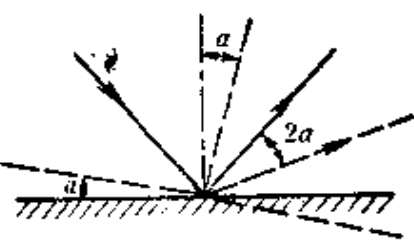
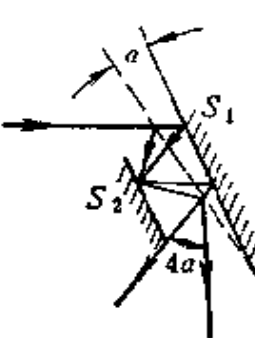
$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (2-22)$$

式(2-22)表明密接薄透镜(如眼镜片)总光焦度等于两个薄透镜(眼镜片两面)的光焦度之和。

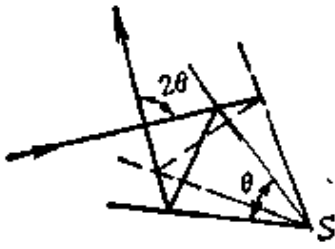
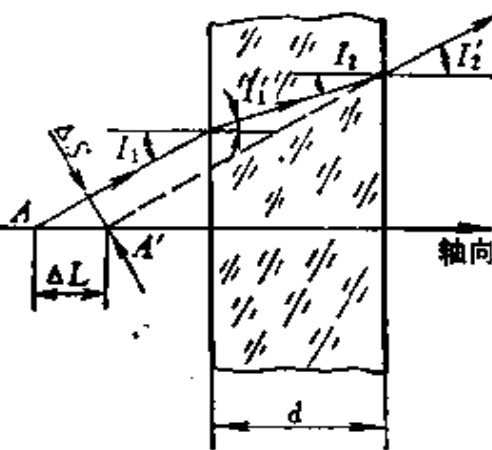
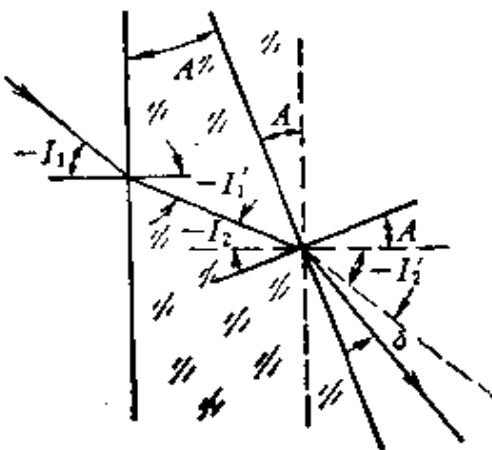
九、平面镜和棱镜成象

见表 2-5。

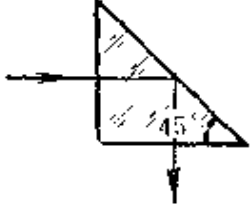
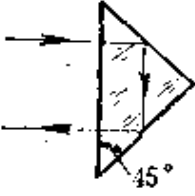
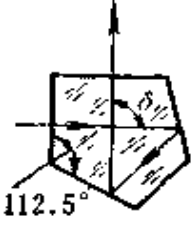
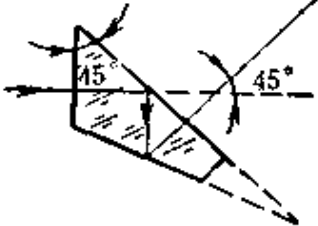
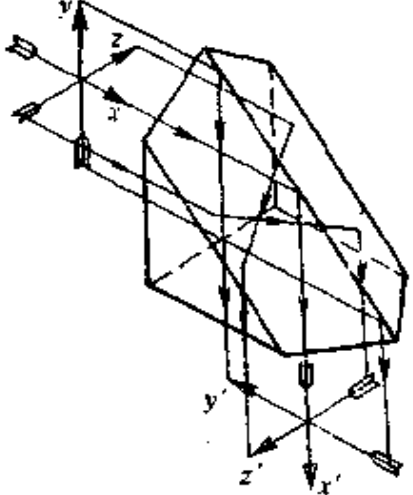
表 2-5

	图 形	说 明
平		<p>1. 物点 A 的象点 A' 在平面镜另一侧，虚象，物与象对称，成理想象</p> <p>2. $AP = A'P$</p>
面		<p>入射光线方向不变，当平面镜转动 α 角时，反射光线转动 2α 角</p>
镜		<p>光线在平面镜 S_1 和 S_2 上反射，当 S_1 转动 α 角时，出射光线随之转动 $2n\alpha$ 角，其中 n 为光线在 S_1 上反射的次数</p>

(续)

	图 形	说 明
平		<p>光线在夹角为 θ 的两平面镜上反射，反射光线与入射光线的夹角为 2θ，当两平面镜同时绕垂直于纸面的 S 轴转动时，反射光线方向不变</p>
面		<ol style="list-style-type: none"> 1. 光线经过平行玻璃板折射后，方向不变，即 $I_1 = I_2'$。 2. 当 I_1 很小时，象点 A' 对于物点 A 的轴向位移 $\Delta L = d \left(1 - \frac{1}{n} \right)$ 3. 当 I_1 很小时，出射光线偏离入射光线的距离 $\Delta S \approx d \left(1 - \frac{1}{n} \right) I_1$ <p>式中：d 为玻璃板厚度；n 为折射率</p>
镜		<p>当光线在楔形镜上的人射角很小时，出射光线的偏角可以下式表示：</p> $\delta = A(n-1)$ <p>式中：A 为光楔的微小楔角；n 为折射率</p>

(续)

	图 形	说 明
		直角棱镜，光线一次反射，改变光轴方向 90°
棱		直角棱镜，光线二次反射，改变光轴方向 180°
		五角棱镜，光线二次反射，改变光轴方向 90°
		半五角棱镜，光线二次反射，改变光轴方向 45°
镜		直角屋脊棱镜，改变光轴方向 90° ，同时使象完全倒转

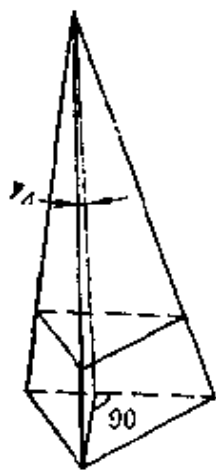
十、反射棱镜的光学平行差

光线从反射棱镜的入射面垂直入射，在出射前对出射面法线的偏差称作反射棱镜的光学平行差。它可以看作把反射棱镜展开成为平行玻璃板后的平行差 θ 。光学平行差以其相互垂直的两个分量表示：在入射光轴截面方向上的光学平行差分量称为“第一光学平行差”，以 θ_1 表示；在垂直于入射光轴截面方向上的光学平行差分量称为“第二光学平行差”，以 θ_2 表示。

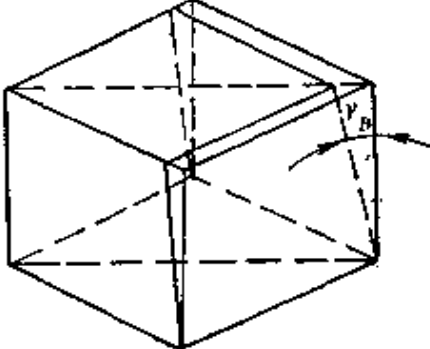
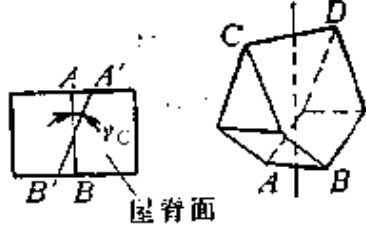
对于入射光轴截面与出射光轴截面是共面的单个棱镜：第一光学平行差是由反射棱镜在光轴截面上的角度误差引起的；第二光学平行差是由反射棱镜的棱的位置误差引起的。这些棱的位置误差称为棱差。

棱差的分类如表 2-6 所示。

表 2-6

名称及代号	示意图	定义
A棱差 γ_A		<p>凡是有三个工作面的棱镜（不限定反射面数），其某一指定的棱与其所对的工作面之间的夹角</p>

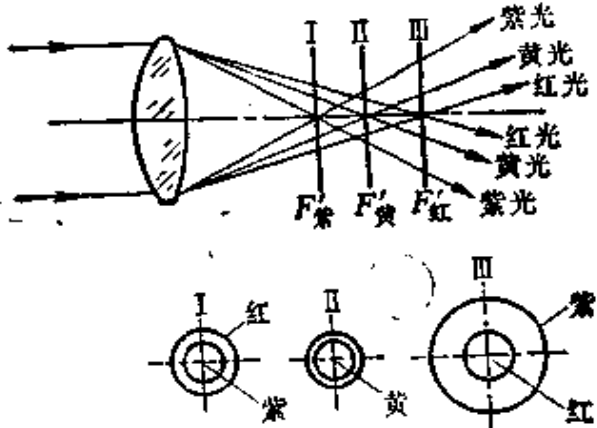
(续)

名称及代号	示意图	定义
B棱差 γ_B		<p>凡是有四个工作面的棱镜，其指定的两个棱在通过两个棱的标准位置的平面上的相对偏转角</p>
C棱差 γ_C		<p>凡是屋脊棱镜，其屋脊棱在通过屋脊棱的标准位置并垂直于屋脊平分面的平面内相对于标准位置的偏转角</p>

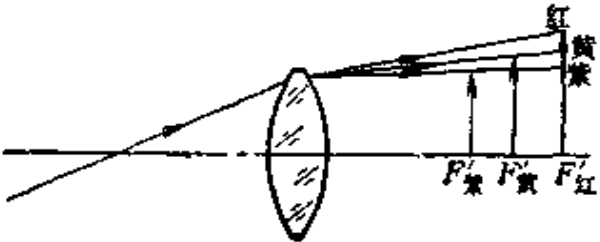
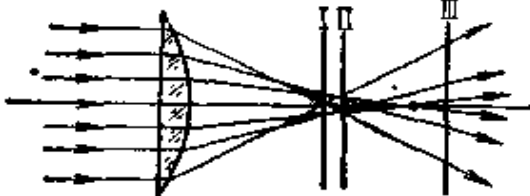
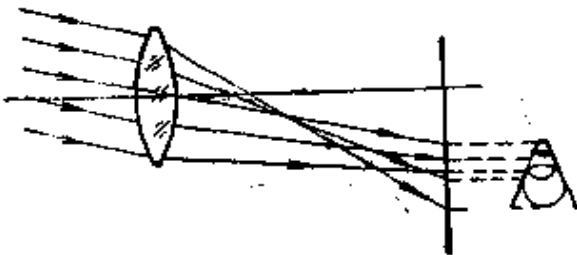
十一、象差概念

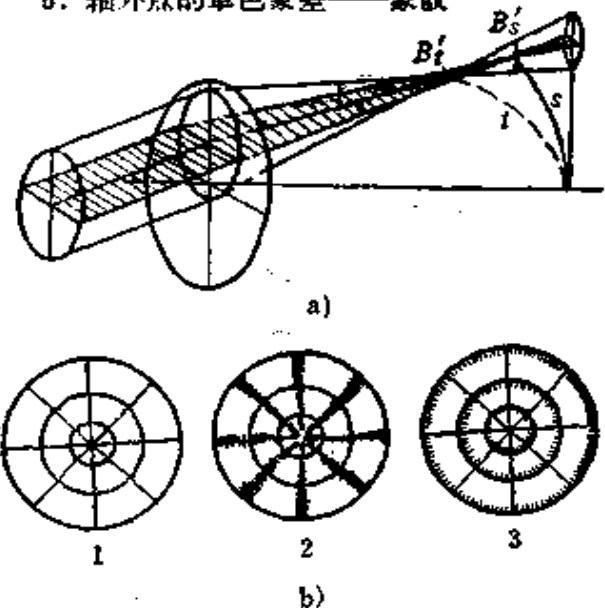
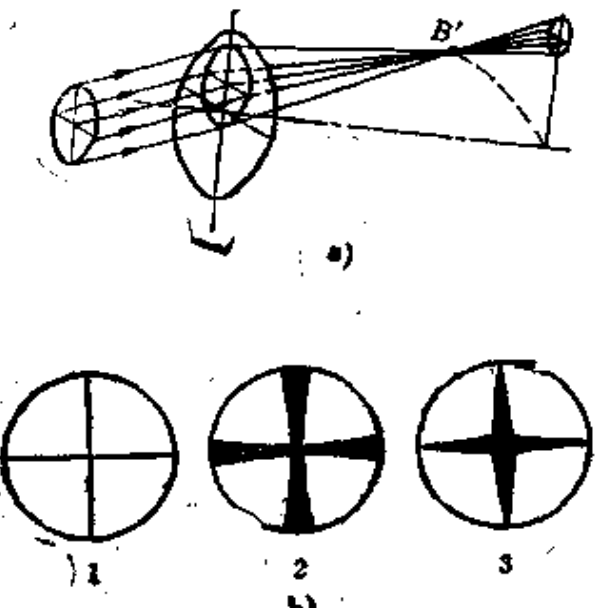
见表 2-7。

表 2-7

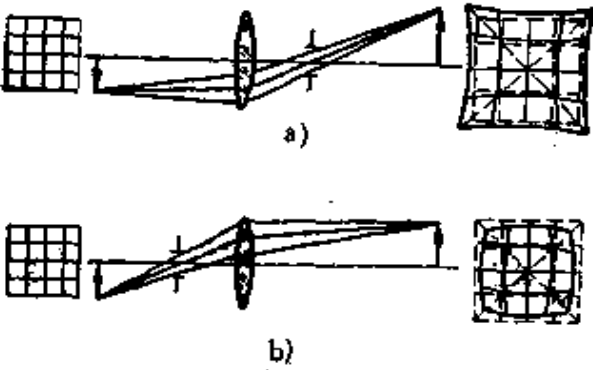
名称	说明
<p>1. 位置色差(轴向色差)</p> 	<p>白光可分解为七种颜色的光，而不同颜色的光对同一种介质的折射率是不同的。因此，对于同一块透镜，一束平行光经过透镜后，其中不同颜色的光的焦点位置是不同的，其差值就称为位置色差</p>

(续)

名 称	说 明
<p>2. 放大率色差(垂轴色差)</p> 	<p>由于各种光的折射率的差异，它们所成的象的高度也不一样，也即放大率不一样。放大率色差使象带有色边</p>
<p>3. 轴上点的单色象差——球差</p> 	<p>一束单色平行光通过一个球面透镜后，它的边缘光线和近轴光线的交点是不同的，两者之差称为球差。球差使轴上物点在任何位置都不可能得到点象而是一个亮斑，称为“弥散圆”。“弥散圆”的大小随不同位置而不同。在左图位置 II 处亮斑最小，称为最小弥散圆</p>
<p>9. 轴外点的单色象差——彗差</p> 	<p>彗差的成因是由于轴外点光束对光轴的不对称性，因而在不同口径上的光线成象于不同位置而使象点成彗星形</p>

名 称	说 明
<p>5. 轴外点的单色象差——象散</p>  <p>1—平面物体 2—象平面位于子午焦线处的象 3—象平面位于弧矢焦线处的象</p>	<p>由于轴外物点发出的光束投射到透镜上时在不同平面内的折射情况不同(参看 a 图), 在弧矢面上(a图阴影线部分)的光线交于 B'_i, 与之平行的上下平面各对光线交于 B'_s 的上下, 形成一条过 B'_i 的短垂线, 称“弧矢焦线”。垂直于弧矢面的各对光线, 形成一条通过 B'_i 点的水平短线, 叫“子午焦线”, 两焦线距离就是象散差。b 图表示一个象散系统对平面物体所成的象</p>
<p>6. 轴外点单色象差——场曲</p>  <p>1—十字线分划板 2—十字线中心调清晰时边缘模糊 3—十字线边缘清晰时中心模糊</p>	<p>场曲的成因是由于近轴物点和轴外物点成象距离不同而形成(参看 a 图)。整个象面为一曲面, 曲面上的象是清晰的, 但当以一个平面(如分划板)作成象面时, 平面上的象就不清楚了(参看 b 图)。</p>

(续)

名 称	说 明
<p>7. 轴外点的单色象差——畸变</p> 	<p>当透镜存在纯畸变时，一个垂直于光轴的平面会变成左图 b 或 a 所示桶形畸变（负畸变）或枕形畸变（正畸变）。这是由于透镜前或后的光阑对轴外物点的光线所起的作用。它使光线经透镜折射后与象面的交点高于或低于理想位置</p>

十二、眼睛和光学仪器工作原理

1. 眼睛

眼睛的解剖示意图如图 2-15 所示。

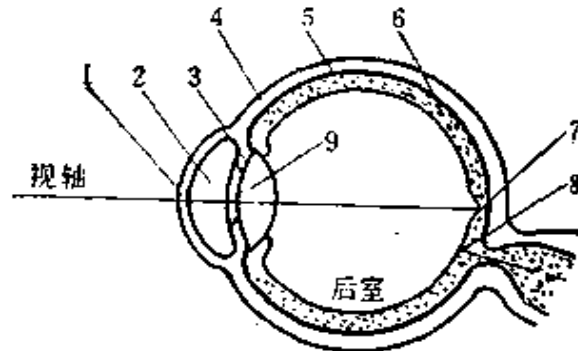


图 2-15 眼睛解剖示意图

1—角膜 2—前室 3—虹彩 4—巩膜 5—脉络膜
6—网膜 7—黄斑 8—盲点 9—水晶体

角膜是由角质构成的透明球面，厚度约为 0.55 mm，折射率为 1.377 1，它是人眼的窗户。

前室是角膜后面的一个空间小区域，深度约为 3.05 mm，其中充满了折射率为 1.337 4 的透明液体，称为水状液。

水晶体是由多层薄膜构成的一个“双凸透镜”，中间较硬，外层较软。在正常状态下，其前表面的半径为 10.2mm，后表面的半径为 6 mm。借助于水晶体周围肌肉的作用，可以使前表面的半径发生变化，以改变“双凸透镜”的焦距，使不同距离的物体都能成象在网膜上。

虹彩中央是一个圆孔，即瞳孔，它能根据被观察物体的亮度而改变口径，以调节进入眼睛的光能量。一般在白天时，瞳孔口径约为 2 mm，夜晚可达 8 mm。

位于水晶体后面的后室充满一种和蛋白质类似的透明液体，叫玻璃液，它的折射率为 1.336。

后室内壁为一层由视神经细胞和神经纤维构成的膜，称为网膜，它是眼睛的感光部分，其中视觉最灵敏的区域叫黄斑。另有一个神经纤维的出口，没有感光细胞，不能产生视觉，叫盲点。网膜外面包围着一层黑色膜，称为脉络膜，它的作用是吸收透过网膜的光线，把后室变成一个暗室。

巩膜是一层不透明的白色外皮，将整个眼球包围起来。

人的视觉作用是由于来自物体的光线，经过角膜及水晶体的折射后，成象在网膜上，使视神经细胞受到刺激而产生视觉。对于正常人，当眼睛处在肌肉放松的自然状态时，无限远物体正好成象在网膜上，即眼睛的象方焦点正好与网膜重合。也就是说，眼睛观察无限远物体时最不容易疲劳。所以，直接用眼睛观察的目视光学仪器，它们的象都应成在无限远，以便眼睛观察时处在没有调节的自然状态。

当观察近距离物体时，为了使物体成象在视网膜上，水晶体周围的肌肉就向内收缩，使前表面半径变小，水晶体焦距缩短。对于正常人，从无限远到 250 mm 的范围内，可以毫不费力地进行调节。这个 250 mm 的近距离称为明视距离，即一般正常的阅读或操作的距离。人眼调节到能看清楚的最近距离(称近点)及肌肉放松时所能看清楚的最远距离(称远点)如表 2-8 所示。表中 p 为近点到眼睛物方主点的距离， r 为远点到眼睛物方主点的距离。由

表可见，到 45 岁时，近点已在明视距离 250 mm 以外，即老年性远视(老花)了。

表 2-8

年龄	$p(m)$	$p = \frac{1}{P}$ (折光度)	$r(m)$	$R = \frac{1}{r}$ (折光度)	$\bar{A} = R - P$ (折光度)
10	-0.071	-14	∞	0	14
15	-0.083	-12	∞	0	12
20	-0.100	-10	∞	0	10
25	-0.118	-8.5	∞	0	8.5
30	-0.143	-7	∞	0	7
35	-0.182	-5.5	∞	0	5.5
40	-0.222	-4.5	∞	0	4.5
45	-0.286	-3.5	∞	0	3.5
50	-0.400	-2.5	∞	0	2.5

表中 \bar{A} 表示眼睛的调节范围或调节能力。

人眼对外界的两个相隔一定距离的物体的分辨本领称为眼睛的鉴别率。它与两个物点在视网膜上的象点距离有关。图 2-16 是视网膜上视神经细胞排列情况示意图。由图可以看出，当两个象点间距不小于两个细胞直径时，即两个象点分别刺激不相邻的两个细胞（图中左上方画有阴影线的六角形），视神经就感觉出是两个点。如果两个点象落在相邻的两个细胞上，那末，阴影就连成一片（如图中左下方所示），视神经就感觉不出（即分辨不出）是两个点象。对于网膜上最灵敏的黄斑区域，视神经细胞直径大约为 0.001~0.003 mm。如果取 0.003 mm 为例，根据公式 $y' = f \tan \omega$ 进行计算，将眼睛的物方焦距 $f = -16.68$ mm 及 $y' = -0.003 \times 2 = -0.006$ 代入上式，得到两物点相对眼睛的视角 ω 为 $1'$ （如图 2-17），即眼睛的视角鉴别率为 $1'$ 。

如果眼睛观察的是两条直线，则鉴别率可以进一步提高。这是因为虽然两条直线的象间隔已在两个细胞直径以内，但是由于两条直线所成的象分别刺激着两列细胞，所以视神经能感觉出它

们的位错（如图 2-16）。表 2-9 是对于不同的分划图形人眼的鉴别率精度。

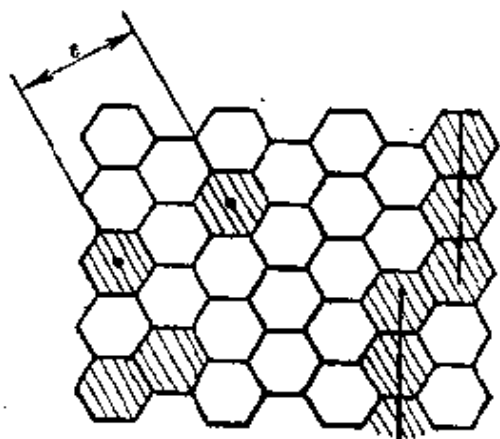


图 2-16 网膜视神经细胞排列示意图

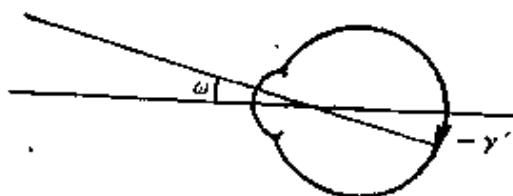
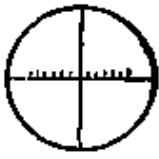
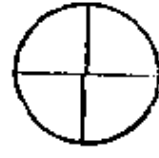

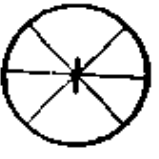


图 2-17

表 2-9 对不同的分划图形人眼的鉴别率精度

分划图形	瞄准方式	精 度
	二实线重合	$\pm 60'$
	二直线的端部对准	$\pm 10' \sim 20'$
	双线对称夹单线	$\pm 5' \sim 10'$
	叉线对准单线	$\pm 10'$

2. 望远镜的工作原理

望远镜是使远距离物体相对于人眼的视角增大的仪器。

同一物体由于远近不同，它们在人眼网膜上所成的象的大小也不同。由于望远镜把远处物体相对于人眼的视角增大了，所以给人以近的感觉，当然对细节的分辨也就较清楚了。其光学原理如图 2-18 a 所示，物镜的象方焦点和目镜的物方焦点重合。来自无限远物点的平行光束经过物镜后成象在象方焦平面上，再经过目镜成为平行光线射出，进入观察者眼中。仪器的视角放大率为

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} \quad (2-23)$$

式中 ω 是入射光束和光轴的夹角； ω' 是出射光束和光轴的夹角，两者正切之比就是望远系统的角放大率。由于把物体看作位于无限远，因此它对人眼的张角和对仪器的张角可认为是相等的，而出射光束和光轴的夹角 ω' 也即物体通过光学系统成象后对人眼的张角（参看图 2-18 b），所以望远系统的视角放大率就等于它的角放大率。

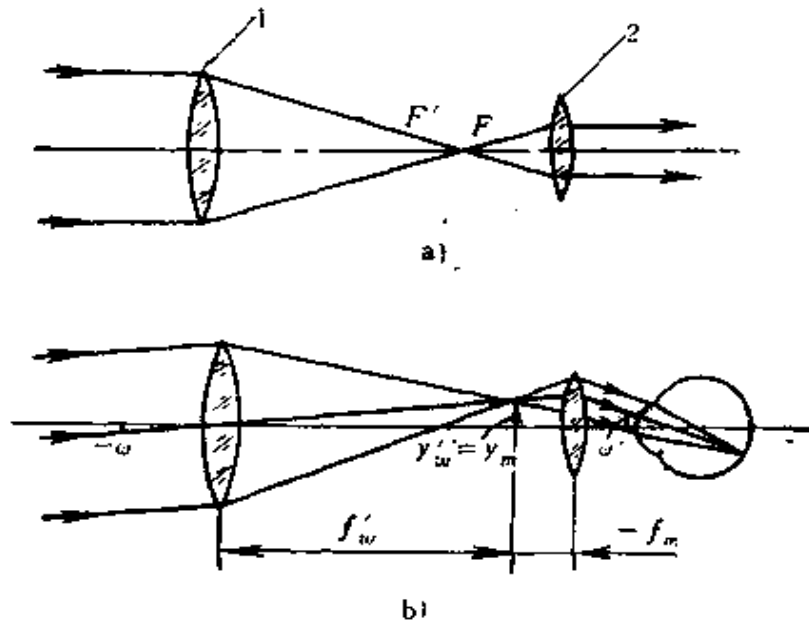


图 2-18 望远镜原理图

1—物镜 2—目镜

根据无限远物体象高计算公式，对于物镜和目镜分别有：

$$\operatorname{tg} \omega = -\frac{y'_w}{f'_w} \quad (2-24)$$

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{y_m}{f'_m} \quad (2-25)$$

式中 y'_w ——物镜象高；
 f'_w ——物镜象方焦距；
 y_m ——目镜物高；
 f'_m ——目镜象方焦距。

将以上关系式代入式 (2-23)，由于 $y'_w = y_m$ ，因此得到

$$\Gamma = -\frac{f'_w}{f'_m} \quad (2-26)$$

上式即为常用的望远系统的视角放大率计算公式。

由式 (2-23) 可以看到，如 Γ 为负值，即 ω' 和 ω 异号，也就是通过望远镜观察到的象是倒立的，如图 2-18 的光学系统观察到的象就是倒立的；如果 Γ 为正值，则象是正立的，如图 2-19 的光学系统观察到的象是正立的。前者在物镜的象方焦平面上可以安放分划板，而后者由于物镜所成的象对于目镜来说是虚物体，故不能安放分划板。一般军用望远镜为了安装分划板又要求得到正立的象，在物镜和目镜之间增加两个转象棱镜，从而得到一个正象系统，如图 2-20 所示。

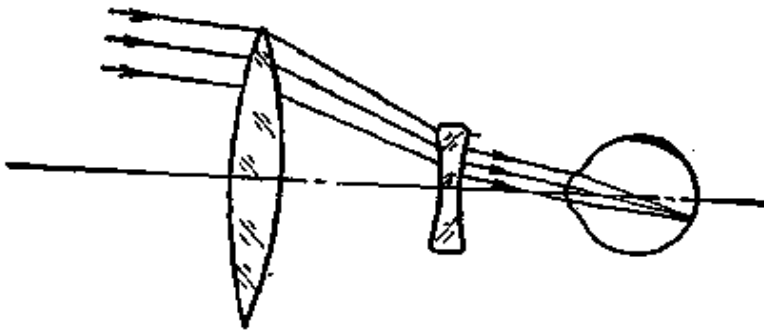


图 2-19 伽利略望远镜原理图

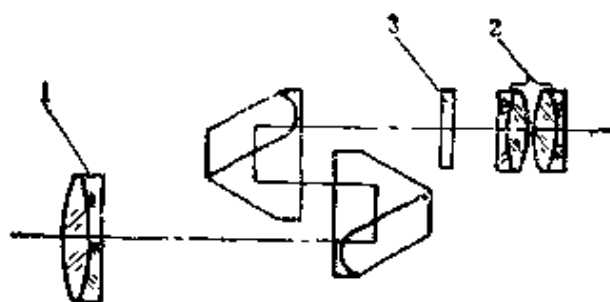


图 2-20 棱镜正象望远镜光学系统

1—物镜 2—目镜 3—分划板

3. 放大镜和显微镜的工作原理

放大镜和显微镜是用来观察近距离微小物体的，使近距离微小物体相对于人眼视角增大，从而在网膜上得到放大的象。图 2-21 是放大镜的工作原理，物体 y 放在焦点 F 附近，经过放大镜后成为眼睛的虚物体 y' （即放大镜的虚象），正立放大，且成在明视距离 250 mm 处。如果放大镜的焦距为 f' ，物体经过放大镜后所成的虚象 y' 对眼睛的视角正切为

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{y'}{-x' + d'} \quad (2-27)$$

式中符号意义参见图 2-21。

如果物体 y 放在明视距离 250 mm 处，直接用眼睛观察，这时物体的视角正切为：

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{y}{250} \quad (2-28)$$

将物体经透镜后所成虚象的视角正切值和肉眼直接观察时的视角正切值相比，即得放大镜的放大率 Γ ，

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{250 y'}{(-x' + d') y} \quad (2-29)$$

将垂轴放大率 $\beta = y'/y = -x'/f'$ 代入上式得：

$$\Gamma = \frac{250 x'}{f'(x' - d')}$$

一般在使用时，眼睛大致在 F' 附近，这时 d' 较 x' 小得多，可忽略不计，则上式就可以写成如下形式

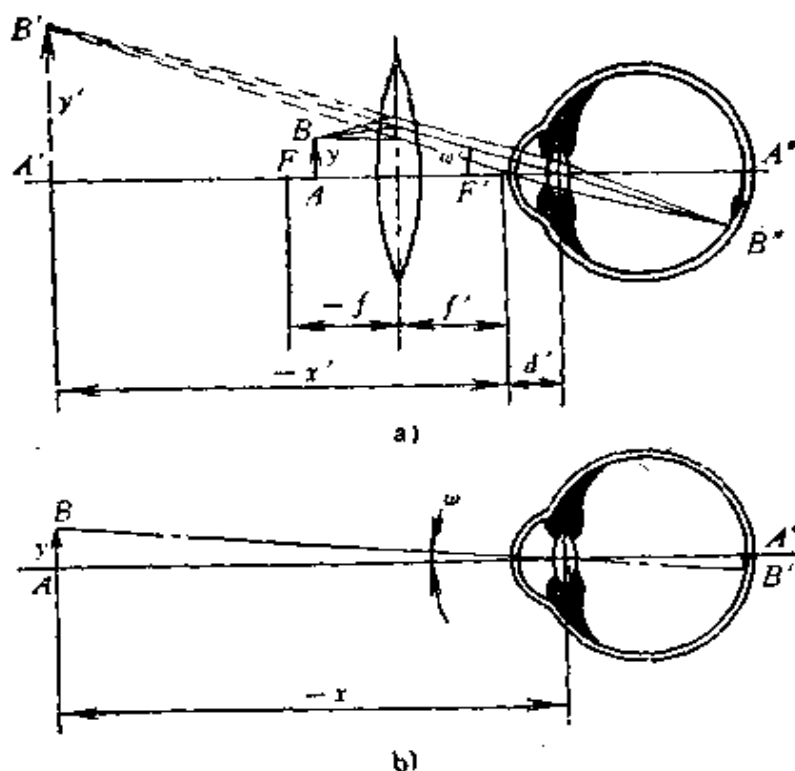


图 2-21 放大镜的放大原理

a) 通过放大镜观察时的视角 b) 眼睛直接观察时的视角

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (2-30)$$

由上式可以看出，放大镜的放大率主要决定于它的焦距。考虑到使用方便，放大镜的焦距不能太短，所以放大镜的倍率一般都不大，常用的在 10 倍以下，少数结构复杂的可达 40 倍。如果需要更高的放大倍率，就要采用具有复杂的光学系统的仪器——显微镜。

显微镜的光学系统如图 2-22 所示。物体 AB 位于物镜的二倍焦距和焦距之间，它经过物镜成象于目镜的物方焦平面（或其附近），为放大倒立的实象 $A'B'$ ，再经过目镜成象在无限远（当 $A'B'$ 在焦平面上）或明视距离处（当 $A'B'$ 在目镜和其第一焦点之间时）。目镜的作用犹如一个放大镜，它把经物镜第一次放大的象再放大一次，所以显微镜的放大率是物镜放大率和目镜放大率的乘积。一般显微镜的物镜和目镜上都刻有放大倍数。

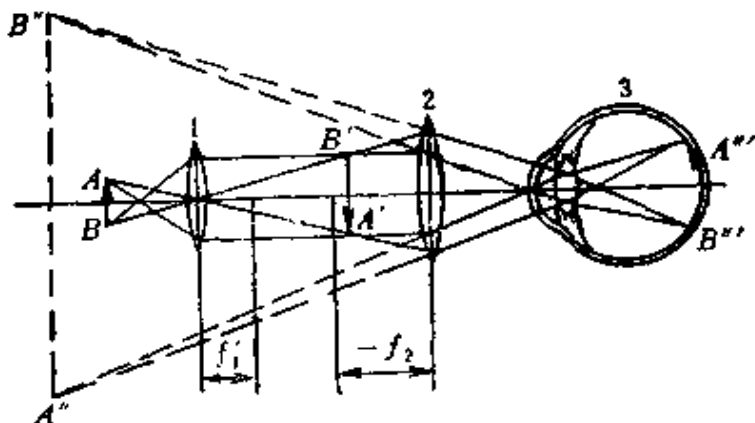


图 2-22 显微镜成象光路图

1—物镜 2—目镜 3—人眼

4. 照相机和幻灯机的工作原理

照相机的工作原理类似于人眼的工作原理。它是将在照相物镜两倍焦距以外的物体，通过照相物镜成象在暗箱的感光底片上，象比实物小，并且是倒立的（参看图 2-23）。调节暗箱长度（老式照相机）或调节照相物镜的透镜之间的距离，使离物镜不同距离的物体能够在感光版上清晰成象。感光版上象的照度可根据被摄物体的光强情况，调节装在镜头上的光阑（俗称光圈）而控制。光强时，缩小光阑孔径；光弱时，加大光阑孔径。象的照度与光阑直径 D 的平方成正比，与镜头的焦距 f' 的平方成反比。也就是说，与 $(D/f')^2$ 成正比。 D/f' 叫做相对孔径。光圈的大小还与被摄对象前后的一定距离间的物体的成象清晰度——景深有关。

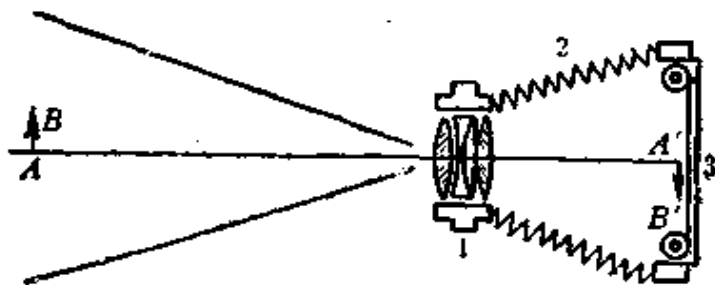


图 2-23 照相机成象示意图

1—物镜 2—暗箱 3—感光底片

幻灯机的作用是将图形或文字投影于屏上成放大实象。图 2-24 是其光路图，从光源 S 发出的光线，通过聚光器 L_1 照明幻灯片 AB ，放映镜头 L_2 使幻灯片上的画面在远处屏幕 C 上成放大倒立的实象（倒插幻灯片即为正象）。为了使幻灯片照明均匀，光源的位置一般在聚光器的焦点和两倍焦距之间，从聚光器出来的光束会聚于放映镜头的光瞳中心。幻灯片位于放映镜头焦点外，并靠近焦点。光源后面的球面镜 M 是为了收集光源 S 向后发射的光线，并使它射向幻灯片。

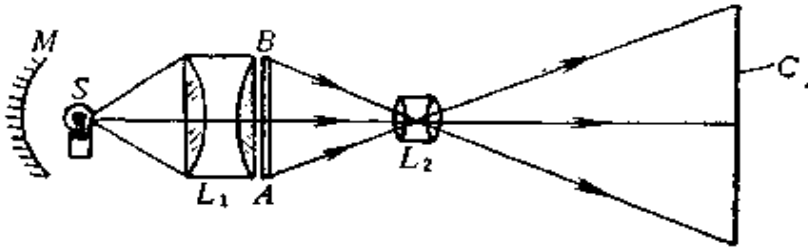


图 2-24 幻灯机原理图

十三、光的干涉

1. 光的干涉现象及相干条件

我们经常可以遇到光的干涉现象，如雨后马路上的彩色油膜、五彩缤纷的肥皂泡等。光的干涉现象是两列或多列光波在一定条件下，在相遇点强度变化的一种特殊情况。一般情况下，两个独立光源（如两盏电灯）所发出的光在某一点相遇时，并不发生干涉。例如，在房间里开亮一盏电灯时，墙上某一点有一定的光强度，开亮两盏电灯时，则该点的光强度等于两个单独光强度之和。但是，如果将房间的两盏灯换成如图 2-25 所示的两个相等的光源 S_1 和 S_2 ，则在墙上有些点的光强度就比单独一个光源 S_1 或 S_2 的光强度要大 4 倍而不是 2 倍，而另一些点的光强度却为零。当 S_1 和 S_2 为单色光时，墙上即出现明暗相间的条纹，这一特殊现象就是由于光的干涉造成的。

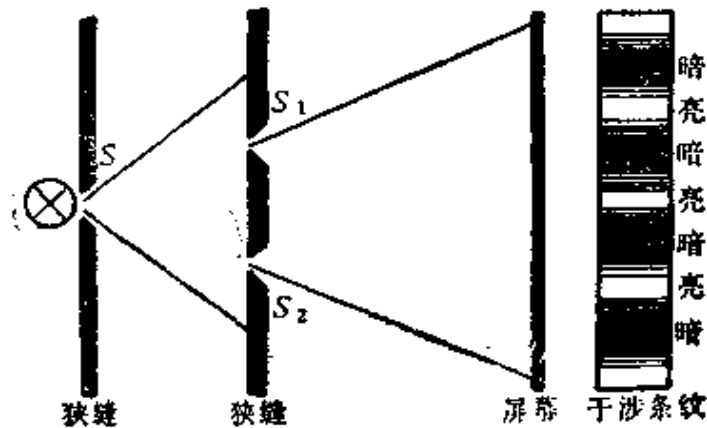


图 2-25

对于在某一点相遇的两列波，如果满足下列条件，就能产生干涉：

- (1) 在空间叠加的两列波，必须波长相等；
- (2) 两列波在相遇点有固定的位相差；
- (3) 两列波在相遇点所产生的振动位移在同一方向。

菲涅耳在 1813 年指出：只要两列波是从同一光源分离出来的，则它们叠加时就会自动地满足以上三个条件。

此外，两列波在相遇点的光程差不能太大，因为原子辐射出的光波是一列一列有限长的波列，当此波列被干涉装置分成同样长的两个波列后，如果光程差太大，两列波就不能相遇。如氪同位素 Kr^{86} 发出的红光(605.78 nm)，其波列长度为 700 mm，那么，两列波的光程差应在 700 mm 以内才会相遇而产生干涉。

2. 平板(薄膜)干涉

对于一块位于空气中的透明薄板(如图 2-26)，假定它的厚度为 d ，折射率为 n ，入射光 S 投射到它的上表面 A 点后，一部分被反射为 S_1 ，另一部分经折射到达第二面 A' 点，光线 AA' 经过第二面反射后为光线 S_2 。当 S_1 和 S_2 通过透镜(或进入人眼)在会聚点相遇时，便产生干涉。相遇点的干涉情形视 S_1 和 S_2 的光程差(位相差)而定。而 S_1 和 S_2 的光程差与薄板的厚度 d 、折射

率 n 及入射角 i 有关。如果在图 2-26 中作 BD 垂直于 S_1 和 S_2 ，使 S_1 和 S_2 自 D 和 B 到相遇点的距离相等，那末， S_1 和 S_2 的光程差就是薄板中的线段 $AA' + A'B$ 和空气中的线段 AD 两者

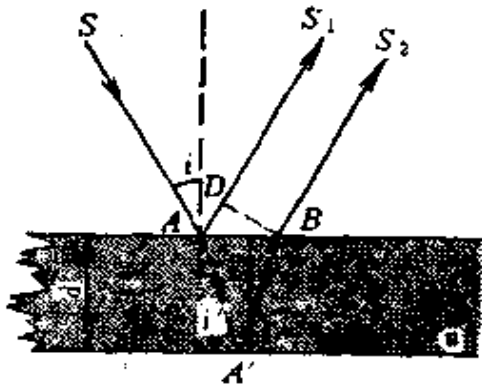


图 2-26 光的干涉

之差。由于光在空气中的速度和在薄板中的速度是不一样的，因此，要比较 $AA' + A'B$ 和 AD 之大小，还需将 $(AA' + A'B)$ 乘以折射率 n 才能和 AD 比较。由此，从图 2-26 可以得到 S_1 和 S_2 的光程差 Δ 为

$$\Delta = 2nd \cos i' - \frac{\lambda}{2} \quad (2-31)$$

式中 $\frac{\lambda}{2}$ 一项是由于 S_1 是从空气(光疏媒质)到玻璃(光密媒质)反射时有“半波损失”。 λ 是光源 S 的波长。

将式(2-31)乘以 $\frac{2\pi}{\lambda}$ ，就得到 S_1 和 S_2 的位相差表达式：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(2nd \cos i' - \frac{\lambda}{2} \right) \quad (2-32)$$

当 S_1 和 S_2 同位相时，即位相差 δ 为：

$$\delta = 2k\pi \quad (k=0, 1, 2, 3 \cdots) \quad (2-33)$$

也即

$$\Delta = 2nd \cos i' - \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (2-34)$$

时， S_1 和 S_2 相遇时有最大光强度；而当 S_1 和 S_2 反位相，即位相差 δ 为：

$$\delta = (2k+1)\pi \quad (2-35)$$

也就是

$$\Delta = 2nd \cos i' - \frac{\lambda}{2} = (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad (2-36)$$

时，有最小光强度。

由式(2-32)可知, 位相差 δ 与透明薄板(或薄膜)的厚度 d 、折射率 n 、折射角 i' 有关。对于折射率均匀、厚度 d 一定的平行平板, 则位相差 δ 只决定于入射角 i , 有相同入射角的光线所形成的反射光经过透镜后在会聚点有相同的位相差, 因而产生干涉, 形成干涉条纹。这种由倾角相同(即入射角 i 相同)的光线形成的干涉条纹称为等倾干涉条纹。由于 S_1 和 S_2 平行(参看图 2-26), 所以等倾条纹定位于无限远。如用透镜对 S_1 和 S_2 聚焦, 则条纹呈现在焦平面上。

如果透明薄板(或薄膜)具有一个微小的楔角 α (如图 2-27), 薄板折射率 n 处处相等, 那末, 当入射角 i 可看作不变的常数时(当光源距薄板较远或观察干涉条纹用的仪器的孔径很小, 如人眼或低倍显微镜, 即可将 Δi 忽略不计), 则反射光相遇点的位相差只决定于厚度 d , 厚度相同的地方有相同的位相差, 而位相差相同的部位的光的干涉形成干涉条纹。这种入射光倾角 i 不变, 而由于薄板(或薄膜)厚度变化而形成的干涉条纹, 称为等厚干涉条纹。

对于一块具有微小楔角的薄板(参看图 2-27), 干涉条纹定位于薄板附近。当入射角 i 不大, 而薄板又很薄时, 可以近似地认为干涉条纹定位于薄板表面, 一般的薄膜干涉就是这种情况。对于图 2-28, 如果楔角 α 是夹在两个表面(如两块抛光玻璃面)间的空气楔, 这时, S_1 没有“半波损失”而 S_2 有“半波损失”, 所以公式(2-31)变为如下形式

$$\Delta = 2 d \cos i' + \frac{\lambda}{2} \quad (2-37)$$

相应地式(2-32)变为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(2 d \cos i' + \frac{\lambda}{2} \right) \quad (2-38)$$

在平面等厚干涉仪及光学加工中观察光圈时, 常常使 i' 近似 0° , 因此, 式(2-37)和(2-38)就成为如下形式

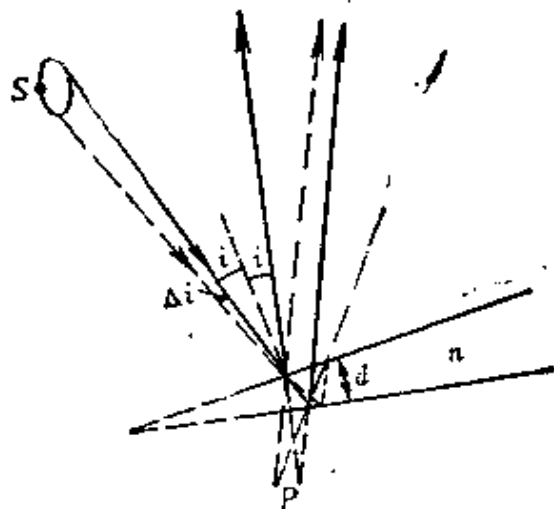


图 2-27 等厚干涉

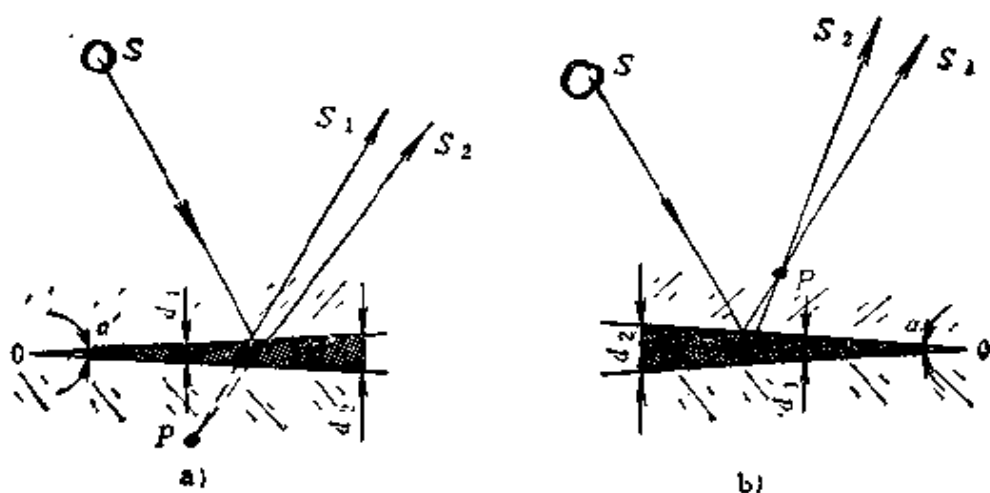


图 2-28 两玻璃表面间为空气楔时的干涉

a) 定位于空气楔下 b) 定位于空气楔上

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (2-39)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(2d + \frac{\lambda}{2} \right) \quad (2-40)$$

形成最大和最小光强度的条件不变, 即当

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (2-41)$$

时有最大光强度。当

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (2-42)$$

时有最小光强度。当两块玻璃表面完全接触(但不能光胶),即 $d = 0$ 时, $\Delta = \frac{\lambda}{2}$, 相干光有最小光强度, 单色光时为0级暗条纹; 当 $d = \frac{\lambda}{4}$ 时, $\Delta = \lambda$, 相干光有最大光强度, 单色光时为一级亮条纹。当 $d = \frac{\lambda}{2}$ 时, $\Delta = \frac{3}{2}\lambda$, 相干光有最小光强度, 单色光时为一级暗条纹。由此可见, 每当 d 变化 $\frac{\lambda}{4}$ 时, 亮暗条纹交替变化一次, 也就是说, 相邻亮条纹或暗条纹的空气楔厚度之差为 $\frac{\lambda}{2}$ 。相隔 N 条亮条纹(或暗条纹)的两点厚度差 Δd (参看图2-29)为

$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2} \quad (2-43)$$

相邻两条亮条纹或暗条纹的宽度与两表面之间的楔角有关。设 e 为条纹宽度, 从图2-29可以看出

$$e = \frac{\Delta d'}{\sin \theta} \quad (2-44)$$

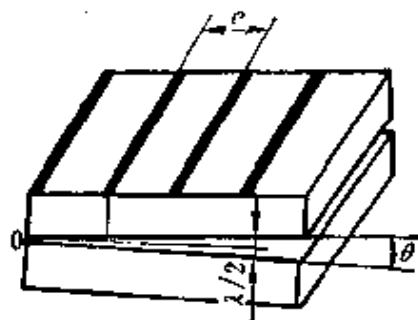


图 2-29 厚度差与光圈数的关系

式中 $\Delta d'$ 为相邻两亮条纹或暗条纹之间空气层厚度差。由于 $\Delta d' = \frac{\lambda}{2}$, 所以得到

$$e = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2-45)$$

一般 θ 都很小, 可以用 θ 代替 $\sin \theta$, 则

$$e = \frac{\lambda}{2 \theta} \quad (2-46)$$

由式(2-46)可以看出, 条纹的宽度随着楔角 θ 的增大而变小, 随着波长的增长而变大。

3. 多光束干涉

前面介绍了一束光投射到一块玻璃板上后，反射光 S_1 和 S_2 两束光相干涉。这种干涉称为双光束干涉。它的特点是干涉条纹较粗，条纹边缘不够锐利，因此测量精度不够高。多光束干涉的特点是条纹锐利，测量精度较高。图 2-30 是多光束干涉原理图。 AB 和 $A'B'$ 是镀有相同高反射率(90%以上)膜的两块平板， AB 平行 $A'B'$ ，间隔为 d ，中间为空气层。来自扩展面光源 S 上任一点的光线到达平板 AB 和 $A'B'$ 后，在两反射面上经过多次反射，一部分成为平行的透射光(1)、(2)、(3)……等等，另一部分成为平行的反射光(1)'、(2)'、(3)'……等等。在这两组光中，相邻光的光程差(或位相差)都相等。当反射率较高时，透射光接近等强度的多光束，相邻光束的光程差为：

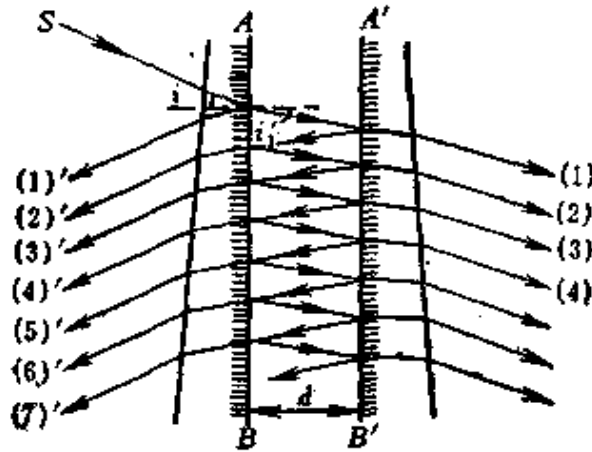


图 2-30 多光束干涉

$$\Delta = 2d \cos i' \quad (2-47)$$

或位相差

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} d \cos i' \quad (2-48)$$

式中 i' 为两镀膜平面间反射光与平面法线的夹角。当此光程差为波长整数倍时，诸光束在相遇点得最大光强度，称为干涉主最大，干涉条纹定位在无穷远(或透镜的焦面上)。由于是扩展面光源和平行平面，故条纹为一组同心圆(参看图 2-31)，属等倾条

纹。诸相干光束干涉主最大的光强度 I_T 的计算如下式：

$$I_T = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}} \quad (2-49)$$

式中 I_0 为来自光源 S 的入射光束的强度， R 为反射系数， δ 为位相差。由式(2-49)也可以看出，当 R 一定时，光强只与位相差有关；而当 d 一定时，位相差只与 i' 有关， i' 角相同的光束形成同一条纹——等倾条纹。当位相差由波长的整数倍 $2k\pi$ 稍一改变，诸光束合成的光强度就迅速变小。反射率愈高，参与干涉的有效相干光束愈多，诸光束合成光强度的减弱就更快和更小(如图 2-32)，反映在干涉图形上就是暗背景面积很大，亮条纹面积很小，因而条纹显得很锐利。

多光束的反射光干涉图样和透射光的图样正好相反，在透射光为亮线的部位，反射光的干涉条纹为暗线，即反射光的多光束干涉为亮背景下的暗线，由于观察起来不如透射光的条纹清楚，故一般不采用。

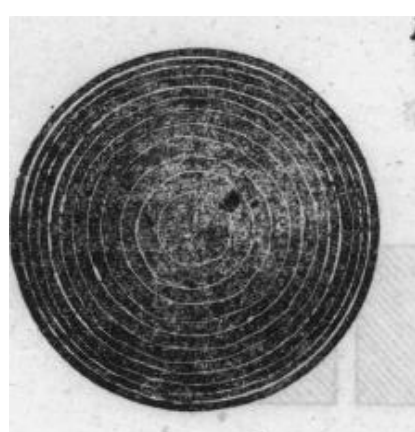


图 2-31 多光束透射干涉图

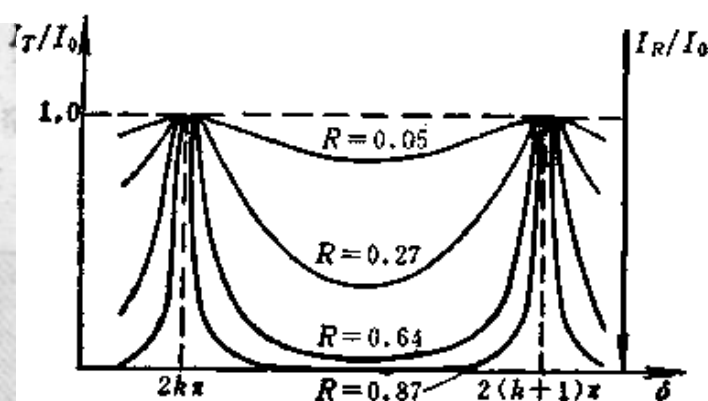


图 2-32

十四、光的衍射

光波绕过障碍物的边缘，偏离原来的直线传播方向继续前进，称为光的衍射，又称绕射。例如，一列平面波遇到一个宽度与波

长接近的狭缝或小孔时,通过狭缝或小孔的波改变了形状,也即波的传播方向发生了变化,其变化的大小与狭缝或小孔的尺寸有关。尺寸小时,变化就大些,如图 2-33 所示。衍射现象在狭缝或孔的尺寸与波长接近时最明显,如图 2-34 所示,当孔较大时,孔后的屏幕上是一个明亮而边缘清晰的光斑(如图 2-34a);随着孔的缩小,光斑也随之缩小(如图 2-34b);但当孔缩小至一定尺寸时,光斑又开始变大,同时边缘不再是清晰的轮廓。光斑的亮度也发生了变化,由原来的均匀分布变为一系列明暗相同的圆环(如图 2-34c)。

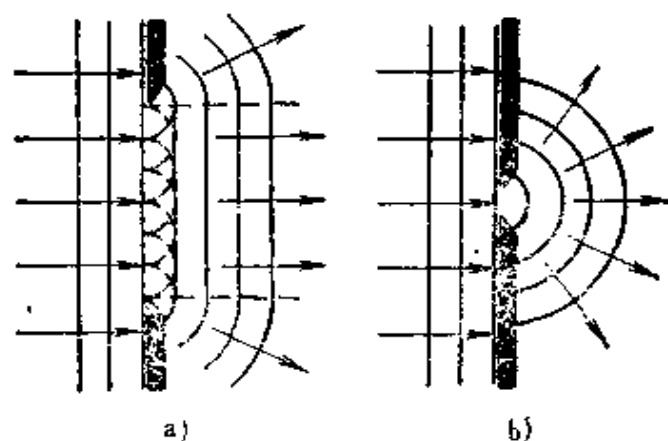


图 2-33 光的衍射
a) 缝较宽 b) 缝较窄

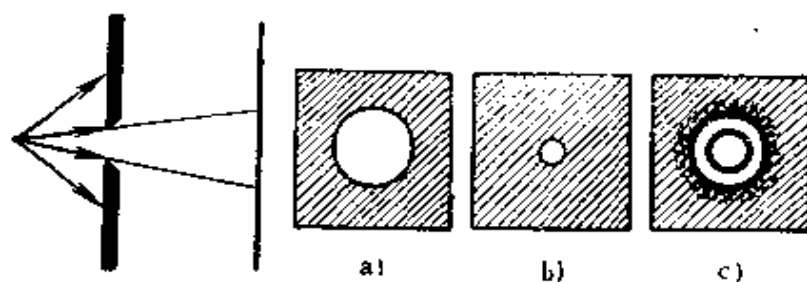


图 2-34 小孔衍射
a) 孔较大时 b) 孔较小时 c) 孔更小时

根据孔或缝和光源及屏幕之间的距离,衍射分为菲涅耳衍射和夫琅和费衍射两种类型,如图 2-35 所示。其中 a 为菲涅耳衍射,

孔到光源和屏的距离为有限远，也即入射光和衍射光均不是平行光；b 和 c 为夫琅和费衍射，孔到光源和屏的距离为无限远或相当于无限远，也即入射光和衍射光均是平行光。

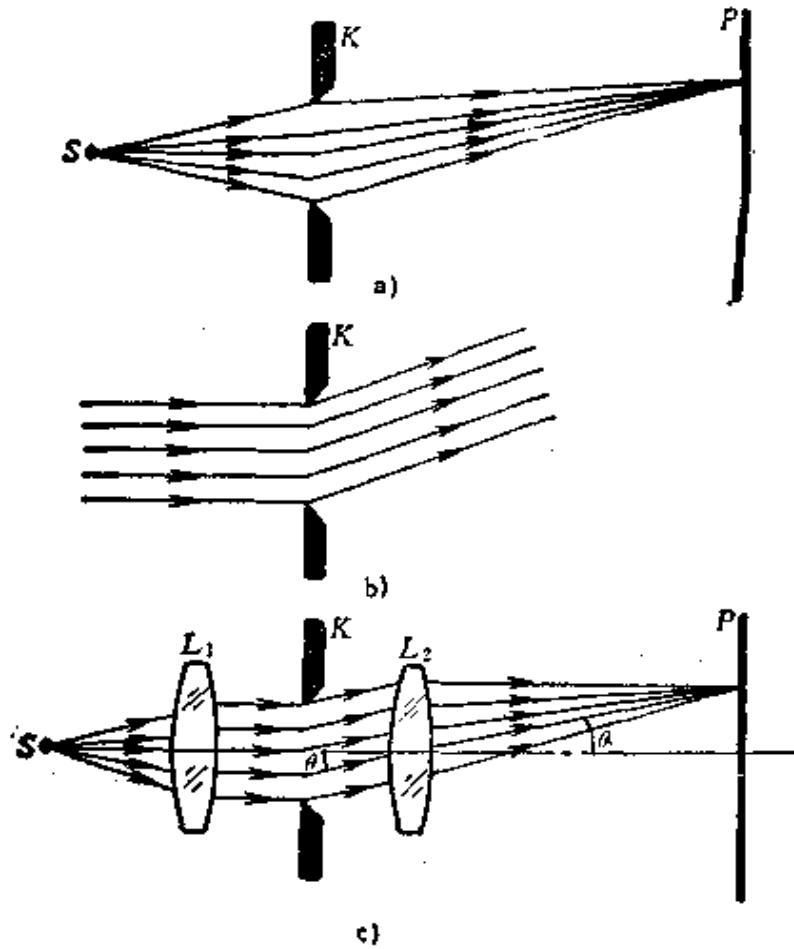


图 2-35 衍射种类

e) 菲涅耳衍射 b) 夫琅和费衍射 c) 光学仪器中夫琅和费衍射

衍射现象的解释可用惠更斯-菲涅耳原理；光波传播过程中某一波面的每一点都是产生子波的新波源，这些点发出的子波的包络面就是新的波前。由新波前所决定的传播方向，就是新的波传播方向(参看图 2-33)。当这些来自同一波面的子波在空间某一

点相遇时,符合相干条件而发生干涉,形成明暗相间的条纹,如图 2-36 所示。图 2-37 为夫琅和费圆孔衍射装置示意图。

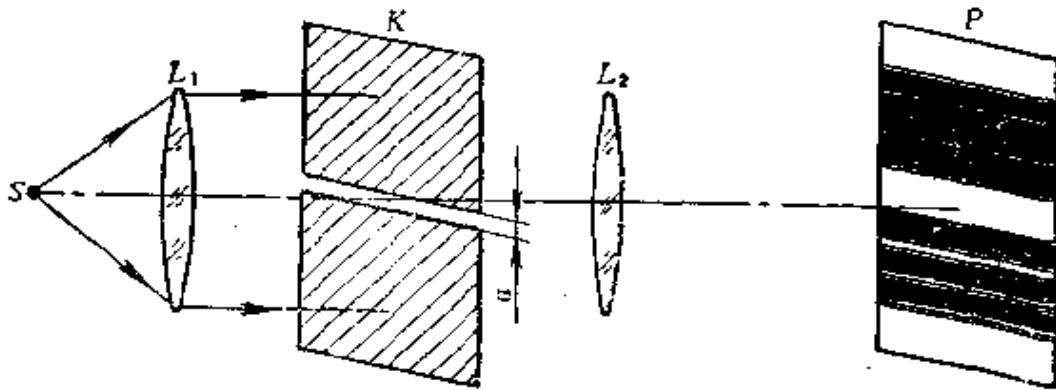


图 2-36 夫琅和费单缝衍射

S —光源 L_1 —准直透镜 L_2 —会聚透镜 K —狭缝板 P —影屏
 a —狭缝宽度

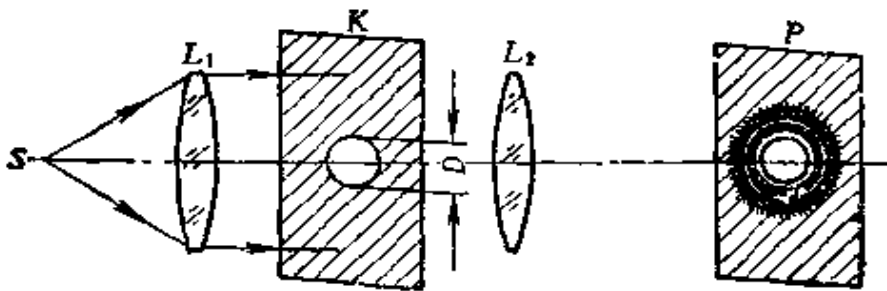


图 2-37 圆孔衍射

S —光源 L_1 —准直透镜 L_2 —会聚透镜 K —小孔板 P —影屏
 D —小孔直径

图 2-38 为夫琅和费圆孔衍射条纹位置及光强度分布与衍射角 θ 的关系。衍射角 θ 的含意如图 2-35 所示。

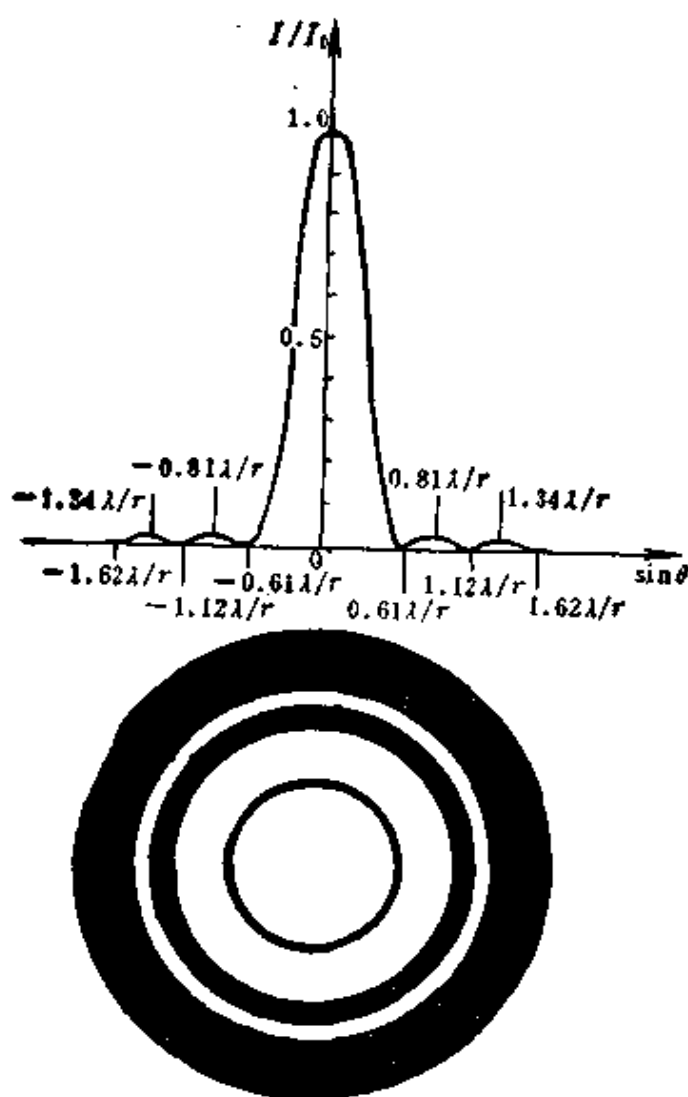


图 2-38 夫琅和费圆孔衍射图样

表 2-10 是各级衍射环(衍射条纹)位置与相对光强度的关系。表中 λ 为照明单色光源的波长, I/I_0 表示衍射光相对于中央亮斑中心的相对光强度, r 为衍射孔的半径。

图 2-38 的中央亮斑称为“爱里斑”, 它集中了通过圆孔总光能量的 84% 左右。“爱里斑”的边缘衍射角 θ_0 可按下列式计算:

$$\sin\theta_0 = 0.61 \frac{\lambda}{r} \quad (2-50)$$

一般 θ_0 都很小, 因此可用 θ_0 代替 $\sin\theta_0$, 即

表 2-10

衍射环	衍射角 $\sin \theta$	相对强度 I/I_0
中央亮斑	0	1
第一暗环	$0.61 \frac{\lambda}{r}$	0
第一亮环	$0.81 \frac{\lambda}{r}$	0.0174
第二暗环	$1.12 \frac{\lambda}{r}$	0
第二亮环	$1.34 \frac{\lambda}{r}$	0.0041
第三暗环	$1.62 \frac{\lambda}{r}$	0
第三亮环	$1.85 \frac{\lambda}{r}$	0.0016

$$\theta_0 = 0.61 \frac{\lambda}{r} \quad (2-51)$$

如用衍射孔的直径 $D (= 2r)$ 来表示, 则有

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2-52)$$

衍射屏上“爱里斑”的半径 ρ 与衍射角 θ_0 及会聚透镜 L_2 的焦距 f 之间的关系如式(2-53):

$$\rho = f \tan \theta_0 \approx f \theta_0 \quad (2-53)$$

即

$$\rho = 1.22 \frac{\lambda f}{D} \quad (2-54)$$

十五、光的偏振

1. 偏振光的特点和获得方法

光是一种电磁波, 它的传播是相互垂直振动的电场和磁场的

传播，如图 2-39 所示。由于电场和磁场的相应关系，为简便起见，在讨论光的波动性质时，常选电场为代表。光波是一种横波，即它的振动方向和传播方向互相垂直(如图 2-39)。

一个普通光源向周围空间辐射出无数振动方向不同互不干扰的电磁波，它们是独立传播的。图 2-40 是其示意图，箭头方向表示各个电磁波的传播方向。如果一列光波的电场振动方向只在一个固定的平面内，这样的光称为平面偏振光，简称偏振光。如果正对着光波的传播方向看去，光波的电场振动方向为一直线，故平面偏振光又称直线偏振光(如图 2-40b)。如果电场振动方向随着时

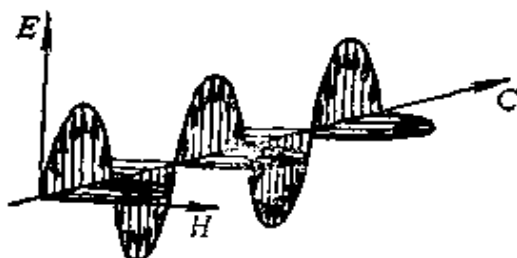


图 2-39 光的传播

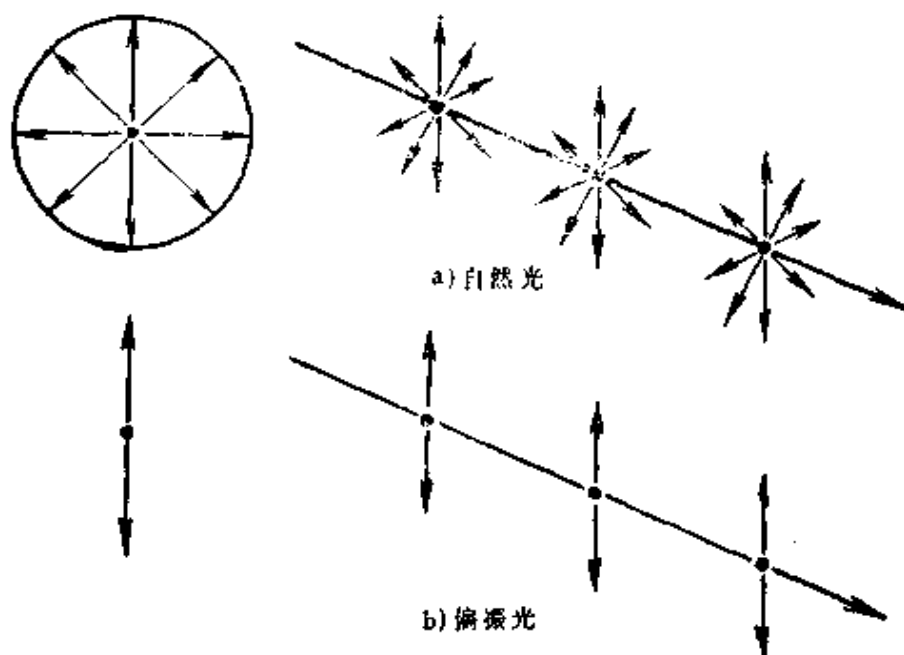


图 2-40 自然光和偏振光

间作有规则的变化,正对它的传播方向看去,电场振动在垂直于传播方向的平面上的轨迹呈椭圆或圆,这样的光称椭圆偏振光或圆偏振光。介于偏振光和自然光之间的还有部分偏振光,它是某个方向电场振动强些,而和它垂直的另一方向振动弱些。

偏振光的获得可以由自然光通过人造偏振片、光的反射和折射以及通过某些双折射晶体等方法来获得。

人造偏振片的作用是使自然光通过它后只有一个固定的电场振动方向,成为线偏振光。反射和折射产生的偏振光如图 2-41 所示,一束自然光以入射角 i , 投射到折射率为 n 的介质分界面上后,反射光和折射光都成为部分偏振光。在反射光中,垂直于纸面的振动多于平行于纸面的振动;在折射光中正好相反,平行于纸面的振动多于垂直于纸面的振动。当反射光与折射光垂直时,即反射角 i_0 与折射角 r 之和为 90° 时,则反射光成为全偏振光,折射光为部分偏振光。反射光为全偏振光时的入射角 i_0 称为全偏振角(又称布儒斯特角)。满足反射光为全偏振光的条件是

$$\operatorname{tgi}_0 = n \quad (2-55)$$

式(2-55)称为布儒斯特定律,它对金属介质是不适用的。

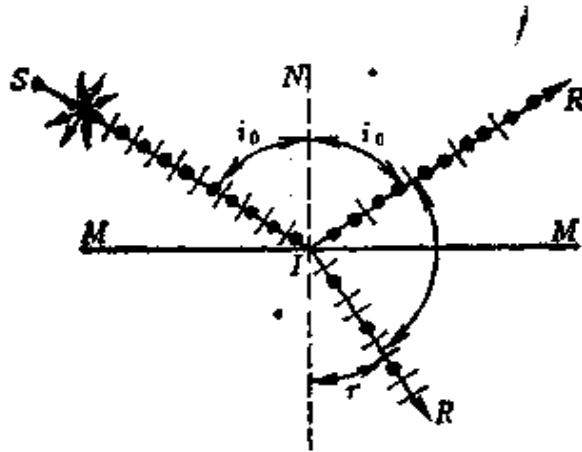


图 2-41 反射和折射产生偏振光

·——垂直于纸面的电场振动方向 -——平行于纸面的电场振动方向

光的偏振还可以由双折射晶体获得,如图 2-42,一条垂直投射于方解石(CaCO_3)晶体的自然光分解为两条光线,其中一条遵

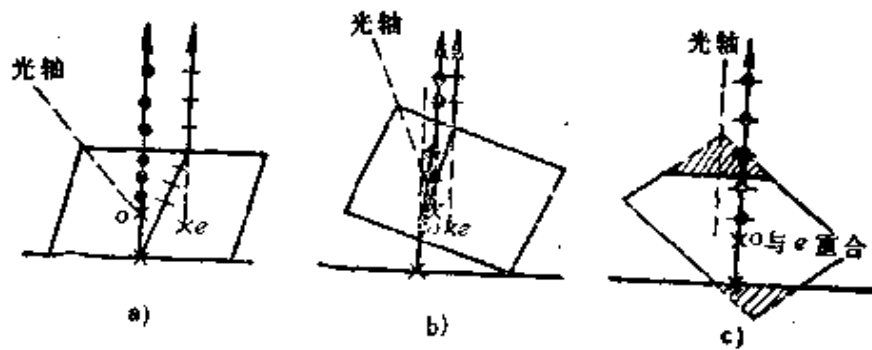


图 2-42 双折射

- a) 自然光分解为 o 光和 e 光 b) 改变入射光角度, o 光和 e 光距离也改变 c) 自然光沿光轴方向入射, 不发生双折射(阴影线部分已磨去)

循以前介绍过的折射定律,称为寻常光线或 o 光,另一条即使当入射角为零度时,也可能发生偏折,并不遵守折射定律,称为非寻常光线或 e 光。 o 光和 e 光都是线偏振光。上述现象称为晶体的双折射,它能使一个物点形成两个象点。当改变自然光线的入射角时, o 、 e 两条光线的位置和距离也会随着改变(如图 2-42 所示)。当转动晶体到某一位置时,入射光就不再发生双折射现象(如图 2-42c 所示),晶体对入射光线不发生双折射的这一特殊方向称为晶体的光轴(晶体的光轴不同于几何光学上的光轴,晶体光轴指的某个方向而不是一条线)。包含晶体光轴和光线的平面称为晶体的主截面。只有一个光轴方向的晶体称为单轴晶体。有些晶体如云母、蓝宝石等具有彼此相交成一定角度的两个光轴方向叫双轴晶体。晶体对 o 光和 e 光的折射率分别用 n_o 和 n_e 表示。在光轴方向, $n_e = n_o$,垂直于光轴方向, n_e 与 n_o 的差别最大。表 2-11 是单轴晶体对波长 589.3nm 的单色光的 n_o 与 n_e 的值。

对于 $n_e < n_o$ 的晶体,称为负晶体; $n_e > n_o$ 的晶体,称为正晶体。

图 2-43 是用由方解石制造的尼科耳棱镜获得偏振光。图面就是它的主截面, $A'D'$ 是由加拿大胶胶合的抛光面。入射光在前半个棱镜中分解为振动面互相垂直的 o 光和 e 光, o 光以约 76° 的

表 2-11

晶体名称	n_o	n_e
方解石	1.658 3	1.486 4~1.633 3
电气石	1.640	1.620~1.640
硝酸钠	1.585 4	1.336 9~1.585 4
水晶	1.544 2	1.544 2~1.553 3
硝酸钾	1.493	1.493~1.502
冰	1.306	1.306~1.307

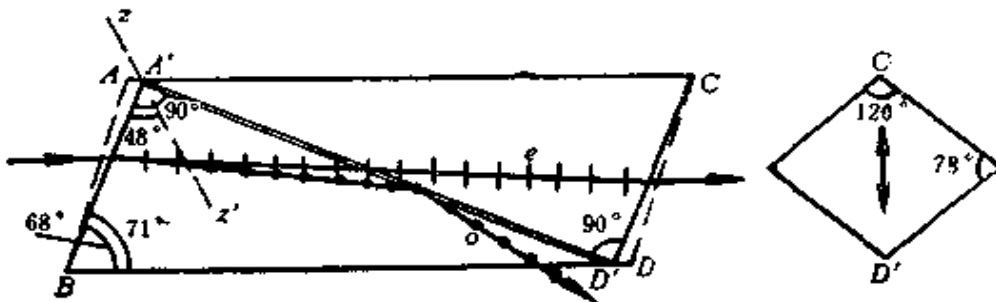


图 2-43 尼科耳棱镜

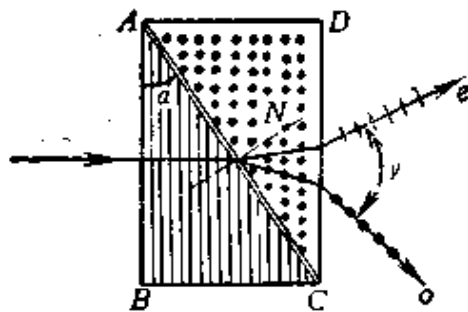


图 2-44 渥拉斯顿棱镜

入射角投射在胶层上。对 o 光来说, 胶层相对于方解石是光疏介质 (方解石的 $n_o=1.658$, 加拿大胶的 $n_o=1.55$), 当入射角大于临界角 (约 70°) 时, o 光自胶层全反射, 因此不能进入胶层后面的半块棱镜, 而 e 光由于 $n_e=1.468$, 在胶层上不产生全反射, 所以能通过后半部尼科耳棱镜, 它的振动方向在主截面内。从尼科耳棱镜的端面看去, 此 e 光的振动方向平行于平行四边形的对角线 CD' (参看图 2-43)。

图 2-44 是渥拉斯顿棱镜, 它由方解石或石英晶体制成, 能产

生振动面互相垂直的两个平面偏振光。棱镜 ABC 的光轴平行于直角边 AB , 棱镜 ACD 的光轴平行于折射棱 C (即垂直于纸面)。一束垂直投射到 AB 面的非偏振单色光, 进入棱镜后将分解为 o 光和 e 光, 但是并不分开, 沿着同一直线以不同速度传播, 到达 AC 面后, 由于光线振动方向不变而光轴已改变, 因此 o 光变为 e 光, 对于用方解石制造的棱镜来说, 由于 $n_o > n_e$, 这条光线相当于从光密媒质射向光疏媒质, 因此进入棱镜 ACD 后便向下折射, 最后从棱镜 ACD 射出时, 又一次向下折射; 在棱镜 ABC 中的 e 光和 ABC 中的 o 光的情形正好相反, 两次都是向上折射, 结果使 o 光和 e 光分开一个角度 γ 。

2. 波片

从单轴双折射晶体上, 平行于光轴 (或平行于晶体的主截面) 切下来的薄片, 称为波片 (或阻波片)。当一束自然光或振动面与光轴成 θ 夹角的单色线偏振光垂直投射到波片表面后 (如图 2-45 所示, 波片表面垂直纸面), 被分成两束直线偏振光, 一束振动方向与光轴平行 (e 光, 图中以横线代表), 另一束与光轴垂直 (o 光, 图中以黑点代表)。 o 光在晶体内向任何方向的传播速度都相等, e 光除光轴方向和 o 光速度相等外, 其他方向均不同。当晶体是负晶体时, (如方解石) e 光将快于 o 光 (图 2-45 a); 当晶体是正晶体时 (如水晶), o 光将快于 e 光 (图 2-45 b), 两者产

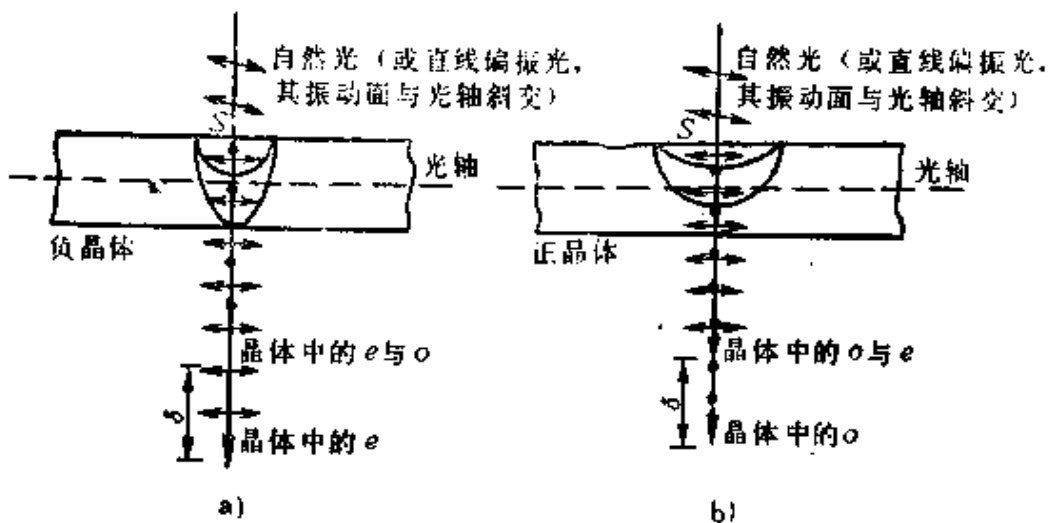


图 2-45 光在波片内被分成 o 光与 e 光

生一定光程差 Δ 或位相差 δ

$$\Delta = (n_o - n_e)l \quad (2-56)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e)l \quad (2-57)$$

式中 λ_0 为投射光在真空中的波长。由式(2-56)或(2-57)可以看出, 光程差 Δ 或位相差 δ 与波片厚度有关。如果一个波片厚度正好使透出来的两束光的光程差 Δ 等于入射光的波长或波长的整数位, 这个波片就称为这种波长的全波片。如果透过的两束光的光程差 Δ 正好是半个波长或 $1/4$ 波, 则称为半波片或 $1/4$ 波片。

3. 偏振光的干涉

要使偏振光发生干涉, 除了两列光波具有相同的频率和恒定的位相差以外, 还必须使两列偏振光相遇时的电场振动方向相同。图 2-46 是偏振光干涉的实验装置示意图, N_1 和 N_2 为两个尼科耳棱镜, K 为两表面平行的单轴晶体薄片, 光轴平行于薄片表面。当 N_1 和 N_2 的偏振面成正交状态时, 如果没有晶片 K , 则平行光透过 N_1 后成直线偏振光, 由于 N_2 的偏振面垂直 N_1 , 因此由 N_1 产生的线偏振光不能通过 N_2 , 在 N_2 后面的视场是暗的。当插入晶片 K 后, 则 N_2 后面的视场不再是完全黑暗的。如果光源是自然光(白光), 在 N_2 后面将观察到某种彩色, 它是由于晶片 K 产生的两束线偏振光通过 N_2 后发生干涉的结果。这种由偏振光的干涉而产生的颜色称为色偏振。具体色彩视两束光的位相差而定, 而位相差由晶片厚度及 $n_o - n_e$ 而定。如果光源是白光, 由于白光是各种颜色光的混合, 当位相差 δ 符合某种颜色的加强条件时, 视场就出现均匀一致的颜色。如果晶片为楔形, 就出现各种彩色条纹(单色光时为明暗相间的条纹)。

如果入射到晶片表面的光线是会聚线偏振光, 则观察它们干涉的装置如图 2-47 所示。晶片 K 的光轴垂直于自身表面, 并和仪器光轴平行。透镜 L_1 使来自 N_1 的线偏振光会聚在晶片 K 上; 透镜 L_2 使来自晶片的光成平行光射向与 N_1 正交的 N_2 。在 N_2 后面观察到的干涉图样如图 2-48 a 所示。其中黑十字线称为等旋

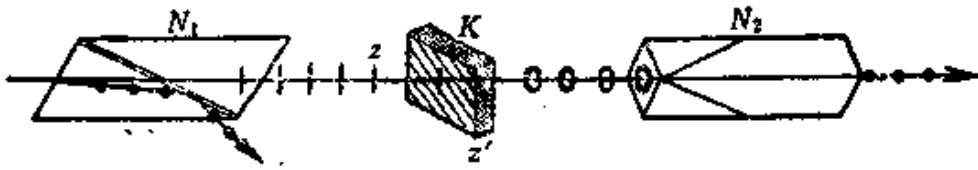


图 4-46 平行平面偏振光干涉实验装置

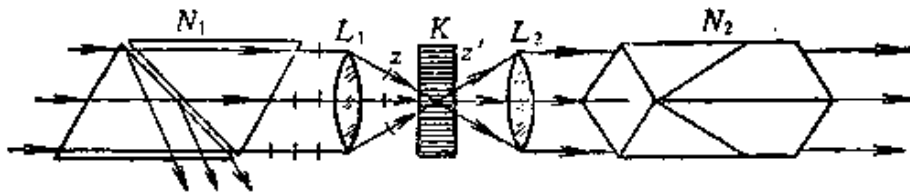


图 2-47 会聚平面偏振光干涉实验装置

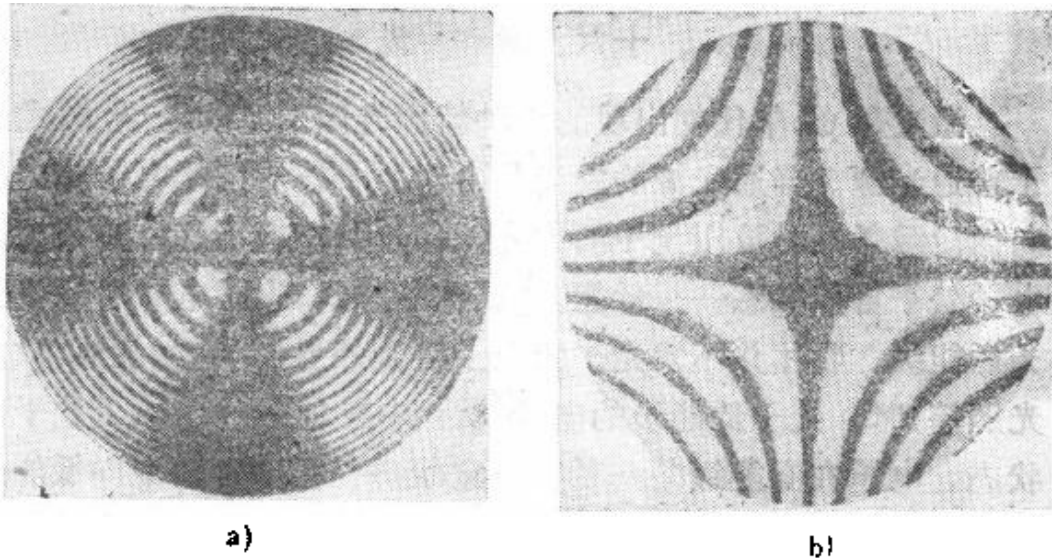


图 2-48 会聚偏振光干涉图

- a) N_1 垂直 N_2 , 光轴垂直于切片(方解石)表面
 b) N_1 垂直 N_2 , 光轴平行于切片(石英)表面

线, 它的一条线的方向与 N_1 平行, 另一条的方向与 N_1 垂直。围绕黑十字线中心的同心圆视所用光源不同而为明暗相间的圆环(单色光时)或彩色圆环(白光时), 这些圆环称为等色线。图 2-48 b 是光轴平行于石英切片表面, N_1 垂直于 N_2 时的干涉图。

4. 物质的旋光性

当偏振光沿着某些单轴晶体的光轴方向传播时，虽然并不产生双折射，但却使偏振光的振动面旋转某一角度，某些晶体的这一性质称为旋光性。例如在两个正交的尼科耳棱镜间放入一片光轴垂直于晶片表面的石英片，当光源是单色光时，在 N_2 后面观察时视场是亮的，然后旋转 N_2 至某一角度，视场又变暗了，这说明偏振面被石英片旋转了一定角度。如果光源是白光，在 N_1 垂直 N_2 的情况下，放入石英片后视场是彩色的，旋转 N_2 时视场颜色随着变化，这说明旋光能力还与波长有关(旋光色散)。当对着光源射来光线的方向看去，振动面沿顺时针方向旋转，称为右旋；沿逆时针方向旋转，称为左旋。偏振面旋转的角度与晶片厚度成正比。石英晶体有左旋和右旋两种类型，其中一个外形是另一个外形的镜像。

十六、激 光

激光是 60 年代初出现的一种新颖光源。它的发光方式不同于普通光源。普通光源的发光是由于原子核周围的电子从高能级向低能级跃迁时放出光子而发光。在一般情况下，原子核周围的电子处于自然状态——低能态(或称基态)，这时电子所处位置称为低能级，物体并不发光。当原子受到外界影响(如加热、放电、光照等)时，处于低能级的电子就跳到高能级，使原子处于高能状态。电子在 高能级是一种不稳定状态，它要自发地向低能级跃迁，同时辐射出光子，使物体发光。这种发光状态叫做自发辐射。普通的白炽灯、水银灯等都属于这种状态。在普通的发光体里，处于高能态的原子数量较低能态的原子数量总是要少，因而它的发光能力总是不会很高。但对某些所谓激光物质，当它受到外界影响(如光照)时，大量处于低能级的电子跳到高能级，使处于高能态的原子数量较低能态的要多，即所谓“粒子数反转”，这时如有适当能量的外来光子刺激(感应)处于高能状态的原子，就会引起高能级上的电子向低能级跃迁，并发出和外来光子相同的

光子，使物体发光。由于这种发光状态是受外来刺激而辐射出来的，因此称为受激辐射(激光)。辐射出来的光子为外来光子和电子跃迁时放出的光子，也就是说辐射出来的光要较外来光亮得多，这就是所谓光放大。激光器的英文名称 Laser(莱塞)即英文受激辐射放大的缩写。当然，实际上激光器的工作不仅仅是上述一次放大，而是通过激光器内谐振腔的作用，反复进行放大、振荡，然后输出，因而有很大的亮度。图 2-49 是常见的氩氦气体激光器示意图，放电管 2 用硬质玻璃或石英玻璃制成，内充氩氦气体。储气套 3 使激光器有较长工作寿命。4 为圆筒形阴极，6 为阳极。1、5 为反射镜(构成谐振腔)，其中一块用于输出激光的窗口。反射率为 93.5~99%，另一块要求反射率在 99% 以上。两块反射镜的反射面要严格平行。当玻璃管内的两个电极没有接通时，氩氦气体的原子处于基态，没有光辐射。给两个电极加上电压，使气体放电，产生光辐射。这时的光辐射还是属于一般光辐射，光子的方向是杂乱无章的，其中有些逸出管外；有的垂直射到反射镜表面。这些垂直射到反射镜表面的光子被反射回去，成为“初始信号”，它们激发工作气体的原子成高能态，再放出光子，然后再被反射镜反射回去，再激发工作气体放出光子，循环

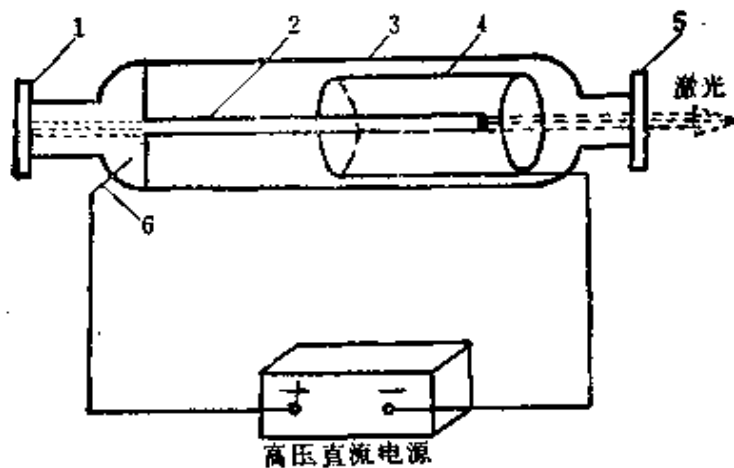


图 2-49 氩氦气体激光器

为阳极。1、5 为反射镜(构成谐振腔)，其中一块用于输出激光的窗口。反射率为 93.5~99%，另一块要求反射率在 99% 以上。两块反射镜的反射面要严格平行。当玻璃管内的两个电极没有接通时，氩氦气体的原子处于基态，没有光辐射。给两个电极加上电压，使气体放电，产生光辐射。这时的光辐射还是属于一般光辐射，光子的方向是杂乱无章的，其中有些逸出管外；有的垂直射到反射镜表面。这些垂直射到反射镜表面的光子被反射回去，成为“初始信号”，它们激发工作气体的原子成高能态，再放出光子，然后再被反射镜反射回去，再激发工作气体放出光子，循环

往复而使反射光不断地被放大到一定程度后,其中一部分光线透过反射率稍低的那块反射镜射出,另一部分仍被反射回去,再激发工作物质而发射光子。当然,反射光的放大并不是无限的,它受各种因素的影响而到一定程度就不能再增大。但较普通光源来说,由于多次的光放大而变得非常强。

由于只有垂直射到反射镜表面的光子才能在两反射镜之间来回反射,直到最后输出,因此,输出光束的发散角很小,即方向性好,能量也非常集中,这也是激光高亮度的原因之一。激光的单色性好也与谐振腔有关。从图 2-49 可以看出,谐振腔的两块反射镜类似于前面介绍过的多光束干涉的两块反射镜。设两块反射镜之间的距离为 L ,激光的某一束光线在反射镜之间来回反射,就形成了一组平行光,从反射镜输出后都是相干光。任意两条相邻的相干光的光程差 Δ 彼此相等,即

$$\Delta = 2nL\cos\alpha \quad (2-58)$$

式中 α 为反射光束与镜面法线间的夹角,取 $\alpha \approx 0$,则得 $\cos\alpha = 1$ 。谐振腔内气体折射率近似取为 1,则公式(2-58)就成为

$$\Delta = 2L \quad (2-59)$$

当 $\Delta = 2L = k\lambda$ 时($k=0, 1, 2, \dots$),光束相干后得到最大光强度。由此可见,能够被增强的光束的波长与谐振腔的长度 L 有关,即

$$\lambda = \frac{2L}{K} \quad (2-60)$$

或者根据 $\lambda = \frac{c}{\nu}$ 改写为

$$\nu = K \frac{c}{2L} \quad (2-61)$$

式(2-61)称为共振(谐振)条件或驻波条件。频率 ν 称为谐振频率或共振频率,也称纵模。至于那些满足多光束干涉光强度极小条

件的波，则被滤掉而无输出。适当选择谐振腔的长度和采取一系列的选频稳频措施，就可使激光器实现单模输出，即输出光线具有良好的单色性。

以上以氦氖气体(原子状态)为工作物质的气体激光器为例，简要地介绍了激光器的工作原理。气体激光器是目前种类最多、应用最广泛的一种激光器。

激光器发展迅速，种类繁多，表 2-12 列出了四类激光器及其中一些激光器的名称。

表 2-12 激光器种类

类	别	名 称
气 体 器 激 光 器	中 性 原 子 激 光 器	氦氖激光器
	离 子 激 光 器	氩激光器、氪激光器
	分 子 激 光 器	二氧化碳激光器、氰化氢激光器、H ₂ O 激光器
固 体 器 激 光 器	晶 体 激 光 器	红宝石激光器、钇铝石榴石(YAG)激光器
	非 晶 体 (玻 璃) 激 光 器	铍玻璃激光器
	塑 料 激 光 器	
液 体 器 激 光 器	无 机 液 体 激 光 器	二氯氧化硒 (SeOCl ₂) 激光器
	有 机 液 体 激 光 器	螯合物激光器、染料激光器。
半 导 体 器 激 光 器	P-n 结激光器	GaAs, GaSb 激光器
	电 子 束 激 励 激 光 器	CdS, ZnS 激光器
	光 激 励 半 导 体 激 光 器	GaAs PbTe 激光器

十七、全息照相

普通照相只是在感光底片上记录下物体各部分光强(振幅)的分布。而全息照相既记录了物体各部分光强(振幅)，又记录了物体各部分光的位相，即记录了振幅和位相全部信息，故称为“全息照相”。它的照相方法如图 2-50 所示，照明光源是一束激光(只有相干性好、亮度高的激光光源出现，才使“全息照相”得以实现)，其中一部分直接照射到物体，经物体反射后到达底片；另一部分先照射到反射镜，经反射镜反射再到达底片。前者称物光，后者称参考光束。两部分光线在底片上产生干涉，形成无数看上去是不规则的干涉条纹(全息图)。这些干涉条纹记录了物体各部分反射回来的光线的强弱(振幅)和位相。

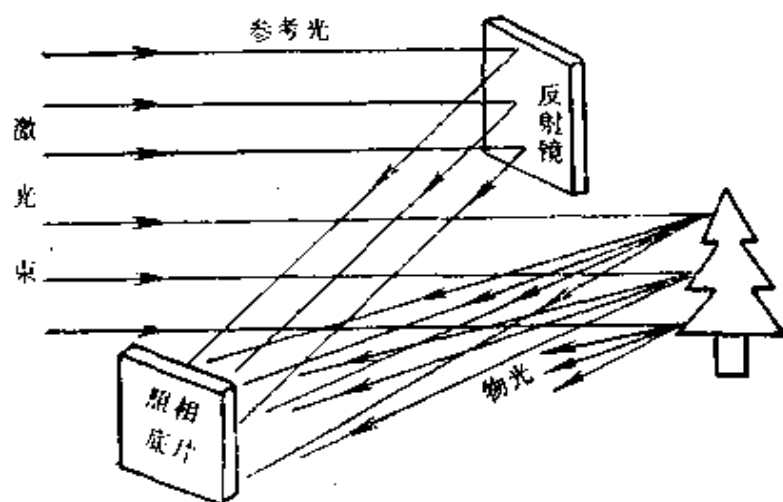


图 2-50 全息照相

要将全息图实现物体的再现，还是用一束激光照明底片(如图 2-51)，透过全息图的光线经衍射分成三部分：一部分是直接透射的平行光(称为 0 级衍射)，另外两部分是 +1 级和 -1 级衍射光。肉眼在 +1 级衍射光的方向能观察到物体的虚象；在 -1 级衍射光的方向将可接收到由衍射光构成的实象；在 0 级方向只是一片均匀的亮光。

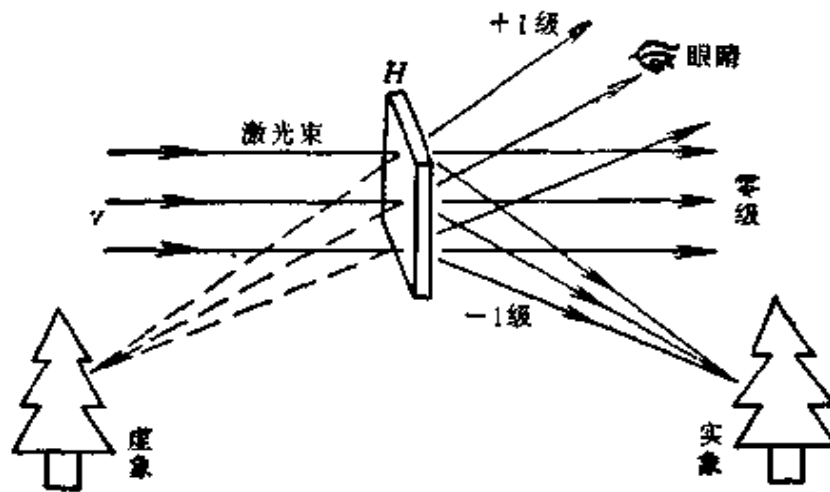


图 2-51 全息图再现

H—全息照片

全息照相由于记录了物体的全部“信息”，因此，它在再现时，如同观看实物一样，观察位置不同，所看到的实物形象也不同。

全息照相的另一个特点是底片上记录了每一物点发出的光波，也即底片上任何局部小区域都记录了整个物体的光信息。所以，万一全息底片破碎后，任取一碎片，仍能再现完整的物体形象，只不过亮度弱一些，分辨率有所降低，空间立体感由于底片小而受到限制而已。

第三章 常用材料和辅料

一、无色光学玻璃

1. 系列和分类

无色光学玻璃分为两个系列：普通光学玻璃系列(P系列)和耐辐射光学玻璃系列(N系列)。

无色光学玻璃的分类：根据折射率 n_d 和色散系数 ν_d 按 $n_d-\nu_d$ 领域图中的位置进行分类，共分为18类，如表3-1所示。

表 3-1 无色光学玻璃分类

代号	名称	代号	名称	代号	名称	代号	名称	代号	名称
FK	氟冕	BaK	钡冕	KF	冕火石	ZBaF	重钡火石	TiF	钛火石
QK	轻冕	ZK	重冕	QF	轻火石	ZF	重火石	TF	特种火石
K	冕	LaK	镧冕	F	火石	LaF	镧火石		
PK	磷冕	TK	特冕	BaF	钡火石	ZLaF	重镧火石		

2. 牌号

同类光学玻璃中，根据其折射率 n_d 、中部色散 n_F-n_C 及色散系数 ν_d 的差别，分别在代号后面用序号1、2、3……等等加以区别，如K1、K2、K3……等等，K1、K2、K3等就叫做牌号。

3. 质量指标

无色光学玻璃的质量指标包括：折射率 n_d 、色散系数 ν_d 与标准数值的允许差值；同一批玻璃中，折射率和色散系数的一致性；光学均匀性；应力双折射；条纹度；气泡度；光吸收系数等。在无色光学玻璃国家标准中，根据它们与规定数值的差别进

行分类、分级。

4. 耐辐射光学玻璃

在经X射线或 γ 射线照射后,具有一定抗辐射稳定性的光学玻璃称为耐辐射光学玻璃。

耐辐射光学玻璃的分类同上述无色光学玻璃。其牌号是将其耐辐射能力加在上述普通无色光学玻璃上而形成。如K9玻璃能耐 1×10^5 伦琴的X射线照射,就称为K509,依此类推。

5. 部分光学玻璃的物理、化学特性

光学玻璃的折射率 n_d 、相对研磨硬度FA、化学稳定性、密度和显微硬度等数据见表3-3。

表中相对研磨硬度FA是指在同等研磨条件下,被测玻璃相对于标准玻璃(K9)的研磨硬度。它用标准玻璃样品的研磨量(被研磨的体积)与被测玻璃样品的研磨量(被研磨的体积)的比值A表示

$$A = \frac{V_0}{V}$$

式中 V_0 ——标准玻璃样品被研磨的体积(cm^3);

V ——被测玻璃样品被研磨的体积(cm^3)。

表中显微硬度表示玻璃抵抗硬物压入的能力,用克氏显微硬度HK表示。

表中耐潮稳定性的测试是把两面抛光的玻璃样品置于 $70 \pm 1^\circ\text{C}$ 时的饱和水蒸气条件下,七昼夜后,用测定玻璃表面散射性的装置测量其表面散射率 T_B (有光陷阱时),再和标准白板时的散射率 T_A 相比,即

$$H = \frac{T_B}{T_A} \times 100\%$$

H值(浊度值)即表示玻璃表面“生雾率”。

耐潮稳定性的分级是在上述条件下,将被测样品的H值和标准样品BaK7、ZK9的H值进行比较而定出。分1、2、3、4级。

表中耐酸稳定性测试是采用酸度为 pH 2.9 的醋酸、pH 4.6 的标准醋酸盐、pH 6.0 的水作为测定介质，抛光玻璃样品表面被介质侵蚀后，在白炽灯下观察玻璃表面出现紫蓝干涉色的时间（此时侵蚀破坏层的厚度为 135 nm）或表面呈现杂色或脱落现象的时间，据此可对光学玻璃耐酸稳定性进行递减式分类定级，如表 3-2。

表 3-2

成膜时间 级别	测定介质 酸度	pH2.9±0.2	pH4.6±0.2	pH6.0±0.2
	1 a	≥5 h		
1 b	<5h, ≥0.5h			
2 a			>30min	
2 b			<30min, ≥5min	
3 a				>3 h
3 b				≤3 h

表 3-3 无色光学玻璃部分数据

玻璃牌号	折 射 率 n_d	研磨硬度 FA	显微硬度 HK (10 ⁷ Pa)	密 度 ρ (g/cm ³)	化学稳定性	
					耐酸级别	耐潮级别
FK1	1.486 05	—	355	3.57	3 a	3
FK2	1.486 56	—	355	3.80	3 a	3
QK1	1.470 47	0.75	395	2.30	3 a	2
QK2	1.478 17	1.60	—	2.27	1 a	1
QK3	1.487 46	0.90	495	2.46	3 a	2
K1	1.499 67	1.13	495	2.50	1 a	1
K2	1.500 47	0.99	505	2.41	1 a	1
K3	1.504 63	0.87	495	2.40	2 a	1
K4	1.508 62	1.05	475	2.50	1 a	1
K5	1.510 07	0.99	510	2.47	1 a	1
K6	1.511 12	0.90	460	2.51	1 a	1
K7	1.514 78	0.98	565	2.51	1 a	1

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_d	研磨硬度 FA	显微硬度 HK (10^3Pa)	密 度 ρ (g/cm^3)	化学稳定性	
					耐酸级别	耐潮级别
K8	1.51602	0.93	450	2.62	1 a	2
K9	1.51637	1.00	570	2.53	1 a	2
K10	1.51818	0.96	520	2.58	1 a	1
K11	1.52638	0.94	510	2.61	1 a	1
K12	1.53359	1.00	495	2.76	1 a	1
K16	1.51878	0.90	500	2.62	1 a	1
PK1	1.51907	0.40	—	2.58	—	—
P2K	1.54867	—	—	2.94	—	—
BaK1	1.53028	0.95	450	2.76	1 a	1
BaK2	1.53998	0.92	485	2.86	1 a	1
BaK3	1.54678	0.94	530	2.86	1 b ~ 2 a	1
BaK4	1.55248	0.90	505	2.93	1 b	2
BaK5	1.56069	0.82	480	3.02	1 a	1
BaK6	1.56388	0.85	520	3.09	1 b	1
BaK7	1.56889	0.79	485	3.12	1 b	2
BaK8	1.57249	0.79	475	3.20	2 a	2
BaK9	1.57444	0.77	490	3.11	1 a	2
BaK11	1.55963	0.86	505	3.03	1 a	2
ZK1	1.56888	0.78	515	3.06	2 b	2
ZK2	1.58313	0.74	540	3.28	2 a ~ 2 b	2 ~ 3
ZK3	1.58919	0.84	540	3.29	2 a ~ 2 b	3
ZK4	1.60881	0.62	515	3.52	3 a	3
ZK5	1.61120	0.56	510	3.58	3 a	3
ZK6	1.61269	0.68	475	3.56	2 a ~ 2 b	3
ZK7	1.61309	0.65	525	3.51	3 b	3
ZK8	1.61410	0.71	490	3.61	1 a ~ 1 b	2
ZK9	1.62041	0.63	495	3.61	3 b	3
ZK10	1.62210	0.68	475	3.59	3 a	2
ZK11	1.63854	0.56	480	3.69	3 a	3
ZK14	1.60311	0.72	515	3.44	3 a	3
ZK15	1.60729	0.75	520	3.51	3 a	3
ZK19	1.61375	0.67	470	3.60	3 a	2
ZK20	1.61720	0.71	475	3.63	3 a	3
LaK1	1.65950	0.52	510	3.92	3 b	3

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_d	研 磨 硬 度 FA	显 微 硬 度 HK (10^7 Pa)	密 度 ρ (g/cm ³)	化 学 稳 定 性	
					耐 酸 级 别	耐 潮 级 别
LaK2	1.69211	0.76	555	3.68	3 a ~ 3 b	3
LaK3	1.74693	1.16	635	4.12	3 a ~ 3 b	3
LaK4	1.64050	0.90	470	3.71	3 b	4
LaK5	1.67790	0.47	470	4.08	3 b	4
LaK6	1.69350	0.42	485	4.29	3 b	4
LaK7	1.71300	0.99	620	3.78	2 b ~ 3 a	2
LaK8	1.72000	0.91	490	4.34	3 a	3
LaK10	1.65113	0.77	475	3.81	3 b	4
LaK11	1.66461	0.49	465	4.01	3 a ~ 3 b	3
LaK12	1.69680	0.99	620	3.70	2 b ~ 3 a	3
TK1	1.58599	—	430	4.11	—	—
KF1	1.50058	0.96	420	2.52	1 a	2
KF2	1.51539	0.89	430	2.69	1 a	2
KF3	1.52629	0.89	395	2.71	1 a	3
QF1	1.54811	0.69	430	2.93	1 a	2
QF2	1.56091	0.72	365	3.02	1 a	2
QF3	1.57502	0.58	410	3.23	1 a	2
QF5	1.58215	0.71	455	3.22	1 a	2
QF6	1.53172	0.83	455	2.81	1 a	2
QF9	1.56138	0.83	430	3.02	1 a	2
QF11	1.57842	0.71	435	3.23	1 a	2
QF14	1.59551	0.67	390	3.38	1 a	2
F 1	1.60324	0.61	400	3.48	1 a	1
F 2	1.61295	0.58	390	3.58	1 a	1
F 3	1.61655	0.59	380	3.60	1 a	1
F 4	1.62005	0.61	390	3.63	1 a	1
F 5	1.62435	0.59	360	3.68	1 a	1
F 6	1.62495	0.64	380	3.62	1 b	1
F 7	1.63636	0.60	375	3.76	1 a	1
F 12	1.62364	0.67	—	3.62	1 a	1
F 13	1.62588	0.60	365	3.65	1 a	1
BaF1	1.54809	0.82	455	2.93	1 a	1
BaF2	1.56970	0.60	450	3.16	1 a	1
BaF3	1.57960	0.75	485	3.23	2 a	1

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_d	研 磨 硬 度 FA	显 微 硬 度 HK (10 ¹ Pa)	密 度 ρ (g/cm ³)	化 学 稳 定 性	
					耐 酸 级 别	耐 潮 级 别
BaF4	1.58271	0.50	475	3.28	1 a	1
BaF5	1.60562	0.70	455	3.50	1 a	1
BaF6	1.60772	0.71	420	3.53	1 a	1
BaF7	1.61413	0.70	400	3.56	1 a	1
BaF8	1.62604	0.63	425	3.68	1 a	1
ZBaF1	1.62231	0.66	460	3.47	2 a	2
ZBaF2	1.63962	0.66	445	3.83	2 a ~ 2 b	2
ZBaF3	1.65691	0.52	460	3.98	3 a	3
ZBaF4	1.66426	0.80	455	3.91	1 b	2
ZBaF5	1.67103	0.50	470	4.02	2 b	2
ZBaF8	1.60729	0.71	450	3.54	2 b	2
ZBaF11	1.62012	0.56	450	3.27	3 a	3
ZBaF13	1.63930	0.60	455	3.60	3 a	3
ZBaF15	1.65128	0.56	475	3.91	3 a	3
ZBaF16	1.66672	0.67	470	3.76	2 a	2
ZBaF17	1.66755	0.53	445	3.76	2 a ~ 2 b	2
ZBaF18	1.66998	—	430	3.90	2 b	2
ZBaF20	1.70181	—	475	3.96	3 a ~ 3 b	3
ZBaF21	1.72340	0.51	450	3.96	3 a	3
ZF1	1.64767	0.61	350	3.86	1 a	1
ZF2	1.67268	0.62	380	4.09	1 a	1
ZF3	1.71741	0.63	370	4.46	2 a	1
ZF4	1.72822	0.56	340	4.52	2 b	1
ZF5	1.74002	0.64	360	4.65	2 a	1
ZF6	1.75523	0.62	340	4.78	2 a	1
ZF7	1.80627	0.50	330	5.20	2 b ~ 3 a	1
ZF8	1.65446	0.62	360	3.91	2 a	1
ZF10	1.68893	0.53	355	4.22	2 a	1
ZF11	1.69895	0.58	380	4.06	1 a	1
ZF12	1.76182	0.45	360	4.54	2 b	1
ZF13	1.78472	0.42	370	4.74	2 b	1
ZF14	1.91761	—	—	5.95	—	—
LaF1	1.69362	—	—	4.41	3 a	3
LaF2	1.71700	0.46	480	4.41	3 a	3

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_d	研 磨 硬 度 FA	显 磨 硬 度 (10^4 Pa)	密 度 ρ (g/cm ³)	化 学 稳 定 性	
					耐 酸 级 别	耐 碱 级 别
LaF3	1.74400	0.99	450	4.60	3 a	3
LaF4	1.74950	0.44	430	4.22	3 a	3
LaF5	1.75367	0.57	475	4.18	3 a ~ 3 b	3
LaF6	1.75719	1.20	680	4.21	3 a	3
LaF7	1.78179	—	470	4.21	1 b ~ 2 a	2
LaF8	1.78427	—	510	4.47	3 a	3
LaF9	1.78443	—	680	4.16	3 a	3
LaF10	1.78831	1.20	615	4.55	1 b	2
ZLaF1	1.80166	—	610	4.42	—	—
ZLaF2	1.80279	—	590	4.96	—	—
ZLaF3	1.85544	—	530	5.10	—	—
ZLaF4	1.91042	—	—	5.47	—	—
TiF1	1.53256	0.71	440	2.51	1 a	2
TiF2	1.58013	0.70	420	2.61	1 a	2
TiF3	1.59270	0.56	455	2.68	1 a	2
TiF4	1.61650	—	300	3.31	2 b ~ 3 a	3
TF1	1.52949	0.60	400	2.56	3 b	2
TF3	1.61242	0.53	430	3.23	3 b	4
TF4	1.61340	—	565	3.21	3 b	4
TF5	1.65412	—	515	3.58	3 b	4
TF6	1.68064	—	450	3.84	3 b	4

二、有色光学玻璃

1. 按特性分类

按着色剂特性，有色光学玻璃分为：

- 1) 硒镉着色玻璃；
- 2) 离子着色的中性(暗色)玻璃；
- 3) 离子着色的选择性吸收玻璃。

2. 牌号

有色光学玻璃牌号如表 3-4。

表 3-4 有色光学玻璃牌号

玻璃名称	代 号	玻 璃 牌 号
透紫外线玻璃	ZWB	ZWB1 ZWB2
透红外线玻璃	HWB	HWB1 HWB2 HWB3 HWB4
紫色玻璃	ZB	ZB1 ZB2 ZB3
蓝色(青色)玻璃	QB	QB1 QB2 QB3 QB4 QB5 QB6 QB7 QB8 QB9 QB10 QB11 QB12 QB13 QB14 QB15 QB16 QB17 QB18 QB19 QB20 QB21 QB22
绿色玻璃	LB	LB1 LB2 LB3 LB4 LB5 LB6 LB7 LB8 LB9 LB10 LB11 LB12 LB13 LB14 LB15 LB16
黄色(金色)玻璃	JB	JB1 JB2 JB3 JB4 JB5 JB6 JB7 JB8
橙色玻璃	CB	CB1 CB2 CB3 CB4 CB5 CB6 CB7
红色玻璃	HB	HB1 HB2 HB3 HB4 HB5 HB6 HB7 HB8 HB9 HB10 HB11 HB12 HB13 HB14 HB15 HB16
防护玻璃	FB	FB1 FB2 FB3 FB4 FB5 FB6 FB7
中性(暗色)玻璃	AB	AB1 AB2 AB3 AB4 AB5 AB6 AB7 AB8 AB9 AB10
透紫外线白色玻璃	BB	BB1 BB2 BB3 BB4 BB5 BB6 BB7 BB8

3. 按质量指标分类、分级

有色光学玻璃按下列质量指标分类、分级：

(1) 各种牌号玻璃吸收率的光谱曲线参数与规定值的允许偏差；

(2) 双折射；

(3) 条纹度；

(4) 气泡度。

4. 有色光学玻璃的物理、化学性质

(1) 反射修正值 D_r

$$D_r = -2 \lg(1 - \rho)$$

式中 $\rho = \left(\frac{n_D - 1}{n_D + 1} \right)^2$

n_D ——波长 λ 为589.3 nm的黄光折射率。

(2) 化学稳定性

1) 硅酸盐玻璃对潮湿大气作用的稳定性分成以下三组:

A组: 在温度50°C, 相对湿度85%条件下, 在玻璃抛光表面产生霉污的时间超过20 h。

B组: 在温度50°C, 相对湿度85%条件下, 在玻璃抛光表面产生霉污的时间在5~20 h之间。

C组: 在温度50°C, 相对湿度85%条件下, 在玻璃抛光表面产生霉污的时间少于5 h。

2) 硅酸盐玻璃对弱酸水溶液作用稳定性分成以下三组:

I组: 在温度50°C, 浓度为0.1 N醋酸溶液中, 在玻璃抛光表面上, 浸蚀厚度达135 nm的时间超过5 h。

II组: 在温度50°C, 浓度为0.1 N醋酸溶液中, 在玻璃抛光表面上, 浸蚀厚度达135 nm的时间为1~5 h。

III组: 在温度50°C, 浓度为0.1 N醋酸溶液中, 在玻璃抛光表面上, 浸蚀厚度达135 nm的时间少于1 h。

3) 非硅酸盐玻璃对潮湿大气作用的稳定性分成以下二组:

a组: 稳定的玻璃。

b组: 不稳定的玻璃。

4) 非硅酸盐玻璃对酸溶液作用的稳定性分成以下三组:

1组: 难溶解的玻璃。

2组: 中等溶解度的玻璃。

3组: 易溶解的玻璃。

5. 有色光学玻璃的折射率、反射修正值、化学稳定性和密度的数据

见表3-5。

表 3-5 有色光学玻璃部分数据

玻璃牌号	折 射 率 n_D	反 射 修 正 值 D_r	化 学 稳 定 性 类 别		密 度 (g/cm^3)
			潮 湿 大 气	酸 溶 液	
JB4	1.523	0.038	C	I	2.64
JB5	1.523	0.038	C	I	2.64
JB6	1.523	0.038	C	I	2.64
JB7	1.523	0.038	C	I	2.64
JB8	1.523	0.038	C	I	2.64
CB3	1.523	0.038	C	I	2.64
CB4	1.523	0.038	C	I	2.64
CB5	1.523	0.038	C	I	2.64
CB6	1.523	0.038	C	I	2.64
CB7	1.523	0.038	C	I	2.64
HB9	1.523	0.038	C	I	2.64
HB10	1.523	0.038	C	I	2.64
HB11	1.523	0.038	C	I	2.64
HB12	1.523	0.038	C	I	2.64
HB13	1.523	0.038	C	I	2.64
HB14	1.523	0.038	C	I	2.64
HB15	1.523	0.038	C	I	2.64
HB16	1.523	0.038	C	I	2.64
ZWB1	1.557	0.043	b	I	2.65
ZWB2	1.520	0.038	c	I	2.58
ZB1	1.524	0.038	B	I	2.53
ZB2	1.495	0.035	B	I	2.40
ZB3	1.501	0.035	B	I	2.40
QB1	1.520	0.038	C	I	2.51
QB2	1.520	0.038	C	I	2.51
QB3	1.517	0.037	C	I	2.51
QB4	1.582	0.046	C	I	3.25
QB5	1.520	0.038	B	II	2.52
QB6	1.519	0.038	C	I	2.52
QB7	1.523	0.038	C	I	2.52
QB8	1.529	0.039	C	I	2.63
QB9	1.524	0.038	B	I	2.53
QB10	1.529	0.039	C	I	2.63
QB11	1.514	0.037	C	I	2.57

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_D	反射修正值 D_r	化学稳定性类别		密 度 (g/cm ³)
			潮湿大气	酸 溶 液	
QB12	1.517	0.037	C	I	2.59
QB13	1.522	0.038	C	I	2.61
QB14	—	—	—	—	—
QB15	1.512	0.037	a	I	2.67
QB16	1.520	0.038	C	I	2.64
QB17	1.515	0.037	B	I	2.60
QB18	1.518	0.037	B	I	2.50
QB19	1.477	0.032	C	III	2.27
QB20	1.477	0.032	C	III	2.27
QB21	1.535	0.040	b	2	2.86
QB22	1.535	0.040	b	2	2.93
LB1	1.524	0.038	C	I	2.52
LB2	1.524	0.038	C	I	2.56
LB3	1.523	0.038	C	I	2.52
LB4	1.523	0.038	C	I	2.52
LB5	1.535	0.040	b	3	2.85
LB6	1.534	0.040	b	2	2.83
LB7	1.522	0.038	B	I	2.52
LB8	1.523	0.038	C	I	2.52
LB9	1.522	0.038	C	I	2.50
LB10	1.522	0.038	C	I	2.50
LB11	1.522	0.038	C	I	2.52
LB12	1.536	0.040	C	III	2.73
LB13	1.527	0.039	C	I	2.53
LB14	1.527	0.039	C	I	2.53
LB15	1.527	0.039	C	I	2.53
LB16	1.535	0.040	b	2	2.84
JB1	1.536	0.040	C	III	2.78
JB2	1.632	0.052	A	II	3.69
JB3	1.502	0.036	B	III	2.40
CB1	1.523	0.038	C	I	2.55
CB2	1.523	0.038	C	I	2.55
HWB1	1.525	0.038	B	I	2.53
HWB2	1.525	0.038	B	I	2.53

(续)

玻璃牌号	折 射 率 n_D	反射修正值 D_r	化学稳定性类别		密 度 (g/cm ³)
			潮湿大气	酸 溶 液	
HWB3	1.525	0.038	B	I	2.53
HWB4	1.525	0.038	B	I	2.53
HB1	1.673	0.057	A	I	4.09
HB2	1.537	0.040	B	I	2.72
HB3	1.604	0.048	B	III	3.37
HB4	1.533	0.039	b	2	2.83
HB5	1.591	0.047	C	II	3.26
HB6	1.477	0.032	C	III	2.27
HB7	1.477	0.032	C	III	2.27
AB1	1.521	0.038	C	I	2.51
AB2	1.523	0.038	C	I	2.52
AB3	1.526	0.039	C	I	2.52
AB4	1.502	0.036	B	II	2.42
AB5	1.502	0.036	B	II	2.42
AB6	1.502	0.036	B	II	2.42
AB7	1.505	0.036	B	II	2.42
AB8	1.509	0.037	B	II	2.42
AB9	1.514	0.037	B	II	2.43
AB10	1.527	0.038	B	II	2.46
FB1	1.522	0.038	C	I	2.53
FB2	1.525	0.038	B	I	2.53
FB3	1.524	0.038	C	I	2.53
FB4	1.523	0.038	C	I	2.53
FB5	1.526	0.038	C	I	2.52
FB6	1.526	0.038	C	I	2.52
FB7	1.700	0.060	b	3	3.70
BB1	1.512	0.037	C	I	2.52
BB2	1.502	0.036	C	I	2.38
BB3	1.575	0.045	A	I	3.23
BB4	1.624	0.050	A	I	3.67
BB5	1.643	0.054	B	I	3.72
BB6	1.700	0.060	A	I	4.22
BB7	1.518	0.038	C	I	2.50
BB8	1.508	0.037	A~B	I	2.47

三、其他技术玻璃

1. 光学石英玻璃

(1) 光学石英玻璃的牌号

常见的光学石英玻璃如表 3-6。

表 3-6 光学石英玻璃牌号

牌 号	名 称	应用波段范围 (nm)
JGS1	远紫外光学石英玻璃	185~2 500
JGS2	紫外光学石英玻璃	220~2 500
JGS3	红外光学石英玻璃	260~3 500

(2) 光学石英玻璃的质量指标

光学石英玻璃按光谱特性、光学均匀性、应力双折射、条纹度、颗粒不均匀性、气泡度、荧光特性等各项指标分类。

光谱特性按不同波段的透过率分为 1、2、3 类。

光学均匀性按平行光管光路中放入毛坯后的最小鉴别角与其理论鉴别角之比分为 1、2、3、4、5 类。

应力双折射按每厘米最大光程差分为 1、2、3、4、5 类。

条纹度对于 JGS 1 分为 1、2、3、4 类；对于 JGS 2、JGS 3，按条纹允许程度分为 1、2 类，又按规定观察方向分为 A、B、C 三级。

颗粒不均匀性按颗粒影象分为 1、2、3 类。

气泡度按气泡大小及数量分为 0、1、2、3、4、5、6 等 7 个类别。

荧光特性分为 1、2 类。

(3) 光学石英玻璃理化特性

见表 3-7。

表 3-7 光学石英玻璃理化特性

分子式	SiO ₂	可溶解的溶剂	氢氟酸
分子量	60.06	20°C时的光学常数 标准值:	
密度(g/cm ³)	2.21		
硬度(莫氏)	5.5	折射率(n _D)	1.458 5 ± 4 × 10 ⁻⁴
线膨胀系数(-60~ +20°C)	2.1 × 10 ⁻⁷	中部色散(n _F -n _C)	0.006 74 ± 4 × 10 ⁻⁵
熔点(°C)	1 700	色散系数(ν)	68.0

2. 硬质玻璃

(1) 化学成分

见表 3-8。

表 3-8 硬质玻璃化学成分(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	ZnO	CaO	MgO
76	2	13	1.5	6.5	0.37	0.63	

(2) 物理特性

见表 3-9。

表 3-9 硬质玻璃物理特性

项 目	参 数	项 目	参 数
线膨胀系数(20~300°C)度 ⁻¹	49 × 10 ⁻⁷	软化温度(°C)	750
应变温度(°C)	470	密度(g/cm ³)	2.30
退火温度(°C)	500		

(3) 化学特性

见表 3-10。

表 3-10 硬质玻璃化学特性

项 目	试 验 方 法	技术参数
抗水试验	用0.3~0.5mm 玻璃颗粒在纯水中煮沸 1 h, 用0.01N HCl滴定, 失重	0.028mg/g
抗酸试验	用6.15N HCl煮沸 3 h, 失重	0.33mg/100cm ²
抗碱试验	用Na ₂ CO ₃ 及NaOH混合液在97.5±0.5°C 温度下浸煮 3 h, 失重	90mg/100cm ²

3. 微晶玻璃(超低膨胀玻璃)

微晶玻璃强度比普通玻璃高 8 倍, 硬度接近淬火钢, 密度约为 2.44~2.62 g/cm³, 具有很好的热稳定性。国内已能生产直径在 2 m 以上的透明超低膨胀玻璃, 膨胀系数在 +3~-1.5×10⁻⁷/°C(0~320°C)。超低膨胀玻璃常用于制作大型反射镜、光胶工具、分离器、高精度平面抛光模基板等。

四、光学晶体

1. 晶体和非晶体

晶体和非晶体的主要区别在于内部质点(原子、分子、离子)排列的规律性。质点作有规律排列的是晶体, 否则是非晶体。图 3-1 是石英晶体和石英玻璃内部质点排列情况示意图。

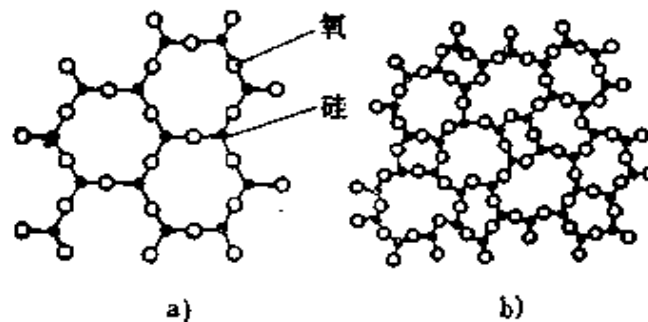


图 3-1 石英晶体和石英玻璃的质点排列
a) 石英晶体 b) 石英玻璃

石英玻璃是高温的 SiO₂ 熔体在经过结晶温度时冷却速度较

快、质点来不及形成有规律的排列就凝固成固体，所以非晶体又叫“过冷液体”。如果到 SiO_2 的结晶温度时，让熔体在此温度保持足够的时间，则其中的 Si 和 O 就排列成有规律的结构，形成石英晶体，如图 3-1 a 所示。

结晶多面体的面叫做晶面，晶面和晶面之间的夹角叫晶面角。对同一类晶体，对应晶面间的夹角总是一定的，如图 3-2 中的几种外形不同的石英晶体， a 、 b 面之间夹角总是 $141^\circ 47'$ ， b 、 c 面之间夹角总是 120° ， a 、 c 面间夹角总是 $113^\circ 08'$ ，这就是面角守恒定律。结晶多面体的棱边叫晶棱。

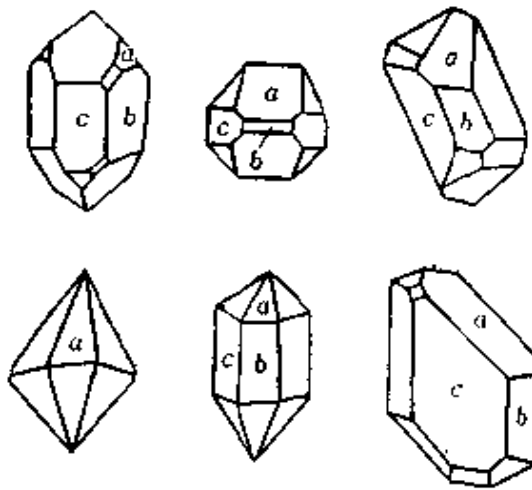


图 3-2 几种不同外形的石英晶体

2. 晶体的一般特性

(1) 规则而对称的多面体外形

当晶体生长环境合适时，晶体的自范性和对称性使晶体自发地生长成规则而对称的多面体外形，如图 3-3 所示。

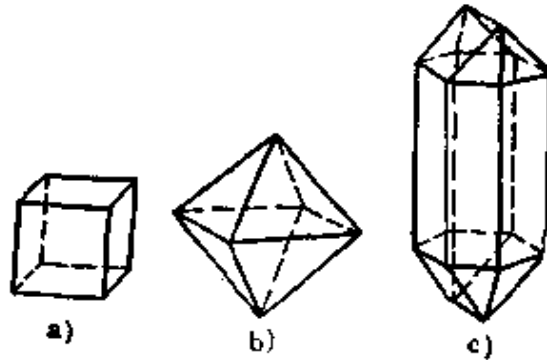


图 3-3 晶体形状
a) 食盐 b) 明矾 c) 硝石

(2) 各向异性

晶体的许多物理化学性质与其方向有关。表 3-11 是石英晶体在两个互相垂直方向上的某些特性。

表 3-11

方 向	热膨胀系数 (度 ⁻¹)	电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)	折射率 ($\lambda = 589\text{nm}$ 时)
平行于光轴	7.97×10^{-6}	2×10^{14}	1.553
垂直于光轴	13.37×10^{-6}	3×10^{19}	1.554

(3) 固定的熔点

晶体有固定的熔点，而非晶体只有软化温度范围，它们的加热曲线如图 3-4 所示。

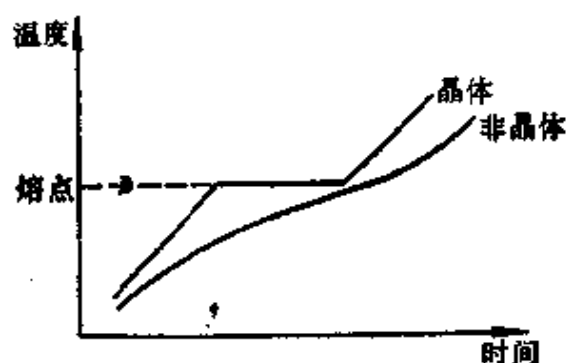


图 3-4 晶体与非晶体的加热曲线

(4) 解理性

晶体在受到敲击时，易于沿解理面裂开，如云母裂成片状。

3. 单晶和多晶

若在整块晶体中，质点排列都非常有规则，则为单晶。

若晶体中虽然晶胞内部质点排列是很规则的，但晶胞与晶胞间的取向不一定相同，则为多晶。

4. 晶体的内部结构

晶体的特性是由其内部结构决定的。组成晶体的微粒(原子、分子、离子)有规则地排列在空间的一定点上,这些点的总和叫做

晶格(或点阵),排有粒子的那些点叫做晶格的结点。图 3-5 是氯化钠晶体结构示意图。

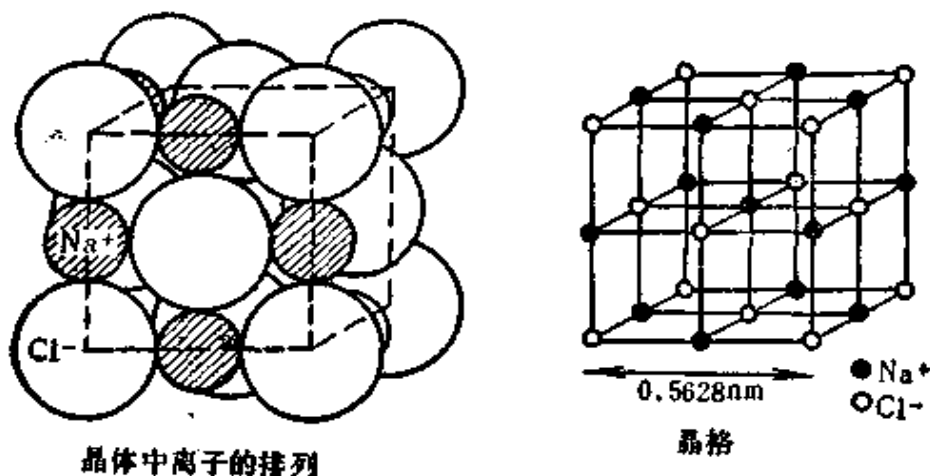


图 3-5 氯化钠晶体结构

从晶体结构出发,它的确切定义是:组成物质的粒子在空间按一定的晶格而排列者,叫做晶体。

在晶格中,仍能表现出其结构的一切特征的最小部分叫做晶胞。我们用 a 、 b 、 c 三个向量及其相互之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表征晶胞的特征,叫做晶胞常数(又称晶格常数)(参看图 3-6)。

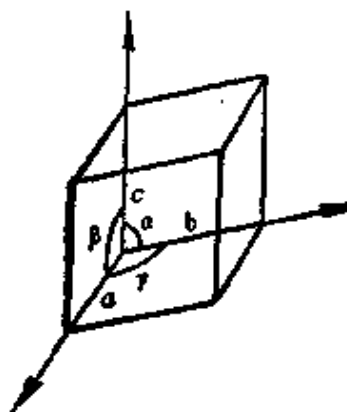


图 3-6 单位晶胞及晶胞常数表示法

6. 七大晶系

理论计算和实际观察得出如下结论:微粒在晶胞内的排列方式只有 14 种,称为 14 种布拉菲格子。结点仅在晶胞角上者称简式格子,以 P 表示。晶胞中心也有结点者,称体心格子,以 I 表示。晶胞两底面有结点者,称底心格子,以 C 表示。各面中心皆

有结点者，称面心格子，以F表示。这14种晶胞可归结为七个晶系：三斜、单斜、正交、四方、立方、三方和六方晶系，如表3-12所示。

表 3-12 布拉非原胞及其按晶系分布

晶系	简单(P)	底心(C)	体心(I)	面心(F)	晶胞常数
三斜					$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
单斜					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$
正交					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
四方					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六方					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
三方					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
立方					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

6. 晶面指数和面间距

晶格中各种方位的原子层叫晶面。晶面指数是用来表征晶面的一种方法。它由如下步骤确定：

(1) 首先选定晶格中的某一结点为坐标原点，以晶格的三条棱作为坐标轴(晶轴) ox 、 oy 、 oz ， x 轴与 y 轴、 y 轴与 z 轴、 z 轴与 x 轴正方向之间的夹角分别为 γ 、 α 、 β ，以晶格常数 a 、 b 、 c 分别作为 x 轴、 y 轴、 z 轴上的量度单位，如图3-7所示。

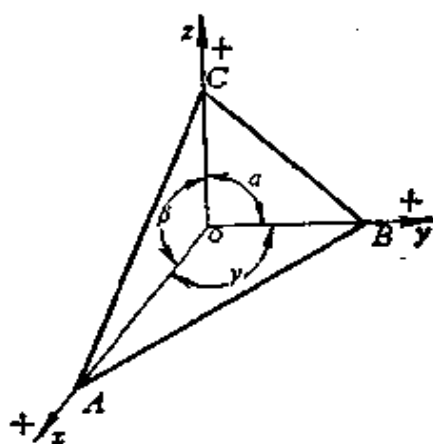


图 3-7 确定晶面指数

(2) 求出晶面在各坐标轴上的截距 $oA = m$ ， $oB = n$ ， $oC = p$ 。如果截距是负数，则在该数值上加一短横表示，如 \bar{m} 代表 m 为负数。

(3) 取截距的倒数 $\frac{1}{m}$ ， $\frac{1}{n}$ ， $\frac{1}{p}$ 。

(4) 将这些倒数化为最小整数比，并括在一个括号内，即 $\frac{1}{m}$ ：

$\frac{1}{n}$ ： $\frac{1}{p} = (h:k:l)$ ，并记为 $(h\ k\ l)$ 。 $(h\ k\ l)$ 称晶面指数(又称密勒指数)，它代表一族晶面。因为与平面 ABC 平行的其他晶面在各轴上的截距为 rm 、 rn 、 rp ， r 为不等于零的实数，故截距的最小整数比仍是 $(h:k:l)$ 。 $(h\ k\ l)$ 族中最靠近的两晶面间的距离称面间距，以 d 表示之。七大晶系的面间距计算公式参见式5-38~41。图3-8是 KDP 晶体的有关晶面指数。

(5) 对于 $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ 的六方晶系, 还可选四根晶轴, 如图 3-9 所示, 其中 z 轴为六方晶系的六次旋转轴, 再选在与 z 轴垂直的平面上正方向互成 120° 的三根二次旋转轴 x_1 、 x_2 、 x_3 。 z 轴的量度单位为晶格常数 c , x_1 、 x_2 、 x_3 三根轴的量度单位为 a (或 b), 由此得到四个晶面指数 $(h k i l)$ 。图 3-10 是磷酸锂晶体的有关晶面指数。

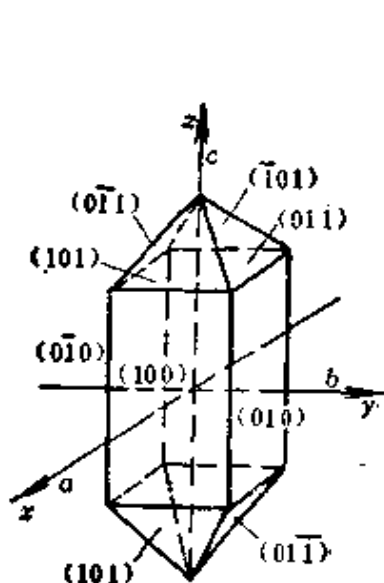


图 3-8 KDP 晶体晶面指数

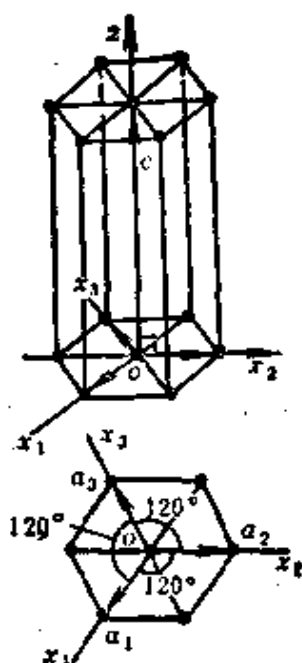


图 3-9 六方晶系四轴表示法

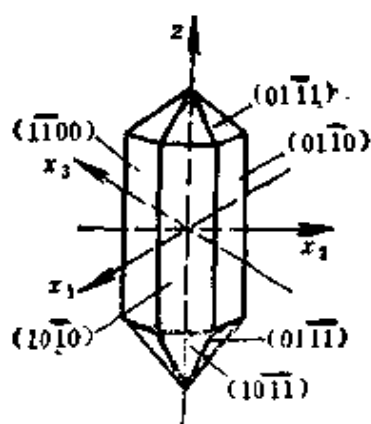


图 3-10 磷酸锂晶体晶面指数

7. 晶体的解理面和解理程度

晶体的解理面指一系列互相平行的平面。晶体在外力作用下，能沿这些平面裂开。部分常见晶体的解理面如表 3-13 所示。

表 3-13 常见晶体的解理面

晶体名称	解理面	晶体名称	解理面
白云母	(100)	方解石(CaCO_3)	(101)
氯化钠(NaCl)	(100)	石墨(C)	(001)
氯化钾(KCl)	(100)	金刚石(C)	(111)
氟化锂(LiF)	(100)	透明石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	(010)
氟化钙(CaF_2)	(111)	砷化镓(GaAs)	(110)
溴化钾(KBr)	(100)	锗(Ge)	(111)

晶体的解理程度根据解理面出现的难易而分为五种，如表 3-14 所示。

表 3-14 晶体解理程度区分

解理程度	解理难易	解理面平滑度	备注
极完善	易	最平滑	易剥成薄片
完善	易	平滑	不能剥成薄片，但可裂成解理块
中等	不易	中等	
不完善	难	差	
极不完善	最难或不解理	最差	

8. 部分光学晶体性能

见表 3-15。

表 3-15 光学晶体的性能

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解 (微溶解) 溶剂	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			克氏 (kg/mm ²)	莫氏	g/ 100g水	温度 (°C)			$\alpha \times 10^6$, 度 ⁻¹	温度 (°C)
氯化钠 (食盐)	NaCl	58.45	2.165	20	立方	完善的 (100)	15.2		35.7	0	甘油:(乙 醇, 液体 铷)	801	39.2	0~300
氯化钾 (钾盐)	KCl	74.55	1.984	20	立方	(100)	7.2		34.7	20	碱, 醚, 甘 油, (乙醇)	776	37.4	51
氯化银 (角银矿)	AgCl	143.34	5.56	20	立方	没有	9.5	2.5	0.000089	10	铵水, 硫 代硫酸 钠, 氰化 钾	457.7	30.01	25
氯化铀	UCl ₄	239.85	7.00	20	立方	(110)	12.8		0.32	20	(盐酸)	430	54.57	15~60
氯化亚铜	CuCl	99.00	3.53	20	立方	(110)		2	0.0062	20	盐酸, 铷 水	422	~10	40~140
溴化亚铜	CuBr	143.46	4.718	20	立方			2.25	极小		盐酸, 硝 酸, 溴化 氢, 铷水	504	19	20~150
氯化铅 (氯铅矿)	PbCl ₂	278.12	5.85	20	斜方	(100) 完善		2.5	0.99	20	(稀盐酸)	501	93(体膨 胀)	20~120
氟化钠 (氟盐矿)	NaF	42.00	2.79	20	立方 (有时 四方)	(100)	60	3.5	4.22	18	氢氟酸; (乙醇)	980 (四方 晶系) 997 (立方 晶系)	33.13	30~250

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解(微溶解) (溶剂)	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			莫氏	克氏 kg/mm ²	g/100g 水	温度 (°C)			$\alpha \times 10^6$, 度 ⁻¹	温度 (°C)
氟化锂	LiF	25.94	2.601	20	立方	(100)	99.1	18	0.27	18	酸	870	31.95	-150~0
氟化钙 (氟石)	CaF ₂	78.08	3.18	20	立方	(111)	158.3	18	0.0016	18	(酸)	1360	18.38	-192~ 17
氟化钡	BaF ₂	175.36	4.83	20	立方		82	10	0.17	10	酸, 氟化 钡	1280	18.4	0~300
氟化铯	SrF ₂	125.63	4.24	20	立方		3.5	27	0.012	27	热盐酸	1190		
氟化镁 (氟镁矿)	MgF ₂	62.32	3.1766	18	四方	(100) 和 (110)	576	18	0.0076	18	硝酸	1255	8.8//C- 轴 13.1//C- -轴	0~500
氟化镉	CdF ₂	150.41	6.382	20	立方		4.0	25	4.35	25	(氢氟酸)	1047	27	20~120
氟化铅	PbF ₂	245.21	7.763	18	立方		2.0	20	0.064	20	硝酸	822		
溴化钾	KBr	119.01	2.75	25	立方	(100)	5.9	0	53.48	0	甘油, (醚)	730	37.6	-160~ 300
溴化铯	CsBr	212.83	4.44	20	立方		19.5	25	124.3	25	酸, 乙醇	636	46.6	-130~ 300
溴化铊	TlBr	284.31	7.557	17.3	立方		11.9	25	0.05	25	乙醇	460	51.20	15~60
碘化钾	KI	166.02	3.13	20	立方	(100)		0	127.5	0	乙醇, 水	723	40.6	20~100
碘化铯	CsI	259.83	4.510	20	立方	(110)		0	44	0	乙醇	621	48.6	22~36

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			克氏 kg/mm ²	莫氏	g/100g 水	温度 (°C)		$\alpha \times 10^4$, 度 ⁻¹	温度 (°C)
溴化铯- 碘化铯 KRS-5	TlBr-TlI(42% TlBr, 58% TlI)	312.9 45.7% TlBr 54.3% TlI	7.371	16	立方	没有	40.2		0.05	20	414.5	58	20~100
溴化铯- 氯化铯 KRS-6	TlBr-TlCl (40%TlBr, 60%TlCl)	257.0 29.8% TlBr 70.2% TlCl	7.192	16	立方		39.5		0.32	20	423.5	49	20~100
溴化银- 氯化银 KRS-13	AgBr-AgCl (65%AgBr, 35%AgCl)	172.24			立方		17		0.0006			39	20
结晶石英	SiO ₂	60.06	2.648-5	25	六方	(1011)	741		不溶解		<1470	7.067// C-轴	0~360
蓝宝石	Al ₂ O ₃	101.94	3.98	20	三方	(1011)	1370		0.000098	29	2030	6.66// C-轴 5.01C- 轴	20~50
氧化镁(方 镁石)	MgO	40.32	3.58	20	立方	完善的 (100); 完善的 (111)	692		0.0086	30	2800	11.2	27
尖晶石	MgO·Al ₂ O ₃	142.26	3.62	20	立方	(111)	1140		不溶解		2050	5.93	20~70

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			莫氏	克氏 kg/mm ²	%/100g 水	温度 (°C)		α × 10 ⁻⁶ , 度 ⁻¹	温度 (°C)
二氧化钛 (金红石)	TiO ₂	79.90	4.26	20	四方	(110)	879		不溶解	浓盐酸	1820	9.19 // C-轴 7.14 ⊥ C-轴	20~70
氧化钡	BaO	153.36	5.72	20	立方		3	90.8	80	稀酸, 乙醇	1923		
氧化锌(红 锌矿)	ZnO	81.38	5.676	20	六方		170	0.00016	29	(酸, 碱, 氯化铵)	>1800	3.9 // C-轴 3.2 ⊥ C- 轴	20~70
二氧化锡 (锡石)	SnO ₂	150.70	6.95	20	四方	(100)	6.5	不溶解		在苛性碱 中分解	1127 (分解 温度)	3.9 // C- 轴 3.2 ⊥ C- 轴	20~70
钛酸钡	BaTiO ₃	232.96	5.90		四方 5~120 °C						1625	3.5 (四方晶 系)	20~120
钛酸锶	SrTiO ₃	183.53	5.122	20	立方 120°C 以上	没有	595	不溶解			2080	8.6 (立方晶 系)	120
钛酸钙(钙 钛矿)	CaTiO ₃	135.98	4.10	20	斜方	(001) 不完善	6.5					9.4	

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解 (微溶解) 溶剂	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm^3	温度 (°C)			莫氏	$g/100g$ 水	温度 (°C)	$\alpha \times 10^{-6}$ 度 $^{-1}$			温度 (°C)	
硝酸钠	$NaNO_3$	85.01	2.261	20	三方	(1011) 平面	19.2		73	0	糖水, (甘油, 丙酮)	306.8	12 // C- 轴 11 ⊥ C- 轴	50
方解石	$CaCO_3$	100.09	2.711	25.2	三方	(1011) 完善	75		0.0014	25	碱和碱金属的氟化物	1339 (压力) 102.5 大气 (压)	24.39 // C-轴 5.68 ⊥ C-轴	-150~0
磷酸二氢铵 ADP	$NH_4H_2PO_4$	115.04	1.803	20	四方				22.7	0			1.9 // C- 轴 39.3 ⊥ C-轴	24~134
磷酸二氢钾 KDP	KH_2PO_4	136.09	2.338	20	四方				33	25		252	34.3 // C-轴 21.6 ⊥ C-轴	-150~ 20
钼酸铅(钼 铅矿)	$PbMoO_4$	367.16	6.03	20	四方	(011)		2.75	不溶解		酸, 苛性 钾, 在液 盐酸中分 解	1060~ 1070		
云母(白云 母)			2.9		单斜	极完善 (100)		2.8	不溶解		受氟酸蒸 气作用	1200~ 1300	$A_{111}=8.1$ $A_{222}=7.5$	51

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解剂 (微溶解)	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			莫氏	克氏 (kg/mm ²)	g/100g水	温度 (°C)			α × 10 ⁶ , 度	温度 (°C)
硫	S	256.53	2.07	20	斜方	(001) 和 (110)	2		不溶解		甲苯, (乙 醇, 苯, 乙 醚)	112.8	180 (冷膨胀)	-79~18
硅	Si	28.09	2.33	25	立方	(111)	1150		不溶解		氟氢酸和 硝酸的混 酸	1410	2.33	27
锗	Ge	72.60	5.327	25	立方	(111)	780		不溶解		热盐酸, 王水	936	5.75	27
硒	Se	631.68	4.79 (结晶硒) 4.3(无 定形硒)	18	三方	(0112)	2 (结晶 硒)		不溶解 (结晶硒)		加热时溶 解于硝 酸。无定 形硒溶解 于硫酸、 二硫化碳 和苯	217 (结晶 硒)	22.9 (结晶硒) 48.7 (无定形 硒)	20~100 0~21
碲	Te	255.22	6.25	20	三方	(1010)	2		不溶解		硫酸, 硝 酸, 王水, 氟化钾	452	1.6// C-轴 27.2⊥ C-轴	20
金刚石 (或化硅(碳 硅石))	C SiC	12.01 40.07	3.51 3.217	20	立方 六方	(111) (0001) 不好	8820 2880	10 9.5	不溶解 不溶解		在熔融苛 性碱中溶 化分解	>3500 2600 (分解, 升华)	0.87 3.26	0~555 200

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解 (微溶解) 重溶剂	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			克 (kg/mm ²) 莫氏	g/100g 水	温度 (°C)	$\alpha \times 10^6$, 度 ⁻¹			温度 (°C)	
硫化铅(方铅矿)	PbS	239.28	7.5	20	立方	(100)	2~3	0.000086	20	碱	1114	7.54	308	
硒化铅(硒铅矿)	PbSe	286.17	8.10	15	立方	(001)	2.5	不溶解		硝酸	1065	7.65	303	
碲化铅(碲铅矿)	PbTe	334.82	8.16	20	立方	(001)	3	不溶解		加热时完全溶解于硝酸	917	9.02	303	
硫化锌(闪锌矿)	ZnS	97.45	4.102	25	立方 (可能是六方晶系)	(110)	4.0	0.000065	18	易溶于酸	1020 (多晶型转化点)	6.70	20~70	
硫化镉(硫镉矿)	CdS	144.48	4.82	20	六方	(1010)	3	0.00013	18	酸	1500 (100大气压时)	3.5 // C-轴 5 ⊥ C-轴	30~500	
硒化镉(硒镉矿)	CdSe	191.37	5.81	15 (室温)	六方	完善	71	不溶解		在酸中分解	>1350			
碲化镉	CdTe	240.02	5.854		立方	(110)	56	不溶解		在硝酸中分解	1041	4.5	50	

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解(微溶解) 溶剂	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			克氏 (kg/mm ²)	莫氏	g/100g 水	温度 (°C)			$\alpha \times 10^{-6}$, 度 ⁻¹	温度 (°C)
砷化铟	InSb	237.0	5.7751		立方	(011) 和 (111)	223	3.8	不溶解			523	5.04	27
磷化铟	InP	145.80	4.8		立方	(011)	535					1070	4.5	
砷化铷	InAs	189.73	5.66 (计算)		立方	(110) 和 (111)	381		不溶解			940	5.20	17~300
砷化镓	GaP	100.70	4.13 (计算)		立方	(011)	945	5				~1350	5.3	
砷化镓	CaAs	144.63	5.3161	25	立方	(110)	750	4.5	不溶解			1238	5.74	18~287
砷化镓	GaSb	191.48	5.619		立方	(110)	448	4.5	不溶解			705	6.9	
砷化铋	AlSb	148.73	4.26 (计算)		立方	(001) 和不完 善的 (111)	394	4.8	在湿空气中 中受腐蚀			1050		
砷化铋(砷 磁矿)	Bi ₂ Te ₃	800.83	7.7	20	三方	(0001)		2				573	22.2 // C-轴 12.9 ⊥ C-轴	20

(续)

晶体名称	分子式	分子量	密度		晶系	解理	硬度		溶解度		溶解剂	熔点 (°C)	热膨胀	
			g/cm ³	温度 (°C)			莫氏	克氏 (kg/mm ²)	g/100g 水	温度 (°C)			$\alpha \times 10^6$, 度 ⁻¹	温度 (°C)
氟化镁	MgF ₂ (多晶)	62.32	3.18	25			~6	576	不溶解			1396	10.7	25~100
硫化锌	ZnS(多晶)	97.45	4.088	25				354	不溶解			800	6.6	25~100
钨酸钙(白 钨矿)	CaWO ₄	288.00	6.06	20	四方	(101)	4.5	390	~0.006			1535	7.9 // a- 轴	25~500
掺钕钇铝石 榴石 (YAG)	Y _{2.97} Nd _{0.03} - Al ₃ O ₁₂				立方		8~8.5					1970	12.7 // c-轴	
硫酸甘氨酸 (TGS)	(NH ₂ CH ₂ CO- OH) ₂ H ₂ SO ₄ LiIO ₃				单斜	(010)					水			
碘酸锂					六方						水			
磷酸二氘钾 (KD*P)	KD ₂ PO ₄				四方						水			
铋酸锆钽 (SBN)	Sr _{1-x} Ba _x Nb ₂ O ₆ (0.25 ≤ x ≤ 0.75)		5.4		四方		5.5					1470		
透明石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	172.18	2.31~ 2.32		单斜	极完善	2		0.241	0		128	25	0~100
碲偏汞	Cd _{1-x} Hg _x Te		7.69		立方							按盐, 碲 (-1.5 代硫酸钠 H ₂ O)	4	

五、磨料和磨具

1. 磨料的种类和性能

磨料按来源有天然磨料和人造磨料两大类。天然磨料系由天然矿物加工所得。人造磨料由人工冶炼获得。

表 3-16 是常用天然磨料特性。表 3-17 是常用人造磨料特性。

表 3-16 常用天然磨料特性

名称	代号	特 性			
		外 观	莫氏 硬度	密度 (g/cm ³)	研 磨 特 性
金刚石 (C)	IT	纯净金刚石为无色透明体,因混有杂质而呈黄色褐色等	10	3.15~ 3.53	硬度最高,是加工硬质晶体的理想材料,也是制造刀片、磨轮等必不可少的。其微粉可用于硬质和非硬质晶体的抛光
刚玉 (Al ₂ O ₃)		蓝灰色或黄灰色颗粒	9	3.9~ 4.1	韧性好
乐山金刚砂 (3FeO· Al ₂ O ₃ · 3SiO ₂)		12°~80°是褐色,100°~320°是淡红色,W28~W1呈浅灰或乳白色	7~8	磨粒 3.89磨 粉4.08 微粉 3.99	磨削力相当于人造刚玉的75%,但韧性强,其微粉在光学行业中使用最普遍

表 3-17 常用人造磨料特性

名称	代号	特 性			
		外 观	莫氏 硬度	密度 (g/cm ³)	研 磨 特 性
黑碳化硅 (α -SiC)	TH (C)	黑色不透明体,六角形结晶	9.5~ 9.75	真密度 3.21堆 积密度 1.45~ 1.56	性脆,锋利,有一定导电性和导热性。适于加工抗张强度低的金属和非金属

(续)

名称	代号	特 性			
		外 观	莫氏 硬度	密度 (g/ cm ³)	研 磨 特 性
绿碳化硅 (α -SiC)	TL (GC)	绿色半透明体	9.5~ 9.75	同上	比黑碳化硅略脆, 适用于加工硬而脆的材料
立方碳化硅 (β -SiC)	TF (SC)	草黄色结晶			硬度高于黑碳化硅, 切削能力较强
棕刚玉 (α - Al ₂ O ₃)	GZ (A)	棕褐色	9	真密度 3.97 堆积密度 1.68~ 1.95	韧性较好, 抵抗破碎力较强
白刚玉 (α - Al ₂ O ₃)	GB (WA)	白色	9	3.98 (1.75~ 1.88)	脆性较大, 容易破碎, 切削能力优于棕刚玉, 其微粉可用作晶体抛光粉
铬刚玉	GG (PA)	玫瑰红或紫红色		3.98 (1.79~ 1.85)	韧性较白刚玉好, 硬度与白刚玉相近
微晶刚玉	GW (MA)	与棕刚玉相似		3.94 (1.64~ 1.72)	磨粒由微小晶体集合而成, 因而强度高, 韧性大
单晶刚玉	GD (SA)	浅黄色或白色		3.98 (1.85~ 1.91)	每一个磨粒由单一的结晶体形成, 具有良好的多棱切削刃, 较高的硬度及韧性, 在磨削过程中不易碎裂, 切削寿命长
碳化硼	TP (BC)	黑色	9.6~ 9.8	2.5	硬度高, 耐磨性好, 适用于宝石等硬质材料的加工
立方氮化硼	DL		9.8~ 10		分为一型(DLI)和二型(DLII)两个品种, DLI主要用于制造树脂结合剂磨具及研磨用; DLII主要用于制造陶瓷、金属、电镀结合剂磨具
人造金刚石	JR		10		常用于制造磨具及作高硬度材料的磨料, 其微粉可用于抛光晶体

注: 1. 括号内的代号为下届标准要采用的代号。2. 莫氏硬度为10级制。3. 密度值项括号内数字为堆积密度。

2. 磨料粒度及其组成(摘自 GB 2477—83)

(1) 磨料粒度按颗粒尺寸大小分为 41 个号, 记作:

4# 5# 6# 7# 8# 10# 12# 14# 16# 20#
22# 24# 30# 36# 40# 46# 54# 60# 70# 80# 90#
100# 120# 150# 180# 220# 240#

W 63 W 50 W 40 W 28 W 20 W 14 W 10 W 7
W 5 W 3.5 W 2.5 W 1.5 W 1.0 W 0.5

(2) 4#至 240# 检查用筛见表 3-18, 各号粒度组成应符合表 3-19 之规定。

表 3-18

筛 号	网孔基本尺寸(μm)
5/16	8000
0.265	6700
3+	5600
4	4750
6	4000
6	3350
7	2800
8	2360
10	2000
12	1700
14	1400
16	1180
18	1000
20	850
25	710
30	600
35	500
40	425
45	355
50	300
60	250
70	212
80	180
100	150

(续)

筛号	网孔基本尺寸(μm)
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45

表 3-19

粒度	最粗粒	粗 粒		基 本 粒		混 合 粒		细粒	
	100% 通过下 列筛号	不通过 筛号	重量% 不多于	不 通 过 筛 号	重量% 不少于	不通过筛号		通过下 列筛号 重量最 多3%	
4*	5/16	3 $\frac{1}{2}$	20	4	40	4	5	70	6
5*	0.255	4	20	6	40	5	6	70	7
6*	3 $\frac{1}{4}$	5	20	6	40	6	7	70	8
7*	4	6	20	7	40	7	8	70	10
8*	5	7	20	8	45	8	10	70	12
10*	6	8	20	10	45	10	12	70	14
12*	7	10	20	12	45	12	14	70	16
14*	8	12	20	14	45	14	16	70	18
16*	10	14	20	16	45	16	18	70	20
20*	12	16	20	18	45	18	20	70	25
22*	14	18	20	20	45	20	25	70	30
24*	16	20	25	25	45	25	30	65	35
30*	18	25	25	30	45	30	35	65	40
36*	20	30	25	35	45	35	40	65	45
40*	25	35	30	40	40	40	45	65	50
46*	30	40	30	45	40	45	50	65	60
54*	35	45	30	50	40	50	60	65	70
60*	40	50	30	60	40	60	70	65	80
70*	45	60	25	70	40	70	80	65	100

(续)

粒度	最粗粒	粗 粒		基 本 粒		混 合 粒			细粒		
	100% 通过下 列筛号	不通过 筛号	重量% 不多于	不通过筛号		重量% 不少于	不通过筛号		重量% 不少于	通过下 列筛号 重量最 多3%	
80 [*]	50	70	25	80		40	80	100	65	120	
90 [*]	60	80	20	100		40	100	120	65	140	
100 [*]	70	100	20	120		40	120	140	65	200	
120 [*]	80	120	20	140		40	140	170	65	230	
150 [*]	100	140	15	170	200	40	170	200	230	65	325
180 [*]	120	170	15	200	230	40	200	230	270	65	
220 [*]	140	200	15	230	270	40	230	270	325	60	
240 [*]	170	200	5	230	270	8	230	270	325	38	

表 3-20

粒 度	最 粗 粒		粗 粒		基 本 粒		混 合 粒		细 粒	
	尺 寸 范 围	允 许 颗 数	尺 寸 范 围	重 量 % 不 多 于	尺 寸 范 围	重 量 % 不 少 于	尺 寸 范 围	重 量 % 不 少 于	尺 寸 范 围	重 量 % 不 多 于
W63	100~80	1	80~63	15	63~50	50	63~40	80	细于40	5
W50	80~63	1	63~50	15	50~40	50	50~28	80	细于28	5
W40	63~50	1	50~40	15	40~28	50	40~20	80	细于20	5
W28	50~40	1	40~28	18	28~20	45	28~14	74	细于14	8
W20	40~28	1	28~20	18	20~14	45	20~10	74	细于10	8
W14	28~20	2	20~14	20	14~10	45	14~7	72	细于7	8
W10	20~14	2	14~10	20	10~7	40	10~5	70	细于5	10
W7	14~10	2	10~7	20	7~5	40	7~3.5	70	细于3.5	10
W5	10~7	3	7~5	20	5~3.5	40	5~2.5	70	细于2.5	10

(3) W 63 至 W 5 各号粒度组成应符合表 3-20 之规定。

3. 人造金刚石(摘自 JB 2808—79)

(1) 品种

人造金刚石磨料分为一型、二型、三型和四型四个品种,其代号和适用范围如表 3-21。

表 3-21

品 种	代 号	粒 度	用 途
人造金刚石 一型	JR ₁	46*~280*	制造树脂结合剂磨具或研磨用
人造金刚石 二型	JR ₂	46*~280*	制造金属结合剂、陶瓷结合剂磨具 或研磨用
人造金刚石 三型	JR ₃	36*~120*	制造一般地层地质钻探钻头和半导 体及非金属材料切削加工工具等
人造金刚石 四型	JR ₄	36*~120*	制造硬地层地质钻探钻头、修正工 具及非金属硬脆材料加工工具等

(2) 微粉

微粉分精微粉(代号 WI)和普通微粉(代号 WII), 它们的规格见表 3-22 和表 3-23。

表 3-22 精微粉②

(μm)

粒 度	尺寸范围	小于下列颗 粒尺寸不超 过10%①	粒 度	尺寸范围	小于下列颗 粒尺寸不超 过10%①
WI40	40~20	20	WI5	5~2.5	2.5
WI28	28~14	14	WI3.5	3.5~1.5	1.5
WI20	20~10	10	WI2.5	2.5~1.0	1.0
WI14	14~7	7	WI1.5	1.5~0.5	0.5
WI10	10~5	5	WI1.0	1.0以细	—
WI7	7~3.5	3.5	WI0.5	0.5以细	—

① 以颗粒百分数表示。

② 此标准不能满足的特殊要求, 可由供需双方共同协商解决。

表 3-23 普通微粉

(μm)

粒 度	以下颗粒尺寸不超过5%	以下颗粒尺寸不低于85%	下列颗粒尺寸不超过10%
W1140	50~40	40~20	20以细
W1128	40~28	28~14	14以细
W1120	28~20	20~10	10以细
W1114	20~14	14~7	7以细
W1110	14~10	10~5	5以细
W117	10~7	7~3.5	3.5以细

(3) 杂质含量

36#~120#杂质含量不应超过 0.5%(颗粒百分数)。

150#~280#杂质含量不应超过 1.5%(颗粒百分数)。

W 40~W 5 杂质含量不应超过 2.5%(重量百分数)。

W 3.5~W 0.5 杂质含量不应超过 5%(重量百分数)。

4. 磨具

磨具是将磨料用结合剂粘结在一起,具有一定形状的磨削工具。光学加工上常用的磨具有平形砂轮、金刚石筒形砂轮、金刚石磨片等。

磨具的特性包括:磨料种类、粒度、硬度、结合剂、组织紧密程度。

(1) 硬度

磨具的硬度系指在静止状态时,磨粒间结合的强度。它表现为磨具在工作中受到外力作用时,磨粒从磨具中脱落的快慢程度。表 3-24 是磨具的硬度等级及代号。

表 3-24 磨具硬度等级及代号

硬度等级	代 号	硬度等级	代 号	硬度等级	代 号	硬度等级	代 号
超软	CR	中软	ZR	中	Z	中硬	ZY
超软 1	CR ₁	中软 1	ZR ₁	中 1	Z ₁	中硬 1	ZY ₁
超软 2	CR ₂	中软 2	ZR ₂	中 2	Z ₂	中硬 2	ZY ₂
软	R					中硬 3	ZY ₃
软 1	R ₁						
软 2	R ₂						
硬	Y	超硬	CY				
硬 1	Y ₁	超硬 1	CY ₁				
硬 2	Y ₂	超硬 2	CY ₂				

注：脚注1、2、3表示的意义为硬度依次递增。

(2) 结合剂

结合剂的种类及性能如表 3-25。

表 3-25 结合剂种类和性能

结合剂名称	代 号	性 能
树脂结合剂	S	系由酚醛树脂或其它树脂为主要原料配制而成。用它制成的模具有较好的强度，并富有弹性，磨削效率高，自锐性好，不易堵塞，工件磨削面质量好，但不适于大负荷磨削，抗热性能和抗碱性能差
陶瓷结合剂	A	系由粘土、长石、滑石、硼玻璃、硅石等陶瓷原料配制而成。 磨具硬度范围广，有良好的耐热性、化学稳定性和耐水性，磨削效率较高，不易堵塞和发热。但磨具比较脆，使用时经不起冲击。用它做成的金刚石磨具其金刚石消耗介于青铜结合剂和树脂结合剂之间
橡胶结合剂	X	系由天然或人造橡胶为主要原料，加入适当的添加物而成。它比树脂结合剂更富有弹性，气孔小，自锐性好，加工面粗糙度小
青铜结合剂	Q	磨具的结合力强，耐磨性好，使用寿命长，可承受大负荷磨削，但磨具自锐性差，磨削效率不如树脂结合剂
电镀金属结合剂	D	磨具的结合力强，多用于制造各种形状复杂、特殊、特小的制品。由于金刚石层较薄，使用寿命也较短

(3) 组织紧密度

组织紧密度是指磨具内磨料、结合剂、气孔三者的关系。一般非金刚石磨具以单位体积内磨料所占的体积百分比数表示，如表 3-26 所示。金刚石磨具以每立方厘米内金刚石的重量表示（称为浓度），如表 3-27 所示。

表 3-26 磨具组织紧密度

紧 密 组 织		中 等 组 织		疏 松 组 织	
组织号	磨料体积(%)	组织号	磨料体积(%)	组织号	磨料体积(%)
1	60	5	52	9	44
2	58	6	50	10	42
3	56	7	48	11	40
4	54	8	46	12	38

表 3-27 金刚石浓度和含量关系

代 号	浓 度	单位体积内金 刚石含量 (0.2g/cm ³)	金刚石层中 金刚石体积 (%)
25	25%	1.1	6.25
50	50%	2.2	12.5
75	75%	3.3	18.75
100	100%	4.4	25
150	150%	6.6	37.5
200	200%	8.8	50

金刚石磨具浓度的选择主要依据结合剂的种类、磨具形状以及加工工序和加工要求来决定。表 3-28 是四种结合剂的常用浓度。

表 3-28

结 合 剂 种 类	浓 度
树脂	50~100
青铜	75~150
陶瓷	100
电镀	150~200

(4) 人造金刚石磨具的特征及标志书写顺序

表 3-29 是人造金刚石磨具的标志书写顺序及其所代表的意义。

表 3-29

代号 或参数	JR	280	S	75	BW ₁	150×32×32×5×3
意义	磨料	粒度	结合剂	浓度	形状	外径×厚度×孔径×金刚石层环宽× 金刚石层层厚

5. W 50 以下磨料新旧标号对照

表 3-30 列出了常见的 W 50 以下磨料新旧标号对照, 供参考。标号对照是参照该号磨料的基本粒尺寸编制的, 其中 302[#]和 320[#]的基本粒尺寸范围为 42~28 μm, 与 W 40 的尺寸范围 40~28 μm 略有不同。

表 3-30

新 标 号	旧标号(1)	旧标号(2)	旧标号(3)
W50	280	280	280
W40	M40	302	320
W28	M28	302 ⁺	400
W20	M20	303	500
W14	M14	303 ⁺	600
W10	M10	304	800
W 7	M 7	305	1 000
W 5	M 5	306	1 200
W3.5		307	1 500

六、抛 光 粉

1. 抛光粉的种类与性能

常用的抛光粉有氧化铈 (CeO_2)、氧化铁 (Fe_2O_3)、氧化铬 (Cr_2O_3)、氧化铝 (Al_2O_3)、氧化镁 (MgO)、氧化锡 (SnO_2)、金刚石微粉 (C) 等。其性能如表 3-31 所示。

表 3-31 抛 光 粉 性 能

名 称	外 观	密 度 (g/cm^3)	莫氏硬度	特 性
氧化铈 (CeO_2)	白色或淡黄色粉末	7~7.3	6~8	熔点约2600°C,晶粒平均尺寸0.5~4 μm ,呈多边形,比表面平均值6350 cm^2/g ,比放射性强度小于 10^{-7} 居里/kg。氧化铈含量80~95%。混合稀土抛光粉中氧化铈含量40~50%,其他稀土氧化物约占55~45%,混合物呈黄色或黄红色。氧化铈对玻璃的抛光效率较高
氧化铁 (Fe_2O_3)	深红色至褐色粉末	5.1~5.3	5~7	熔点1560~1570°C,晶粒平均尺寸0.2~1 μm ,晶体外形近似球形,比表面平均值5000 cm^2/g , Fe_2O_3 含量不少于96%,铁的含量不大于0.1%,氯化亚铁含量不大于0.38%,盐酸不溶物(SiO_2)含量不大于0.5%,氧化钙、氧化镁含量不大于0.5%。氧化铁较氧化铈抛光效率低,故近年来在一般光学工厂中已逐渐被氧化铈代替。但低温煅烧的红粉在玻璃对板或样板制造、光学零件手修、某些晶体抛光时,还常被采用
氧化铬 (Cr_2O_3)	绿色粉末	5.2	6~7.5	熔点1990°C。常用作锗、硫化锌及金属镜面的抛光粉
氧化铝 (Al_2O_3)	白色粉末	3.4~4	8~9	熔点2020°C,常用作锗晶体的抛光粉
氧化镁 (MgO)	白色粉末	3.2~3.7	5.5	熔点2800°C。可用作锗晶体的抛光粉,但效率比氧化铬、氧化铝低
氧化锡 (SnO_2)	白色或淡褐色粉末	6.9	5~7	熔点1127°C。常用于一些软质晶体的抛光
金刚石微粉 (C)	黄褐或灰紫色粉末	3.15~3.53	10	3500°C升华。常用于抛光晶体

2. 添加剂

表 3-32 是氧化铈抛光液中常用的添加剂成分及含量 (以重量计)。添加剂除了可以提高抛光效率外,对改善表面质量、避免油斑(水印)也有好处。

表 3-32

氧化铈	水	添 加 剂		
		三氯化铈	稀土氯化物	稀土硝酸盐
0.5~20	100	0.23~2.25		
0.5~20	100		0.5~5	
1~60	100			0.5~10

表 3-33 是以硝酸锌、硫酸锌、氯化锌等锌盐作为各类抛光液通用的添加剂(以重量计)。调节 pH 值至 4~5 时效果较好,其中以硝酸锌效果最好,硫酸锌次之,氯化锌较差。

表 3-33

抛 光 粉	水	锌 盐	备 注
1~60	100	0.2~5	
250	500	13~40	
250(氧化铈)	500	13~40(硫酸锌)	另加入40硝酸铈
250(氧化铈)	500	13~40(氯化锌)	

七、粘 结 胶

粘结胶可以是单一或多种物品的混合物。常用于配制粘结胶的物品有:蜂蜡、石蜡、松香、沥青、漆片、石膏、水泥、碳酸钙、滑石粉、固体古马隆树脂、环氧树脂等。

1. 配制粘结胶常用材料特性

(1) 蜂蜡 又名黄蜡,主要成分为软脂酸蜂蜡酯 ($C_{15}H_{31}$ -

COOC₃₀H₆₁)和蜡酸[CH₃(CH₂)₂₄COOH]的混合物。它是淡黄色至褐黄色固体,不溶于水,易溶于汽油、乙醚、苯、四氯化碳等溶剂。光学加工用蜂蜡的技术指标见表3-34。

表 3-34

项 目	指 标	项 目	指 标
密度	0.953~0.970	皂化值KOH mg/g	85~100
滴点°C	56~66	比值(酯值除以酸值)	8~20
酸值KOH mg/g	4~6	碘值,不大于	15
酯值KOH mg/g	80~90	针入度(25°C, 100g, 5", 0.1mm)	不大于14~16

(2) 石蜡 又名白蜡,是加工石油的副产品,由各种不同结构的固体饱和烃所构成,分子式为C₁₉H₄₀~C₃₅H₇₂。它有清晰的板状或条状结构,密度为0.87,熔点32~75°C,易溶于汽油、丙酮、苯等有机溶剂中。表3-35是一般工业用48#~58#石蜡技术指标。

表 3-35 48#~58#石蜡技术指标

指 标 牌 号	外 观	臭 味	颜色安定性,不少于(日)	熔 点 (°C)	机械杂质	含油量% 不大于
48	白色	无	7	48	无	2.3
50				50		2.1
52				52		1.8
54				54		1.6
56				56		1.4
58				58		1.2

(3) 松香 微黄色至棕红色透明的玻璃状脆性物质,具有特殊的松香味。系由松脂经蒸馏除去松节油而得的固体剩余物。主要

成分为同分异构树脂酸，通式为 $C_{20}H_{30}O_2$ ，为不饱和化合物，活性较大，易氧化。长时间与空气接触，颜色会变深。不溶于水，易溶于乙醇、乙醚、丙酮、苯等溶剂。松香按质量指标分为六级。在光学加工中，常用特级或一级，其技术指标如表 3-36 所示。

表 3-36 松香技术指标

指 标 名 称		特 级	一 级
颜 色	色 泽	微 黄	淡 黄
	不深于罗维邦色号	黄	20
		红	1.4
外 观		透 明	
软化点(环球法)°C不低于		74	
酸值KOH mg/g不低于		164	
不皂化物含量%不多于		6	
机械杂质含量%不多于		0.05	

(4) 沥青 光学加工中目前用得较普遍的是石油沥青。以化学成分来说，石油沥青包括有油分、胶脂及沥青质等主要成分。油分使沥青具有流动性。胶脂使沥青具有弹性及延度，而沥青质使沥青具有粘度及温度稳定性。沥青易溶于汽油、苯、四氯化碳等有机溶剂中。表 3-37 是几个不同品种沥青的技术指标。

表 3-37 沥青的技术指标

名 标		建 筑 石油沥青	专 用 石油沥青	油 漆 沥 青	抛 光 石油沥青	刻 度 沥 青
牌 号		10 ^号	3 ^号		80 ^号	
主 要 指 标	软化点(环球法), °C不低于	90~110	125~140	125~140	90	130
	针入度(25°C, 100 g)1/10mm	5~20	7~10	3~8	(150g) 23.5	
	延度(25°C, cm) 不小于	1	1	—	4.3	

(续)

名 称	建 筑 石油沥青	专 用 石油沥青	油漆沥青	抛 光 石油沥青	刻度沥青	
牌 号	10*	3*		80*		
主 要 指 标	溶解度,%不小于	(苯) 99	(苯) 99	(苯) 99.5	99.9	99
	闪点(开口) ^o C, 不低于	230	260	260	340	230
	水分,%不大于	痕迹	痕迹	痕迹	无	痕迹
	灰分,%不大于	—	1	0.3	0.1	
	蒸发损失(160 ^o C) 5h,%不大于	1	—	—	0.42	
	蒸发后针入度比, %不小于	60	—	—	90.9	
	油溶性:在270~ 280 ^o C.沥青与亚麻 仁油以1:1混合时 的溶解度	—	完全	完全	—	

(5) 虫胶 又名假漆、漆片、洋干漆、紫草茸等。系由虫胶树上的紫胶虫吸食和消化树汁后的分泌液在树枝上凝结干燥而成。原系紫红色，因而也叫紫胶。经精制后成黄色或棕色的虫胶片，其主要成分为光桐酸酯，溶于乙醇和碱性溶液，微溶于酯类和烃类。

(6) 石膏 固定光学零件所用石膏系将天然石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 磨碎和适当加热 (约 $120 \sim 200^{\circ}\text{C}$) 以后得到的半水硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) 粉末。将它适当加水调和后即较快地凝固成固体，并且过程是不可逆的。石膏粉在凝固过程中产生膨胀现象，其中水的含量对凝固性能和强度的影响如表 3-38。

(7) 水泥 主要成分为氧化钙 (CaO)、氧化铝 (Al_2O_3)、氧化铁 (Fe_2O_3) 和氧化硅 (SiO_2) 等。光学加工中常用 500 号快硬硅酸盐水泥。利用水泥凝固过程中收缩的特性，部分抵消石膏的膨胀因素，以减轻光学零件在石膏盘中的倾斜，保证角度精度。水

泥与石膏的比例为 1:2 至 1:4。

表 3-38 水的含量对凝固性能和强度的影响

水与石膏之比 (ml/g)	凝固时间 (min)	凝固时的膨胀率 (%)	固化后的强度 (kg/cm ²)
0.45	3.75	0.51	271
0.60	7.25	0.29	186
0.80	10.5	0.29	114

(8) 香豆酮-茛树脂 俗称固马龙, 系由重质苯或酚油(煤焦油 150~200°C左右的馏分)经缩合、蒸馏而得, 有粘稠液体和固体两种。光学加工中常用它的固体。它具有热塑性, 质硬而脆, 颜色浅黄至棕褐。熔化后, 在空气中继续加热时颜色会变深。耐酸、碱, 不溶于低级一元醇、多元醇及蓖麻油而溶于氯化烃酯类、醚类、酮类等有机溶剂及多数脂肪油。其质量标准见表 3-39。

表 3-39 香豆酮-茛树脂质量标准

项 目	指 标	项 目	指 标
软化点(环球法)°C	80~90	酸碱度范围(酸度计法) pH	5~9
灰分%不大于	0.5	水分%不大于	0.3

(9) 松香改性酚醛树脂 系由苯酚与甲醛缩合并以松香改性而制成, 其质量指标如表 3-40。

(10) 环氧树脂 凡含有环氧基团的高分子化合物统称环氧树脂。未固化前, 它是线型结构的热塑性树脂, 只有与固化剂作用后, 才能使线型环氧树脂分子交联成网状结构的大分子, 成为不溶、不熔的固化物。

环氧树脂的种类很多, 在光学工艺上用得较多的为双酚 A 型 (E 型) 环氧树脂, 它是由二酚基丙烷及环氧氯丙烷在碱性催化剂存在下缩聚而成的热塑性线型高分子树脂。由于两者配比和反应

表 3-40

项 目	指 标	
	一 级	二 级
外 观	无定形棕色透明固体	
软化点(环球法), °C 酸值, KOH mg/g, 不大于	135~150 20	
色泽(铁钴比色法)不大于	12	15
溶解度(在芳香族碳氢化合物、酯类溶剂、松节油及植物油中)	全	溶

条件不同而生成不同分子量的环氧树脂。低分子量环氧树脂多为高粘度透明液体。加入固化剂后成为热固性树脂。高分子量的环氧树脂多为固体, 具有热塑性, 加入固化剂后亦成为热固性树脂。固化后的环氧树脂具有化学稳定性好、机械强度高、耐热性好、电绝缘性能优良、收缩性和吸水性小等特点。表 3-41 是部分 E 型环氧树脂性能。

表 3-41 环氧树脂性能

牌 号	外 观	软化点 (°C)	环 氧 值 (当量/100g)	特 性 及 用 途
E-51 (618 [°])	淡黄色至黄色高粘度透明液体	粘度 ≤ 4 Pa·s (40°C)	0.48~0.54	分子量最小, 色泽淡, 质量较高, 力学性能、电性能好, 收缩性小, 粘结及防腐能力强, 主要作为粘胶、浇铸、密封、浸渍、层压等用
E-44 (6101 [°])	淡黄色至棕色高粘度透明液体	12~20	0.41~0.47	粘度比 E-51 略高, 其余特性同 E-51。主要用于粘胶、浇铸、密封、层压等
E-42 (634 [°])	同上	21~27	0.38~0.45	粘度比 E-44 略高。其余特性同 E-51。用途同 E-44
E-33 (637 [°])		20~35	0.28~0.38	粘度比 E-42 略高。特性同 E-51, 用途同 E-42
E-28 (638 [°])		40~55	0.23~0.33	粘度比 E-33 略高。特性同 E-51。主要用于浇铸

(续)

牌 号	外 观	软化点 (°C)	环 氧 值 (当量/100E)	特 性 及 用 途
E-20 (601*)	淡黄至棕黄 色透明固体	64~76	0.18~0.22	可直接与胺类固化剂配合, 制成冷干或烘干涂料
E-14 (603*)		78~85	0.10~0.18	用于配制耐腐蚀或绝缘涂料
E-12 (604*)	同E-20	85~95	0.09~0.14	主要用作配制耐腐蚀涂料
E-09 (609*)		135~155	0.02~0.045	用于涂料、热熔胶等

(11) 环氧树脂固化剂

1) 固化剂类型(表 3-42)

表 3-42 固化剂类型

类型	反 应 型 网 化 剂			
品种	脂 肪 胺	芳 香 胺	有 机 酸 酐	低 聚 物
反应机理	胺基上的活泼氢与环氧基反应使其开环,形成高分子网状化合物	同左	羧基与环氧树脂中的羟基及环氧基反应,形成高分子网状化合物	因品种不同而异,主要是低聚物分子中的胺基、羧基、巯基等与环氧树脂反应
固化温度	室温(个别加温)	高温	高温(个别室温)	室温或高温
特点	多数是液体,使用方便,并可常温固化,但多数固化产物机械强度和耐热性均较低。有毒性	耐热性和机械强度较高,但多数是固体,使用不便,毒性较大	机械强度和耐热性较高,用量范围宽。但多数是固体,使用不便,有刺激性	毒性低,性能较好
常见品种	乙二胺、二乙烯三胺、三乙烯四胺、四乙烯五胺、多乙烯多胺、己二胺等。	间苯二胺、4,4'-二氨基二苯甲烷等	邻苯二甲酸酐、顺丁烯二酸酐、NA酸酐、均苯四酸二酐、70酸酐等	低分子聚酰胺、酚醛树脂、醛亚胺树脂、聚硫橡胶等

(续)

类型	催化型固化剂			
品种	叔胺类	咪唑类	硼化物	有机金属化合物
反应机理	叔胺氮原子上的未共享电子与环氧基上的碳原子形成负离子,使其开环,并使链增长形成高分子化合物	同左	三氟化硼络合物作用主要是通过受热分解放出质子,使环氧基开环聚合交联。硼胺化合物主要是叔氮原子起催化作用	主要利用放出的质子促使环氧基开环聚合而形成高分子化合物
固化温度	室温或高温	中温	室温或高温	中温
特点	粘接性能较好,有毒性	用量少,气味小,用途广,耐热性较高,毒性低	多数为潜性固化剂,使用寿命长	有较好的机械性能和耐热性,但价格贵,毒性较大
常见品种	三乙胺、三乙醇胺、苄基二甲胺、双氰胺	2-甲基咪唑、2-乙基4-甲基咪唑、704 ^o 固化剂、708 ^o 固化剂	三氟化硼-苄胺、三氟化硼-咪唑等	辛酸亚锡、钛酸四丁酯、三乙氧基铝等

2) 部分固化剂固化条件(表 3-43)

表 3-43 固化剂固化条件

名称	用量 (g/100g 树脂)	固化条件		其他特性
		温度 (°C)	时间 (h)	
三乙胺	10	20	24	低沸点无色液体,使用寿命7h 无色或浅黄色粘稠液体,使用寿命4h
三乙醇胺	14	80	4	
咪唑	4~8	60~80	6~8	白色结晶,使用寿命可达几十小时
三氟化硼-苄胺	10	130	4	使用寿命3~4周
三氟化硼-咪唑	3	140	4	使用寿命8~10月
二乙烯三胺	10~11	25	24	无色至浅黄色液体,有刺激气味,使用寿命短
间苯二胺	14~16	80	2~4	白色或淡黄色结晶,使用寿命约6h
邻苯二甲酸酐	40~45	150	24	白色结晶,使用寿命较长
400 ^o 聚酰胺	35~200	20	24	同650 ^o 聚酰胺树脂的使用寿命
烷胺基硼烷 (594 ^o)	7~12	60	4	
		120	2	黄褐色稠状液体,使用寿命10个月以上

(12) 增韧剂或增塑剂 环氧树脂硬化后,一般都较脆。为此,需加入增韧剂或增塑剂来改善它的抗冲击性。但增塑剂并不与环氧树脂反应,仅是机械地混和,时间长了,会游离出来而造成胶质老化或变质,故一般用量为树脂重量的5~20%,当加入增韧剂时,则参与反应。常用的增塑剂有邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯、磷酸三苯酯等。常用的增韧剂有低分子聚酰胺、聚硫橡胶、不饱和聚酯树脂等。

(13) 稀释剂 大多数环氧树脂都是粘稠液体或固体,在配制时需要加入溶剂稀释,以便于操作,同时也可提高树脂的润湿能力。

稀释剂有活性和非活性两种。非活性稀释剂不参与反应,固化过程中挥发出来。常用的非活性稀释剂有丙酮、环己酮、苯、甲苯、二甲苯、正丁醇及苯乙烯等,一般用量为树脂重量的5~15%

常用的活性稀释剂具有环氧基,能参与环氧树脂固化反应。一般用量为树脂重量的5~20%。用活性稀释剂时,固化剂的用量要按稀释剂的用量和其环氧值适当增加。双酚A型(E型)环氧树脂最好采用缩水甘油醚型稀释剂,如600[#]、630[#]、690[#]、512[#]等活性稀释剂,它们的环氧值及粘度等如表3-44所示。

表 3-44 稀释剂

牌 号	化 学 名 称	环 氧 值	粘 度Pa·s
600 [#]	二缩水甘油醚环氧	1.15~1.3	$4\sim6\times 10^{-3}$
630 [#]	多缩水甘油醚环氧	0.35~0.47	$40\sim 126\times 10^{-3}$
690 [#]	环氧丙烷苯基醚	0.45	7×10^{-3}
512 [#]	乙二醇双缩水甘油醚	0.7	100×10^{-3}

(14) 催化剂 某些胺类和酸酐类固化剂与环氧树脂的反应速度较慢,为提高效率,降低固化温度,可加入适当的催化剂。表3-45列出了不同固化剂所用催化剂。

表 3-45

固化剂	催化剂	常用品种	实 例
胺类	酚类化合物 硫醇化合物	间甲酚, 间苯二酚 乙二硫醇	以间苯二胺为固化剂的环氧树脂体系在 60°C 下固化 4 h, 如加入 10% 间苯二酚, 在 20°C 下 4 h, 即可完全固化
酸酐类	叔胺化合物 咪唑	三乙醇胺、苄基 二甲胺吡啶、 2,4,6-三(二甲胺基 甲基)苯酚、2-乙基- 4-甲基咪唑	以桐油酸酐为固化剂的环氧树脂体系, 应在 180°C 下固化 24 h, 如加入 1% 2-乙基-4-甲基咪唑, 则可在 140°C 下固化 24 h

(15) 填充剂 填充剂的作用是提高树脂机械强度、耐磨性能和粘结强度, 增加导热率, 提高耐热性, 降低固化收缩率和热膨胀系数等。

可作填充剂的材料很多, 但应是中性或弱碱性, 不含结晶水, 不与环氧树脂及辅助材料起反应。粉末填充剂要求颗粒细小均匀。填充剂比重和环氧树脂比重相差不能太大。常用填充剂如表 3-46 所示。

表 3-46 填充剂

填 充 剂 名 称	作 用
铝粉、云母粉、石棉、玻璃纤维、石英粉、铁粉、水泥	提高机械强度及硬度
氧化铝粉、钛白粉、瓷粉	提高粘结力
石棉粉、酚醛树脂	提高耐热性
铜粉、铝粉	提高导电、导热性
石墨、硅酸镁、石英粉	提高抗磨性
不饱和聚酯、脲醛树脂	增加柔软性
高岭土、碳酸钙、硅酸铝、各种纤维、石膏粉、滑石粉、白垩	提高抗弯模数
滑石粉	增加润滑性

(16) 环氧树脂配方实例 表 3-47。

表 3-47

序号	组份与配比 (重量比)	固 化 条 件			用 途
		压 力 (kg/ cm ²)	温 度 (°C)	时 间 (h)	
1	618*环氧树脂 100 二乙稀三胺 8 邻苯二甲酸二丁酯20 氧化铝粉(200目)100	0.5	20	24	各种金属、胶木、陶瓷、 玻璃等粘接
2	618*环氧树脂 100 间苯二胺 18 600*稀释剂 10 间苯二酚 10	0.5	20	24	室温固化,高温使用
3	618*环氧树脂 100 400*聚酰胺(650*) 100~120	0.5	20	24	用于一般金属、塑料、 陶瓷、木材等粘接
4	618*环氧树脂 100 703*醛亚胺树脂 30 二甲苯甲醛树脂 20	0.5	20	24	耐水性好,用于金属、塑 料、木材、陶瓷等粘接
5	618*环氧树脂 100 邻苯二甲酸酐 40 聚酯树脂 20 氧化铝粉 50	0.5	140	4	用于150°C以下金属件 粘接
6	6101*环氧树脂 100 JL.Y-121聚硫橡胶10 微胶囊(内含4,4'二氯 基二苯甲烷) 50	0.5	130	2	用于金属粘接

2. 部分粘结胶配方

下面介绍的配方,由于目前对材料的性能、来源等尚无统一的规定,因此,按照同样的比例配制出来的粘结胶,由于材料上的差别而其性能会有较大出入,故按下面的配方配制出来后,尚需结合实际使用情况作一些成分上的调整。一般说来,如果胶太软,可增加松香含量,减少蜡的含量;太硬,则反之。表 3-48

是用于粗磨加工中的零件粘结胶配方；表 3-49 是用于磨边时的零件粘结胶；表 3-50 是用于透镜或平面镜弹性胶的火漆。火漆硬度的调整除了改变松香、沥青的比例外，还可增加或减少填料（如碳酸钙、滑石粉等），以提高或降低软化点。用于磨边、细磨抛光前的上盘等工作的松香蜂蜡胶，熬制好后还要用洁净纱布夹棉花过滤，以去掉砂粒一类机械杂质。

表 3-48 常用粘结胶配方之一

序号	松香(特级或一级)(%)	蜂蜡(%)	石蜡(%)	固体固马龙(%)	虫胶(%)	用途
1	80~60	02~40				成盘粘结
2	90~80	10~20				粘玻璃条
3	84~83	7~8			9	铣磨时粘结
4	83~89		17~11			粘玻璃条
5	20~25		20~25	60~50		成盘及玻璃条粘结
6	20		40	40		同上

表 3-49 磨边胶配方(%)

序 号 成 分	1	2	3	4	5	6	7
松香(特级或一级)	98~97	96~95	94~92	91~90	89~88	73	89
蜂蜡	2~3	4~5	6~8	9~10	11~12	2	10
漆片						25	1

表 3-50 火漆配方表之一

序 号	1	2	3	4	5
材 料 名 称	含 量 百 分 比				
松香(特级或一级)	44~61	60~64	55~62	29~34	25~15
沥青(80°)	5~8	5~9	10~2		17~7
环氧树脂(E-44)				1	
纯地蜡(80°)			4~3		
机油(20°或30°)			1		
颜料(深色)				少量	
滑石粉	51~31				
碳酸钙		35~27	30~32		8~39
双飞粉				70~65	50~39
软化点(°C)	80~130	80~120	90~120	90~100	110~160
应用范围	中、小零件	同1	同1	同1	大、中、小零件

表 3-51 火漆配方表之二

松 香	轻质碳酸钙	双 飞 粉	沥 青	改性酚醛树脂	蜂 蜡
47份	28份	18份	6份	3份	1份

注：此表是国内某厂经反复试验后，在表3-50基础上改进的一种配方，它的特点是对温度变化不敏感。

八、抛 光 胶

目前用得较多的抛光胶仍是以松香、沥青为基本原料的抛光胶(又称抛光柏油)。根据各单位的习惯和传统，在上述基本原料中又适当加入一定量的添加物——蜂蜡、羊毛纤维(1~5%)、固马龙、松香改性酚醛树脂、塑料粉等。表3-52和表3-53列出了15个不同性能的抛光胶配方，其中表3-52是以针入度值来表示其硬度的，1号最硬，10号最软。表3-53是以软化点来表示其硬度的。由于材料来源不同，按同样的比例配出来的抛光胶，其

硬度值可能会有较大出入,故尚需根据实际使用情况作适当调整。如增加松香含量则提高硬度;反之,则降低。表 3-54 配方常用于准球心高速抛光。

对于高精度平面抛光模,国内外曾经试用过聚四氟乙烯抛光模,收到了较好的效果。它是在一块低膨胀系数玻璃板上,涂上一层厚约 0.5mm 的聚四氟乙烯制成。玻璃平板在涂料前先用 280[#] 砂子磨平,控制平行度在 0.1mm 以内;然后在表面锯出纵横交错的小槽,槽深约 1.5mm,宽约 1.3mm,使表面形成很多 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 的小方块(图 3-11),然后再用 W40 磨料把表面磨平,用 $\phi 1.4 \sim \phi 2.4 \text{ mm}$ 的钢丝将小槽倒角,就完成了底板的准备工作。

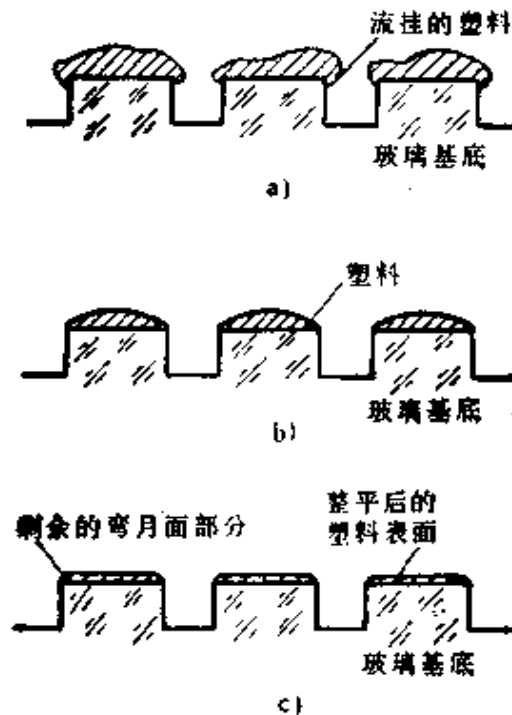


图 3-11

a) 不正确的涂层,塑料流挂在格状小块上 b) 正确涂层 c) 整平后的形状

接着是配制聚四氟乙烯塑料,它分底层和面层。底层塑料是将四份混合酸液(按重量计)缓慢地滴入六份聚四氟乙烯分散液而成(只能将酸液滴入分散液,不能反之)。滴时要不断搅拌,而且一定不能过快。混合酸液由铬酐 17.3g, 85%浓度的磷酸 20g, 将两者混合后加蒸馏水 100ml 制成。底层塑料要随配随用。

面层塑料是将七份聚四氟乙烯分散液(按体积计)倒入三份胶体水剂石墨粉搅拌混合而成,用400目筛子过滤。它也应随用随配。

两种塑料配好后,先刷上底层塑料,反复刷5~6次,至厚度达0.05~0.1mm。每次刷后应在100°C左右烘干,再加温至350°C左右,保温10min后,让其自然冷却至室温。底层涂好后开始刷面层塑料,大约共刷10~15次才成型,厚约0.3~0.5mm。每刷一次后要先用红外线灯预热,再加温到350°C并保温1.5h,最后一层要保温4h。涂料时,注意勿将开好的槽堵塞。塑料加温时会产生有毒气体,故应在有良好的通风状况下进行。

塑料抛光面的整形是利用毛玻璃板加水缓慢磨平。开始时用表面粗糙度大的,以加快磨平速度,逐渐换粗糙度较小的玻璃板。

聚四氟乙烯抛光模主要用来解决高精度平面问题,国外最高抛光精度已达 $1/200\lambda$ 。但其抛光效率较低,因此在利用它抛光前应先用常规方法将平面度控制在1~2个光圈,再用聚四氟乙烯盘精抛。抛光粉粒度应选细一些。

表 3-52 抛光胶配方(%)之一

序 号	松 香 (特级或 一级)	沥 青 (3*)	蜂 蜡 (提纯)	机械油 (20*~ 30*)	针 入 度 (mm)
1	92	6	2	—	0.1~0.3
2	91	7	2	—	0.3~0.5
3	89	9	2	—	0.5~0.6
4	87	11	2	—	0.6~0.8
5	85	12	2	1	0.8~1.0
6	80	18	2	—	1.0~1.2
7	78	20	2	—	1.2~1.5
8	66	32	2	—	1.5~2.0
9	55	43	2	—	2.5~3.0
10	48	45	2	5	3以上

注:表中针入度测定条件:荷重0.5kg, 30°C, 1 min。

表 3-53 抛光胶配方(%)之二

序 号	松 香	沥 青 (80*)	蜂 蜡 (提纯)	松香改性 酚醛树脂	软化点(°C, 环球法)
1	60	39	1	—	60~63
2	70	29	1	—	63~65
3	80	19	1	—	65~70
4	56	19	1	24	70~75
5	16	19	1	64	75~80

表 3-54 抛光胶配方(%)之三

松 香	沥 青 (5*)	蜂 蜡	210松香改 性酚醛树脂	604固体环 氧树脂	羊 毛
49.45	7.5	0.5	28.75	11.5	2.3

九、常用有机溶剂

见表 3-55。

表 3-55 常用

名称	分子式	外观	沸点 (°C)	凝固点 (°C)	自燃温度 (°C)	密度 (g/cm ³) (20°C)
无水乙醇	C ₂ H ₅ OH	无色液体	78.30	-110.5	400	0.789
乙醚	(C ₂ H ₅) ₂ O	无色液体	34.6	-116.3	188	0.714
溶剂汽油		无色或淡黄色	120~200		230~260	0.795
丙酮	CH ₃ COCH ₃	无色液体	56.5	-94.3	500	0.792
苯	C ₆ H ₆	无色液体	80.1	5.5(熔)	580	0.879
三氯乙烯	CH ₂ ClCCl ₂	无色液体	86.7	-73	不燃	1.465
石油醚		无色液体	30~90			0.675
四氯化碳	CCl ₄	无色液体	76.70	-23	不燃	1.595
二硫化碳	CS ₂	无色液体	46.25	-108.6	124	1.260

十、擦拭材料

1. 擦布

对擦布的基本要求是：洁净、柔软、脱脂、落毛少、酸碱度呈中性。

光学冷加工过程中用的擦布的脂肪含量不大于0.15%，水分含量不大于8%。

有机溶剂

蒸气压力 (Pa) (20°C)	与空气混合的 爆炸限度% (体积)	挥发速率 (以乙醚=1)	其他性能和用途
5853	3.28~18.95	8.3	乙醇含量99.5%以上,能溶于水、甲醇、乙醚、苯等有机溶剂。具有吸湿性,与水能形成共沸混合物。能溶解松香、漆片、油脂等
58928	1~40	1	有特殊芳香味。微溶于水,易溶于乙醇、苯及石油醚等有机溶剂。蒸气具有麻醉性。能溶解油脂、松香、沥青、蜡及某些树脂
9946	1.20~6	39~55	能溶解沥青、蜡、油脂等
16665	2.15~13	2.1	有特殊气味。能与水、醇、醚、和多数油类混溶。蒸气对人体有害
9999	1.40~9.50	3	有芳香味。不溶于水,能与乙醇及醚互溶。能溶解沥青、松香、树脂、脂肪、蜡及油类等。蒸气对人体有害
7999		3.8	不溶于水而溶于醇及醚,性质稳定,并呈酸性反应。有毒。能溶解脂肪、油及蜡等
			有特殊臭味,不溶于水,易溶于水醇、醚、苯等有机溶剂。能溶沥青、蜡、油脂等
12092		3	有特殊气味。不溶于水,溶于醇、醚、苯、油类、三氯甲烷、汽油等。具有麻醉性和毒性。能溶解脂肪、各种树脂、橡胶等有机物质
39663	1~50	1.8	纯品有乙醚味,一般均具有恶臭。易挥发及易燃烧。有毒。能与无水乙醇、醚、苯、氯仿、四氯化碳、油脂以任何比例混合。溶于苛性碱及硫化碱。能溶解碘、溴、硫、油脂、蜡、树脂、橡胶、樟脑及黄磷等物质

2. 脱脂棉

1) 光学脱脂棉

光学脱脂棉是用长纤维高质量原棉经梳理、化学处理、脱脂等工序,除去所含油脂、蜡质、盐类及机械杂质而制成的。其技术要求如表 3-56,常用于冷加工中清洁度要求高的工序,如零件检验及软质晶体的擦拭等。

表 3-56 光学脱脂棉指标

项 目	零级脱脂棉	一级脱脂棉
外 观	纤维条理均匀、洁白	纤维条理均匀、洁白
气 味	无任何气味	无任何气味
短纤维(5mm以下)和棉尘含量(%)	0.1	0.1
水分含量(%)	<0.8	<0.8
平均纤维长度(mm)	不小于19	不小于19
毛细管作用:5min内上升高度(mm)	70	70
水抽取溶液反应	中性	中性
灰分含量	0.1	0.15
氯化物、硫酸盐及钙盐含量	痕量	痕量
脂肪和蜡质含量(%)	0.03	0.05

2) 医用脱脂棉

医用脱脂棉在纤维长度、强度、脂肪及蜡的含量等方面较光学脱脂棉要差，常用于抛光过程及其他要求不高的场合。

十一、保护涂料

过去，光学冷加工常用的抛光面保护涂料是假漆。但是假漆的酒精溶液呈酸性(pH值为4~6)，且漆膜的透水性大，因此，对化学稳定性差的玻璃很不适用。另外，化学稳定性差的玻璃在磨边过程中的保护是要求不影响对心。加工完毕后入库的零件的保护是要求能很方便地除去保护胶。下面介绍几种保护胶的配方，表3-57是抛光工序间保护胶，表3-58是磨边保护胶，表3-59是库存保护胶。抛光面在涂胶前，最关键之点是表面必须洁净、干燥，否则达不到保护目的。

50257 3624
256765

表 3-57 抛光工序间保护胶

序号	原 料	配 比	清 洗 溶 剂
1	α -蒎烯树脂 香蕉水	30g 100 ml	汽油
2	丙烯酸树脂 醋酸乙酯	100g 100 ml	乙醇;乙醚; 醋酸乙酯
3	甘油松香 E ₁₂ 环氧树脂 乙醇-甲苯溶液(1:1)	50 g 10 g 300 ml	汽油; 乙醇
4	环化橡胶 二甲苯	4 g 100 ml	汽油; 乙醇
5	210松香改性酚醛树脂 E ₁₂ 环氧树脂 香蕉水	160 g 25 g 400 ml	汽油; 乙醇
6	SF ₆₀₁ (武汉化工所研制)		汽油

表 3-58 磨边保护胶

序号	原 料	配 比	清 洗 溶 剂
1	α -蒎烯树脂 石蜡 碳酸钙	100 g 20 g 1 g	汽油 苯
2	201甲基硅油 苯	5% 95%	250°C固化1 h,成膜后洗不掉
3	49°十二烷基三甲氧基硅烷		室温固化24 h,成膜后洗不掉

表 3-59 库存保护胶

序 号	原 料	配 比	使 用 方 法
1	乙基含氢硅油 苯 二甲胺基乙醇 无水乙醇	10 g 100 ml 1 g 100ml	1. 按配比配成溶液 2. 直接涂于零件表面 3. 2~3min后成膜 此配方仅适用于不涂消光漆的零件, 膜层洗不掉
2	49°防雾剂 无水乙醇 无水乙醚	2ml 175ml 75ml	室温固化24 h 膜层洗不掉
3	过氧乙烯树脂 邻苯二甲酸二丁酯 E ₁₂ 环氧树脂 二甲苯 醋酸乙酯 丙 酮	5 g 1.5 g 0.5 g 20ml 20ml 10ml	1. 用干净毛笔涂于洁净的抛光面 2. 此配方属可剥性涂料

第四章 模 具

用于粘结和研磨平面零件的工具称平模；粘结和研磨球面零件的工具称球模；粗磨或抛光过程中用于装置棱镜的角度工具称夹模。上述统称模具。

一、平 模

1. 圆形平模上圆形零件的粘结数

在计算平模上零件的粘结数以前，先根据所用机床功率，初步确定在该机床上能加工的平面镜盘（粘结在平模上的所有零件

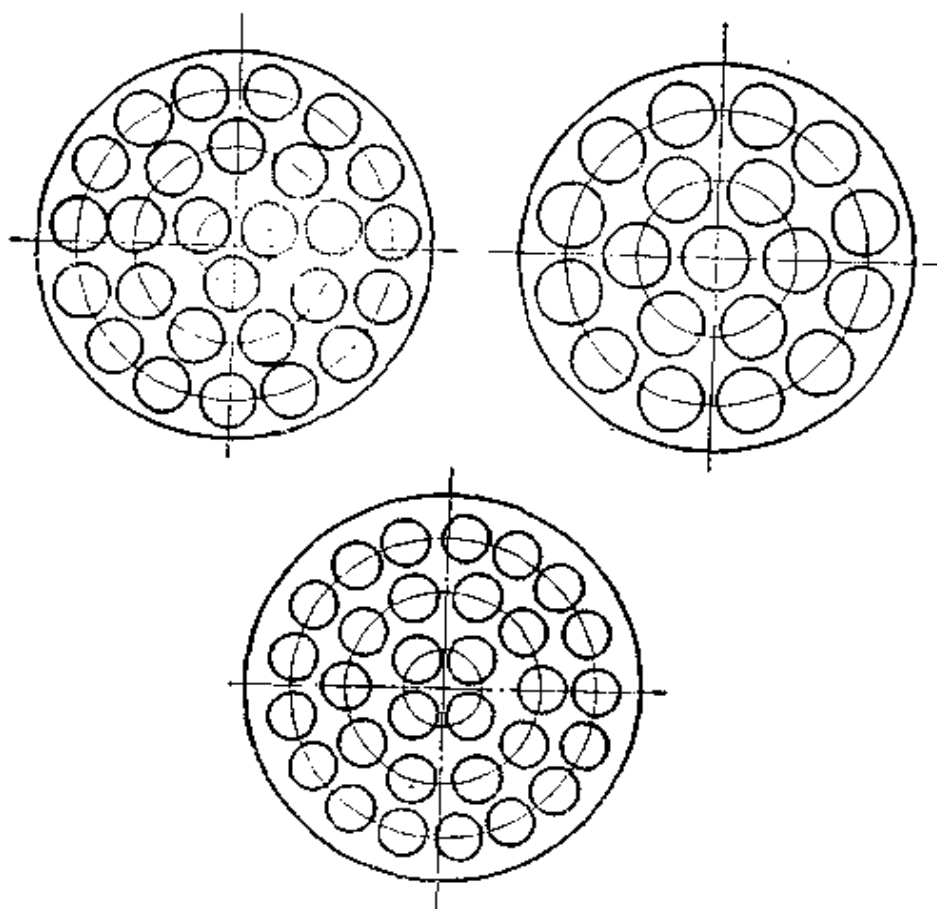


图 4-1 平模上零件的排列

组成镜盘)的最大直径,然后根据此初定直径计算能够粘结的零件数量,再根据计算结果对初定直径略加修正。

(1) 确定排列方式

排列方式的区别主要在于中心第一圈的数量。比较合理的排列方法是中心一块、三块和四块三种(参看图 4-1)。中心排列为二块和五块的方法不合适,因为这时中间部分空隙太大,影响均匀磨削。

(2) 计算各圈零件数 n_m (参看图 4-2)

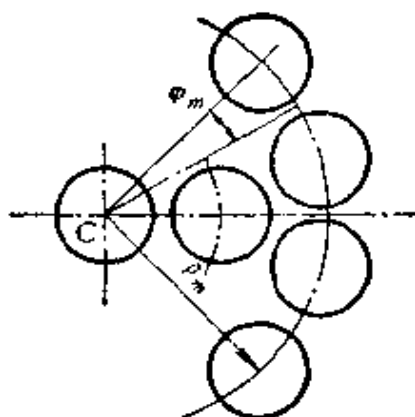
$$n_m = \frac{2\pi}{2\varphi_m} = \frac{\pi}{\varphi_m} \quad (4-1)$$

式中 $\varphi_m = \arcsin \frac{d+b}{2\rho_m}$;

d ——零件直径;

b ——相邻两块零件之间的间隙量(一般取 $b=0.05d$, 但不小于 0.5 mm);

ρ_m ——过第 m 圈零件中心的圆半径(其计算方法根据镜盘中心零件排列方式不同而略有差别)。



当镜盘中心放置一块零件时(参 图 4-2 中心一块的排列
看图 4-2)

$$\rho_m^1 \ominus = (m-1)(d+b) \quad (4-2)$$

当中心放置三块零件时(参看图 4-3)

$$\rho_m^3 = (m-0.4)d + (m-2)b \quad (4-3)$$

当中心放置四块零件时(参看图 4-4)

$$\rho_m^4 = (m-0.26)d + (m-1)b \quad (4-4)$$

(3) 计算零件总数

镜盘上零件总数为各圈零件数之和。

⊖ 右上角数字代表排列方法,下同。

2. 镜盘和粘结模的直径

知道了最后一圈的半径 ρ_m ，就不难求出镜盘的直径 D ，即 D 等于两倍的 ρ_m 加上两倍的 $\frac{d}{2}$ 。按中心一块零件的方式排列时，镜盘直径 D_1 为：

$$D_1 = (2m - 1)d + (m - 1)2b \quad (4-5)$$

按中心三块零件的方式排列时，镜盘的直径 D_3 为：

$$D_3 = (m + 0.1)2d + (m - 2)2b \quad (4-6)$$

按中心四块零件的方式排列时，镜盘的直径 D_4 为：

$$D_4 = (m + 0.24)2d + (m - 1)2b \quad (4-7)$$

粘结模的直径由镜盘直径加上边缘间隙量 $2b$ 得到。

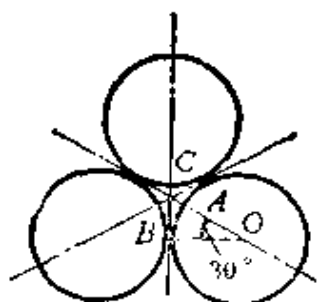


图 4-3 中心三块零件

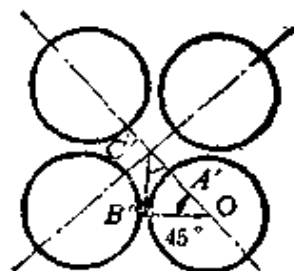


图 4-4 中心四块零件

3. 计算圆形零件粘结数的综合表

为了迅速求得已知直径为 d 的零件的排列情况，对上述中心一块、三块和四块三种排列方式，编制了圆形平面镜盘上圆形零件的粘结数的综合表(见表 4-1)。此表的使用方法如下：

1) 根据所用机床功率或其他工艺条件，初步确定镜盘直径 D' 。

2) 求出镜盘直径 D' 和零件直径 d 的比值 $\frac{D'}{d}$ 。

3) 从表 4-1 的 $\frac{D'}{d}$ 栏中找与之相对应的值，如无相同的则取较小的近似值。

4) 表 4-1 的第三直栏 m 是镜盘上零件的总圈数。

5) 表 4-1 的第四直栏 $n_1 + n_2 + n_3 + \dots$ 中， n_1 为第一圈的零件数，也即中心零件的排列方式。 n_2 、 n_3 依次为第二圈和

第三圈的零件数，依此类推。

6) 表 4-1 的第五直栏 N 为镜盘上零件总数。

7) 表 4-1 的第六直栏 D 为镜盘的最后直径。

8) 也可以根据已知零件直径 d 和需要加工的零件总数 N ，求出镜盘的直径 D 。

表 4-1 圆形平面镜盘上圆形零件的粘结数

序号	D'/d	m	$n_1+n_2+n_3+\dots$	N	D
1	1	1	1	1	d
2	2.2	1	3	3	$2.20d$
3	2.48	1	4	4	$2.48d$
4	3.1	2	1+6	7	$3.00d+2b$
5	4.2	2	3+9	12	$4.20d$
6	4.58	2	4+10	14	$4.48d+2b$
7	5.20	3	1+6+12	19	$5.00d+4b$
8	6.30	3	3+9+15	27	$6.20d+2b$
9	6.68	3	4+10+17	31	$6.48d+4b$
10	7.30	4	1+6+12+18	37	$7.00d+6b$
11	8.40	4	3+9+15+22	49	$8.20d+4b$
12	8.78	4	4+10+17+23	54	$8.48d+6b$
13	9.40	5	1+6+12+18+25	62	$9.00d+8b$
14	10.50	5	3+9+15+22+28	77	$10.20d+6b$
15	10.88	5	4+10+17+23+29	83	$10.48d+8b$
16	11.50	6	1+6+12+18+25+31	93	$11.00d+10b$
17	12.60	6	3+9+15+22+28+34	111	$12.20d+8b$
18	12.98	6	4+10+17+23+29+35	118	$12.48d+10b$
19	13.60	7	1+6+12+18+25+31+37	130	$13.00d+12b$
20	14.70	7	3+9+15+22+28+34+41	152	$14.20d+10b$
21	15.08	7	4+10+17+23+29+35+42	160	$14.48d+12b$
22	15.70	8	1+6+12+18+25+31+37+43	173	$15.00d+14b$
23	16.80	8	3+9+15+22+28+34+41+47	199	$16.20d+12b$
24	17.18	8	4+10+17+23+29+35+42+48	208	$16.48d+14b$
25	17.80	9	1+6+12+18+25+31+37+43+50	223	$17.00d+16b$
26	18.90	9	3+9+15+22+28+34+41+47+53	252	$18.20d+14b$
27	19.28	9	4+10+17+23+29+35+42+48+54	262	$18.48d+16b$

(续)

序号	D'/d	m	$n_1+n_2+n_3+\dots$	N	D
28	19.90	10	1+6+12+18+25+31+37+43+50+56	279	$19.00d + 18b$
29	21.00	10	3+9+15+22+28+34+41+47+53+59	311	$20.20d + 16b$
30	21.38	10	4+10+17+23+29+35+42+48+54+60	322	$20.48d + 18b$
31	22.00	11	1+6+12+18+25+31+37+43+50+56+62	341	$21.00d + 20b$
32	23.10	11	3+9+15+22+28+34+41+47+53+59+66	377	$22.20d + 18b$
33	23.48	11	4+10+17+23+29+35+42+48+54+60+67	389	$22.48d + 20b$
34	24.10	12	1+6+12+18+25+31+37+43+50+56+62+68	409	$23.00d + 22b$
35	25.20	12	3+9+15+22+28+34+41+47+53+59+66+72	449	$24.20d + 20b$
36	25.58	12	4+10+17+23+29+35+42+48+54+60+67+73	462	$24.48d + 22b$

4. 圆平模材料和结构参数

(1) 材料

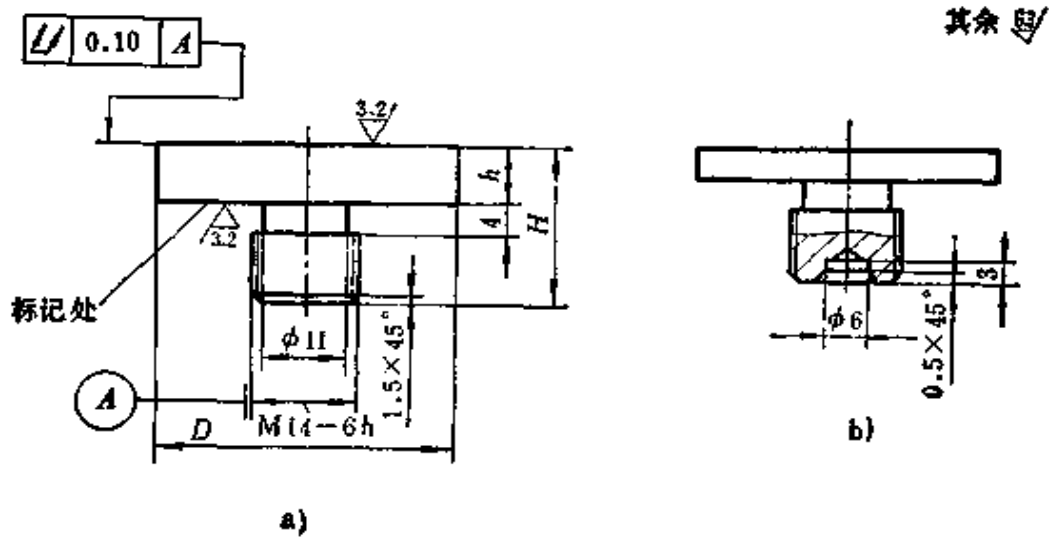
常用圆平模材料如表 4-2 所示。

表 4-2

平模种类	直径(mm)	材 料
粗磨平模	200~450	灰口铸铁HT20-40
精磨平模	30~450	黄铜H62 硅黄铜HSi80-3 灰口铸铁HT20-40
抛光平模 粘结平模	30~450	铝合金LY12 铸铝合金ZL7

(2) 结构参数(摘自 WJ 1383—83)

平模的结构参数如图 4-5~7 和表 4-3~5。

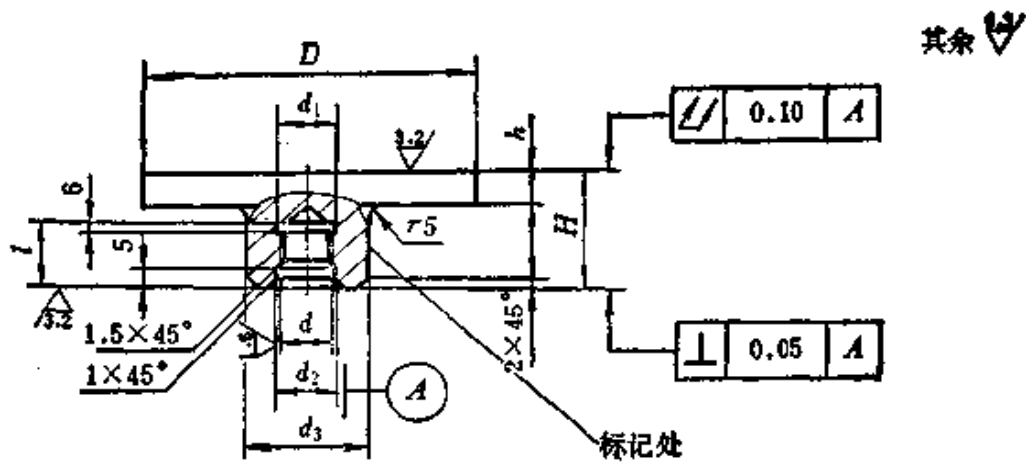
图 4-5 $D=30\sim 60$ mm 圆平模

a) 用于精磨 b) 用于抛光

表 4-3 $D=30\sim 60$ 圆平模(图4-5)

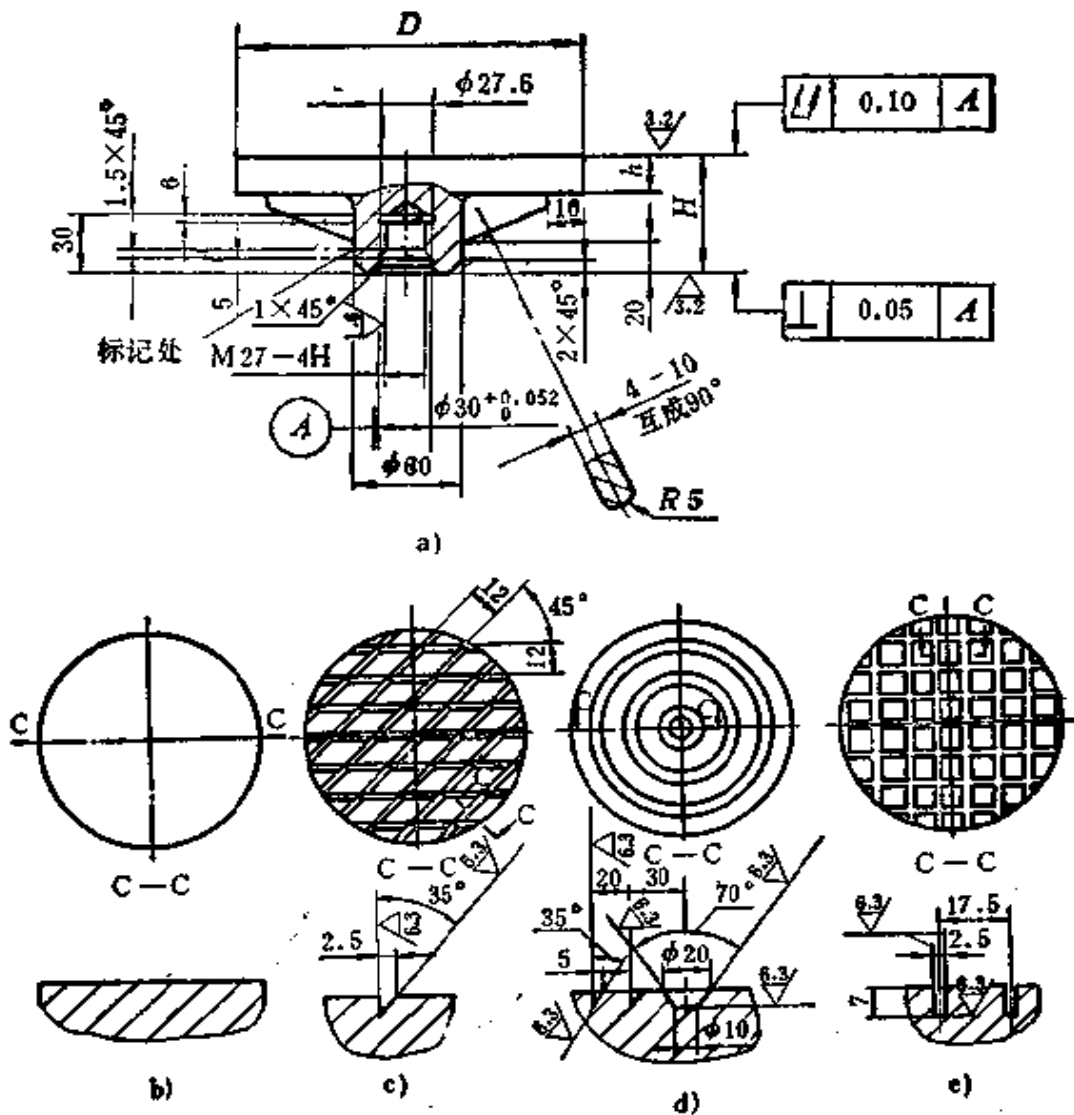
(mm)

D	用于精磨		用于抛光	
	h	H	h	H
30	8	22	4	18
40				
50	10	24	6	20
60				

图 4-6 $D=80\sim 320$ mm 圆平模表 4-4 $D=80\sim 320$ 平模 (图4-6) (mm)

D	用于粗磨		用于精磨		用于抛光		d	d ₁	d ₂		d ₃	l
	h	H	h	H	h	H			基本尺寸	极限偏差H 9		
80			10	36	6	32						
100			12	38	8	34						
120	12	38					M20-5H	20.4	22		36	22
150	14	40	14	40	10	36						
170												
200	18	52	18	52	14	48				+0.052		
220										0		
240	20	54	20	54	16	50					48	
260							M27-4H	27.6	30			30
280	22	56	22	56	18	52						
300												
320	26	65	25	65	20	60					55	

其余√

图 4-7 $D=350\sim 450$ mm 圆平模

a) 平模形状 b) 表面不开槽 c) 斜交槽 d) 同心圆槽 e) 正交槽

表 4-5 $D=350\sim 450$ 圆平模(图4-7) (mm)

D	用于粗磨		用于精磨		用于抛光	
	h	H	h	H	h	H
350	25	70	25	65	20	60
400						
450			—	—	—	—

二、球 模

1. 粘结模

设计粘结模时，首先是计算镜盘上零件的排列方式和数量，确定镜盘的尺寸(张角、高度和直径)，然后再求粘结模的球面半径和其他尺寸。

(1) 用解析法确定镜盘上零件的排列、数量和镜盘尺寸

1) 排列和数量

计算镜盘上零件的排列和数量的第一步是根据零件球面半径及机床功率给出镜盘的初定高度。当零件球面半径 $R < 75 \text{ mm}$ 时，镜盘可粘成半球形，即镜盘的高度 $H = R$ ；当零件球面半径 $R > 75 \text{ mm}$ 时，在不超过机床功率的情况下，可达 $H = 0.85 R$ 。镜盘表面半径即零件加工面半径。

镜盘高度初步确定后，首先计算镜盘上零件的排列方法和圈数。镜盘上零件的圈数可用 γ 与 2α 之比求得，如图 4-8 所示。 γ 为通过镜盘顶点和边缘的两条半径之间的夹角； α 为通过零件中心和间隙中心的两条半径之间的夹角。其中 γ 由下式确定

$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{H_0}{R}\right) \quad (4-8)$$

式中 H_0 ——镜盘初定高度；

R ——镜盘表面半径。

α 由下式确定

$$\alpha = \arcsin \frac{d+b}{2R} \quad (4-9)$$

式中 d ——零件直径；

b ——各圈零件之间的间隙量。

一般情况下取 $b = 0.05 d$ ，但不小于 0.5 mm 。对于边缘较厚和零件张角较大 ($\alpha_0 > 8^\circ$) 的双凸、平凸和月形镜的凸面(参看图 4-8 c、d)， b 要适当增大 Δb ，以免零件边缘下部相碰。 Δb 由下式确定：

$$\Delta b = 2t \sin \alpha_0 \quad (4-10)$$

式中 t ——零件边缘厚度；

α_0 ——通过零件中心和粘结面边缘的两条半径之间的夹角，其值由下式确定

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{d}{2(R_1 - T \pm h_2)} \quad (4-11)$$

上式正负号的取法：对于双凸透镜取正号，月形镜取负号，平凸透镜 h_2 为 0；

R_1 ——待加工球面半径；

T ——零件中心厚度；

h_2 ——粘结面的矢高。

由于 γ 与 2α 之比值 $\frac{\gamma}{2\alpha}$ 总不可能是整数，故将它分解为整

数 m' 和小数 ξ 两部分，前者就是镜盘上零件的圈数，后者则代表镜盘上零件的排列特征，如图 4-8 b 所示。由于在计算镜盘上零件的圈数时，将中心的一块也算作一圈，但上述 m' 恰好由于分解成整数而将这中间一块没有算作一圈，故为了与实际计算

圈数的方法符合， $\frac{\gamma}{2\alpha}$ 之值需增加一个附加常数 $\frac{1}{2}$ ，即

$$\frac{\gamma}{2\alpha} + \frac{1}{2} = m + \xi \quad (4-12)$$

式中 m ——整数部分，它代表镜盘上零件的圈数；

ξ ——小数部分，它代表镜盘上零件的排列特征，即中间一圈的零件数。

表 4-6 列出了对应各种不同的 ξ 值及中间一圈的零件数 n_1 。由表看出，当零件具有不同的直径，即 $\sin \alpha$ 不同时，中间一圈虽然同样是三块或四块，但 ξ 也不一样。与平面镜盘相同的理由，中间一圈是 2 块和 5 块的排列方式一般不采用。

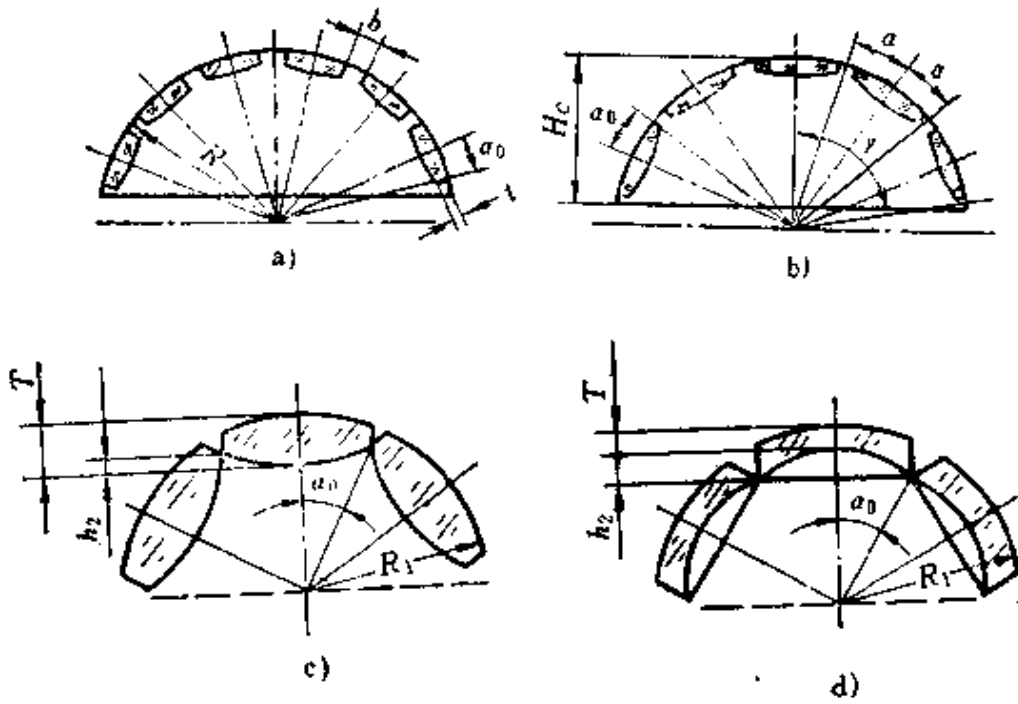


图 4-8 镜盘上零件的排列

a)、b) 一般边缘厚度的透镜

c)、d) 边缘厚度较大的透镜

表 4-6 对应不同的 ξ 值第一圈零件数

n_1	$\sin \alpha$															
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	到1.0	
	ξ															
1	0.0															
2	0.5															
3	0.58										0.59		0.60			
4	0.71			0.72				0.73	0.74	0.76	0.78					
5	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.91	0.94	0.98								

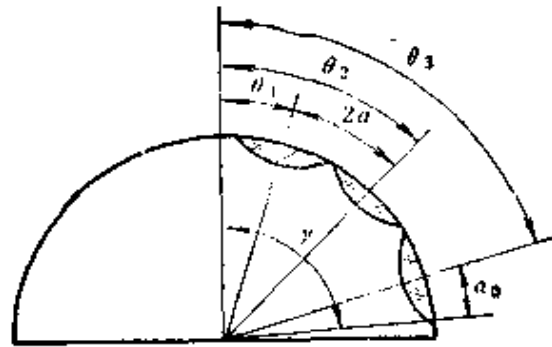
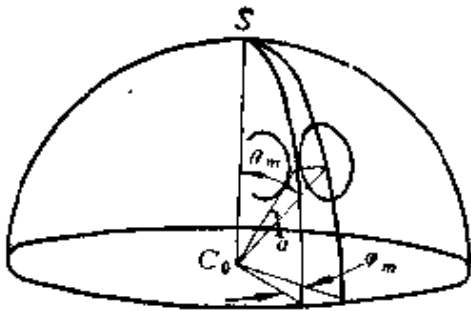


图 4-9 零件在镜盘上的位置 图 4-10 第一圈零件在镜盘上的位置

镜盘上每圈的零件数 n_m ，可按下式求得：

$$n_m = \frac{\pi}{\varphi_m} \quad (4-13)$$

式中 φ_m ——通过零件中心的子午面与通过两间隙中心的子午面间的夹角(参看图 4-9)。它由下式确定：

$$\sin \varphi_m = \frac{\sin \alpha}{\sin \theta_m} \quad (4-14)$$

式中 θ_m ——通过镜盘顶点及通过 m 圈零件中心的两半径间夹角(参看图 4-9)。它由下式确定：

$$\theta_m = \theta_1 + 2\alpha(m-1) \quad (4-15)$$

式中 θ_1 ——通过镜盘顶点及通过第一圈零件中心的两半径之间的夹角(参看图 4-10)。它由下式确定：

$$\sin \theta_1 = \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi_1} \quad (4-16)$$

式中 φ_1 ——第一圈零件所张立体角之半，可按下式求出

$$\varphi_1 = \frac{180^\circ}{n_1} \quad (4-17)$$

式中 n_1 ——第一圈零件的数量。

θ_1 的正弦亦可用表 4-7 确定。对应于第一圈不同的 n_1 ，有一个确定的 $\sin \theta_1$ 值，用 $\sin \alpha$ 表示出来。

表 4-7 $\sin\theta_1$ 与 $\sin\alpha$ 的关系

n_1	$\sin\theta_1$	n_1	$\sin\theta_1$
1	0	4	1.414 $\sin\alpha$
2	$\sin\alpha$	5	1.705 $\sin\alpha$
3	1.154 $\sin\alpha$		

为了迅速地求得第 m 圈的零件数, 表 4-8 根据不同的 $\sin\varphi_m$ 列出了对应的第 m 圈的零件数 n_m 。如果根据公式 4-14 算出的 $\sin\varphi_m$ 从表中找不到相等的值, 就取接近并稍大于计算值的 $\sin\varphi_m$ 值。

表 4-8 与 $\sin\varphi_m$ 值对应的第 n_m 圈的零件数

$\sin\varphi_m$	n_m	$\sin\varphi_m$	n_m	$\sin\varphi_m$	n_m	$\sin\varphi_m$	n_m
—	1	0.282	11	0.148	21	0.101	31
1.000	2	0.259	12	0.142	22	0.098	32
0.866	3	0.239	13	0.136	23	0.095	33
0.707	4	0.223	14	0.131	24	0.092	34
0.588	5	0.208	15	0.125	25	0.090	35
0.500	6	0.195	16	0.121	26	0.087	36
0.434	7	0.184	17	0.116	27	0.085	37
0.383	8	0.174	18	0.112	28	0.083	38
0.342	9	0.165	19	0.108	29	0.081	39
0.309	10	0.156	20	0.105	30	0.079	40

镜盘上零件总数为各圈零件数之和, 即

$$N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$$

根据镜盘的初定高度求得零件的排列方式和圈数以后, 再根据此排列方式和圈数确定镜盘的尺寸(张角、高度和直径)。

2) 镜盘的张角

镜盘张角 γ_m 由下式确定

$$\gamma_m = \theta_m + \alpha_0 \quad (4-18)$$

3) 镜盘的高度

镜盘高度 H_m 由下式确定

$$H_m = R(1 - \cos\gamma_m) \quad (4-19)$$

4) 镜盘的直径

镜盘直径 D_m 由下式确定

$$D_m = 2R\sin\gamma_m \quad (4-20)$$

(2) 用作图法确定镜盘上零件的排列、数量和镜盘尺寸

作图法较简单, 但精度较低, 适用于圈数不大于 3~4 圈的镜盘。

镜盘的初定尺寸方法仍同解析法。然后根据选定的第一圈零件的排列方式, 求出镜盘上零件的圈数和数量。

1) 第一圈为一块(参看图 4-11)

i) 求圈数

a) 以零件球面半径 $R = OA$ 作半圆;

b) 作弦 $MN = d + b$ (MN 即第一圈零件位置, d 为零件直径, b 为间隙量), 并与半径 OA 正交;

c) 从 M 点分别截取 $ME = ES = MN$, 确定圈数。

ii) 求每圈零件数

a) 自 ES 中点作弦 $ad \perp AO$ 交 AO 于 c , 以 ac 为半径, 以 c 点为圆心作圆;

b) 在此圆上自 d 点顺序截取 MN 值(1、2、3……)。当截取到最后不是整数时, 可略改变一下零件位置, 使这一圈的 MN 截取值为整数。 MN 截取值即为这一圈的零件数。其余各圈零件数按此法求得。

iii) 镜盘上零件总数为每圈零件数之和。

2) 第一圈为三块(参看图 4-12)

第一圈位置由第一圈零件顶点到过镜盘顶点的半径 OA 的垂直距离 ac 确定;

$$ac = \frac{d+b}{\sqrt{3}} \quad (4-21)$$

其余步骤与第一圈为一块的相同。

3) 第一圈为四块(参看图 4-13)

第一圈的位置由第一圈零件顶点到过镜盘顶点的半径 OA 的垂直距离 ac 确定,

$$ac = \frac{d+b}{\sqrt{2}} \quad (4-22)$$

其余步骤与第一圈为一块的相同。

对于具有较大边缘厚度的双凸、平凸和月形透镜的凸面, 用作图法求镜盘上零件的排列方式和数量时, 可用所谓假设半径的方法解决零件上部间隙已够而下部还相碰的问题, 即先按基本半径 $R=OA$ 画出半圆, 再在镜盘中央按透镜实际尺寸画出透镜图(参看图 4-14), 然后经过透镜边缘下部 a, d 两点以假设半径 R' 作半圆 $BA'C$, 再按照上述作图法在此半圆上求透镜的排列方式和数量。

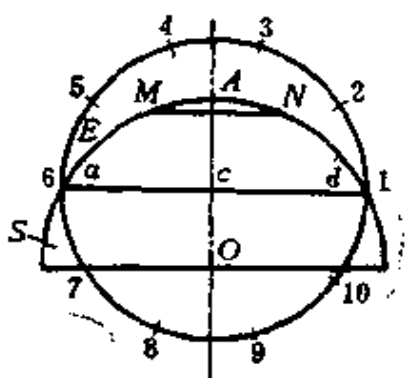


图 4-11 中心一块零件的作图法

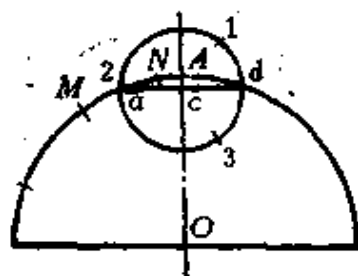


图 4-12 中心三块零件的作图法

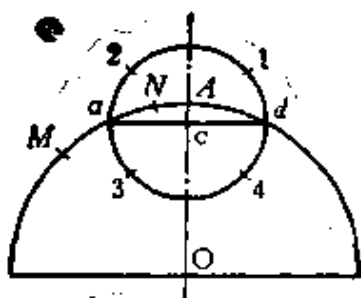


图 4-13 中心四块零件的作图法

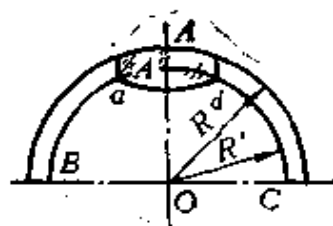


图 4-14 确定假设半径

(3) 粘结模尺寸

(1) 弹性法上盘的粘结模

弹性法上盘时，粘结胶具有较大的厚度（如图 4-15 所示），最薄处约为零件直径的 0.05~0.20。

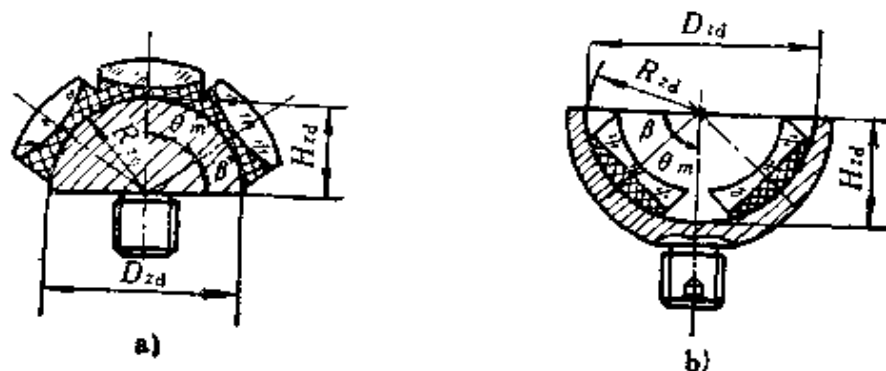


图 4-15 弹性法上盘

a) 凸透镜 b) 凹透镜

粘结模的半径应根据以下两种情况来考虑：一是每块零件应具有相同厚度的胶层；二是不应使最外一圈零件边缘有悬空现象（如图 4-16 所示）。

各种不同形状的透镜用弹性法上盘时，粘结模半径 R_{zd} 的计算方法如表 4-9 所示。

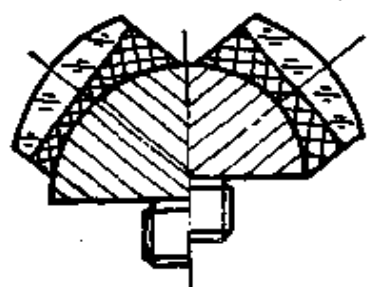


图 4-16 正确的(左边)和有缺点的(右边)粘结

上述计算方法中，对于那些相对曲率较大，只胶三块或四块透镜的凸粘结模，为了避免透镜边缘产生悬空现象，造成边缘砂眼不易去掉，应将粘结模尺寸适当加大，这时粘结模半径 R_{zd} 可按下式计算：

$$R_{zd} = R_0 - t_0 \quad (4-23)$$

式中 R_0 ——镜盘基本半径；

t_0 ——透镜厚度。

粘结模的其他参数按下列公式确定，

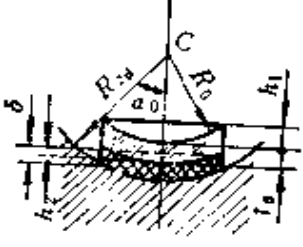
张角 γ_{zd} ：

$$\gamma_{zd} = \theta_m + \beta \quad (4-24)$$

表 4-9 弹性法粘结模的半径计算

名称	示意图	计算公式
双凸、平凸、正月形透镜凸面		$R_{e1} = R_0 - t_0 - \delta$
负月形透镜凸面		$R_{e1} = \sqrt{(R_0 - t_0 - h)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} - \delta$ <p>d 为零件直径</p>
正月形透镜凹面		$R_{e1} = R_0 + t_0 + \delta$
双凹透镜凹面		$R_{e1} = R_0 + (t_0 + h_1 + h_2 + \delta) \cos \alpha_0$

(续)

名称	示意图	计算公式
负月形透镜凹面		$R_{zd} = R_0 + (t_0 + h_1 - h_2 + \delta) \cos \alpha_0$

式中 θ_m ——由式(4-15)得到

$$\beta = \arcsin \frac{1.2d}{2R_{zd}} \quad (\text{参看图 4-15})$$

高度 H_{zd} :

$$H_{zd} = R_{zd}(1 - \cos \gamma_{zd}) \quad (4-25)$$

直径 D_{zd} :

$$D_{zd} = 2R_{zd} \sin \gamma_{zd} \quad (4-26)$$

2) 刚性法上盘的粘结模

刚性法上盘时的胶层厚度要比弹性法薄得多。第一面的胶层厚度 δ 约 0.05 mm; 第二面如中间加上布垫, 则大约为 0.2~0.3 mm。

图 4-17 所示为各种不同情况的刚性法上盘示意图。a 的左边为块料加工双凸透镜第一面, 零件粘在平面座上; 右边为加工双凸透镜第二面, 零件粘在凹窝内。凹窝半径应比零件表面半径略小些, 使中间胶层比边缘约厚 0.1 mm, 避免擦伤第一面。b 为加工较大半径的凸面时, 由于在粘结模上铣平面座较困难, 就用螺钉固定一块垫板。c 的左边透镜具有较薄边缘, 这时凹窝直径要比透镜直径小些, 以保证抛光模表面与粘结模表面有足够的间隙。d 为加工平凹透镜的凹面时, 透镜粘在平面座垫上。e 为加工双凹透镜的凹面, 左边是当透镜粘结面的曲率半径小于透镜直径时, 先将其边缘倒边后再粘到粘结模上, 使倒边紧贴住粘结模。当粘结面的曲率半径较大时, 可以不必倒边, 直接粘到粘结模上。

如右边所示。f 为加工月形镜凸面时，透镜粘在凸模上的情形，与 e 的情况类似，当粘结面的曲率半径小于透镜直径时，倒边后再粘上。g 为加工正月形镜凹面时的粘结情形。h 为加工正月形镜凸面时的粘结情形。各种不同形状透镜的粘结模用刚性法上盘时，粘结模半径 R_{zg} 的计算方法如表 4-10。

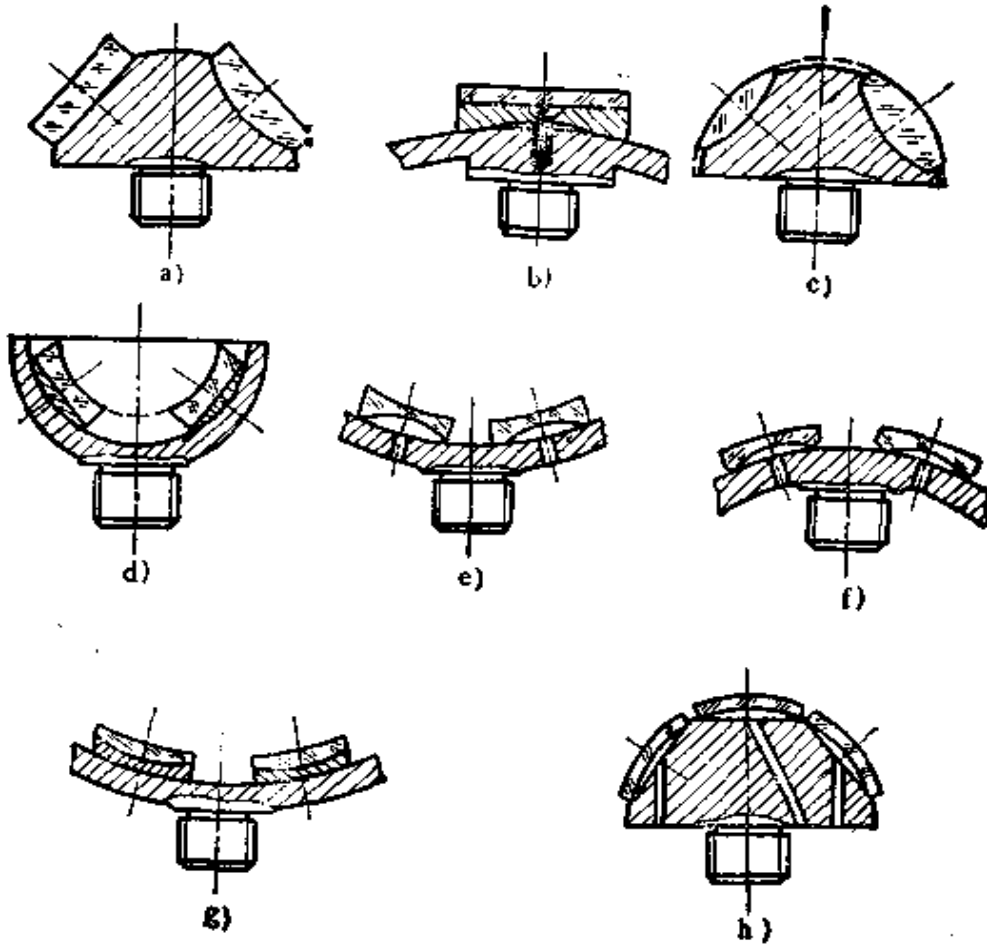
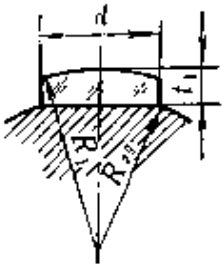
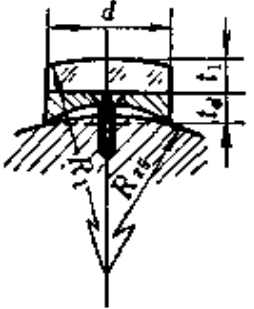
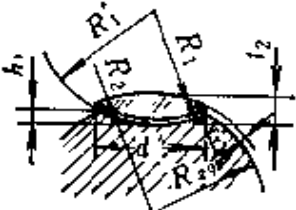
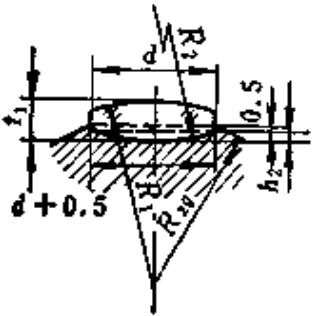


图 4-17 刚性法上盘

粘结模的张角 γ_{zg} 、高度 H_{zg} 、直径 D_{zg} (参看图 4-18) 可分别按式 (4-24)、(4-25)、(4-26) 求得。

对于那些具有球窝或平台的粘结模，根据每圈零件在镜盘上的角度 θ_m 和 φ_m (也即球窝或平台在粘结模上的角度 θ_m 和 φ_m)，在球模图纸上标出平台或球窝的位置。不用球窝或平台的粘结模，

表 4-10 刚性法粘结模半径计算

名 称	示 意 图	计 算 公 式
平凸透镜凸面 (第一面)		$R_{2g} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_1 - t_1 - \delta)^2}$
小曲率平凸透镜 凸面		$R_{2g} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_1 - t_1 - t_g - \delta)^2}$
尖边或薄边双凸 透镜第二面		$R_{2g} = R_2 - E \quad (E > 0.5)$ $d' = 2\sqrt{2R_1h_1 - h_1^2}$ $h_1 = \frac{2R_{2g}(t_2 - E) - (t_2 - E)^2}{2(R_1 + R_{2g} - t_2 + E)}$ $R_1' = R_1 \frac{h_1}{h_1 + 0.1}$
型料毛坯双凸透 镜第一面		$R_{2g} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_1 - t_1 + h_2 + \Delta - \delta + 0.5)^2}$ $\Delta = h_2' - h_2$ $h_2' = R_2 - \sqrt{R_2^2 - \left(\frac{d + 0.5}{2}\right)^2}$

(续)

名称	示意图	计算公式
双凹、平凹、月形 透镜第一面		$R_{2s} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_1 + t_1 + \delta + 1)^2}$
型料毛坯负月形 透镜凹面		$R_{2s} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_1 + t_1 - h_2 + \delta)^2}$
型料毛坯正月形 透镜凹面		$R_{2s} = R_1 + t_1 + \delta + t_2$
双凹透镜第二面		$R_{2s} = \sqrt{\left(\frac{d'}{2}\right)^2 + (R_1 + t_2 + h' + \delta)^2}$ $h' = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{d'}{2}\right)^2}$ $d' = d_0 + (0.5 \sim 1.0)$ <p>d_0 — 磨边后内径, 下同</p>

(续)

名称	示意图	计算公式
负月形透镜凸面		$R_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{d'}{2}\right)^2 + (R_2 - t_2 - h' - \delta)^2}$ $h' = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{d'}{2}\right)^2}$ $d' = d_0 + (0.5 \sim 1.0)$
正月形透镜凸面		$R_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (R_2 - t_2 - h_1 - \delta)^2}$

如有气孔或气槽，则需标出气孔或气槽的位置（如图 4-19 所示）。

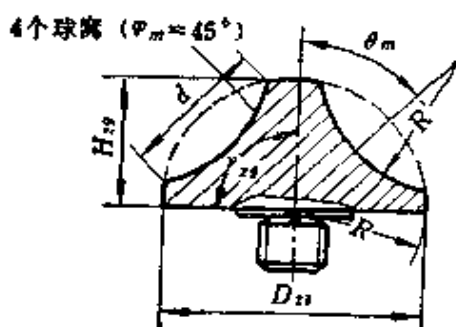


图 4-18 粘结模张角、高度和直径

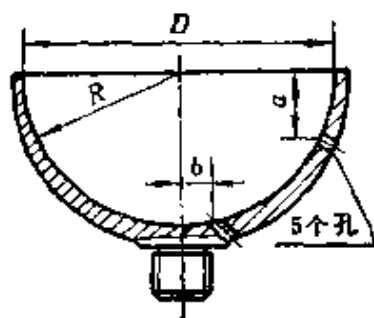


图 4-19 粘结模气孔位置

2. 研磨模

球面镜盘的合理磨削，应是玻璃表面磨去由上一道磨料造成的破坏层深度和下一道磨料造成的破坏层深度之差（如图 4-20）。

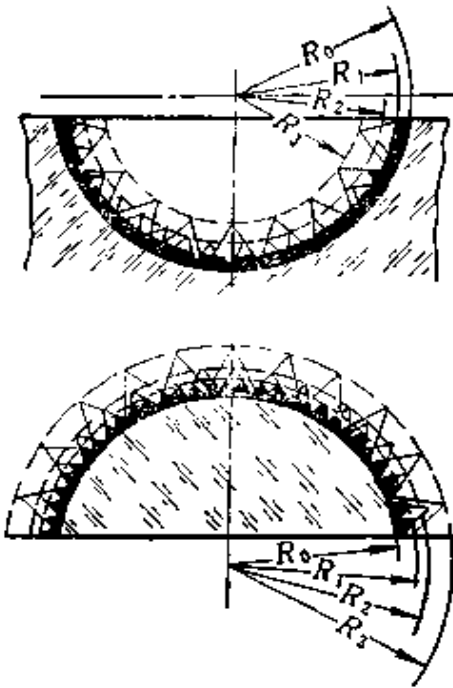


图 4-20 表面均匀磨削

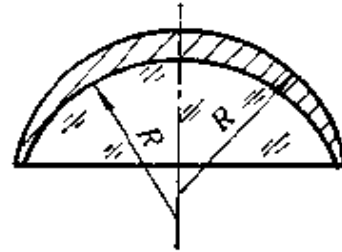


图 4-21 表面不均匀磨削

由图看出，透镜抛光后的表面半径和它在使用各号磨料研磨后的表面半径都是不同的。否则，就不能保证均匀磨削（如图 4-21），其结果会使上道磨料磨后的粗毛面不能完全去掉。为了弥补这一缺陷，只好加大加工余量。这样做显然是不合理的。

合理的做法是：用不同粒度磨料研磨时，采用不同曲率半径的研磨模，就能保证整个表面均匀磨削（考虑到中心部分和边缘部分的毛面深度差，实际是一个近似的均匀磨削，这一点下面将论述）。

不同粒度磨料所用研磨模的半径 R_n' 按下式计算：

$$R_n' = R_0 \pm (1.2 M_n + A_n) \quad (4-27)$$

式中 R_0 ——抛光完工后镜盘表面的基本半径；

M_n ——用第 n 号磨料研磨后的破坏层深度（即毛面深度）；

A_n ——用第 n 号磨料研磨时的磨料层厚度。

系数 1.2 是考虑到研磨过程中可能出现的粗砂眼和划痕而采取的安全系数。

式中括号前正负号的取法：凹研磨模取正号，凸研磨模取负号（下同）。

用弹性法上盘时,考虑到零件在贴置模内的情况,因此上盘前单件研磨时所用研磨模的半径计算公式与公式(4-27)有所不同。

为了使透镜更稳地贴在贴置模表面,常使透镜表面与贴置模表面中间不接触(如图4-22所示)。空隙的大小与研磨透镜的磨料粒度有关。对用粒度大于W50的磨料研磨的表面,空隙约为0.03 mm;用W50~W40磨料研磨的表面,空隙约为0.015 mm。因此,镜盘在以后的研磨过程中就要相应地多磨去一层厚度为0.03 mm或0.015 mm的玻璃层,才能将整个镜盘表面破坏层磨到要求的程度,也就是说,镜盘半径要增加这样一个数值(对于凸面)或减去这样一个数值(对于凹面),才能保证整个镜盘表面破坏层磨到要求的程度。

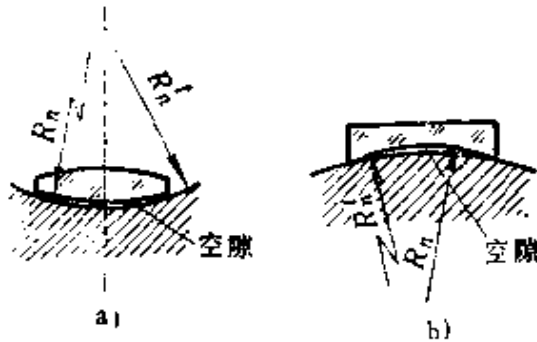


图 4-22 透镜在贴置模上

a) 贴凸面 b) 贴凹面

的半径 R_n' 的计算公式为:

$$R_n' = R_n \pm [1.2 M_n + (0.015 \sim 0.03) - (0.02 \sim 0.05)] \quad (4-28)$$

知道了贴置模半径,贴置前单块研磨时所用研磨模的半径就可以求得了。这就是它与贴置模的半径相差一层磨料层的厚度及在零件直径 d 的范围内的矢高变量 Δh (即零件表面半径与贴置模半径相差 ΔR)。具体计算公式如下:

$$R_n'' = R_n \pm [1.2 M_n + (0.015 \sim 0.03) + (0.02 \sim 0.05) + A_n + \Delta h K] \quad (4-29)$$

式中 Δh ——贴置模和零件表面之间的空隙,对于粗磨取 $\Delta h = 0.03$ mm,细磨取 $\Delta h = 0.015$ mm;

另外,镜盘在上盘过程中,由于粘结胶和粘结模在冷却过程中的收缩,镜盘半径也要发生变化,凸镜盘半径变小 0.04~0.05 mm,凹镜盘变大 0.02~0.03 mm。镜盘半径的这一变动可以用改变贴置模半径来弥补。因此,用第 n 号磨料研磨后贴置模

K ——贴置模半径与零件表面半径之差 ΔR 和空隙 Δh 的相对系数，可根据零件外径 d 和贴置模半径 R_n' 的比值

$$\frac{d}{R_n'}, \text{ 从表 4-11 查得 } \left(\frac{d}{R_n'} \text{ 即表中 } \frac{D}{R} \text{ 栏} \right),$$

其他符号的意义同前。

破坏层深度 M_n 的数值与磨料的性质、玻璃的硬度、磨料颗粒的尺寸以及研磨工艺条件等因素有关，可通过实验确定。粒度小于 240[#] 的刚玉磨料对 K9 玻璃造成的破坏层深度可按公式 (4-30) 计算：

$$M_n = 0.57 l_n^{1.09} (\mu\text{m}) \quad (4-30)$$

式中 l_n ——磨料颗粒最大尺寸 (μm)。

表 4-11 $\frac{D}{R}$ 的比值和系数 K 的关系

$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K
0.01	26 800	0.41	46.12	0.81	10.67	1.21	3.907	1.61	1.458
0.02	21 700	0.42	43.84	0.82	10.374	1.22	3.817	1.62	1.418
0.03	8 967	0.43	41.76	0.83	10.089	1.23	3.728	1.63	1.378
0.04	4 999	0.44	39.82	0.84	9.814	1.24	3.642	1.64	1.338
0.05	3 251	0.45	38.00	0.85	9.547	1.25	3.558	1.65	1.299
0.06	2 222	0.46	36.39	0.86	9.290	1.26	3.476	1.66	1.261
0.07	1 634	0.47	34.77	0.87	9.043	1.27	3.396	1.67	1.223
0.08	1 256	0.48	33.22	0.88	8.800	1.28	3.317	1.68	1.186
0.09	984.6	0.49	31.81	0.89	8.570	1.29	3.241	1.69	1.149
0.10	799.5	0.50	30.49	0.90	8.350	1.30	3.166	1.70	1.113
0.11	659.2	0.51	29.25	0.91	8.136	1.31	3.092	1.71	1.077
0.12	553.8	0.52	28.076	0.92	7.920	1.32	3.020	1.72	1.042
0.13	473.0	0.53	26.97	0.93	7.719	1.33	2.950	1.73	1.007
0.14	407.0	0.54	25.92	0.94	7.522	1.34	2.881	1.74	0.972
0.15	353.0	0.55	24.97	0.95	7.330	1.35	2.814	1.75	0.938
0.16	311.5	0.56	24.00	0.96	7.147	1.36	2.748	1.76	0.905
0.17	276.8	0.57	23.11	0.97	6.968	1.37	2.684	1.77	0.871
0.18	244.0	0.58	22.26	0.98	6.794	1.38	2.621	1.78	0.838
0.19	219.5	0.59	21.47	0.99	6.625	1.39	2.559	1.79	0.805
0.20	198.4	0.60	20.71	1.00	6.464	1.40	2.498	1.80	0.773

(续)

$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K	$\frac{D}{R}$	K
0.21	179.9	0.61	19.99	1.01	6.305	1.41	2.439	1.81	0.741
0.22	163.0	0.62	19.30	1.02	6.151	1.42	2.381	1.82	0.710
0.23	149.0	0.63	18.64	1.03	6.002	1.43	2.324	1.83	0.676
0.24	137.0	0.64	18.02	1.04	5.857	1.44	2.267	1.84	0.644
0.25	126.4	0.65	17.42	1.05	5.715	1.45	2.213	1.85	0.613
0.26	116.3	0.66	16.85	1.06	5.578	1.46	2.159	1.86	0.581
0.27	108.0	0.67	16.32	1.07	5.445	1.47	2.106	1.87	0.549
0.28	100.5	0.68	15.79	1.08	5.315	1.48	2.054	1.88	0.518
0.29	93.64	0.69	15.28	1.09	5.189	1.49	2.004	1.89	0.486
0.30	87.41	0.70	14.61	1.10	5.066	1.50	1.954	1.90	0.455
0.31	81.73	0.71	14.35	1.11	4.947	1.51	1.905		
0.32	76.63	0.72	13.91	1.12	4.830	1.52	1.857		
0.33	71.97	0.73	13.49	1.13	4.715	1.53	1.809		
0.34	67.69	0.74	13.09	1.14	4.606	1.54	1.763		
0.35	63.72	0.75	12.70	1.15	4.499	1.55	1.717		
0.36	60.16	0.76	12.33	1.16	4.394	1.56	1.672		
0.37	56.92	0.77	11.97	1.17	4.291	1.57	1.628		
0.38	53.89	0.78	11.63	1.18	4.192	1.58	1.585		
0.39	51.09	0.79	11.297	1.19	4.095	1.59	1.542		
0.40	48.49	0.80	10.977	1.20	4.000	1.60	1.500		

本章附录 II 列有各号刚玉对 K 9 玻璃造成的破坏层深度及其他牌号与 K 9 的换算系数。

当研磨模在下面时,磨料层厚度 A_n 按下式计算:

$$A_n = 1.143 l_n - 2.86 (\mu\text{m}) \quad (4-31)$$

当研磨模在上面时,颗粒在 $70 \mu\text{m}$ 以下时,按下式计算:

$$A_n = 1.333 l_n + 0.3 \quad (4-32)$$

对于颗粒大于 $70 \mu\text{m}$ 者,磨料层的厚度大于按上式计算的值,具体数值可通过实验确定。本章附录 I 列有各种不同粒度的刚玉粉的磨料层厚度供参考。

上述计算研磨模半径的公式,对于半径大于 100 mm 的研磨模尚需作一些补充计算。这是由于按公式(4-27)计算得到的镜盘表面光圈往往低得太多。例如曲率半径为 150 mm ,直径为 50 mm

的镜盘,按公式(4-27)计算得到的研磨模,磨出来的表面大约只低0.4个光圈,少了一些。因此,必须作一些补充计算。

如要在镜盘表面得到一定数量的低光圈,则镜盘表面半径与基本半径之差 $\Delta R_0'$ 为:

$$\Delta R_0' = \Delta h_0 K_1 \quad (4-33)$$

式中 Δh_0 ——镜盘表面矢高的变量;

K_1 ——按比值 $\frac{d}{R_0}$ 由表4-11查得(即表中 K 值), $\frac{d}{R_0}$ 即表中 $\frac{D}{R}$ 栏。 d 值的大小由所要求的低光圈数是以整盘还是以单件为准而定,即取镜盘直径或取单件直径为 d 。

如果取3.5个光圈近似为矢高变量 $\Delta h = 1 \mu\text{m}$,则式4-33可改写为:

$$\Delta R_0' = \frac{N}{3500} K_1 (\text{mm}) \quad (4-34)$$

式中 N ——表面要求的低光圈数。

因此,为了得到需要的低光圈数,镜盘表面半径相对于最后一道磨料的毛面深度 M_n 要增加(对于凸面)或减少(对于凹面)一个数值为 $\frac{N}{3500} K_1 - 1.2 M_n$ 的量。相应地研磨模半径也就要随着起变化。对于半径为100~250 mm的研磨模,其半径 R_n' 将为

$$R_n' = R_0 \pm (1.2 M_n + \frac{N}{3500} K_1 - 1.2 M_n + A_n) \quad (4-35)$$

式中 M_n ——镜盘表面用最后一道磨料研磨后的破坏层深度。

其他符号的意义同前。

对于半径大于250 mm的镜盘,破坏层深度 $1.2 M_n$ 这一项的计算方法需作些更改,才能保证边缘粗毛面得到充分研磨。这是由于上述计算公式中的 M_n 是指整个镜盘表面的最大破坏层深度,

也即边缘的破坏层深度之故。中心的破坏层深度约比边缘小20%，即相当于 $0.8 M_n$ 。对于半径不太大的接近半球的镜盘，当将镜盘半径增大（对于凸面）或减小（对于凹面） M_n ，当镜盘中心磨去 $0.8 M_n$ 时，镜盘边缘磨去约 $1.0 M_n$ （如图4-23），从而整个镜盘表面呈现均匀的毛面。对于半径较大的镜盘，当将镜盘半径增加或减小 M_n 时，镜盘中心已磨去 $0.8 M_n$ ，满足磨削要求，但镜盘边缘磨去量不到 $1.0 M_n$ 。为了使整个镜盘表面同时达到预期的磨削要求（符合要求的毛面），镜盘表面半径变化量按下式计算（参看图4-24）：

$$\Delta R_i = 0.8 M_n + 0.2 M_n K_2 \quad (4-36)$$

式中 K_2 一按比值 $\frac{D_i}{R}$ 从表4-11查得。其中 D_i 为镜盘直径， R 为镜盘基本曲率半径。

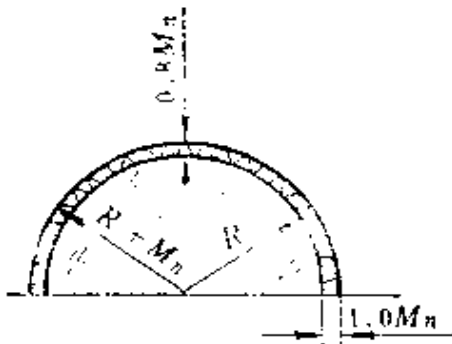


图 4-23 镜盘表面的破坏层深度差

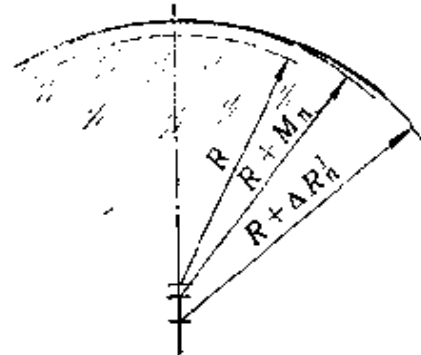


图 4-24

为了保证零件表面具有一定数量的低光圈，按式(4-36)计算得到的镜盘变量 ΔR_i 还要按上面提到的再增加 $\left(\frac{N}{3500} K_1 - 1.2 M_2\right)$ 这样一个量。 $1.2 M_2$ 按式(4-36)计算将为： $0.8 M_2 + 0.2 M_2 K_2$ 。因此，整个镜盘用某一号磨料研磨后的半径与基本半径的差 ΔR_i 的最终形式将为：

$$\begin{aligned} \Delta R_i = & 0.8 M_n + 0.2 M_n K_2 + \frac{N}{3500} K_1 \\ & - (0.8 M_2 + 0.2 M_2 K_2) \end{aligned} \quad (4-37)$$

用于研磨半径大于 250 mm 的镜盘的研磨模,它的球面半径与式(4-37)的镜盘半径相差磨料层厚度 A_n ,即对于凹研磨模为基本半径 R_0 加上 ΔR_n^i ,再加上 A_n ;对于凸研磨模为基本半径 R_0 减去 ΔR_n^i ,再减去 A_n 。具体计算公式如下:

$$R_n^i = R_0 \pm \left(0.8 M_n + 0.2 M_n K_2 + \frac{N}{3500} K_1 - 0.8 M_z - 0.2 M_z K_2 + A_n \right) \quad (4-38)$$

同样,贴置模的半径也就要作相应变化。用于半径为 100~250 mm 的镜盘的贴置模半径按下式计算:

$$R_n^i = R_0 \pm \left[1.2 M_n + \frac{N}{3500} K_1 - 1.2 M_z + (0.015 \sim 0.03) + (0.02 \sim 0.05) \right] \quad (4-39)$$

用于半径 250 mm 以上的镜盘的贴置模半径按下式计算:

$$R_n^i = R_0 \pm \left[0.8 M_n + 0.2 M_n K_2 + \frac{N}{3500} K_1 - 0.8 M_z - 0.2 M_z K_2 + (0.015 \sim 0.03) + (0.02 \sim 0.05) \right] \quad (4-40)$$

在贴置前单件研磨时,半径为 100~250 mm 的研磨模的半径按下式计算:

$$R_n^{i'} = R_0 \pm \left[1.2 M_n + \frac{N}{3500} K_1 - 1.2 M_z + (0.015 \sim 0.03) + (0.02 \sim 0.05) + A_n + \Delta h K_1 \right] \quad (4-41)$$

半径大于 250 mm 的单件研磨模的半径按下式计算:

$$R_n^{i'} = R_0 \pm \left[0.8 M_n + 0.2 M_n K_2 + \frac{N}{3500} K_1 - 0.8 M_z - 0.2 M_z K_2 + (0.015 \sim 0.03) + (0.02 \sim 0.05) + A_n + \Delta h K_1 \right] \quad (4-42)$$

研磨模的直径与镜盘的加工方式、曲率半径等因素有关。根据镜盘的不同加工方式和曲率半径,研磨模所具有的相对或绝对尺寸列于表 4-12 供参考。

表 4-12 研磨模尺寸

工序名称	加工条件	零件特征	研磨模的相对或绝对尺寸	
粗磨	单件或整盘手磨	平面或曲率很小($R > 250\text{mm}$)的球面	$D = 350 \sim 500\text{mm}$	
		$250 > R > 100\text{mm}$ 的球面	$D = 200 \sim 350\text{mm}$	
		$R < 100\text{mm}$ 的球面	高度 $H = 0.85R \sim R$	
细磨	单件或整盘手磨	圆形平面	单件或镜盘直径的1.2~1.5	
		方形平面	单件或镜盘对角线的1.0~1.1	
		凹面	单件或镜盘直径的1.15~1.25	
		凸面	单件或镜盘直径的1.1~1.2	
	单件或整盘机器磨	单件或整盘手磨	半径在 100 mm 以内的凸面镜盘,研磨模在上	镜盘直径的1.0~0.9
			半径在 100 mm 以内的凸面镜盘,研磨模在下	镜盘直径的1.1~1.2
			半径大于 100 mm 的凸面镜盘,研磨模在上	镜盘直径的1.0~0.9
			半径在 100 mm 以内的凹面镜盘,研磨模在下	镜盘直径的1.3~1.4
		单件或整盘机器磨	半径在 100 mm 以内的凹面镜盘,研磨模在上	镜盘直径的1.0
			半径大于100mm 的凹面镜盘,研磨模在下	镜盘直径的1.2~1.3
			平面镜盘,研磨模在下	镜盘直径的1.1~1.3
			平面镜盘,研磨模在上	镜盘直径的0.75~0.90

3. 倒边模

透镜在定心磨边后进行倒边时所用的球模称倒边模,其曲率半径 R_c 与倒边对圆柱面构成的夹角 α 有关(参看图 4-25),可按下式计算:

$$R_s = \frac{d_0}{2\cos\alpha} \quad (4-43)$$

式中 d_0 ——透镜直径。

4. 抛光模

抛光模的表面半径就是基本半径 R_0 ，不必计算。抛光模金属基座的曲率半径与抛光胶的厚度有关。理想的抛光胶层应在整个表面上等厚，但这实际上不易做到，这是因为抛光胶在抛光过程中具有一定的流动性，那些流到边缘而突出金属基座的胶不断地被刮掉。如此流失的结果，对于新做的胶层等厚的抛光模（如图

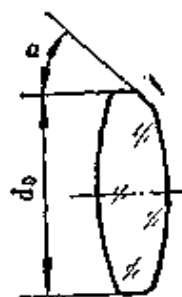


图 4-25 透镜的倒角

4-26)，会使中间薄于边缘。因此，新做抛光模时，应使中间胶层略厚于边缘（如图 4-27），这样在流失过程中，抛光胶厚度会逐渐趋于等厚。

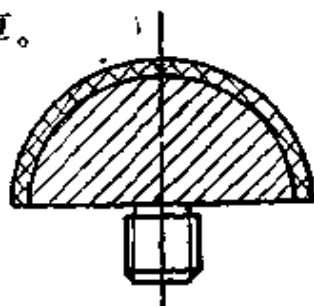


图 4-26 新做的等厚胶层抛光模

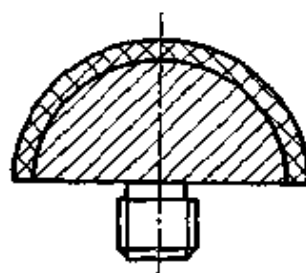


图 4-27 新做的不等厚胶层抛光模

抛光模基座的半径 R ，按下式计算：

$$R_s = R_0 \pm b \quad (4-44)$$

式中 R_0 ——镜盘表面基本半径；

b ——抛光胶边缘厚度，它与镜盘曲率半径 R 有关，如表 4-13 所示。

表 4-13 抛光胶厚度与曲率半径 R 的关系

(mm)

曲率半径 R	厚度	曲率半径 R	厚度	曲率半径 R	厚度
<30	1~3	30~80	2~4	>80	3~6

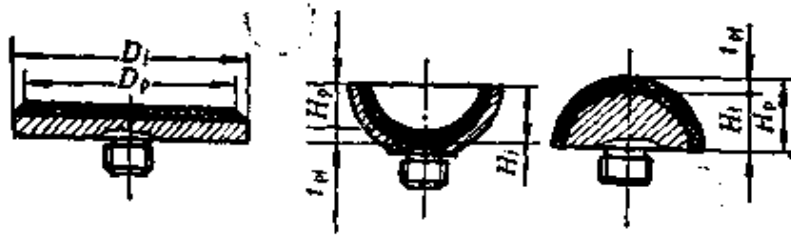
式(4-44)中正负号的取法：凹面取正号，凸面取负号。

对于基本半径较大的球面镜盘或抛光模直径 $D_p \leq 1.5 R_0$ 的抛光模，式(4-44)的实际意义不大，这时抛光模金属基座半径可取镜盘的基本半径。

表4-14列出了不同曲率半径的镜盘或零件及在不同的加工方式下，抛光模和金属基座的尺寸，供参考。

表 4-14 抛光模和金属基座尺寸

零件特征	加工条件	抛光模尺寸	金属基座尺寸(D_i)
半径在10mm 以内的球面	手抛光，抛光模在下	单件或镜盘直径的1.1~1.5；或半球	半球
	机器抛光，抛光模在下	单件或镜盘直径的1.2~1.5；或半球	半球
	机器抛光，抛光模在上	单件或镜盘直径的0.8~1.0	$H_i = H_p \pm t_p$
半径大于10mm 的球面	机器抛光，抛光模在下	镜盘直径的1.1~1.2	$H_i = H_p \pm t_p$
	机器抛光，抛光模在上	镜盘直径的0.9~1.0	$H_i = H_p \pm t_p$
直径20mm 以内的平面	单件手抛光，抛光模在下	零件直径的1.3~1.7	$D_i = D_p + 10 \text{ mm}$
直径50mm 以内的平面	单件手抛光，抛光模在下	零件直径的1.2~1.3	$D_i = D_p + 10 \text{ mm}$
平面镜盘	机器抛光，抛光模在下	镜盘直径的1.1~1.2	$D_i = D_p + 10 \text{ mm}$
	机器抛光，抛光模在上	镜盘直径的0.9~1.0	$D_i = D_p + 10 \text{ mm}$



注：表中 H_i —金属基座高度； H_p —抛光模高度； t_p —抛光胶厚度，凸面取负号，凹面取正号； D_p —抛光模直径(参看上图)。

5. 球模材料和结构参数

(1) 球模材料(见表 4-15)

表 4-15 球模材料

工作面直径 (mm)	球模种类	材 料
>3	粗磨球模 贴置球模 精磨球模 倒边球模	灰口铸铁 HT20—40 黄铜 H62 硅黄铜 HSi80—3
$3 \sim 30$	抛光球模	钢 20
>3	粘结球模	铝合金 LY12 铸铝合金 ZL7

注：黄铜和硅黄铜不用于粗磨球模。

(2) 结构参数

球模的结构参数如图 4-28~42 和表 4-16~31。其中 $R \geq 5$ 以上的图和表，摘自 WJ 1382—83。

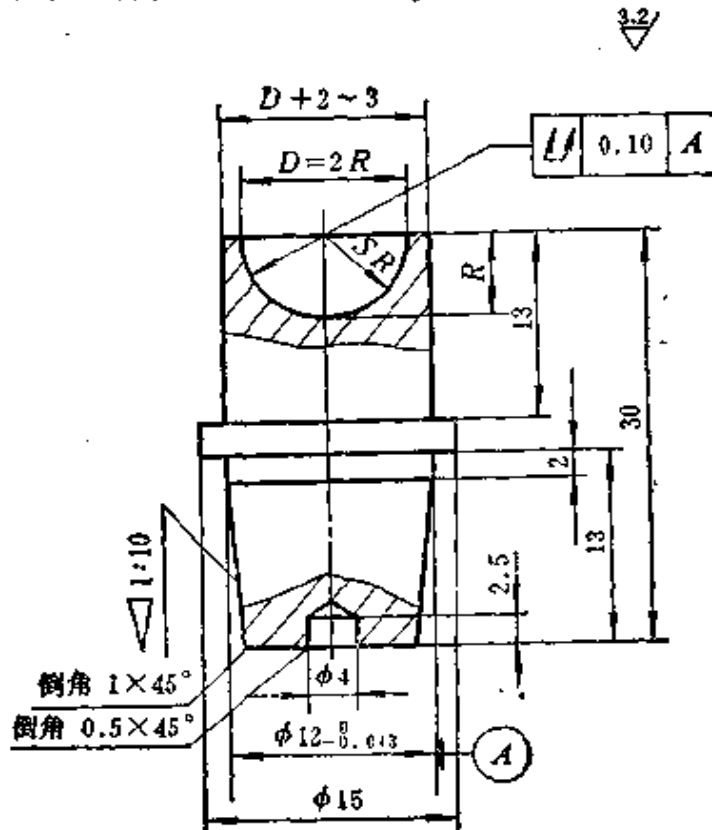


图 4-28 $R \leq 5$ 凹球模

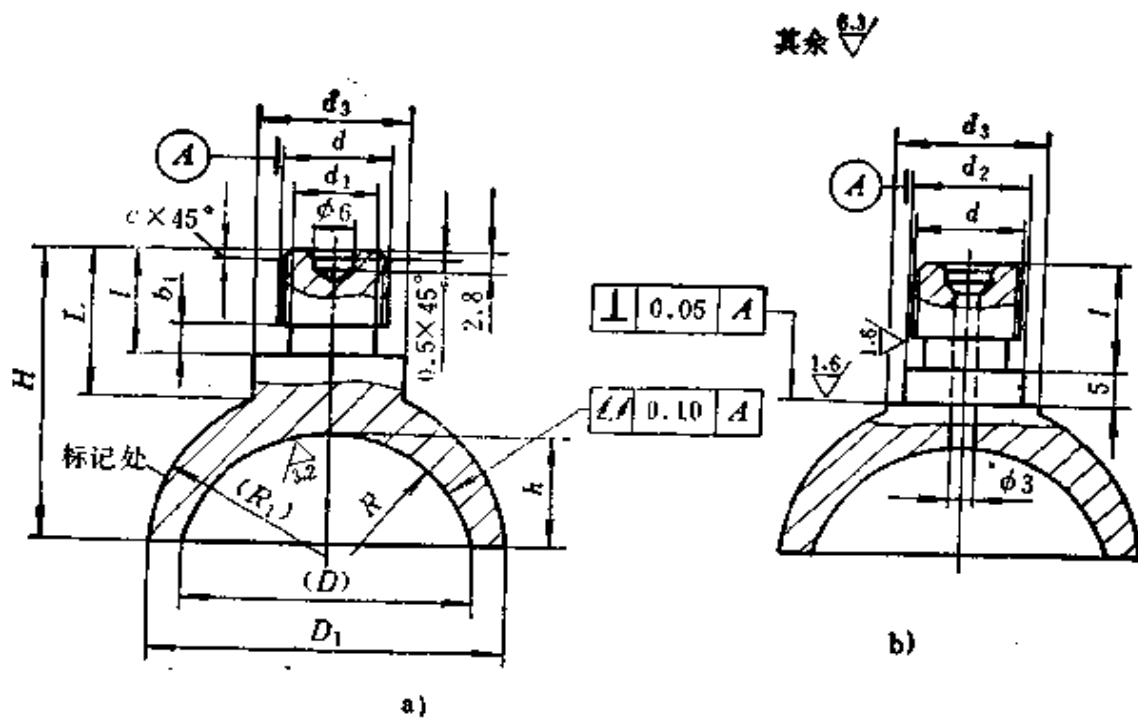


图 4-30

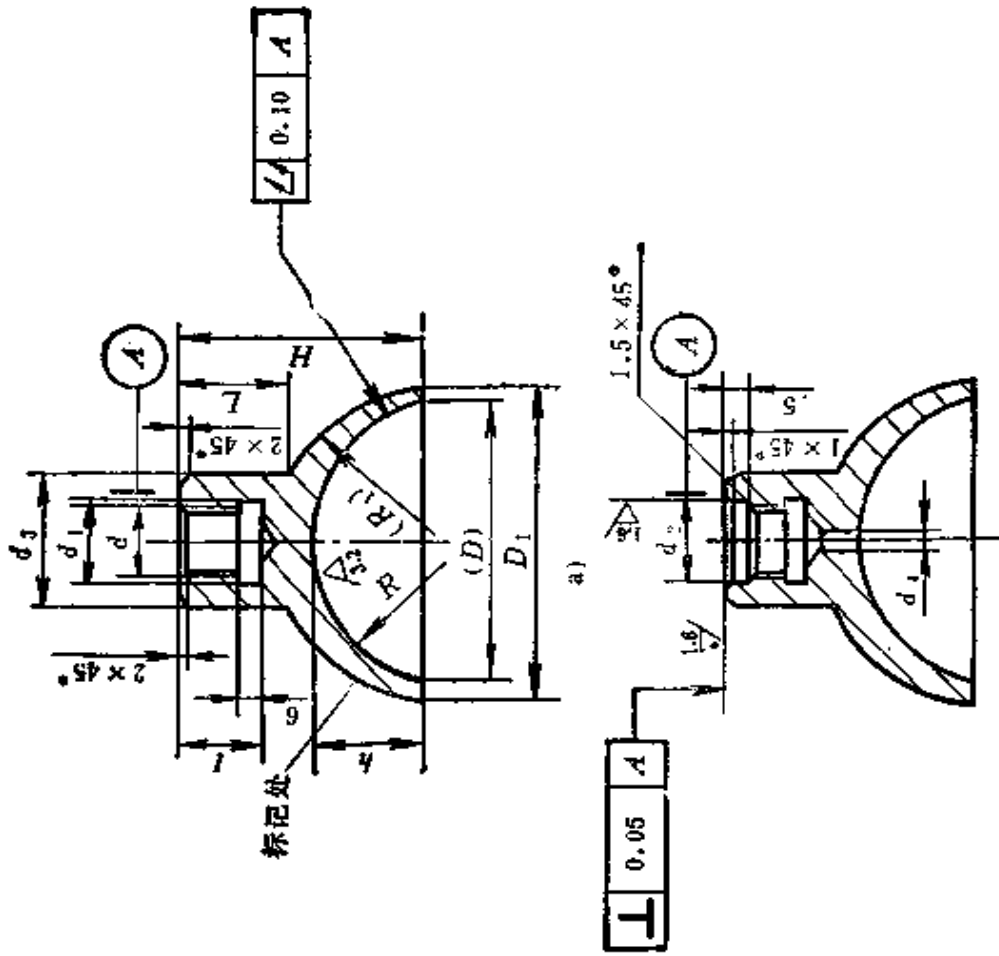
表 4-17 $15 < R \leq 35$ 凹球模 (图4-30)

(mm)

R	γ	h	(D)	用于粗磨、精磨					用于抛光、倒边	
				D_1	(R_1)	L	H	d_3	D_1	(R_1)
> 15~25	90°	R	2R	D+8	R+5.0	18	h+28	20	D+6	R+3.5
	74.5°	0.73R	1.93R		R+3.5					R+2.5
	61.5°	0.52R	1.76R		R+3.3					R+1.2
	51°	0.37R	1.55R		R+1.7					R-0.3
> 25~35	90°	R	2R	D+10	R+5.9	23	h+35	25	D+8	R+4.5
	74.5°	0.73R	1.93R		R+4.2					R+3.2
	61.5°	0.52R	1.76R		R+2.0					R
	51°	0.37R	1.55R		R-0.5					R-2.5

R	用于抛光、倒边						d	d_1	d_2		l	b_1	e
	不用镀件			用镀件					基本尺寸	极限偏差			
	L	H	d_3	L	H	d_3							
> 15~25	18	h+24	20	25	h+30	25	M14-6 h	11	15	0 -0.043	14	4	1.5
> 25~35	22	h+31	25	28	h+35	30	M20-6 h	16.4	22	0 -0.052	18	5	2

其余 \sqrt{A}

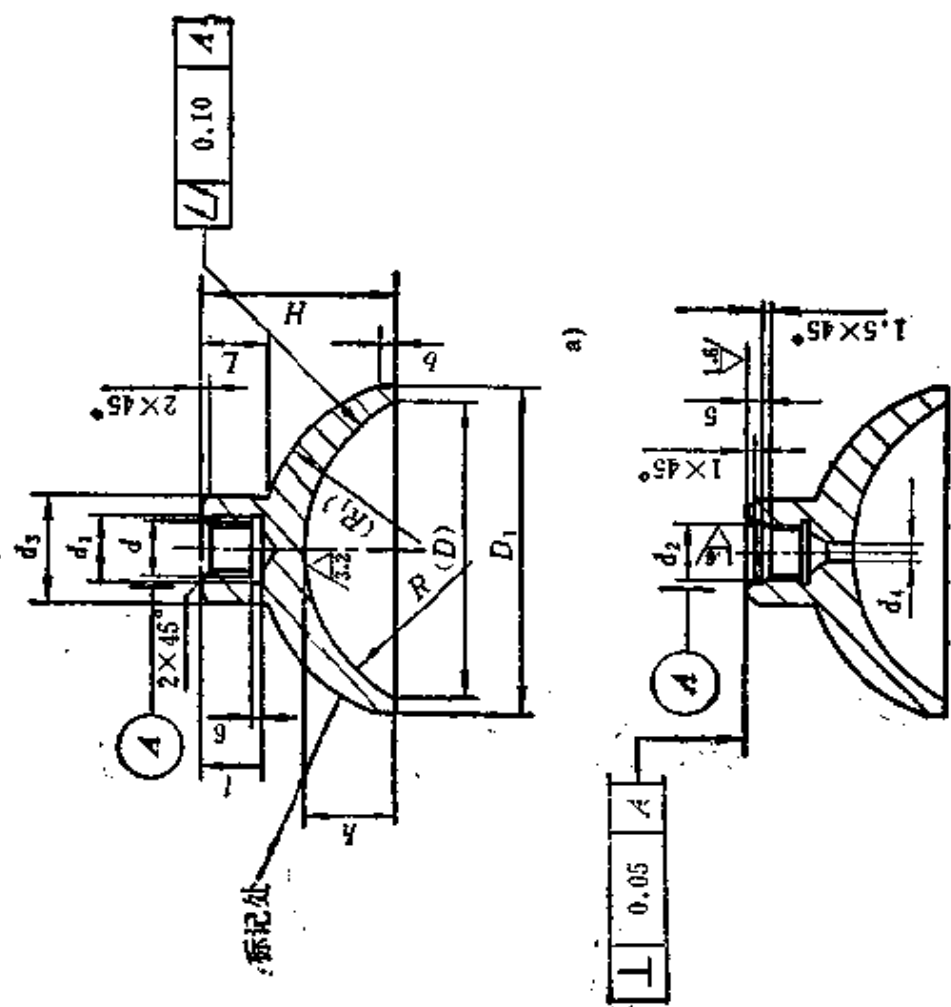


b) 图 4-31

表 4-18 $35 < R \leq 150$ 凹球槽 (图 4-31) (mm)

R	γ	h	(D)	用于粗磨、精磨		用于抛光		L	d	d ₁	d ₂		d ₃	d ₄	l	
				D ₁	(R ₁)	H	D ₁				(R ₁)	H				基本尺寸
>35~50	90°	R	2R	D+10	R+5.7		R+4.3	25	M20-5H	20.4	22	36	3	22		
	81.5°	0.85R	1.98R	D+10	R+4.7	h+36	R+3.1	h+32								
	74.5°	0.73R	1.93R		R+3.8		R+2.8									
>50~70	90°	R	2R	D+12	R+6.7		R+4.5	33								
	81.5°	0.85R	1.98R	D+12	R+5.5	h+46	R+3.3	h+44								
	74.5°	0.73R	1.93R		R+4.2		R+1.4									
>70~100	67.5°	0.62R	1.85R		R+2.3		R+6.5									
	90°	R	2R		R+7.6		R+5.3								+0.052 0	30
	81.5°	0.85R	1.98R	D+14	R+6.3	h+48	R+3.5	h+46		27.6						
>100~125	74.5°	0.73R	1.93R		R+4.6		R+1.2	32	M27-4H	27.6	30	48	5	30		
	67.5°	0.62R	1.85R		R+2.0		R+6.0									
	81.5°	0.85R	1.98R		R+7.0		R+4.0									
>125~140	74.5°	0.73R	1.93R	D+16	R+2.0	h+50	R+1.0	h+48								
	67.5°	0.62R	1.85R		R+4.3		R+3.5									
	74.5°	0.73R	1.93R		R+1.5		R									
>140~150	67.5°	0.62R	1.85R		R+1.5			30								

其余 ∇A



b) 图 4-32

表 4-19 $35 < R \leq 220$ 凹球模 (图 4-32)

R	γ	h	(D)	用于粗磨、精磨			用于抛光、倒边			L	d	d ₁	d ₂		z	
				D ₁	(R ₁)	H	D ₁	(R ₁)	H				基本尺寸	极限偏差		
																D ₂
>35~50	61.5°	0.52R	1.76R	D+10	R+1.2	h+36	D+6	R+2.7	h+32	25.5	M20-5H	20.4	22	36	3	22
	51°	0.37R	1.55R	D+12	R-0.9	h+46	D+4	R-2.5	h+44							
>50~70	61.5°	0.52R	1.76R	D+10	R+1.5	h+44	D+4	R-0.6	h+40	34.5						
	51°	0.37R	1.55R	D+12	R-2.5	h+48	D+8	R-3.9	h+44							
>70~100	61.5°	0.52R	1.76R	D+10	R+0.5	h+46	D+4	R-0.4	h+44	33						
	51°	0.37R	1.55R	D+12	R-4.0	h+50	D+10	R-1.2	h+48							
>100~140	61.5°	0.52R	1.76R	D+11	R+0.8	h+48	D+8	R-5.3	h+46	6						
	56°	0.44R	1.66R	D+12	R-3.4	h+48	D+6	R-8.3	h+46							
>140~165	61.5°	0.37R	1.55R	D+10	R-4.5	h+52	D+4	R-11.8	h+50	7	32	27.6	30	48	5	30
	51°	0.37R	1.55R	D+12	R-1.3	h+50	D+6	R-3.0	h+48							
>165~185	46°	0.31R	1.44R	D+12	R-9.0	h+52	D+12	R-12.6	h+50	8						
	56°	0.44R	1.66R	D+16	R-1.0	h+50	D+8	R-7.0	h+48							
>185~200	51°	0.37R	1.55R	D+14	R-3.7	h+54	D+6	R-12.1	h+50	9						
	46°	0.31R	1.44R	D+12	R-10.0	h+54	D+8	R-12.4	h+50							
>200~220	46°	0.31R	1.44R	D+14	R-7.3	h+54	D+8	R-8.2	h+50							

(mm)

其余 ∇

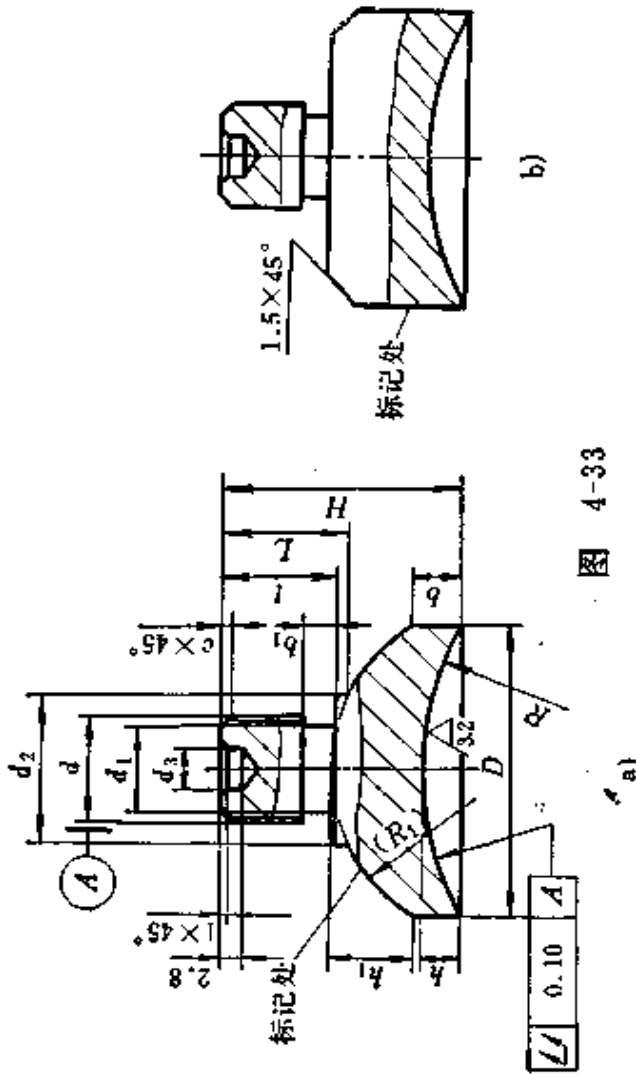
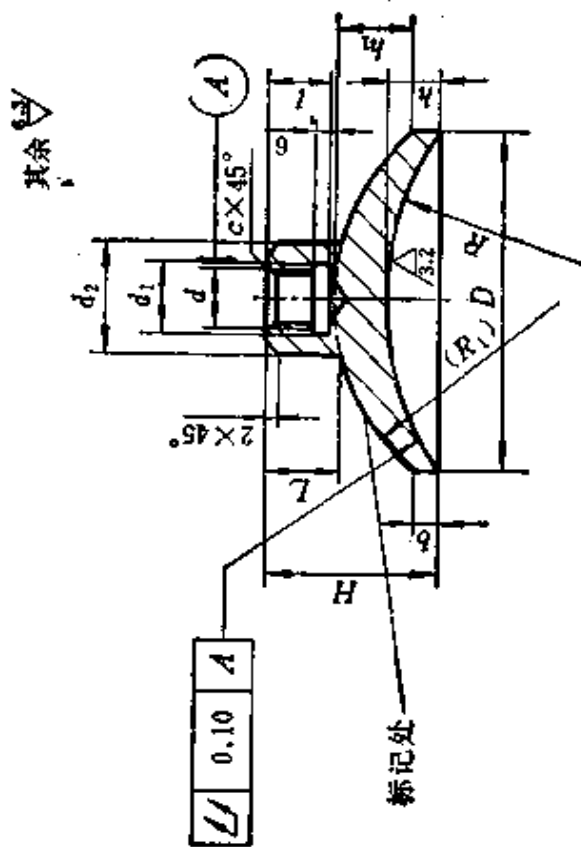


图 4-33

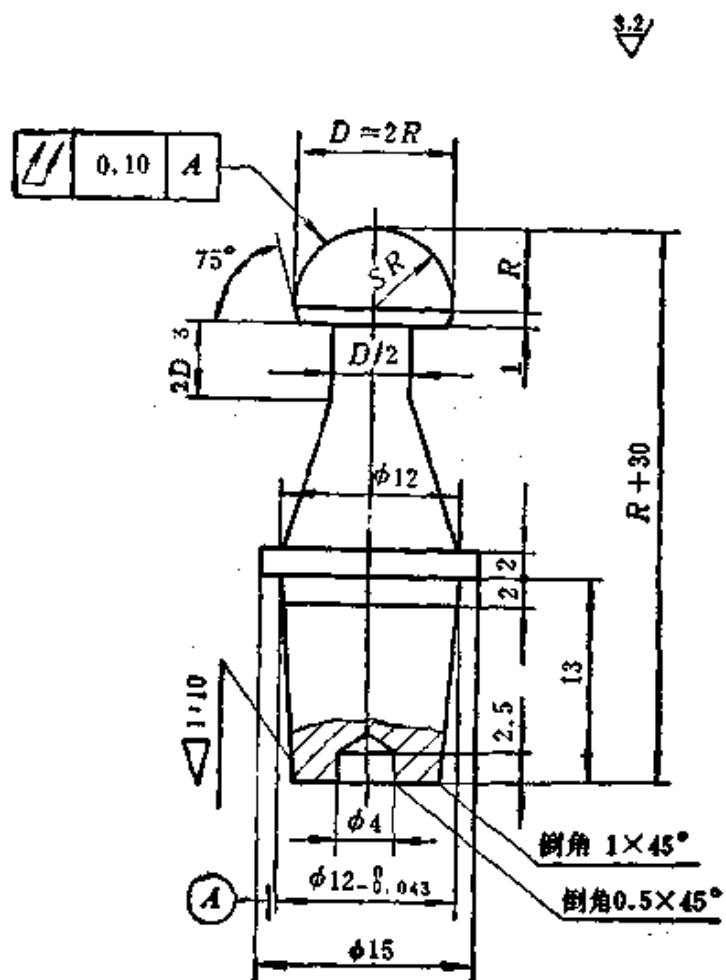
表 4-20 D=20~70凹球模(图 4-33)

D	用于粗磨、精磨		用于抛光		(R ₁)	L	d	d ₁	d ₂	d ₃	b ₁	l	c
	b	h ₁	H	h									
20~30	6	h+4	h+18	3	h+3	h+14	M8—6h	6.2	12	5	2	8	1
35~50	7	h+5	h+26	4	h+4	h+22	M14—6h	11	20	6	4	14	1.5
	8	h+6	h+34	5	h+5	h+28							
60~70	8	h+6	h+34	5	h+5	h+28	M20—6h	16.4	25		5	18	2

(mm)

表 4-21 $D=80\sim 320$ 凹球標(图 4-34) (mm)

D	用于粗磨、精磨			用于抛光、倒边			(R ₁)	L	d	d ₁	d ₂	l	c
	b	h ₁	H	h	h ₁	H							
80~120	9	h+7	h+38	6	h+6	h+34	$\frac{D^2}{8h_1} + \frac{h_1}{2}$	23.0	M20-5H	20.4	36	22	1.5
140~180	10	h+8	h+48	7	h+7	h+44		31.5	M27-4H	27.6	48	30	2
200~240	11	h+9	h+50	3	h+8	h+46	30.0						
260~320	12	h+10	h+52	9	h+9	h+48							

图 4 35 $R \leq 5$ 凸球模

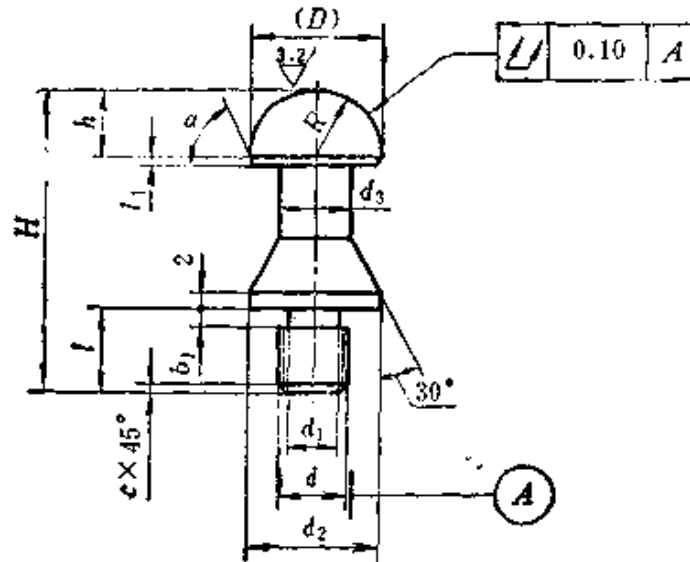
其余 $\sqrt[6.3]{}$ 

图 4-36

表 4-22 $5 < R \leq 15$ 凸球横(图 4-36) (mm)

R	γ	h	(D)	H	d	d_1	d_2	d_3	l_1	l	b_1	c	a
$>5 \sim 10$	90°	R	$2R$	$h + 28$	$M8-6h$	6.2	15	$\frac{D}{2}$	1	10	2	1	75°
	74.5°	$0.73R$	$1.93R$										90°
	56°	$0.44R$	$1.66R$										
$>10 \sim 15$	90°	R	$2R$	$h + 35$	$M14-6h$	11	20	10	2	14	4	2	75°
	74.5°	$0.73R$	$1.93R$										90°
	56°	$0.44R$	$1.66R$										

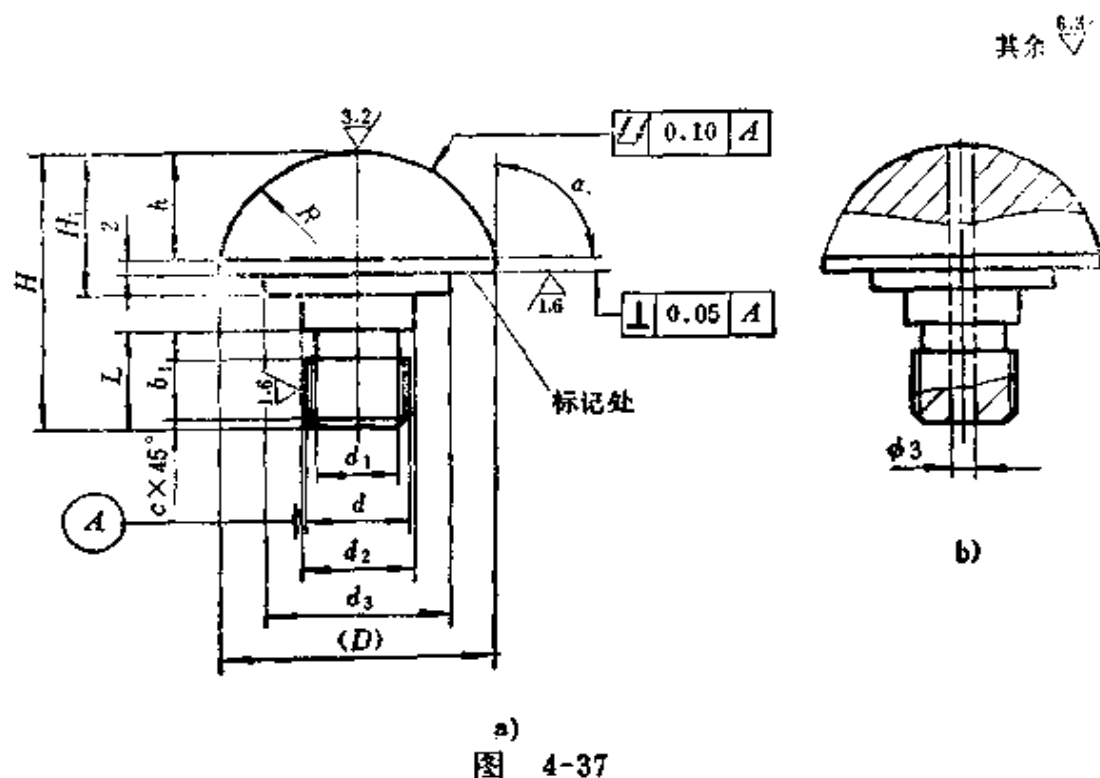


图 4-37

表 4-23 15 < R ≤ 35 凸球模 (图 4-37) (mm)

R	γ	h	(D)	用于粗磨、普通 精磨、抛光		用于高速精 磨、抛光		d	
				H ₁	H	H ₁	H		
>15~25	90°	R	2R	h + 5	h + 24	R + 5	R + 24	M14-6h	
	74.5°	0.73R	1.93R						
	61.5°	0.52R	1.76R						
	51°	0.37R	1.55R						
>25~35	90°	R	2R		h + 28	R + 5	R + 28		M20-6h
	74.5°	0.73R	1.93R						
	61.5°	0.52R	1.76R						
	51°	0.37R	1.55R						
R	d ₁	d ₁		d ₃	L	b ₁	c	α	
		基本尺寸	极限偏差 H9						
>15~25	11	15	0	25 (不大于 D)	14	4	1.5	75°	
			-0.043					90°	
>25~35	16.4	22	0	30	18	5	2	75°	
			-0.052					90°	

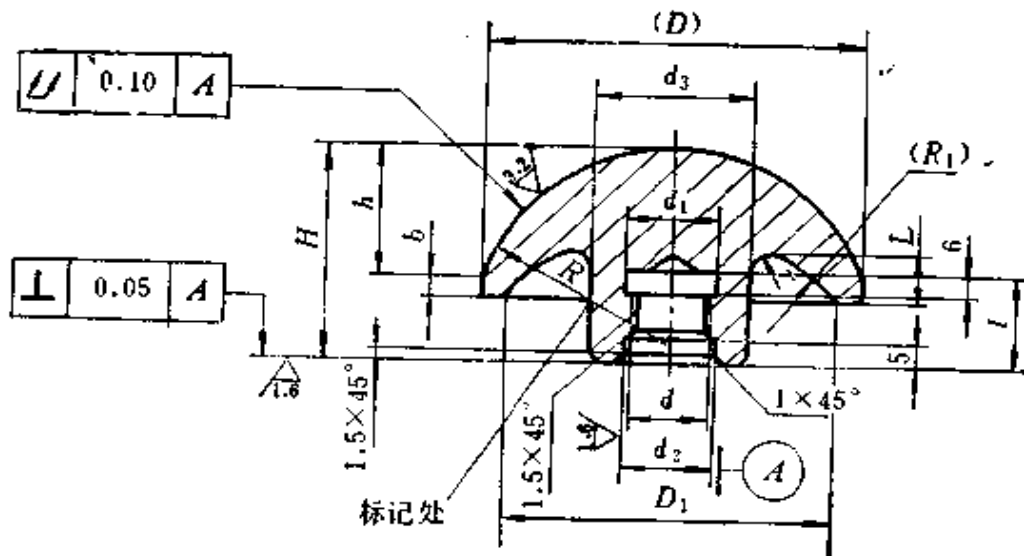
其余 ∇ 

图 4-38

表 4-24 $35 < R \leq 150$ 凸球模(图 4-38) (mm)

R	γ	h	(D)	D_1	用于粗磨、精磨				用于抛光	
					b	(R_1)	H			L
							高精	粗磨、普精		
>35~50	90°	R	2R	D-10	—	R-2.5	R+5	h+15	h-A ₁ -16	—
	81.5°	0.85R	1.98R		2.5	R-1.2			h-A ₁ -13	2
	74.5°	0.73R	1.93R		3	R+2.6				
>50~70	90°	R	2R	D-12	—	R-4.2	R	h+20	h-A ₂ -18	—
	81.5°	0.85R	1.98R		3	R-2.5			h-A ₂ -15	2
	74.5°	0.73R	1.93R		4	R			h-A ₂ -14	
	67.5°	0.62R	1.85R		—	R+4.5				
>70~100	90°	R	2R	D-14	—	R-5.6	R	h+20	h-A ₃ -20	—
	81.5°	0.85R	1.98R		4	R-4.3			h-A ₃ -16	2
	74.5°	0.73R	1.93R		—	R-1.0			h-A ₃ -15	
	67.5°	0.62R	1.85R		4	R+2.2				
>100~125	81.5°	0.85R	1.98R	D-16	5	R-5.5	R-10	h+20	h-A ₃ -17	2
	74.5°	0.73R	1.93R			R-2.7				
	67.5°	0.62R	1.85R			R+1.5				
>125~140	81.5°	0.85R	1.98R	D-16	5	R-2.4	R-20	h+20	h-A ₃ -17	2
	74.5°	0.73R	1.93R			R+1.0				
>140~150	67.5°	0.62R	1.85R	D-16	5	R+0.7	R-20	h+20	h-A ₃ -17	2

(续)

R	用于抛光			d	d ₁	d ₂		d ₃	d ₄	l	γ	
	(R ₁)	H				L	基本尺寸					极限偏差H9
		高抛	普抛									
>35~50	R-4.1	R+5	h+10	h-A ₁ -12	M20-5H	20.4	22		36	3	22	
	R-3.2			h-A ₁ -10								
	R-1.3											
>50~70	R-5.2	R		h-A ₂ -14							5	
	R-4.0			h-A ₂ -12								
	R-2.0											
R+1.2												
R-6.4	h-A ₂ -16											
R-5.0												
>70~100	R-2.7	h+15		h-A ₃ -14	M27-4H	27.6	30	+0.052 0	48	5	30	
	R+0.8											
>100~125	R-5.5	R-10		h-A ₃ -16							16	
	R-3.5											
	R+0.4											
>125~140	R-2.4	R-20		h-A ₃ -18								
	R+2.0											
>140~150	R+1.7											

注：d₄为高速精磨(抛光)模中心的冷却液喷射孔直径。

表 4-25 35<R≤150 凸球模(图 4-38) (mm)

R 1	>30.9~33.4	>33.4~36.5	>36.5~42.0	>42.0~52.6		
A 1	14.0	12.0	10.0	8.0		
R 1	>45.0~50.0	>50.0~60.0	>60.0~75.0			
A 2	12.5	10.5	8.5			
R 1	>63~68	>68~78.5	>78.5~91.0	>91.0~110	>110~140	>140
A 3	13	11	9	7.5	6.0	4.5

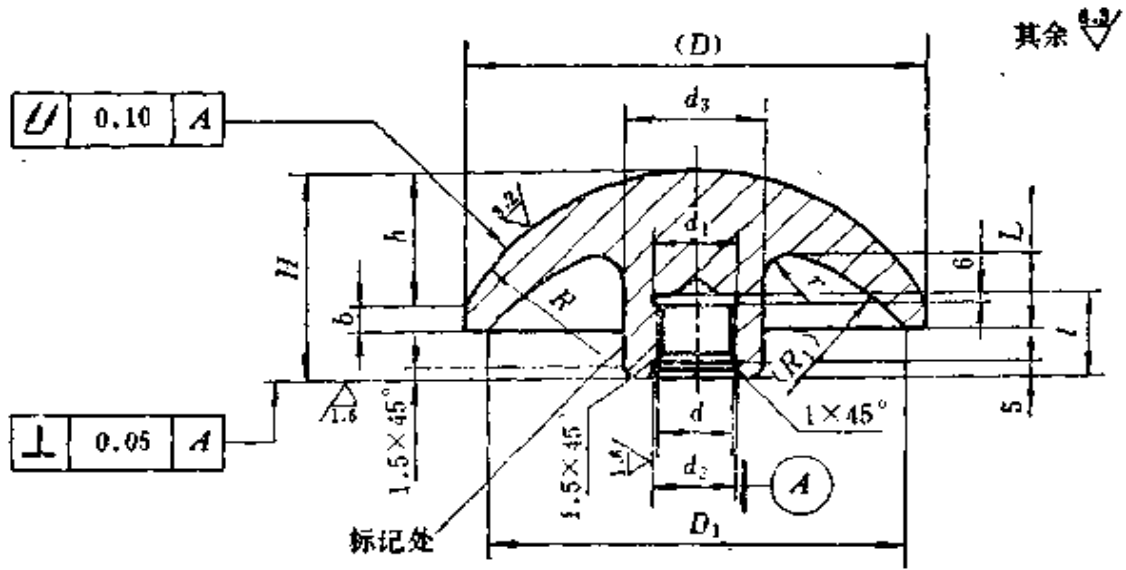


图 4-39

表 4-26 $35 < R \leq 220$ 凸球模 (图 4-39) (mm)

R	γ	h	(D)	D ₁	(R ₁)	用于粗磨、精磨		
						b	H	
							高精	粗磨、 普精
>35~50	61.5°	0.52R	1.76R	D-10	R+4	6	R+5	h+20
	51°	0.37R	1.55R	D-8	69	5	R-10	
>50~70	61.5°	0.52R	1.76R	D-12	R+2	7	R-10	h+20
	51°	0.37R	1.55R	D-10	R+18	5	R-20	
>70~100	61.5°	0.52R	1.76R	D-14	R+0.5	8	R-20	h+25
	51°	0.37R	1.55R	D-12	R+14	6	R-30	
>100~140	61.5°	0.52R	1.76R	D-16	R+0.5	8	R-30	h+25
	56°	0.44R	1.66R		R+5.5			
	51°	0.37R	1.55R	D-14	R+11	7	R-40	
46°	0.31R	1.44R	R+32					
>140~165	61.5°	0.52R	1.76R	D-18	R-0.5	9	R-40	h+25
	56°	0.44R	1.66R		R+4			
	51°	0.37R	1.55R	D-16	R+10	3	R-60	
46°	0.31R	1.44R	R+28					
>165~185	56°	0.44R	1.66R	D-18	R+7	9	R-80	h+25
	51°	0.37R	1.55R		R+9			
	46°	0.31R	1.44R		R+18			
185~200	51°	0.37R	1.55R	D-20	R+9	10	-	h+25
	46°	0.31R	1.44R		R+18			
200~220	46°	0.31R	1.44R	D-20	R+18	10	-	h+25

(续)

R	用于抛光		L	d	d ₁	d ₂		d ₃	d ₄	l	r	
	b	H				基本尺寸	极限偏差 H9					
		高抛										普抛
>35~50	$\frac{3}{2}$	R+5	h+20	$h-A_1-9$	M20-5H	20.4	22		36	3	22	5
	$\frac{2}{2}$	R-10		$h-A_1-13$								
>50~70	$\frac{4}{2}$	R-10		$h-A_2-10$								
>70~100	$\frac{5}{3}$	R-20		$h-A_3-11$								
>100~140	5	R-30		$h-A_3-13$								
	4			$h-A_3-12$								
	6	R-40		$h-A_3-13$								
>140~165			h+25	$h-A_3-14$	M27-4H	27.6	30	+0.052 0	48	5	30	10
	5	R-60		$h-A_3-13$								
				$h-A_3-15$								
>165~185	6	R-80	$h-A_3-16$									
>185~200	7			$h-A_3-14$								
>200~220				$h-A_3-15$								

注：表中 d_4 为高速精磨(抛光)模中心的冷却液喷射孔直径。

表 4-27 35<R≤220凸球模(图4-39)

(mm)

R 1	39.0~46.5	>46.5~54.0				
A 1	9.0	7.0				
R 1	>50.0~60.0	>60.0~75.0	>75.0~ 90.0			
A 2	10.5	8.5	6.5			
R 1	>70.0~78.5	>78.5~91.0	>91.0~ 110.0	>110.0~ 140.0	>140.0~ 180.0	>180.0~ 238.0
A 3	11.0	9.0	7.5	6.0	4.5	3.0

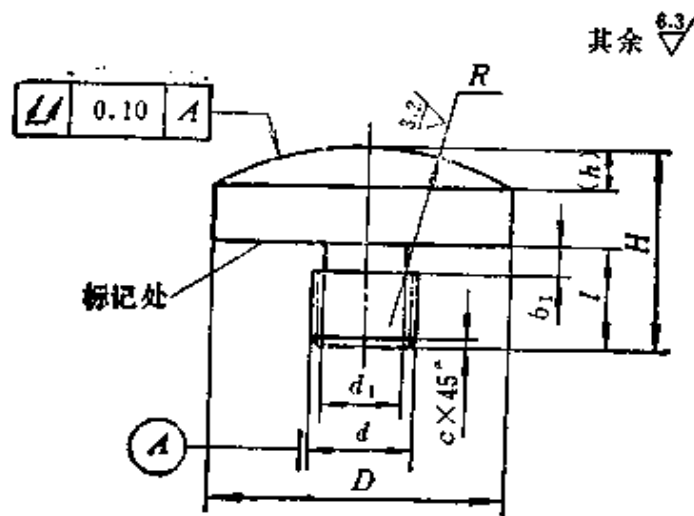
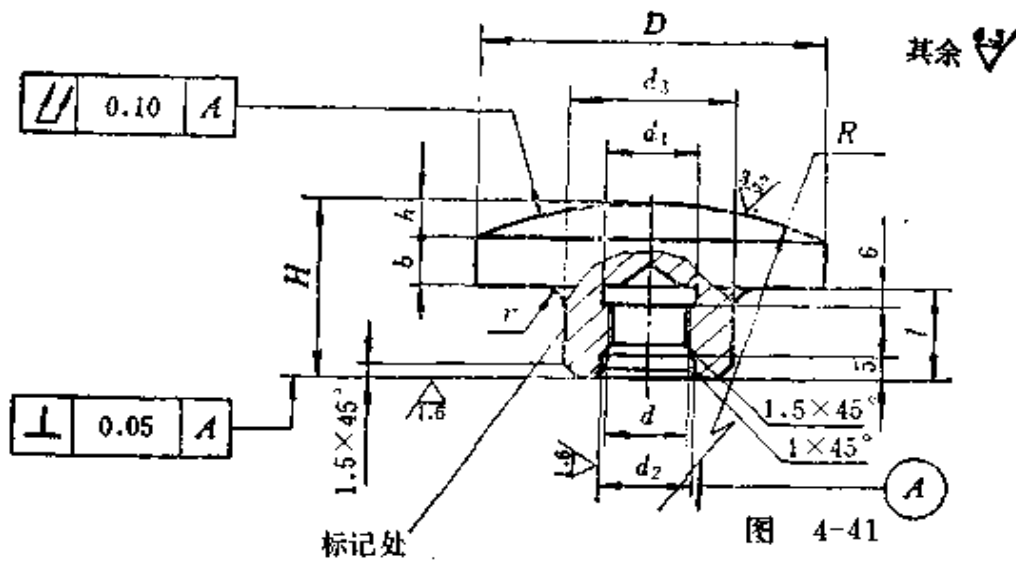


图 4-40

表 4-28 $D=20\sim 70$ 凸球模 (图4-40) (mm)

D	H		d	d_1	l	b_1	e
	用于粗磨、 精磨	用于抛光					
20~30	$h+15$	$h+11$	$M8-6h$	6.3	8	2	
35~50	$h+22$	$h+18$	$M14-6h$	11	14	4	1.6
60~70	$h+27$	$h+23$	$M20-6h$	16.4	18	5	2

表 4-29 $D=80\sim 320$ 凸球模 (图 4-41) (mm)

D	h	用于粗磨, 精磨			用于抛光		
		b	h_1	H	b	h_1	H
80~120	>9	10	$h-7$	$h+20$ (不小于40)	7	$h-7$	$h+16$ (不小于36)
140~180	>10	11	$h-8$	$h+25$ (不小于52)	8	$h-8$	$h+20$ (不小于48)
200~240	>11	12	$h-9$		9	$h-9$	
260~320	>12	13	$h-10$	10	$h-10$		

D	(R_1)	L	d	d_1	d_2		d_3	l	r
					基本尺寸	极限偏差 H9			
80~120	$\frac{D^2}{8h_1} + \frac{h_1}{2}$	$h-7-A_1$	M20-5H	20.4	22	+0.052 0	36	22	5
140~180		$h-8-A_2$							
200~240		$h-9-A_2$	M27-4H	27.6	30		48	30	10
260~320		$h-10-A_2$							

表 4-30 $D=80\sim 320$ 凸球模 (图 4-41) (mm)

R 1	>90~150	>150~300	>300
A 1	3	2	1
R 1	>180~300	>300~600	>600
A 2	3.5	2	1

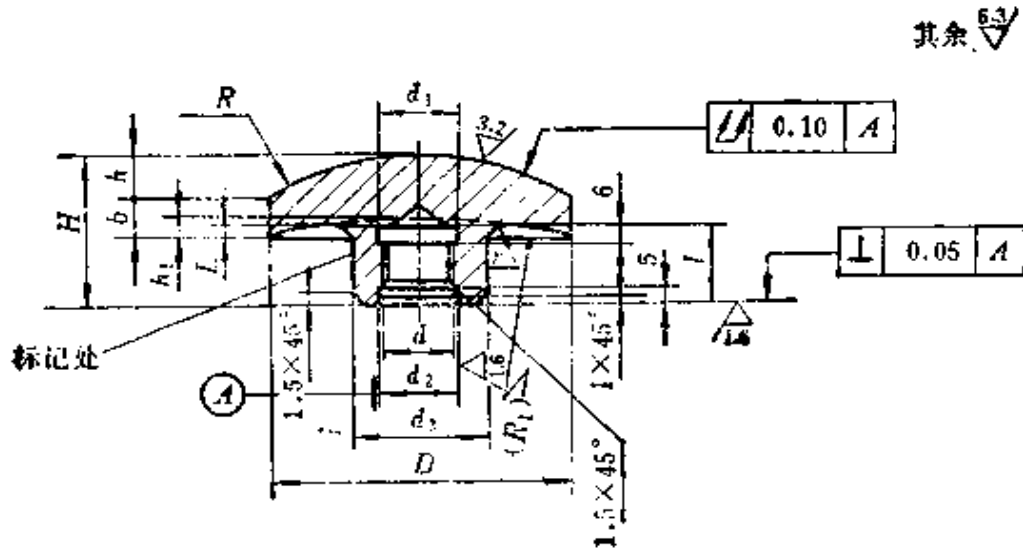


图 4-42

表 4-31 $D=80\sim 320$ 凸球模 (图 4-42) (mm)

D	h	用于粗磨、 精磨		用于抛光		d	d ₁	d ₂		d ₃	l	r
		b	H	b	H			基本 尺寸	极限偏差 H 9			
80~120	<9	16-h (不小于10)	40	12-h (不小于7)	36	M20-5H	20.4	22		36	22	5
140~180	<10	18-h (不小于11)	50	14-h (不小于8)	46				+0.052 0			
200~240	<11	20-h (不小于12)	52	16-h (不小于9)	48	M27-4H	27.6	30		48	30	10
260~320	<12	22-h (不小于13)	54	18-h (不小于10)	50							

6. 球模的工作面制造公差及检验

对于不同用途、不同曲率半径的球模，其机械制造公差如表 4-32 和表 4-33 所示。表 4-32 为当球模张角 $2\gamma > 100^\circ$ 时，以半径误差 ΔR 表示；表 4-33 为当球模张角 $2\gamma \leq 100^\circ$ 时，以矢高误差 Δh 表示。

球模曲率半径的检验，当 R 小于 35 mm 时，可用圆弧样板检验；当 R 大于 35 mm 时，可用简易球径计检验。其测量圈的口径及弧高的读数精度可参照表 4-34。

表 4-32 球模 ΔR 值 (mm)

球模类别 工作面半径	球模类别	
	粗磨、精磨、贴复球模	抛光、粘结球模
>2~20	± 0.02	± 0.06
>20~35	± 0.03	± 0.08
>35~50	± 0.04	± 0.1
>50~80	± 0.05	± 0.12
>80~130	± 0.06	± 0.14
>130~180	± 0.07	± 0.16

注：凸球模取“+”号，凹球模取“-”号。

7. 球面镜盘参数表

根据给定的透镜毛坯直径 ϕ 和镜盘上透镜的间隙 b 以及待加工面半径 R (即镜盘半径 R_j)，由 $(\phi + b)/(2R_j)$ ，可从表 4-35 很快地查到透镜在第一行为一块、三块和四块的三种排列情况下，各行透镜数 N ，镜盘上透镜的总数 ΣN ，镜盘的张角 γ_j ，并由 K_1 (直径比例系数) 或 K_2 (矢高比例系数)，可以很快地求得镜盘的直径 D_j 或镜盘高度 H_j ：

$$D_j = K_1 R_j$$

$$H_j = K_2 R_j$$

表中没有列出 $(\phi + b)/(2R_j) < 0.0175$ 的镜盘参数，这一类镜盘上透镜的排列可按平面镜盘的计算方法确定。当 $(\phi + b)/(2R_j) >$

0.6691 时, 工件曲率较大, 仅能单件加工, 工件尺寸即镜盘尺寸。

当 $2\gamma_s < 100^\circ$ 时, 表中只列出 K_1 值, 亦即镜盘以直径 D_s 表征; 当 $2\gamma_s > 135^\circ$ 时, 表中只列出 K_2 值, 亦即镜盘以矢高 H_s 表征。除此之外, 采用 K_1 或 K_2 均可。

表 4-33 球模 Δh 值 (mm)

球模类别 工作而直径	球模类别	
	粗磨、精磨、贴复球模	抛光、粘结球模
> 30~50	± 0.03	± 0.1
> 50~80	± 0.04	± 0.12
> 80~120	± 0.05	± 0.14
> 120~160	± 0.06	± 0.16
> 160~240	± 0.07	± 0.18
> 240~340	± 0.08	± 0.20

注: 凸球模取“+”号, 凹球模取“-”号。

表 4-34 球模测量圈直径

球模 R	球模直径	测量圈直径	弧高读数精度 δh		
			粗磨模	精磨模	粘结、抛光模
> 35~150	< 140	60	0.015	0.01	0.02
> 150	< 200				
> 70~150	> 140	100			
> 150	> 200				

表 4-35 球面镜盘参数

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0175	1	1	0°57'	0.1029		3	3	2°06'	0.0733		4	4	2°22'	0.0836	
	6	7	2°57'	0.1029		9	12	4°06'	0.1430		10	14	4°22'	0.1523	
	12	19	4°57'	0.1726		16	28	6°06'	0.2125		16	30	6°22'	0.2218	
	18	37	6°57'	0.2420		22	50	8°06'	0.2818		23	53	8°22'	0.2910	
	24	61	8°57'	0.3110		28	78	10°06'	0.3507		29	82	10°22'	0.3599	
	31	92	10°57'	0.3799		34	112	12°06'	0.4192		35	117	12°22'	0.4283	
	37	129	12°57'	0.4482		41	153	14°06'	0.4872		41	158	14°22'	0.4962	
0.0177	1	1	0°58'	0.1047		3	3	2°08'	0.0745		4	4	2°24'	0.0838	
	6	7	3°00'	0.1047		9	12	4°10'	0.1453		10	14	4°26'	0.1546	
	12	19	5°02'	0.1755		16	28	6°12'	0.2160		16	30	6°28'	0.2253	
	18	37	7°04'	0.2460		22	50	8°14'	0.2864		23	53	8°30'	0.2956	
	24	61	9°06'	0.3163		28	78	10°16'	0.3565		29	82	10°32'	0.3656	
	31	92	11°08'	0.3862		34	112	12°18'	0.4261		35	117	12°34'	0.4352	
	37	129	13°10'	0.4556		41	153	14°20'	0.4951		41	158	14°36'	0.5041	
0.0180	1	1	0°59'	0.1064		3	3	2°11'	0.0762		4	4	2°27'	0.0855	
	6	7	3°03'	0.1064		9	12	4°15'	0.1482		10	14	4°31'	0.1575	
	12	19	5°07'	0.1784		16	28	6°19'	0.2200		16	30	6°35'	0.2293	
	18	37	7°11'	0.2501		22	50	8°23'	0.2916		23	53	8°39'	0.3008	
	24	61	9°15'	0.3215		28	78	10°27'	0.3628		29	82	10°43'	0.3719	
	31	92	11°19'	0.3925		34	112	12°31'	0.4334		35	117	12°47'	0.4425	
	37	129	13°23'	0.4629		41	153	14°35'	0.5036		41	158	14°51'	0.5126	
0.0183	1	1	1°00'	0.1082		3	3	2°13'	0.0774		4	4	2°29'	0.0867	
	6	7	3°06'	0.1082		9	12	4°19'	0.1505		10	14	4°35'	0.1598	
	12	19	5°12'	0.1812		16	28	6°25'	0.2235		16	30	6°41'	0.2328	
	18	37	7°18'	0.2541		22	50	8°31'	0.2962		23	53	8°47'	0.3054	
	24	61	9°24'	0.3267		28	78	10°37'	0.3685		29	82	10°53'	0.3776	
	31	92	11°30'	0.3987		34	112	12°43'	0.4403		35	117	12°59'	0.4493	
	37	129	13°35'	0.4703		40	152	14°49'	0.5115		41	158	15°05'	0.5204	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	ν	K_1	K_2	N	ΣN	ν	K_1	K_2	N	ΣN	ν	K_1	K_2
0.0186	1	1	1°01'	0.1099		3	3	2°15'	0.0785		4	4	2°32'	0.0881	
	6	7	3°09'	0.1842		9	12	4°23'	0.1529		10	14	4°40'	0.1627	
	12	19	5°17'	0.2582		16	28	6°31'	0.2270		16	30	6°48'	0.2368	
	18	37	7°25'	0.3318		22	50	8°39'	0.3008		23	53	8°55'	0.3196	
	24	61	9°33'	0.4050		28	78	10°47'	0.3742		29	82	11°04'	0.3839	
	31	92	11°41'	0.4776		34	112	12°55'	0.4471		35	117	13°12'	0.4567	
	37	129	13°49'			40	152	15°03'	0.5193		41	158	15°20'	0.5289	
0.0189	1	1	1°02'	0.1116		3	3	2°17'	0.0797		4	4	2°34'	0.0896	
	6	7	3°12'	0.1871		9	12	4°27'	0.1552		10	14	4°44'	0.1650	
	12	19	5°22'	0.2622		16	28	6°37'	0.2305		16	30	6°54'	0.2403	
	18	37	7°32'	0.3370		22	50	8°47'	0.3054		23	53	9°04'	0.3152	
	24	61	9°42'	0.4113		28	78	10°57'	0.3799		29	82	11°14'	0.3896	
	31	92	11°52'	0.4850		34	112	13°07'	0.4539		35	117	13°24'	0.4635	
	37	129	14°02'			40	152	15°17'	0.5272		41	158	15°34'	0.5367	
0.0192	1	1	1°03'	0.1134		3	3	2°19'	0.0808		4	4	2°36'	0.0907	
	6	7	3°15'	0.1900		9	12	4°31'	0.1575		10	14	4°48'	0.1674	
	12	19	5°27'	0.2662		16	28	6°43'	0.2339		16	30	7°00'	0.2437	
	18	37	7°39'	0.3421		22	50	8°55'	0.3100		23	53	9°12'	0.3198	
	24	61	9°51'	0.4175		28	78	11°07'	0.3856		29	82	11°24'	0.3953	
	31	92	12°03'	0.4923		34	112	13°19'	0.4607		35	117	13°36'	0.4703	
	37	129	14°15'			40	152	15°31'	0.5350		41	158	15°48'	0.5446	
0.0195	1	1	1°04'	0.1151		3	3	2°21'	0.0820		4	4	2°39'	0.0925	
	6	7	3°18'	0.1929		9	12	4°35'	0.1598		10	14	4°53'	0.1703	
	12	19	5°32'	0.2703		16	28	6°49'	0.2374		16	30	7°07'	0.2478	
	18	37	7°46'	0.3473		22	50	9°03'	0.3146		23	53	9°21'	0.3249	
	24	61	10°00'	0.4238		28	78	11°17'	0.3913		29	82	11°35'	0.4016	
	31	92	12°14'	0.4996		34	112	13°31'	0.4676		35	117	13°49'	0.4776	
	37	129	14°28'			40	152	15°45'	0.5429		41	158	16°03'	0.5530	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.0198	1	1	1°05'			3	3	2°24'	0.0838		4	4	2°41'	0.0936	
	6	7	3°21'	0.1169		9	12	4°40'	0.1627		10	14	4°57'	0.1728	
	12	19	5°37'	0.1937		16	28	6°56'	0.2414		16	30	7°13'	0.2512	
	18	37	7°53'	0.2713		22	50	9°12'	0.3198		23	53	9°29'	0.3295	
	24	61	10°09'	0.3525		28	78	11°28'	0.3976		29	82	11°45'	0.4073	
	31	92	12°25'	0.4300		31	112	13°44'	0.4748		35	117	14°01'	0.4844	
	37	129	14°41'	0.5070		40	152	16°00'	0.5513		41	158	16°17'	0.5608	
0.0201	1	1	1°06'			3	3	2°26'	0.0849		4	4	2°44'	0.0954	
	6	7	3°24'	0.1186		9	12	4°44'	0.1650		10	14	5°02'	0.1755	
	12	19	5°42'	0.1986		16	28	7°02'	0.2449		16	30	7°20'	0.2553	
	18	37	8°00'	0.2783		22	50	9°20'	0.3244		23	53	9°38'	0.3347	
	24	61	10°18'	0.3576		28	78	11°38'	0.4033		29	82	11°56'	0.4135	
	31	92	12°36'	0.4363		34	112	13°56'	0.4816		35	117	14°14'	0.4917	
	37	129	14°54'	0.5143		40	152	16°14'	0.5591		41	158	16°32'	0.5691	
0.0204	1	1	1°07'			3	3	2°28'	0.0861		4	4	2°46'	0.0965	
	6	7	3°27'	0.1201		9	12	4°48'	0.1674		10	14	5°06'	0.1778	
	12	19	5°47'	0.2015		16	28	7°08'	0.2484		16	30	7°26'	0.2587	
	18	37	8°07'	0.2824		22	50	9°28'	0.3289		23	53	9°46'	0.3393	
	24	61	10°27'	0.3628		28	78	11°48'	0.4090		29	82	12°06'	0.4192	
	31	92	12°47'	0.4425		34	112	14°03'	0.4884		35	117	14°26'	0.4985	
	37	129	15°07'	0.5216		40	152	16°28'	0.5669		41	158	16°46'	0.5770	
0.0207	1	1	1°08'			3	3	2°30'	0.0872		4	4	2°49'	0.0983	
	6	7	3°30'	0.1221		9	12	4°52'	0.1697		10	14	5°11'	0.1807	
	12	19	5°52'	0.2044		16	28	7°14'	0.2518		16	30	7°33'	0.2628	
	18	37	8°14'	0.2864		22	50	9°36'	0.3335		23	53	9°55'	0.3444	
	24	61	10°36'	0.3679		28	78	11°58'	0.4147		29	82	12°17'	0.4255	
	31	92	12°58'	0.4488		34	112	14°20'	0.4951		35	117	14°39'	0.5058	
	37	129	15°20'	0.5239		40	152	16°42'	0.5747		41	158	17°01'	0.5853	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_2}$	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	
0.0209	1	1	1°09'	0.1238		3	3	2°32'	0.0834		4	4	2°51'	0.0994		4	4	2°51'	0.0994		
	6	7	3°33'	0.1238		9	12	4°56'	0.1720		10	14	5°15'	0.1830		14	14	5°15'	0.1830		
	12	19	5°57'	0.2073		16	28	7°20'	0.2553		16	30	7°33'	0.2662		30	30	7°33'	0.2662		
	18	37	8°21'	0.2904		22	50	9°44'	0.3381		23	53	10°03'	0.3490		53	53	10°03'	0.3490		
	24	61	10°45'	0.3730		28	78	12°08'	0.4204		29	82	12°27'	0.4312		82	82	12°27'	0.4312		
	31	92	13°09'	0.4550		34	112	14°32'	0.5019		35	117	14°51'	0.5126		117	117	14°51'	0.5126		
	37	129	15°33'	0.5362		40	152	16°56'	0.5825		41	158	17°15'	0.5931		158	158	17°15'	0.5931		
0.0212	1	1	1°10'	0.1256		3	3	2°34'	0.0896		4	4	2°53'	0.1006		4	4	2°53'	0.1006		
	6	7	3°36'	0.1256		9	12	5°00'	0.1743		10	14	5°19'	0.1853		14	14	5°19'	0.1853		
	12	19	6°02'	0.2102		16	28	7°26'	0.2587		16	30	7°45'	0.2697		30	30	7°45'	0.2697		
	18	37	8°28'	0.2945		22	50	9°52'	0.3427		23	53	10°11'	0.3536		53	53	10°11'	0.3536		
	24	61	10°54'	0.3782		28	78	12°18'	0.4261		29	82	12°37'	0.4369		82	82	12°37'	0.4369		
	31	92	13°20'	0.4612		34	112	14°44'	0.5086		35	117	15°09'	0.5193		117	117	15°09'	0.5193		
	37	129	15°46'	0.5434		40	152	17°10'	0.5903		41	158	17°29'	0.6009		158	158	17°29'	0.6009		
0.0215	1	1	1°11'	0.1273		3	3	2°35'	0.0907		4	4	2°56'	0.1023		4	4	2°56'	0.1023		
	6	7	3°39'	0.1273		9	12	5°04'	0.1766		10	14	5°24'	0.1882		14	14	5°24'	0.1882		
	12	19	6°07'	0.2131		16	28	7°22'	0.2622		16	30	7°52'	0.2737		30	30	7°52'	0.2737		
	18	37	8°35'	0.2985		22	50	10°00'	0.3473		23	53	10°20'	0.3583		53	53	10°20'	0.3583		
	24	61	11°03'	0.3833		28	78	12°28'	0.4317		29	82	12°48'	0.4431		82	82	12°48'	0.4431		
	31	92	13°31'	0.4675		34	112	14°56'	0.5154		35	117	15°16'	0.5266		117	117	15°16'	0.5266		
	37	129	15°59'	0.5507		40	152	17°24'	0.5981		41	158	17°44'	0.6092		158	158	17°44'	0.6092		
0.0218	1	1	1°12'	0.1291		3	3	2°39'	0.0925		4	4	2°58'	0.1035		4	4	2°58'	0.1035		
	6	7	3°42'	0.1291		9	12	5°09'	0.1795		10	14	5°28'	0.1905		14	14	5°28'	0.1905		
	12	19	6°12'	0.2160		16	28	7°39'	0.2662		16	30	7°58'	0.2772		30	30	7°58'	0.2772		
	18	37	8°42'	0.3025		22	50	10°09'	0.3525		23	53	10°28'	0.3633		53	53	10°28'	0.3633		
	24	61	11°12'	0.3885		28	78	12°39'	0.4380		29	82	12°58'	0.4488		82	82	12°58'	0.4488		
	31	92	13°42'	0.4737		34	112	15°09'	0.5227		35	117	15°28'	0.5334		117	117	15°28'	0.5334		
	37	129	16°12'	0.5580		40	152	17°39'	0.6064		41	158	17°58'	0.6169		158	158	17°58'	0.6169		

(續)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0221	1	1	1°13'			3	3	2°41'	0.0936		4	4	3°01'	0.1053	
	6	7	3°45'	0.1303		9	12	5°13'	0.1818		10	14	5°33'	0.1931	
	12	19	6°17'	0.2189		16	28	7°45'	0.2697		16	30	8°05'	0.2812	
	18	37	8°49'	0.3065		22	50	10°17'	0.3570		23	53	10°37'	0.3685	
	24	61	11°21'	0.3936		24	78	12°49'	0.4437		29	82	13°09'	0.4550	
	31	92	13°53'	0.4739		31	112	15°21'	0.5294		35	117	15°41'	0.5406	
	37	129	16°25'	0.5552		40	152	17°53'	0.6142		41	158	18°13'	0.6252	
0.0221	1	1	1°11'			3	3	2°19'	0.0918		4	4	3°03'	0.1064	
	6	7	3°48'	0.1325		9	12	5°17'	0.1842		10	14	5°37'	0.1957	
	12	19	6°22'	0.2218		16	28	7°51'	0.2732		16	30	8°11'	0.2847	
	18	37	8°55'	0.3106		22	59	10°25'	0.3616		23	53	10°45'	0.3730	
	24	61	11°33'	0.3987		28	78	12°53'	0.4493		29	82	13°19'	0.4607	
	31	92	14°01'	0.4861		31	112	15°33'	0.5352		35	117	15°53'	0.5474	
	37	129	16°33'	0.5725		40	152	18°07'	0.6219		41	158	18°27'	0.6330	
0.0227	1	1	1°15'			3	3	2°45'	0.0960		4	4	3°05'	0.1076	
	6	7	3°51'	0.1343		9	12	5°21'	0.1855		10	14	5°41'	0.1981	
	12	19	6°27'	0.2247		16	28	7°57'	0.2766		16	30	8°17'	0.2891	
	18	37	9°03'	0.3146		22	59	10°33'	0.3662		23	53	10°53'	0.3776	
	24	61	11°39'	0.4039		28	73	13°03'	0.4550		29	82	13°23'	0.4663	
	31	92	14°15'	0.4923		31	112	15°45'	0.5429		35	117	16°05'	0.5541	
	37	129	16°51'	0.5797		40	152	18°21'	0.6796		41	158	18°41'	0.6407	
0.0230	1	1	1°16'			3	3	2°47'	0.0971		4	4	3°08'	0.1093	
	6	7	3°51'	0.1360		9	12	5°25'	0.1838		10	14	5°46'	0.2010	
	12	19	6°32'	0.2276		15	28	8°03'	0.2801		16	30	8°21'	0.2922	
	18	37	9°10'	0.3186		22	59	10°41'	0.3708		23	53	11°02'	0.3829	
	24	61	11°48'	0.4090		23	78	13°19'	0.4607		29	82	13°40'	0.4727	
	31	92	14°26'	0.4985		34	112	15°57'	0.5496		35	117	16°18'	0.5613	
	37	129	17°01'	0.5870		40	152	18°35'	0.6374		41	158	18°56'	0.6499	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0233	1	1	1°17'	0.1378		3	3	2°49'	0.0983		4	4	3°10'	0.1105		4	4	3°10'	0.1105	
	6	7	3°57'			9	12	5°29'	0.1911		10	11	5°50'	0.2033		11	11	5°50'	0.2033	
	12	19	6°37'	0.2305		16	28	8°09'	0.2835		16	30	8°30'	0.2956		30	30	8°30'	0.2956	
	18	37	9°17'	0.3226		22	50	10°49'	0.3753		23	53	11°10'	0.3873		53	53	11°10'	0.3873	
	24	61	11°57'	0.4141		28	78	13°29'	0.4663		29	82	13°50'	0.4618		82	82	13°50'	0.4618	
	31	92	14°37'	0.5047		34	112	16°09'	0.5563		35	117	16°30'	0.5680		117	117	16°30'	0.5680	
	37	129	17°17'	0.5942		40	152	18°49'	0.6451		41	158	19°10'	0.6506		158	158	19°10'	0.6506	
0.0236	1	1	1°17'			3	3	2°51'	0.0994		4	4	3°12'	0.1116		4	4	3°12'	0.1116	
	6	7	3°59'	0.1389		9	12	5°33'	0.1934		10	14	5°54'	0.2056		14	14	5°54'	0.2056	
	12	19	6°41'	0.2328		16	28	8°15'	0.2870		16	30	8°36'	0.2991		30	30	8°36'	0.2991	
	18	37	9°23'	0.3261		22	50	10°57'	0.3799		23	53	11°18'	0.3919		53	53	11°18'	0.3919	
	24	61	12°05'	0.4187		28	78	13°39'	0.4720		29	82	14°00'	0.4838		82	82	14°00'	0.4838	
	31	92	14°47'	0.5103		34	112	16°21'	0.5630		35	117	16°42'	0.5747		117	117	16°42'	0.5747	
	37	129	17°29'	0.6009		40	152	19°03'	0.6528		41	158	19°24'	0.6643		158	158	19°24'	0.6643	
0.0239	1	1	1°18'			3	3	2°53'	0.1006		4	4	3°14'	0.1128		4	4	3°14'	0.1128	
	6	7	4°02'	0.1407		9	12	5°37'	0.1957		10	14	5°58'	0.2079		14	14	5°58'	0.2079	
	12	19	6°46'	0.2357		16	28	8°21'	0.2904		16	30	8°42'	0.3025		30	30	8°42'	0.3025	
	18	37	9°30'	0.3301		22	50	11°05'	0.3845		23	53	11°26'	0.3965		53	53	11°26'	0.3965	
	24	61	12°14'	0.4238		28	78	13°49'	0.4776		29	82	14°10'	0.4895		82	82	14°10'	0.4895	
	31	92	14°58'	0.5165		34	112	16°33'	0.5697		35	117	16°54'	0.5814		117	117	16°54'	0.5814	
	37	129	17°42'	0.6081		40	152	19°17'	0.6605		41	158	19°38'	0.6720		158	158	19°38'	0.6720	
0.0241	1	1	1°19'			3	3	2°55'	0.1018		4	4	3°16'	0.1140		4	4	3°16'	0.1140	
	6	7	4°05'	0.1424		9	12	5°41'	0.1981		10	14	6°02'	0.2102		14	14	6°02'	0.2102	
	12	19	6°51'	0.2385		16	28	8°27'	0.2939		16	30	8°48'	0.3060		30	30	8°48'	0.3060	
	18	37	9°37'	0.3341		22	50	11°13'	0.3890		23	53	11°34'	0.4010		53	53	11°34'	0.4010	
	24	61	12°23'	0.4289		28	78	13°59'	0.4833		29	82	14°20'	0.4951		82	82	14°20'	0.4951	
	31	92	15°09'	0.5227		34	112	16°45'	0.5764		35	117	17°06'	0.5881		117	117	17°06'	0.5881	
	37	129	17°55'	0.6153		40	152	19°31'	0.6682		41	158	19°52'	0.6797		158	158	19°52'	0.6797	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0244	1	1	1°20'			3	3	2°57'	0.1029		4	4	3°19'	0.1157	
	6	7	4°08'	0.1442		9	12	5°45'	0.2004		10	14	6°07'	0.2131	
	12	19	6°56'	0.2414		16	28	8°33'	0.2973		16	30	8°55'	0.3100	
	18	37	9°44'	0.3381		22	50	11°21'	0.3936		23	53	11°43'	0.4061	
	24	61	12°32'	0.4340		28	78	14°09'	0.4889		29	82	14°31'	0.5013	
	31	92	15°20'	0.5239		34	112	16°57'	0.5831		35	117	17°19'	0.5963	
	37	129	18°08'	0.6235		40	152	19°45'	0.6758		41	158	20°07'	0.6879	
0.0247	1	1	1°21'			3	3	2°59'	0.1041		4	4	3°21'	0.1169	
	6	7	4°11'	0.1459		9	12	5°49'	0.2027		10	14	6°11'	0.2154	
	12	19	7°01'	0.2443		16	28	8°39'	0.3008		16	30	9°01'	0.3134	
	18	37	9°51'	0.3421		22	50	11°29'	0.3982		23	53	11°51'	0.4107	
	24	61	12°41'	0.4391		28	78	14°19'	0.4946		29	82	14°41'	0.5070	
	31	92	15°31'	0.5350		34	112	17°09'	0.5897		35	117	17°31'	0.6020	
	37	129	18°21'	0.6296		40	152	19°59'	0.6835		41	158	20°21'	0.6955	
0.0250	1	1	1°22'			3	3	3°01'	0.1053		4	4	3°24'	0.1186	
	6	7	4°14'	0.1476		9	12	5°53'	0.2050		10	14	6°16'	0.2183	
	12	19	7°06'	0.2472		16	28	8°45'	0.3042		16	30	9°08'	0.3175	
	18	37	9°58'	0.3462		22	50	11°37'	0.4027		23	53	12°00'	0.4158	
	24	61	12°50'	0.4442		28	78	14°29'	0.5002		29	82	14°52'	0.5131	
	31	92	15°42'	0.5412		34	112	17°21'	0.5964		35	117	17°44'	0.6092	
	37	129	18°34'	0.6368		40	152	20°13'	0.6911		41	158	20°36'	0.7037	
0.0253	1	1	1°23'			3	3	3°04'	0.1070		4	4	3°26'	0.1198	
	6	7	4°17'	0.1494		9	12	5°58'	0.2079		10	14	6°20'	0.2206	
	12	19	7°11'	0.2501		16	28	8°52'	0.3083		16	30	9°14'	0.3209	
	18	37	10°05'	0.3502		22	50	11°46'	0.4079		23	53	12°08'	0.4204	
	24	61	12°59'	0.4493		28	78	14°40'	0.5064		29	82	15°02'	0.5188	
	31	92	15°53'	0.5474		34	112	17°34'	0.6036		35	117	17°56'	0.6158	
	37	129	18°47'	0.6440		40	152	20°28'	0.6993		41	158	20°50'	0.7113	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0256	1	1	1°24'	0.1511		3	3	3°06'	0.1082		4	4	3°28'	0.1209	
	6	7	4°20'	0.2530		9	12	6°02'	0.2102		10	14	6°24'	0.2229	
	12	19	7°16'	0.3542		16	28	8°58'	0.3117		16	30	9°20'	0.3244	
	18	37	10°12'	0.4544		22	50	11°54'	0.4124		23	53	12°16'	0.4249	
	24	61	13°08'	0.5535		28	78	14°50'	0.5120		29	82	15°12'	0.5244	
	31	92	16°04'	0.6511		34	112	17°46'	0.6103		35	117	18°08'	0.6225	
	37	129	19°00'	0.6511		40	152	20°42'	0.7070		41	158	21°04'	0.7189	
0.0259	1	1	1°25'	0.1529		3	3	3°08'	0.1093		4	4	3°31'	0.1227	
	6	7	4°23'	0.2559		9	12	6°06'	0.2125		10	14	6°29'	0.2258	
	12	19	7°21'	0.3582		16	28	9°04'	0.3152		16	30	9°27'	0.3284	
	18	37	10°19'	0.4595		22	50	12°02'	0.4170		23	53	12°25'	0.4300	
	24	61	13°17'	0.5597		28	78	15°00'	0.5176		29	82	15°23'	0.5306	
	31	92	16°15'	0.6583		34	112	17°58'	0.6169		35	117	18°21'	0.6296	
	37	129	19°13'	0.6583		40	152	20°56'	0.7146		41	158	21°19'	0.7270	
0.0262	1	1	1°26'	0.1546		3	3	3°10'	0.1105		4	4	3°33'	0.1238	
	6	7	4°26'	0.2587		9	12	6°10'	0.2148		10	14	6°33'	0.2281	
	12	19	7°26'	0.3622		16	28	9°10'	0.3186		16	30	9°33'	0.3318	
	18	37	10°26'	0.4646		22	50	12°10'	0.4215		23	53	12°33'	0.4346	
	24	61	13°26'	0.5658		28	78	15°10'	0.5233		29	82	15°33'	0.5362	
	31	92	16°26'	0.6654		34	112	18°10'	0.6236		35	117	18°33'	0.6363	
	37	129	19°26'	0.6654		40	152	21°10'	0.7222		41	158	21°33'	0.7346	
0.0265	1	1	1°27'	0.1563		3	3	3°12'	0.1116		4	4	3°36'	0.1256	
	6	7	4°29'	0.2616		9	12	6°14'	0.2172		10	14	6°38'	0.2310	
	12	19	7°31'	0.3662		16	28	9°16'	0.3221		16	30	9°40'	0.3358	
	18	37	10°33'	0.4697		22	50	12°18'	0.4261		23	53	12°42'	0.4397	
	24	61	13°35'	0.5719		28	78	15°20'	0.5289		29	82	15°44'	0.5423	
	31	92	16°37'	0.6725		34	112	18°22'	0.6302		35	117	18°46'	0.6434	
	37	129	19°39'	0.6725		40	152	21°24'	0.7298		41	158	21°48'	0.7427	

(续)

$\frac{\phi + b}{2H}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0268	1	1	1°28'	0.5181		3	3	3°14'	0.1128		4	4	3°38'	0.1267	
	6	7	4°32'	0.5181		9	12	6°18'	0.2195		10	14	6°42'	0.2333	
	12	19	7°36'	0.2635		16	28	9°22'	0.3255		16	30	9°46'	0.3393	
	18	37	10°40'	0.3702		22	50	12°26'	0.4306		23	53	12°50'	0.4442	
	24	61	13°44'	0.4748		28	78	15°30'	0.5345		29	82	15°54'	0.5479	
	31	92	16°48'	0.5781		34	112	18°34'	0.6368		35	117	18°58'	0.6500	
	37	129	19°52'	0.6797		40	152	21°38'	0.7373		41	158	22°62'	0.7503	
0.0270	1	1	1°29'	0.1598		3	3	3°17'	0.1145		4	4	3°41'	0.1285	
	6	7	4°35'	0.2674		9	12	6°23'	0.2224		10	14	6°47'	0.2362	
	12	19	7°41'	0.3732		16	28	9°29'	0.3295		16	30	9°53'	0.3433	
	18	37	10°47'	0.4799		22	50	12°35'	0.4357		23	53	12°59'	0.4493	
	24	61	13°53'	0.5812		28	78	15°41'	0.5406		29	82	16°05'	0.5541	
	31	92	16°59'	0.6868		34	112	18°47'	0.6440		35	117	19°11'	0.6572	
	37	129	20°05'	0.7939		40	152	21°53'	0.7454		41	158	22°17'	0.7581	
0.0273	1	1	1°30'	0.1616		3	3	3°19'	0.1157		4	4	3°43'	0.1296	
	6	7	4°38'	0.2703		9	12	6°27'	0.2247		10	14	6°51'	0.2385	
	12	19	7°46'	0.3782		16	28	9°35'	0.3330		16	30	9°59'	0.3467	
	18	37	10°54'	0.4850		22	50	12°43'	0.4403		23	53	13°07'	0.4539	
	24	61	14°02'	0.5903		28	78	15°51'	0.5462		29	82	16°15'	0.5597	
	31	92	17°10'	0.6939		34	112	18°59'	0.6506		35	117	19°23'	0.6638	
	37	129	20°18'	0.7939		40	152	22°07'	0.7530		41	158	22°31'	0.7669	
0.0276	1	1	1°31'	0.1633		3	3	3°21'	0.1169		4	4	3°45'	0.1308	
	6	7	4°41'	0.2732		9	12	6°31'	0.2270		10	14	6°55'	0.2409	
	12	19	7°51'	0.3822		16	28	9°41'	0.3364		16	30	10°05'	0.3502	
	18	37	11°01'	0.4901		22	50	12°51'	0.4448		23	53	13°15'	0.4584	
	24	61	14°11'	0.5964		28	78	16°01'	0.5518		29	82	16°25'	0.5652	
	31	92	17°21'	0.7010		34	112	19°11'	0.6572		35	117	19°35'	0.6704	
	37	129	20°31'	0.7939		40	152	22°21'	0.7605		41	158	22°45'	0.7734	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0279	1	1	1°32'	0.1650		3	3	3°23'	0.1180		4	4	3°48'	0.1325	
	6	7	4°44'	0.2760		9	12	6°35'	0.2293		10	14	7°00'	0.2437	
	12	19	7°56'	0.3862		16	28	9°47'	0.3398		16	30	10°12'	0.3542	
	18	37	11°08'	0.4951		22	50	12°59'	0.4493		23	53	13°24'	0.4635	
	24	61	14°20'	0.6025		28	78	16°11'	0.5574		29	82	16°36'	0.5714	
	31	92	17°32'	0.7080		34	112	19°23'	0.6638		35	117	19°48'	0.6775	
	37	129	20°44'	0.7151		40	152	22°35'	0.7681		41	158	23°00'	0.7815	
0.0282	1	1	1°33'	0.1668		3	3	3°25'	0.1192		4	4	3°50'	0.1337	
	6	7	4°47'	0.2789		9	12	6°39'	0.2316		10	14	7°04'	0.2460	
	12	19	8°01'	0.3902		16	28	9°53'	0.3433		16	30	10°18'	0.3576	
	18	37	11°15'	0.5002		22	50	13°07'	0.4539		23	53	13°32'	0.4680	
	24	61	14°29'	0.6086		28	78	16°21'	0.5630		29	82	16°46'	0.5770	
	31	92	17°43'	0.7151		34	112	19°35'	0.6704		35	117	20°00'	0.6840	
	37	129	20°57'	0.7222		40	152	22°49'	0.7756		41	158	23°14'	0.7890	
0.0285	1	1	1°34'	0.1685		3	3	3°27'	0.1204		4	4	3°53'	0.1355	
	6	7	4°50'	0.2818		9	12	6°43'	0.2339		10	14	7°09'	0.2489	
	12	19	8°06'	0.3942		16	28	9°59'	0.3467		16	30	10°25'	0.3616	
	18	37	11°22'	0.5053		22	50	13°15'	0.4584		23	53	13°41'	0.4731	
	24	61	14°38'	0.6147		28	78	16°31'	0.5686		29	82	16°57'	0.5831	
	31	92	17°54'	0.7222		34	112	19°47'	0.6769		35	117	20°13'	0.6911	
	37	129	21°10'	0.7292		40	152	23°03'	0.7831		41	158	23°29'	0.7970	
0.0288	1	1	1°35'	0.1703		3	3	3°29'	0.1215		4	4	3°55'	0.1366	
	6	7	4°53'	0.2847		9	12	6°47'	0.2362		10	14	7°13'	0.2512	
	12	19	8°11'	0.3982		16	28	10°05'	0.3502		16	30	10°31'	0.3650	
	18	37	11°29'	0.5103		22	50	13°23'	0.4629		23	53	13°49'	0.4776	
	24	61	14°47'	0.6208		28	78	16°41'	0.5742		29	82	17°07'	0.5886	
	31	92	18°05'	0.7292		34	112	19°59'	0.6835		35	117	20°25'	0.6977	
	37	129	21°23'	0.7362		40	152	23°17'	0.7906		41	158	23°43'	0.8044	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	
0.0291	1	1	1°35'			3	3	3°30'	0.1221		4	4	3°56'	0.1372		4	4	3°56'	0.1372		
	6	7	4°55'	0.1714		9	12	6°50'	0.2380		10	14	7°16'	0.2530		14	14	7°16'	0.2530		
	12	19	8°15'	0.2870		16	28	10°10'	0.3530		16	30	10°36'	0.3679		30	30	10°36'	0.3679		
	18	37	11°35'	0.4016		22	50	13°30'	0.4669		23	53	13°56'	0.4816		53	53	13°56'	0.4816		
	24	61	14°55'	0.5148		28	78	16°50'	0.5792		29	82	17°16'	0.5936		82	82	17°16'	0.5936		
	31	92	18°15'	0.6263		34	112	20°10'	0.6895		35	117	20°36'	0.7037		117	117	20°36'	0.7037		
	37	129	21°35'	0.7357		40	152	23°30'	0.7975		41	158	23°56'	0.8113		158	158	23°56'	0.8113		
0.0294	1	1	1°36'			3	3	3°33'	0.1238		4	4	3°59'	0.1389		4	4	3°59'	0.1389		
	6	7	4°58'	0.1732		9	12	6°55'	0.2409		10	14	7°21'	0.2559		14	14	7°21'	0.2559		
	12	19	8°20'	0.2899		16	28	10°17'	0.3570		16	30	10°43'	0.3719		30	30	10°43'	0.3719		
	18	37	11°42'	0.4058		22	50	13°39'	0.4729		23	53	14°63'	0.4867		53	53	14°63'	0.4867		
	24	61	15°04'	0.5199		28	78	17°01'	0.5853		29	82	17°27'	0.5997		82	82	17°27'	0.5997		
	31	92	18°26'	0.6324		34	112	20°23'	0.6966		35	117	20°49'	0.7108		117	117	20°49'	0.7108		
	37	129	21°48'	0.7427		40	152	23°43'	0.8055		41	158	24°11'	0.8193		158	158	24°11'	0.8193		
0.0297	1	1	1°57'			3	3	3°35'	0.1250		4	4	4°01'	0.1401		4	4	4°01'	0.1401		
	6	7	5°01'	0.1749		9	12	6°59'	0.2432		10	14	7°25'	0.2582		14	14	7°25'	0.2582		
	12	19	8°25'	0.2927		16	28	10°23'	0.3603		16	30	10°49'	0.3753		30	30	10°49'	0.3753		
	18	37	11°45'	0.4096		22	50	15°47'	0.4765		23	53	14°13'	0.4912		53	53	14°13'	0.4912		
	24	61	15°13'	0.5249		28	78	17°11'	0.5909		29	82	17°37'	0.6058		82	82	17°37'	0.6058		
	31	92	18°37'	0.6385		34	112	20°35'	0.7031		35	117	21°01'	0.7173		117	117	21°01'	0.7173		
	37	129	22°01'	0.7498		40	152	23°59'	0.8129		41	158	24°25'	0.8267		158	158	24°25'	0.8267		
0.0300	1	1	1°36'			3	3	3°37'	0.1262		4	4	4°04'	0.1418		4	4	4°04'	0.1418		
	6	7	5°04'	0.1760		9	12	7°03'	0.2455		10	14	7°30'	0.2611		14	14	7°30'	0.2611		
	12	19	8°30'	0.2956		16	28	10°29'	0.3039		16	30	10°56'	0.3793		30	30	10°56'	0.3793		
	18	37	11°56'	0.4135		22	50	13°55'	0.4810		23	53	14°22'	0.4963		53	53	14°22'	0.4963		
	24	61	15°22'	0.5300		28	78	17°21'	0.5961		29	82	17°48'	0.6114		82	82	17°48'	0.6114		
	31	92	18°48'	0.6445		34	112	20°47'	0.7697		35	117	21°14'	0.7243		117	117	21°14'	0.7243		
	37	129	22°14'	0.7568		40	152	24°13'	0.8804		41	158	24°40'	0.8347		158	158	24°40'	0.8347		

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_0}$	N	ΣN	ψ	K_1	K_2	N	ΣN	ψ	K_1	K_2	N	ΣN	ψ	K_1	K_2
0.0302	1	1	1°39'	0.1784		3	3	3°39'	0.1273		4	4	4°06'	0.1430	
	6	7	5°07'	0.2985		9	12	7°07'	0.2478		10	14	7°34'	0.2634	
	12	19	8°35'	0.4175		16	28	10°35'	0.3673		16	30	11°02'	0.3828	
	18	37	12°03'	0.5350		22	50	14°03'	0.4853		23	53	14°30'	0.5008	
	24	61	15°31'	0.6506		28	78	17°31'	0.6020		29	82	17°58'	0.6169	
	31	92	18°59'	0.7638		34	112	20°59'	0.7162		35	117	21°26'	0.7308	
37	129	22°27'			40	152	24°27'	0.8278		41	158	24°54'	0.8421		
0.0305	1	1	1°40'	0.1801		3	3	3°47'	0.1285		4	4	4°09'	0.1447	
	6	7	5°10'	0.3014		9	12	7°11'	0.2501		10	14	7°39'	0.2662	
	12	19	8°40'	0.4215		16	28	10°41'	0.3708		16	30	11°09'	0.3868	
	18	37	12°10'	0.5401		22	50	14°11'	0.4901		23	33	14°39'	0.5053	
	24	61	15°40'	0.6566		28	78	17°41'	0.6075		29	82	18°09'	0.6230	
	31	92	19°10'	0.7707		34	112	21°11'	0.7227		35	117	21°39'	0.7379	
37	129	22°40'			40	152	24°41'	0.8352		41	158	25°09'	0.8500		
0.0308	1	1	1°41'	0.1818		3	3	3°43'	0.1296		4	4	4°11'	0.1459	
	6	7	5°13'	0.3042		9	12	7°15'	0.2524		10	14	7°43'	0.2685	
	12	19	8°45'	0.4255		16	28	10°47'	0.3742		16	30	11°15'	0.3902	
	18	37	12°17'	0.5451		22	50	14°19'	0.4946		23	53	14°47'	0.5103	
	24	61	15°49'	0.6627		28	78	17°51'	0.6131		29	82	18°19'	0.6285	
	30	91	19°21'	0.7777		34	112	21°23'	0.7292		35	117	21°51'	0.7444	
36	127	22°53'			40	152	24°55'	0.8426		40	157	25°23'	0.8573		
0.0311	1	1	1°42'	0.1836		3	3	3°46'	0.1314		4	4	4°13'	0.1471	
	6	7	5°16'	0.3071		9	12	7°20'	0.2553		10	14	7°47'	0.2609	
	12	19	8°50'	0.4295		16	28	10°54'	0.3782		16	30	11°21'	0.3936	
	18	37	12°24'	0.5502		22	50	14°28'	0.4996		23	53	14°55'	0.5148	
	24	61	15°58'	0.6687		28	78	18°02'	0.6191		29	82	18°29'	0.6341	
	30	91	19°32'	0.7847		34	112	21°36'	0.7163		35	117	22°03'	0.7508	
36	127	23°06'			40	152	25°10'	0.8505		40	157	25°37'	0.8647		

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0314	1	1	1°43'	0.1853		3	3	3°48'	0.1325		4	4	4°16'	0.1488		4	4	4°16'	0.1488	
	6	7	5°19'	0.3100		9	12	7°24'	0.2576		10	14	7°52'	0.2737		10	14	7°52'	0.2737	
	12	19	8°55'	0.4334		16	28	11°00'	0.3816		16	30	11°28'	0.3976		16	30	11°28'	0.3976	
	18	37	12°31'	0.5552		22	50	14°36'	0.5041		23	53	15°04'	0.5199		23	53	15°04'	0.5199	
	24	61	16°07'	0.6747		23	78	18°12'	0.6247		29	82	18°40'	0.6401		29	82	18°40'	0.6401	
	30	91	19°43'	0.7916		34	112	21°48'	0.7427		35	117	22°16'	0.7578		35	117	22°16'	0.7578	
	36	127	23°19'	0.7916		40	152	25°24'	0.8579		40	157	25°52'	0.8726		40	157	25°52'	0.8726	
0.0317	1	1	1°44'	0.1871		3	3	3°50'	0.1337		4	4	4°18'	0.1500		4	4	4°18'	0.1500	
	6	7	5°22'	0.3129		9	12	7°28'	0.2599		10	14	7°56'	0.2760		10	14	7°56'	0.2760	
	12	19	9°00'	0.4374		16	28	11°06'	0.3850		16	30	11°34'	0.4010		16	30	11°34'	0.4010	
	18	37	12°38'	0.5602		22	50	14°44'	0.5086		23	53	15°12'	0.5244		23	53	15°12'	0.5244	
	24	61	16°16'	0.6808		28	78	18°22'	0.6302		29	82	18°50'	0.6456		29	82	18°50'	0.6456	
	30	91	19°54'	0.7986		34	112	22°00'	0.7492		35	117	22°28'	0.7643		35	117	22°28'	0.7643	
	36	127	23°32'	0.7986		40	152	25°38'	0.8652		40	157	26°06'	0.8799		40	157	26°06'	0.8799	
0.0320	1	1	1°45'	0.1838		3	3	3°52'	0.1349		4	4	4°21'	0.1517		4	4	4°21'	0.1517	
	6	7	5°25'	0.3157		9	12	7°32'	0.2622		10	14	8°01'	0.2789		10	14	8°01'	0.2789	
	12	19	9°05'	0.4414		16	28	11°12'	0.3885		16	30	11°41'	0.4050		16	30	11°41'	0.4050	
	18	37	12°45'	0.5652		22	50	14°52'	0.5131		23	53	15°21'	0.5294		23	53	15°21'	0.5294	
	24	61	16°25'	0.6868		28	78	18°32'	0.6357		29	82	19°01'	0.6517		29	82	19°01'	0.6517	
	30	91	20°05'	0.8055		34	112	22°12'	0.7537		35	117	22°41'	0.7713		35	117	22°41'	0.7713	
	36	127	23°45'	0.8055		40	152	25°52'	0.8726		40	157	26°21'	0.8877		40	157	26°21'	0.8877	
0.0323	1	1	1°46'	0.1905		3	3	3°54'	0.1360		4	4	4°23'	0.1529		4	4	4°23'	0.1529	
	6	7	5°28'	0.3186		9	12	7°36'	0.2615		10	14	8°05'	0.2812		10	14	8°05'	0.2812	
	12	19	9°10'	0.4454		16	28	11°18'	0.3919		16	30	11°47'	0.4084		16	30	11°47'	0.4084	
	18	37	12°52'	0.5703		22	50	15°00'	0.5176		23	53	15°29'	0.5339		23	53	15°29'	0.5339	
	24	61	16°34'	0.6928		28	78	18°42'	0.6412		29	82	19°11'	0.6572		29	82	19°11'	0.6572	
	30	91	20°16'	0.8124		31	112	22°24'	0.7621		35	117	22°53'	0.7777		35	117	22°53'	0.7777	
	36	127	23°58'	0.8124		40	152	22°06'	0.8799		40	157	26°35'	0.8950		40	157	26°35'	0.8950	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0326	1	1	1°47'			3	3	3°56'	0.1372		4	4	4°25'	0.1540	
	6	7	5°31'	0.1923		9	12	7°40'	0.2668		10	14	8°09'	0.2835	
	12	19	9°15'	0.3215		16	28	11°24'	0.3953		16	30	11°53'	0.4118	
	18	37	12°59'	0.4493		22	50	15°08'	0.5221		23	53	15°37'	0.5384	
	24	61	16°43'	0.5753		28	78	18°52'	0.6467		29	82	19°21'	0.6627	
	30	91	20°27'	0.6988		34	112	22°36'	0.7686		35	117	23°05'	0.7841	
36	127	24°11'	0.8193		40	152	26°20'	0.8872		40	157	26°49'	0.9023		
0.0329	1	1	1°48'			3	3	3°59'	0.1389		4	4	4°28'	0.1558	
	6	7	5°34'	0.1940		9	12	7°45'	0.2697		10	14	8°14'	0.2864	
	12	19	9°20'	0.3214		16	28	11°31'	0.3993		16	30	12°00'	0.4158	
	18	37	13°06'	0.4533		22	50	15°17'	0.5272		23	53	15°40'	0.5434	
	24	61	16°58'	0.5893		28	78	19°03'	0.6528		29	82	19°32'	0.6687	
	30	91	20°38'	0.7048		31	112	22°49'	0.7756		35	117	23°48'	0.7911	
36	127	24°24'	0.8262		40	152	26°35'	0.8950		40	157	27°04'	0.9101		
0.0332	1	1	1°49'			3	3	4°01'	0.1401		4	4	4°30'	0.1569	
	6	7	5°37'	0.1957		9	12	7°49'	0.2720		10	14	8°18'	0.2887	
	12	19	9°25'	0.3272		16	28	11°37'	0.4027		16	30	12°06'	0.4192	
	18	37	13°13'	0.4573		22	50	15°25'	0.5317		23	53	15°54'	0.5479	
	24	61	17°01'	0.5853		28	78	19°13'	0.6583		29	82	19°42'	0.6742	
	30	91	20°49'	0.7138		34	112	23°01'	0.7820		35	117	23°30'	0.7975	
36	127	24°37'	0.8331		40	152	26°49'	0.9023		40	157	27°18'	0.9173		
0.0334	1	1	1°50'			3	3	4°03'	0.1413		4	4	4°33'	0.1587	
	6	7	5°40'	0.1975		9	12	7°53'	0.2743		10	14	8°23'	0.2916	
	12	19	9°30'	0.3301		16	28	11°43'	0.4061		16	30	12°13'	0.4232	
	18	37	13°20'	0.4612		22	50	15°33'	0.5362		23	53	16°03'	0.5530	
	24	61	17°10'	0.5903		28	78	19°23'	0.6638		29	82	19°53'	0.6802	
	30	91	21°00'	0.7167		34	112	23°13'	0.7884		35	117	23°43'	0.8044	
36	127	24°50'	0.8400		40	152	27°03'	0.9095		40	157	27°33'	0.9250		

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.0337	1	1	1°51'	0.1992		3	3	4°05'	0.1424		4	4	4°35'	0.1598	
	6	7	5°43'	0.3330		9	12	7°57'	0.2766		10	11	8°27'	0.2939	
	12	19	9°35'	0.4652		16	23	11°49'	0.4096		16	30	12°19'	0.4266	
	18	37	13°27'	0.5953		22	50	15°41'	0.5406		23	53	16°11'	0.5574	
	24	61	17°19'	0.7227		28	78	19°33'	0.6693		29	82	20°03'	0.6857	
	30	91	21°11'	0.8468		34	112	23°25'	0.7948		35	117	23°55'	0.8108	
	36	127	25°03'			40	152	27°17'	0.9168		40	157	27°47'	0.9323	
0.0340	1	1	1°52'	0.2010		3	3	4°07'	0.1436		4	4	4°37'	0.1610	
	6	7	5°46'	0.3358		9	12	8°01'	0.2739		10	14	8°31'	0.2962	
	12	19	9°40'	0.4692		16	23	11°55'	0.4130		16	30	12°25'	0.4300	
	18	37	13°34'	0.6003		22	50	15°49'	0.5451		23	53	16°19'	0.5619	
	24	61	17°28'	0.7287		28	78	19°43'	0.6747		29	82	20°13'	0.6911	
	30	91	21°22'	0.8537		34	112	23°37'	0.8012		35	117	21°07'	0.8172	
	36	127	25°16'			40	152	27°31'	0.9210		40	157	28°01'	0.9395	
0.0343	1	1	1°53'	0.2027		3	3	4°09'	0.1447		4	4	4°40'	0.1627	
	6	7	5°49'	0.3387		9	12	8°03'	0.2812		10	14	8°36'	0.2991	
	12	19	9°45'	0.4731		16	28	12°01'	0.4164		16	30	12°32'	0.4340	
	18	37	13°41'	0.6053		22	50	15°57'	0.5496		23	53	16°28'	0.5669	
	24	61	17°37'	0.7349		28	78	19°53'	0.6902		29	82	20°24'	0.6971	
	30	91	21°33'	0.8605		31	112	23°49'	0.8076		35	117	23°20'	0.8241	
	36	127	25°29'			40	152	27°45'	0.9312		40	157	28°16'	0.9472	
0.0346	1	1	1°54'	0.2044		3	3	4°11'	0.1459		4	4	4°42'	0.1639	
	6	7	5°52'	0.3416		9	12	8°09'	0.2835		10	14	8°40'	0.3014	
	12	19	9°50'	0.4771		16	28	12°07'	0.4198		16	30	12°38'	0.4374	
	18	37	13°48'	0.6103		22	50	16°05'	0.5546		23	53	16°36'	0.5714	
	24	61	17°46'	0.7406		28	78	20°03'	0.6857		29	82	20°34'	0.7026	
	30	91	21°44'	0.8673		34	112	24°01'	0.8110		35	117	21°32'	0.8204	
	36	127	25°42'			40	152	27°59'	0.9384		40	157	28°30'	0.9543	

(续)

$\phi \div b -$ zR_1	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2
0.0349	1	1	1°54'			3	3	4°13'	0.1471		4	4	4°44'	0.1650	
	6	7	5°54'	0.2056		9	12	8°13'	0.2858		10	14	8°44'	0.3037	
	12	19	9°54'	0.3439		16	28	12°13'	0.4232		16	30	12°44'	0.4408	
	18	37	13°54'	0.4805		22	50	16°13'	0.5585		23	53	16°44'	0.5758	
	24	61	17°54'	0.6177		28	78	20°13'	0.6911		29	82	20°44'	0.7081	
	30	91	21°51'	0.7460		31	112	24°13'	0.8204		35	117	24°44'	0.8368	
	36	127	25°51'	0.8736		40	152	28°13'	0.9456		40	157	28°14'	0.9615	
0.0352	1	1	1°55'			3	3	4°15'	0.1482		4	4	4°46'	0.1662	
	6	7	5°57'	0.2073		9	12	8°17'	0.2881		10	11	8°48'	0.3060	
	12	19	9°59'	0.3467		16	28	12°19'	0.4266		16	30	12°50'	0.4442	
	18	37	14°01'	0.4844		22	50	16°21'	0.5630		22	52	16°52'	0.5803	
	24	61	18°03'	0.6197		28	78	20°23'	0.6966		28	80	20°54'	0.7135	
	30	91	22°05'	0.7519		34	112	24°25'	0.8267		35	115	24°56'	0.8431	
	36	127	26°07'	0.8804		40	152	28°27'	0.9528		40	155	28°58'	0.9686	
0.0355	1	1	1°56'			3	3	4°17'	0.1494		4	4	4°49'	0.1679	
	6	7	6°00'	0.2091		9	12	8°21'	0.2904		10	14	8°53'	0.3088	
	12	19	10°04'	0.3496		16	28	12°25'	0.4300		16	30	12°57'	0.4482	
	18	37	14°08'	0.4884		22	50	16°29'	0.5675		22	52	17°01'	0.5853	
	24	61	18°12'	0.6247		28	78	20°33'	0.7021		28	80	21°05'	0.7195	
	30	91	22°16'	0.7578		33	111	24°37'	0.8331		35	115	25°09'	0.8500	
	36	127	26°20'	0.8872		40	151	28°41'	0.9599		40	155	29°13'	0.9762	
0.0358	1	1	1°57'			3	3	4°19'	0.1505		4	4	4°51'	0.1691	
	6	7	6°03'	0.2108		9	12	8°25'	0.2927		10	14	8°57'	0.3111	
	12	19	10°09'	0.3525		16	28	12°31'	0.4334		16	30	13°03'	0.4516	
	18	37	14°15'	0.4923		22	50	16°37'	0.5719		22	52	17°09'	0.5897	
	24	61	18°21'	0.6296		28	78	20°43'	0.7075		28	80	21°15'	0.7249	
	30	91	22°27'	0.7638		33	111	24°49'	0.8391		31	114	25°21'	0.8563	
	36	127	26°33'	0.8940		40	151	28°55'	0.9671		40	154	29°27'	0.9833	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0361	1	1	1°58'	0.2125		3	3	4°21'	0.1517		4	4	4°53'	0.1703		4	4	4°53'	0.1703	
	6	7	6°06'	0.3553		9	12	8°29'	0.2950		10	14	9°01'	0.3134		14	14	9°01'	0.3134	
	12	19	10°14'	0.4953		16	28	12°37'	0.4369		16	30	13°09'	0.4550		30	30	13°09'	0.4550	
	18	37	14°22'	0.6345		22	50	16°45'	0.5764		22	52	17°17'	0.5942		52	52	17°17'	0.5942	
	24	61	18°30'	0.7637		28	78	20°53'	0.7129		28	80	21°25'	0.7303		80	80	21°25'	0.7303	
	30	91	22°38'	0.9007		33	111	25°01'	0.8458		34	114	25°33'	0.8626		114	114	25°33'	0.8626	
	36	127	26°46'		40	151	29°03'		0.9742		40	154	29°41'		0.9904		154	29°41'		0.9904
0.0364	1	1	1°59'	0.2143		3	3	4°23'	0.1529		4	4	4°56'	0.1720		4	4	4°56'	0.1720	
	6	7	6°09'	0.3582		9	12	8°33'	0.2973		10	14	9°06'	0.3163		14	14	9°06'	0.3163	
	12	19	10°19'	0.5002		16	28	12°43'	0.4403		16	30	13°16'	0.4590		30	30	13°16'	0.4590	
	18	37	14°29'	0.6396		22	50	16°53'	0.5808		22	52	17°26'	0.5992		52	52	17°26'	0.5992	
	24	61	18°39'	0.7756		28	78	21°03'	0.7184		28	80	21°36'	0.7363		80	80	21°36'	0.7363	
	30	91	22°49'	0.9075		33	111	25°13'	0.8521		34	114	25°46'	0.8694		114	114	25°46'	0.8694	
	36	127	26°59'		40	151	29°23'		0.9813		40	154	29°56'		0.9980		154	29°56'		0.9980
0.0366	1	1	2°00'	0.2160		3	3	4°26'	0.1546		4	4	4°58'	0.1732		4	4	4°58'	0.1732	
	6	7	6°12'	0.3610		9	12	8°38'	0.3002		10	14	9°10'	0.3186		14	14	9°10'	0.3186	
	12	19	10°24'	0.5041		16	28	12°50'	0.4442		16	30	13°22'	0.4624		30	30	13°22'	0.4624	
	18	37	14°36'	0.6445		22	50	17°02'	0.5859		22	52	17°34'	0.6036		52	52	17°34'	0.6036	
	24	61	18°48'	0.7815		28	78	21°14'	0.7243		28	80	21°46'	0.7417		80	80	21°46'	0.7417	
	30	91	23°00'	0.9142		33	111	25°26'	0.8589		34	114	25°58'	0.8737		114	114	25°58'	0.8737	
	36	127	27°12'		40	151	29°33'		0.9889		40	154	30°10'		1.005		154	30°10'		1.005
0.0369	1	1	2°01'	0.2177		3	3	4°28'	0.1558		4	4	5°01'	0.1749		4	4	5°01'	0.1749	
	6	7	6°15'	0.3639		9	12	8°42'	0.3025		10	14	9°15'	0.3215		14	14	9°15'	0.3215	
	12	19	10°29'	0.5081		16	28	12°56'	0.4476		16	30	13°29'	0.4663		30	30	13°29'	0.4663	
	18	37	14°43'	0.6495		22	50	17°10'	0.5903		22	52	17°43'	0.6086		52	52	17°43'	0.6086	
	24	61	18°57'	0.7874		28	78	21°24'	0.7298		28	80	21°57'	0.7476		80	80	21°57'	0.7476	
	30	91	23°11'	0.9209		33	111	25°39'	0.8652		34	114	26°11'	0.8825		114	114	26°11'	0.8825	
	36	127	27°25'		40	151	29°52'		0.9960		40	154	30°25'		1.0126		154	30°25'		1.0126

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	N	ΣN	γ_4	K_1	K_2	
0.0372	1	1	2°02'	0.2195		3	3	4°30'	0.1569		4	4	5°03'	0.1761		4	4	5°03'	0.1761		
	6	7	6°18'	0.3668		9	12	8°46'	0.3048		10	14	8°19'	0.3238		14	14	8°19'	0.3238		
	12	19	10°34'	0.5120		16	28	13°02'	0.4510		16	30	13°35'	0.4697		30	30	13°35'	0.4697		
	18	37	14°50'	0.6544		22	50	17°18'	0.5948		22	52	17°51'	0.6131		52	52	17°51'	0.6131		
	24	61	19°06'	0.7932		28	78	21°34'	0.7352		28	80	22°07'	0.7530		80	80	22°07'	0.7530		
	30	91	23°22'	0.9276		33	111	25°50'	0.8715		34	114	26°23'	0.8888		114	114	26°23'	0.8888		
36	127	27°38'	0.9477		40	151	30°06'	1.0030		40	154	30°39'	1.0196		154	154	30°39'	1.0196			
0.0375	1	1	2°03'	0.2212		3	3	4°32'	0.1581		4	4	5°05'	0.1772		4	4	5°05'	0.1772		
	6	7	6°21'	0.3696		9	12	8°50'	0.3071		10	14	9°23'	0.3261		14	14	9°23'	0.3261		
	12	19	10°39'	0.5160		16	28	13°08'	0.4544		16	30	13°41'	0.4731		30	30	13°41'	0.4731		
	18	37	14°57'	0.6594		22	50	17°26'	0.5992		22	52	17°59'	0.6175		52	52	17°59'	0.6175		
	24	61	19°15'	0.7991		28	78	21°44'	0.7406		28	80	22°17'	0.7584		80	80	22°17'	0.7584		
	30	91	23°33'	0.9343		33	111	26°02'	0.8778		34	114	26°35'	0.8950		114	114	26°35'	0.8950		
36	127	27°51'	0.9477		39	150	30°20'	1.0101		40	154	30°53'	1.0266		154	154	30°53'	1.0266			
0.0378	1	1	2°04'	0.2229		3	3	4°34'	0.1592		4	4	5°08'	0.1789		4	4	5°08'	0.1789		
	6	7	6°24'	0.3725		9	12	8°54'	0.3094		10	14	9°28'	0.3289		14	14	9°28'	0.3289		
	12	19	10°44'	0.5199		16	28	13°14'	0.4578		16	30	13°48'	0.4771		30	30	13°48'	0.4771		
	18	37	15°04'	0.6643		22	50	17°34'	0.6036		22	52	18°08'	0.6225		52	52	18°08'	0.6225		
	24	61	19°24'	0.8050		28	78	21°54'	0.7460		28	80	22°28'	0.7643		80	80	22°28'	0.7643		
	30	91	23°44'	0.9410		33	111	26°14'	0.8811		34	114	26°48'	0.9018		114	114	26°48'	0.9018		
36	127	28°04'	0.9477		39	150	30°34'	1.0171		40	154	31°08'	1.0341		154	154	31°08'	1.0341			
0.0381	1	1	2°05'	0.2247		3	3	4°36'	0.1604		4	4	5°10'	0.1801		4	4	5°10'	0.1801		
	6	7	6°27'	0.3753		9	12	8°58'	0.3117		10	14	9°32'	0.3312		14	14	9°32'	0.3312		
	12	19	10°49'	0.5238		16	28	13°20'	0.4612		16	30	13°54'	0.4805		30	30	13°54'	0.4805		
	18	37	15°11'	0.6693		22	50	17°42'	0.6081		22	52	18°16'	0.6267		52	52	18°16'	0.6267		
	24	61	19°33'	0.8108		28	78	22°04'	0.7514		28	80	22°38'	0.7697		80	80	22°38'	0.7697		
	30	91	23°55'	0.9477		33	111	26°26'	0.8903		34	114	27°00'	0.9080		114	114	27°00'	0.9080		
36	127	28°17'	0.9477		39	150	30°48'	1.0241		40	154	31°22'	1.0410		154	154	31°22'	1.0410			

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0384	1	1	2°06'	0.2264		3	3	4°38'	0.1616		4	4	5°13'	0.1818	
	6	7	6°30'	0.2264		9	12	9°02'	0.3140		10	14	9°37'	0.3341	
	12	19	10°54'	0.3782		16	28	13°26'	0.4646		16	30	14°01'	0.4844	
	18	37	15°18'	0.5277		22	50	17°50'	0.6125		22	52	18°25'	0.6319	
	24	61	19°42'	0.6742		28	78	22°14'	0.7568		28	80	22°49'	0.7756	
	30	91	24°06'	0.8167		33	111	26°38'	0.8966		34	114	27°13'	0.9147	
	36	127	28°30'	0.9543		39	150	31°02'	1.0311		40	154	31°37'	1.0485	
0.0387	1	1	2°07'	0.2281		3	3	4°41'	0.1633		4	4	5°15'	0.1830	
	6	7	6°33'	0.2281		6	12	9°07'	0.3169		10	14	9°41'	0.3364	
	12	19	10°59'	0.3810		19	28	13°33'	0.4686		16	30	14°07'	0.4878	
	18	37	15°25'	0.5317		22	50	17°59'	0.6175		22	52	18°33'	0.6363	
	24	61	19°51'	0.6797		28	78	22°25'	0.7627		28	80	22°59'	0.7809	
	30	91	24°17'	0.8225		33	111	26°51'	0.9033		34	114	27°25'	0.9209	
	36	127	28°43'	0.9610		39	150	31°17'	1.0385		40	154	31°51'	1.0554	
0.0390	1	1	2°08'	0.2299		3	3	4°43'	0.1645		4	4	5°18'	0.1847	
	6	7	6°36'	0.2299		9	12	9°11'	0.3192		10	14	9°46'	0.3393	
	12	19	11°04'	0.3839		16	28	13°39'	0.4720		16	30	14°14'	0.4917	
	18	37	15°32'	0.5356		22	50	18°07'	0.6219		22	52	18°42'	0.6412	
	24	61	20°00'	0.6840		28	78	22°35'	0.7681		28	80	23°10'	0.7868	
	30	91	24°28'	0.8283		33	111	27°03'	0.9095		34	114	27°38'	0.9276	
	36	127	28°56'	0.9676		39	150	31°31'	1.0455		40	154	32°06'	1.0628	
0.0393	1	1	2°09'	0.2316		3	3	4°45'	0.1656		4	4	5°20'	0.1859	
	6	7	6°39'	0.2316		9	12	9°15'	0.3215		10	14	9°50'	0.3416	
	12	19	11°09'	0.3868		16	28	13°45'	0.4754		16	30	14°20'	0.4951	
	18	37	15°39'	0.5395		22	50	18°15'	0.6263		22	52	18°50'	0.6456	
	24	61	20°09'	0.6890		28	78	22°45'	0.7734		28	80	23°20'	0.7922	
	30	91	24°39'	0.8341		33	111	27°15'	0.9157		34	114	27°50'	0.9338	
	36	127	29°09'	0.9742		39	150	31°45'	1.0524		40	154	32°20'	1.0697	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_2	K_1	K_2
0.0396	1	1	2°09'			3	3	4°46'	0.1662		4	4	5°21'	0.1865	
	6	7	6°41'	0.2328		9	12	9°18'	0.3232		10	14	9°53'	0.3433	
	12	19	11°13'	0.3890		16	28	13°59'	0.4782		16	30	14°25'	0.4979	
	18	37	15°45'	0.5429		22	50	18°22'	0.6302		22	52	18°57'	0.6495	
	24	61	20°17'	0.6935		28	78	22°54'	0.7782		28	80	23°29'	0.7970	
	30	91	24°49'	0.8394		33	111	27°26'	0.9214		34	114	28°01'	0.9395	
	36	127	29°21'	0.9803		39	150	31°58'	1.0589		40	154	32°33'	1.0761	
0.0398	1	1	2°10'			3	3	4°48'	0.1674		4	4	5°21'	0.1882	
	6	7	6°44'	0.2345		9	12	9°22'	0.3255		10	14	9°53'	0.3462	
	12	19	11°18'	0.3919		16	28	13°56'	0.4816		16	30	14°32'	0.5019	
	18	37	15°52'	0.5468		22	50	18°30'	0.6346		22	52	19°06'	0.6544	
	24	61	20°26'	0.6982		28	78	23°04'	0.7836		28	80	23°40'	0.8028	
	30	91	25°00'	0.8452		33	111	27°38'	0.9276		34	114	28°14'	0.9461	
	36	127	29°34'	0.9869		39	150	32°12'	1.0658		40	154	32°48'	1.0834	
0.0401	1	1	2°11'			3	3	4°50'	0.1695		4	4	5°26'	0.1894	
	6	7	6°47'	0.2362		9	12	9°26'	0.3278		10	14	10°02'	0.3484	
	12	19	11°23'	0.3947		16	28	14°02'	0.4350		16	30	14°38'	0.5053	
	18	37	15°59'	0.5507		22	50	18°38'	0.6399		22	52	19°14'	0.6588	
	24	61	20°35'	0.7031		28	78	23°14'	0.7370		28	80	23°50'	0.8082	
	30	91	25°11'	0.8510		33	111	27°50'	0.9333		34	114	28°26'	0.9523	
	36	127	29°47'	0.9934		39	150	32°26'	1.0726		40	154	33°02'	1.0903	
0.0404	1	1	2°12'			3	3	4°53'	0.1703		4	4	5°29'	0.1911	
	6	7	6°50'	0.2380		9	12	9°31'	0.3307		10	14	10°07'	0.3513	
	12	19	11°28'	0.3976		16	28	14°09'	0.4889		16	30	14°45'	0.5092	
	18	37	16°06'	0.5546		22	50	18°47'	0.6441		22	52	19°23'	0.6638	
	24	61	20°44'	0.7080		28	78	23°25'	0.7948		28	80	24°01'	0.8140	
	30	91	25°22'	0.8568		33	111	28°03'	0.9405		34	114	28°39'	0.9589	
	36	127	30°00'	1.0000		39	150	32°41'	1.0800		40	154	33°17'	1.0976	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_0}$	N	ΣN	P_1	K_1	K_2	N	ΣN	P_1	K_1	K_2	N	ΣN	P_1	K_1	K_2
0.0407	1	1	2°13'	0.2397		3	3	4°55'	0.1714		4	4	5°31'	0.1923	
	6	7	6°53'	0.2397		9	12	9°35'	0.3330		10	14	10°11'	0.3536	
	12	19	11°33'	0.4004		16	28	14°15'	0.4923		16	30	14°51'	0.5126	
	18	37	16°13'	0.5585		22	50	18°55'	0.6484		22	52	19°31'	0.6682	
	24	61	20°53'	0.7129		28	78	23°35'	0.8000		28	80	24°11'	0.8193	
	30	91	25°33'	0.8626		33	111	28°15'	0.9466		34	114	28°51'	0.9650	
	36	127	30°13'	1.0085		39	150	32°55'	1.0864		40	154	33°31'	1.1044	
0.0410	1	1	2°14'	0.2414		3	3	4°57'	0.1726		4	4	5°33'	0.1934	
	6	7	6°56'	0.2414		9	12	9°39'	0.3353		10	14	10°15'	0.3559	
	12	19	11°38'	0.4033		16	28	14°21'	0.4957		16	30	14°57'	0.5160	
	18	37	16°20'	0.5625		22	50	19°03'	0.6528		22	52	19°39'	0.6725	
	24	61	21°02'	0.7178		28	78	23°45'	0.8055		28	80	24°21'	0.8246	
	30	91	25°44'	0.8681		33	111	28°27'	0.9528		34	114	29°03'	0.9711	
	36	127	30°26'	1.0131		39	150	33°09'	1.0937		40	154	33°45'	1.1111	
0.0413	1	1	2°15'	0.2432		3	3	4°59'	0.1737		4	4	5°36'	0.1952	
	6	7	6°59'	0.2432		9	12	9°43'	0.3376		10	14	10°20'	0.3588	
	12	19	11°43'	0.4061		16	28	14°27'	0.4991		16	30	15°04'	0.5199	
	18	37	16°27'	0.5664		22	50	19°11'	0.6572		22	52	19°48'	0.6775	
	24	61	21°11'	0.7227		28	78	23°55'	0.8108		28	80	24°32'	0.8304	
	30	91	25°55'	0.8741		33	111	28°39'	0.9589		34	114	29°16'	0.9778	
	36	127	30°39'	1.0196		39	150	33°23'	1.1005		40	154	34°00'	1.1184	
0.0416	1	1	2°16'	0.2449		3	3	5°01'	0.1749		4	4	5°38'	0.1963	
	6	7	7°02'	0.2449		9	12	9°47'	0.3398		10	14	10°24'	0.3610	
	12	19	11°48'	0.4090		16	28	14°33'	0.5025		16	30	15°10'	0.5233	
	18	37	16°34'	0.5703		22	50	19°19'	0.6616		22	52	19°56'	0.6819	
	24	61	21°20'	0.7276		28	78	21°05'	0.8161		28	80	24°42'	0.8357	
	30	91	26°06'	0.8799		33	111	28°51'	0.9650		34	114	29°28'	0.9838	
	36	127	30°52'	1.0261		39	150	33°37'	1.1073		40	154	34°14'	1.1251	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0419	1	1	2°17'			3	3	5°03'	0.1761		4	4	5°41'	0.1981	
	6	7	7°05'	0.2466		9	12	9°51'	0.3434		10	14	10°29'	0.3639	
	12	19	11°53'	0.4118		16	28	14°39'	0.5058		16	30	15°17'	0.5272	
	18	37	16°41'	0.5742		22	50	19°27'	0.6660		22	52	20°05'	0.6868	
	24	61	21°29'	0.7325		28	78	24°15'	0.8214		28	80	24°53'	0.8415	
	30	91	26°17'	0.8856		33	111	29°03'	0.9711		34	114	29°41'	0.9904	
	36	127	31°05'	1.0326		39	150	33°51'	1.1140		40	154	34°29'	1.1323	
0.0422	1	1	2°18'			3	3	5°05'	0.1772		4	4	5°43'	0.1992	
	6	7	7°08'	0.2484		9	12	9°55'	0.3414		10	14	10°33'	0.3662	
	12	19	11°58'	0.4147		16	28	14°45'	0.5092		16	30	15°23'	0.5306	
	18	37	16°48'	0.5781		22	50	19°35'	0.6704		22	52	20°13'	0.6911	
	24	61	21°38'	0.7373		28	78	24°25'	0.8267		28	80	24°03'	0.8468	
	30	91	26°28'	0.8911		33	111	29°15'	0.9772		34	114	29°53'	0.9965	
	36	127	31°18'	1.0390		39	150	34°05'	1.1208		40	154	34°43'	1.1390	
0.0425	1	1	2°19'			3	3	5°08'	0.1789		4	4	5°46'	0.2010	
	6	7	7°11'	0.2501		9	12	10°03'	0.3473		10	14	10°38'	0.3690	
	12	19	12°03'	0.4175		16	28	11°52'	0.5131		16	30	15°30'	0.5345	
	18	37	16°55'	0.5820		22	50	19°41'	0.6753		22	52	20°23'	0.6961	
	24	61	21°47'	0.7422		28	78	24°36'	0.8326		28	80	25°14'	0.8526	
	30	91	26°39'	0.8971		33	111	29°28'	0.9838		34	114	30°06'	1.0030	
	36	127	31°31'	1.0455		39	150	34°20'	1.1280		40	154	34°58'	1.1462	
0.0427	1	1	2°20'			3	3	5°10'	0.1801		4	4	5°48'	0.2021	
	6	7	7°14'	0.2518		9	12	10°04'	0.3496		10	14	10°42'	0.3713	
	12	19	12°06'	0.4204		16	28	14°58'	0.5165		16	30	15°36'	0.5378	
	18	37	17°02'	0.5859		22	50	19°52'	0.6717		22	52	20°30'	0.7004	
	24	61	21°56'	0.7471		28	78	24°46'	0.8378		28	80	25°24'	0.8579	
	30	91	26°50'	0.9028		33	111	29°40'	0.9899		34	114	30°18'	1.0091	
	36	127	31°44'	1.0519		39	150	34°34'	1.1347		40	154	35°12'	1.1529	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	
0.0430	1	1	2°20'	0.2530		3	3	5°11'	0.1807		4	4	5°49'	0.2027		4	4	5°49'	0.2027		
	6	7	7°16'	0.4227		9	12	10°07'	0.3513		10	14	10°45'	0.3730		10	14	10°45'	0.3730		
	12	19	12°12'	0.5892		16	28	15°03'	0.5193		16	30	15°41'	0.5406		16	30	15°41'	0.5406		
	18	37	17°08'	0.7514		22	50	19°59'	0.6835		22	52	20°37'	0.7042		22	52	20°37'	0.7042		
	24	61	22°04'	0.9030		28	78	24°55'	0.8426		28	80	25°33'	0.8626		28	80	25°33'	0.8626		
	30	91	27°00'	1.0579		33	111	29°51'	0.9955		34	114	30°29'	1.0146		34	114	30°29'	1.0146		
	36	127	31°56'	1.0771		39	150	34°47'	1.1410		40	154	35°25'	1.1590		40	154	35°25'	1.1590		
0.0433	1	1	2°21'	0.2547		3	3	5°13'	0.1818		4	4	5°52'	0.2044		4	4	5°52'	0.2044		
	6	7	7°19'	0.4255		9	12	10°11'	0.3536		10	14	10°50'	0.3759		10	14	10°50'	0.3759		
	12	19	12°17'	0.5931		16	28	15°09'	0.5227		16	30	15°48'	0.5446		16	30	15°48'	0.5446		
	18	37	17°15'	0.7562		22	50	20°07'	0.6879		22	52	20°46'	0.7091		22	52	20°46'	0.7091		
	24	61	22°13'	0.9137		28	78	25°05'	0.8479		28	80	25°44'	0.8684		28	80	25°44'	0.8684		
	30	91	27°11'	1.0643		33	111	30°03'	1.0015		34	114	30°42'	1.0211		34	114	30°42'	1.0211		
	36	127	32°09'	1.0771		39	150	35°01'	1.1476		40	154	35°40'	1.1661		40	154	35°40'	1.1661		
0.0436	1	1	2°22'	0.2564		3	3	5°15'	0.1830		4	4	5°54'	0.2056		4	4	5°54'	0.2056		
	6	7	7°22'	0.4283		9	12	10°15'	0.3559		10	14	10°54'	0.3782		10	14	10°54'	0.3782		
	12	19	12°22'	0.5970		16	28	15°15'	0.5261		16	30	15°54'	0.5479		16	30	15°54'	0.5479		
	18	37	17°22'	0.7611		22	50	20°15'	0.6922		22	52	20°54'	0.7135		22	52	20°54'	0.7135		
	24	61	22°22'	0.9194		28	78	25°15'	0.8531		28	80	25°54'	0.8736		28	80	25°54'	0.8736		
	30	91	27°22'	1.0707		33	111	30°15'	1.0075		34	114	30°54'	1.0271		34	114	30°54'	1.0271		
	36	127	32°22'	1.0771		39	150	35°15'	1.1543		40	154	35°54'	1.1727		40	154	35°54'	1.1727		
0.0439	1	1	2°23'	0.2582		3	3	5°17'	0.1842		4	4	5°57'	0.2073		4	4	5°57'	0.2073		
	6	7	7°25'	0.4312		9	12	10°19'	0.3582		10	14	10°59'	0.3810		10	14	10°59'	0.3810		
	12	19	12°27'	0.6009		15	27	15°21'	0.5294		16	30	16°01'	0.5518		16	30	16°01'	0.5518		
	18	37	17°29'	0.7659		22	49	20°23'	0.6966		22	52	21°03'	0.7184		22	52	21°03'	0.7184		
	24	61	22°31'	0.9250		27	76	25°25'	0.8524		28	80	26°05'	0.8794		28	80	26°05'	0.8794		
	30	91	27°33'	1.0771		33	109	30°27'	1.0136		34	114	31°07'	1.0336		34	114	31°07'	1.0336		
	35	126	32°35'	1.0771		39	148	35°29'	1.1609		40	154	36°09'	1.1798		40	154	36°09'	1.1798		

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_2	N	ΣN	γ_i	K_i	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0442	1	1	2°24'			3	3	5°20'	0.1859		4	4	5°59'	0.2085	
	6	7	7°28'	0.2599		9	12	10°24'	0.3610		10	14	11°03'	0.3833	
	12	19	12°32'	0.4340		15	27	15°28'	0.5334		16	30	16°07'	0.5552	
	18	37	17°36'	0.6047		21	48	20°32'	0.7015		22	52	21°11'	0.7227	
	24	61	22°40'	0.7707		27	75	25°36'	0.8642		28	80	26°15'	0.8846	
	30	91	27°44'	0.9307		33	108	30°40'	1.0201		34	114	11°19'	1.0395	
	35	126	32°48'	1.0834		39	147	35°44'	1.1680		39	153	36°23'	1.1864	
0.0445	1	1	2°25'			3	1	5°22'	0.1871		4	4	6°01'	0.2096	
	6	7	7°31'	0.2616		9	12	10°28'	0.3633		10	14	11°07'	0.3856	
	12	19	12°37'	0.4369		15	27	15°34'	0.5367		16	30	16°13'	0.5585	
	18	37	17°43'	0.6086		21	48	20°40'	0.7059		22	52	21°19'	0.7270	
	24	61	22°49'	0.7756		27	75	25°46'	0.8694		28	80	26°25'	0.8898	
	30	91	27°55'	0.9364		33	108	30°52'	1.0261		31	114	31°31'	1.0455	
	35	126	33°01'	1.0898		39	147	35°58'	1.1746		39	153	36°37'	1.1929	
0.0448	1	1	2°26'			3	3	5°24'	0.1882		4	4	6°04'	0.2114	
	6	7	7°34'	0.2634		9	12	10°32'	0.3656		10	14	11°12'	0.3885	
	12	19	12°42'	0.4397		15	27	15°40'	0.5401		16	30	16°20'	0.5625	
	18	37	17°50'	0.6125		21	48	20°48'	0.7102		22	52	21°28'	0.7319	
	24	61	22°58'	0.7804		27	75	25°56'	0.8747		28	80	26°36'	0.8955	
	30	91	28°06'	0.9420		33	108	31°04'	1.0321		31	114	31°44'	1.0519	
	35	126	33°14'	1.0961		39	147	36°12'	1.1812		39	153	36°52'	1.1999	
0.0451	1	1	2°27'			3	3	5°25'	0.1894		4	4	6°06'	0.2125	
	6	7	7°37'	0.2651		9	12	10°36'	0.3679		10	14	11°16'	0.3908	
	12	19	12°47'	0.4425		15	27	15°46'	0.5131		16	30	16°26'	0.5658	
	18	37	17°57'	0.6164		21	48	20°56'	0.7146		22	52	21°36'	0.7363	
	24	61	23°07'	0.7852		27	75	26°06'	0.8799		28	80	26°46'	0.9007	
	30	91	28°17'	0.9477		33	108	31°16'	1.0380		31	114	31°56'	1.0579	
	35	126	33°27'	1.1024		39	147	36°26'	1.1878		39	153	37°06'	1.2064	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0454	1	1	2°28'			3	3	5°28'	0.1905		4	4	6°09'	0.2143	
	6	7	7°40'	0.2668		9	12	10°40'	0.3702		10	14	11°21'	0.3936	
	12	19	12°52'	0.4454		15	27	15°52'	0.5468		16	30	16°33'	0.5697	
	18	37	16°04'	0.6202		21	48	21°04'	0.7189		22	52	21°45'	0.7411	
	24	61	23°16'	0.7900		27	75	26°16'	0.8851		28	80	26°57'	0.9064	
	30	91	28°28'	0.9533		33	108	31°28'	1.0440		34	114	32°09'	1.0643	
	35	126	33°40'	1.1087		39	147	36°40'	1.1943		39	153	37°21'	1.2134	
0.0457	1	1	2°29'			3	3	5°29'	0.1911		4	4	6°11'	0.2154	
	6	7	7°43'	0.2685		9	12	10°43'	0.3719		10	14	11°35'	0.3959	
	12	19	12°57'	0.4482		15	27	15°57'	0.5496		16	30	16°29'	0.5731	
	18	37	18°11'	0.6241		21	48	21°11'	0.7227		22	52	21°53'	0.7454	
	24	61	23°25'	0.7948		27	75	26°25'	0.8898		28	80	27°07'	0.9116	
	30	91	28°39'	0.9589		33	108	31°39'	1.0495		34	114	32°21'	1.0702	
	35	126	33°53'	1.1150		39	147	36°53'	1.2004		39	153	37°35'	1.2198	
0.0459	1	1	2°30'			3	3	5°32'	0.1929		4	4	6°14'	0.2172	
	6	7	7°46'	0.2703		9	12	10°48'	0.3748		10	14	11°30'	0.3987	
	12	19	13°02'	0.4510		15	27	16°04'	0.5535		16	30	16°46'	0.5770	
	18	37	16°18'	0.6280		21	48	21°20'	0.7276		22	52	22°02'	0.7503	
	24	61	23°34'	0.7996		27	75	26°36'	0.8955		28	80	27°18'	0.9173	
	30	91	28°50'	0.9645		33	108	31°52'	1.0559		34	114	32°34'	1.0766	
	35	126	34°06'	1.1213		39	147	37°08'	1.2073		39	153	37°50'	1.2267	
0.0462	1	1	2°31'			3	3	5°35'	0.1946		4	4	6°16'	0.2183	
	6	7	7°49'	0.2720		9	12	10°53'	0.3776		10	14	11°34'	0.4010	
	12	19	13°07'	0.4559		15	27	16°11'	0.5574		16	30	16°52'	0.5803	
	18	37	16°25'	0.6319		21	48	21°29'	0.7325		22	52	22°10'	0.7546	
	24	61	23°43'	0.8044		27	75	26°47'	0.9012		28	80	27°28'	0.9225	
	30	91	29°01'	0.9701		33	108	32°05'	1.0623		34	114	32°46'	1.0824	
	35	126	34°19'	1.1275		39	147	37°23'	1.2143		39	153	38°04'	1.2332	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_3	K_4	N	ΣN	γ_3	K_5	K_6	N	ΣN	γ_4	K_7	K_8	
0.0465	1	1	2°32'	0.2737		3	3	5°37'	0.1957		4	4	6°18'	0.2195		4	4	6°18'	0.2195		
	6	7	7°52'	0.4567		9	12	10°57'	0.3799		10	14	11°38'	0.4033		10	14	11°38'	0.4033		
	12	19	13°12'	0.4567		15	27	16°17'	0.5608		16	30	16°58'	0.5936		16	30	16°58'	0.5936		
	18	37	18°32'	0.6357		21	48	21°37'	0.7368		22	52	22°18'	0.7589		22	52	22°18'	0.7589		
	24	61	23°52'	0.8092		27	75	26°57'	0.9064		28	80	27°38'	0.9276		28	80	27°38'	0.9276		
	30	91	29°12'	0.9757		33	108	32°17'	1.0682		34	114	32°58'	1.0283		34	114	32°58'	1.0283		
	35	126	34°32'	1.1338		39	147	37°37'	1.2208		39	153	38°18'	1.2160		39	153	38°18'	1.2160		
0.0468	1	1	2°33'	0.2755		3	3	5°39'	0.1969		4	4	6°21'	0.2212		4	4	6°21'	0.2212		
	6	7	7°55'	0.4595		9	12	11°01'	0.3822		10	14	11°43'	0.4061		10	14	11°43'	0.4061		
	12	19	13°17'	0.4595		15	27	16°23'	0.5641		16	30	17°05'	0.5875		16	30	17°05'	0.5875		
	18	37	18°39'	0.6396		21	48	21°45'	0.7411		22	52	22°27'	0.7638		22	52	22°27'	0.7638		
	24	61	24°01'	0.8140		27	75	27°07'	0.9116		28	80	27°49'	0.9333		28	80	27°49'	0.9333		
	30	91	29°23'	0.9813		33	108	32°29'	1.0741		34	114	32°11'	1.0946		34	114	32°11'	1.0946		
	35	126	34°45'	1.1400		39	147	37°51'	1.2272		39	153	38°33'	1.2464		39	153	38°33'	1.2464		
0.0471	1	1	2°34'	0.2772		3	3	5°41'	0.1981		4	4	6°23'	0.2224		4	4	6°23'	0.2224		
	6	7	7°58'	0.4624		9	12	11°05'	0.3845		10	14	11°47'	0.4084		10	14	11°47'	0.4084		
	12	19	13°22'	0.4624		15	27	16°29'	0.5675		16	30	17°11'	0.5909		16	30	17°11'	0.5909		
	18	37	18°46'	0.6434		21	48	21°53'	0.7454		22	52	22°35'	0.7681		22	52	22°35'	0.7681		
	24	61	24°10'	0.8188		27	75	27°17'	0.9168		28	80	27°59'	0.9384		28	80	27°59'	0.9384		
	30	91	29°31'	0.9869		33	108	32°41'	1.0800		34	114	33°23'	1.1005		34	114	33°23'	1.1005		
	35	126	34°58'	1.1462		39	147	38°05'	1.2336		39	153	38°47'	1.2528		39	153	38°47'	1.2528		
0.0474	1	1	2°35'	0.2789		3	3	5°43'	0.1992		4	4	6°26'	0.2241		4	4	6°26'	0.2241		
	6	7	8°01'	0.4652		9	12	11°09'	0.3868		10	14	11°52'	0.4113		10	14	11°52'	0.4113		
	12	19	13°27'	0.4652		15	27	16°35'	0.5708		16	30	17°18'	0.5948		16	30	17°18'	0.5948		
	18	37	18°53'	0.6173		21	48	22°01'	0.7498		22	52	22°44'	0.7729		22	52	22°44'	0.7729		
	24	61	24°19'	0.8236		27	75	27°27'	0.9219		28	80	28°10'	0.9441		28	80	28°10'	0.9441		
	30	91	29°45'	0.9924		33	108	32°53'	1.0859		34	114	33°36'	1.1068		34	114	33°36'	1.1068		
	35	126	35°11'	1.1524		38	146	38°19'	1.2400		39	153	39°02'	1.2595		39	153	39°02'	1.2595		

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2
0.0477	1	1	2°36'			3	3	5°45'	0.2001		4	4	6°28'	0.2253	
	6	7	8°04'	0.2897		9	12	11°13'	0.3890		19	14	11°56'	0.4135	
	12	19	13°32'	0.4680		15	27	16°41'	0.5742		16	30	17°24'	0.5981	
	18	37	19°00'	0.6511		21	48	22°08'	0.7541		22	52	22°52'	0.7772	
	24	61	24°28'	0.8283		27	75	27°37'	0.9271		28	80	28°20'	0.9492	
	30	91	29°56'	0.9930		33	108	33°05'	1.0917		33	113	34°48'	1.1126	
35	126	35°24'	1.1586		38	146	38°33'	1.2464		39	152	39°16'	1.2659		
0.0480	1	1	2°37'			3	3	5°48'	0.2021		4	4	6°30'	0.2261	
	6	7	8°07'	0.2824		9	12	11°18'	0.3919		10	14	12°00'	0.4158	
	12	19	13°37'	0.4709		15	27	16°48'	0.5781		16	30	17°30'	0.6011	
	18	37	19°07'	0.6550		21	48	22°18'	0.7589		22	52	23°00'	0.7815	
	24	61	24°37'	0.8331		27	75	27°48'	0.9328		28	80	28°30'	0.9543	
	30	91	30°07'	1.0035		33	108	33°18'	1.0980		33	113	34°00'	1.1181	
35	126	35°37'	1.1647		38	146	38°48'	1.2532		39	152	39°30'	1.2723		
0.0483	1	1	2°38'			3	3	5°50'	0.2033		4	4	6°33'	0.2281	
	6	7	8°10'	0.2841		9	12	11°22'	0.3942		10	14	12°05'	0.4187	
	12	19	13°42'	0.4737		15	27	16°54'	0.5814		16	30	17°37'	0.6053	
	18	37	19°14'	0.6588		21	48	22°26'	0.7632		22	52	23°09'	0.7863	
	24	61	24°16'	0.8378		27	75	27°58'	0.9379		28	80	28°41'	0.9591	
	30	91	30°18'	1.0091		33	108	33°30'	1.1039		33	113	34°13'	1.1246	
35	126	35°50'	1.1709		38	146	39°02'	1.2595		39	152	39°45'	1.2781		
0.0486	1	1	2°39'			3	3	5°52'	0.2044		4	4	6°35'	0.2293	
	6	7	8°13'	0.2858		9	12	11°26'	0.3965		10	14	12°09'	0.4203	
	12	19	13°47'	0.4765		15	27	17°00'	0.5847		16	30	17°43'	0.6086	
	18	37	19°21'	0.6627		21	48	22°34'	0.7675		22	52	23°17'	0.7906	
	24	61	24°55'	0.8426		27	75	28°08'	0.9431		28	80	28°51'	0.9650	
	30	91	30°29'	1.0146		33	108	33°42'	1.1097		33	113	34°25'	1.1304	
35	126	36°03'	1.1770		38	146	39°16'	1.2659		39	152	39°59'	1.2851		

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0489	1	1	2°40'	0.2876		3	3	5°54'	0.2055		4	4	6°38'	0.2310	
	6	7	8°16'	0.4793		9	12	11°30'	0.3987		10	14	12°14'	0.4238	
	12	19	13°52'	0.6665		15	27	17°09'	0.5881		16	30	17°50'	0.6125	
	18	37	19°28'	0.8473		21	48	22°42'	0.7718		22	52	23°26'	0.7954	
	24	61	25°04'	1.0291		27	75	28°18'	0.9482		28	80	29°02'	0.9706	
	30	91	30°40'	1.1831		33	108	33°54'	1.1155		33	113	34°38'	1.1366	
	35	126	36°16'	1.1831		38	146	39°30'	1.2722		39	152	40°14'	1.2918	
0.0491	1	1	2°40'	0.2887		3	3	5°55'	0.2062		4	4	6°39'	0.2316	
	6	7	8°18'	0.4816		9	12	11°33'	0.4004		10	14	12°17'	0.4255	
	12	19	13°56'	0.6698		15	27	17°11'	0.5993		16	30	17°55'	0.6153	
	18	37	19°34'	0.8516		21	48	22°49'	0.7756		22	52	23°33'	0.7991	
	24	61	25°12'	1.0251		27	75	28°27'	0.9528		28	80	29°11'	0.9752	
	30	91	30°50'	1.1827		33	108	34°05'	1.1208		33	113	34°49'	1.1419	
	35	126	36°28'	1.1827		38	146	39°43'	1.2780		39	152	40°27'	1.2976	
0.0494	1	1	2°41'	0.2904		3	3	5°57'	0.2073		4	4	6°42'	0.2333	
	6	7	8°21'	0.4844		9	12	11°37'	0.4027		10	14	12°22'	0.4283	
	12	19	14°01'	0.6736		15	27	17°17'	0.5942		16	30	18°02'	0.6191	
	18	37	19°41'	0.8563		21	48	22°57'	0.7799		22	52	23°42'	0.8039	
	24	61	25°21'	1.0306		27	75	28°37'	0.9579		28	80	29°22'	0.9808	
	30	91	31°01'	1.1948		33	108	34°17'	1.1266		33	113	35°02'	1.1481	
	35	126	36°41'	1.1948		38	146	39°57'	1.2842		39	152	40°42'	1.3042	
0.0497	1	1	2°42'	0.2922		3	3	5°59'	0.2085		4	4	6°44'	0.2345	
	6	7	8°24'	0.4872		9	12	11°41'	0.4050		10	14	12°26'	0.4306	
	12	19	14°06'	0.6775		15	27	17°23'	0.5975		16	30	18°08'	0.6225	
	18	37	19°48'	0.8610		21	48	23°05'	0.7841		22	52	23°50'	0.8082	
	24	61	25°30'	1.0361		27	75	28°47'	0.9630		28	80	29°32'	0.9859	
	30	91	31°12'	1.2008		33	108	34°29'	1.1323		33	113	35°14'	1.1538	
	35	126	36°54'	1.2008		38	146	39°11'	1.2905		39	152	40°56'	1.3104	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.0500	1	1	2°43'	0.2333		3	3	6°02'	0.2102		4	4	6°46'	0.2357	
	6	7	8°27'	0.2333		9	12	11°46'	0.4979		10	14	12°30'	0.4329	
	12	19	11°11'	0.4501		15	27	17°39'	0.6014		16	30	18°14'	0.6258	
	18	37	19°55'	0.6213		21	48	23°14'	0.7890		22	52	23°58'	0.8124	
	21	61	25°39'	0.8657		27	75	28°58'	0.9086		28	80	29°42'	0.9909	
30	91	31°23'	1.0415		33	108	34°42'	1.1326		33	113	35°26'	1.1595		
35	126	37°07'	1.2063		38	146	40°26'	1.2971		39	152	41°10'	1.3165		
0.0503	1	1	2°41'	0.2355		3	3	6°01'	0.2114		4	4	6°49'	0.2374	
	6	7	8°30'	0.2355		9	12	11°50'	0.4191		10	14	12°35'	0.4357	
	12	19	11°16'	0.4929		15	27	17°36'	0.6947		16	30	18°21'	0.6296	
	18	37	21°02'	0.6831		21	48	23°22'	0.7932		22	52	24°07'	0.8172	
	24	61	25°48'	0.8765		27	75	29°08'	0.9737		28	80	29°53'	0.9965	
30	91	31°34'	1.0470		33	108	34°51'	1.1443		33	113	35°39'	1.1657		
35	126	37°29'	1.2120		38	146	40°40'	1.3033		39	152	41°25'	1.3231		
0.0506	1	1	2°45'	0.2373		3	3	6°05'	0.2125		4	4	6°51'	0.2385	
	6	7	8°33'	0.2373		9	12	11°51'	0.4124		10	14	12°39'	0.4380	
	12	19	14°21'	0.4957		15	27	17°42'	0.6081		16	30	19°27'	0.6330	
	18	37	20°09'	0.6870		21	48	24°36'	0.7975		22	52	24°15'	0.8214	
	21	61	25°57'	0.8752		27	75	29°14'	0.9788		28	80	30°03'	1.0015	
30	91	31°45'	1.0524		33	108	35°06'	1.1590		33	113	35°51'	1.1713		
35	126	37°33'	1.2193		38	146	40°54'	1.3095		39	152	41°39'	1.3292		
0.0509	1	1	2°46'	0.2391		3	3	6°08'	0.2137		4	4	6°54'	0.2403	
	6	7	8°36'	0.2391		9	12	11°53'	0.4147		10	14	12°44'	0.4408	
	12	19	14°26'	0.4935		15	27	17°48'	0.6144		16	30	18°34'	0.6368	
	18	37	20°16'	0.6912		21	48	23°33'	0.8018		22	52	24°21'	0.8262	
	21	61	26°06'	0.8799		27	75	29°23'	0.9858		28	80	30°14'	1.0070	
30	91	31°56'	1.0579		33	103	35°18'	1.1557		33	113	36°04'	1.1775		
35	126	37°46'	1.2249		38	146	41°03'	1.3150		39	152	41°54'	1.3337		

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.0512	1	1	2°47'	0.3008		3	3	6°10'	0.2148		4	4	6°56'	0.2514	
	6	7	8°19'	0.3008		9	12	12°02'	0.4170		10	14	12°48'	0.4431	
	12	19	14°31'	0.5013		15	27	17°54'	0.6147		16	30	18°40'	0.6401	
	18	37	20°23'	0.6966		21	48	23°46'	0.8060		22	52	24°32'	0.8304	
	24	61	26°15'	0.8846		27	75	29°38'	0.9889		28	80	30°24'	1.0121	
	30	91	32°07'	1.0633		33	108	35°30'	1.1614		33	113	36°16'	1.1831	
	35	126	37°58'	1.2309		38	146	41°22'	1.3218		39	152	42°08'	1.3417	
0.0515	1	1	2°48'	0.3025		3	3	6°12'	0.2160		4	4	6°58'	0.2425	
	6	7	8°42'	0.3025		9	12	13°06'	0.4192		10	14	12°52'	0.4450	
	12	19	14°36'	0.5041		15	27	18°00'	0.6180		16	30	18°46'	0.6434	
	18	37	20°30'	0.7004		21	48	23°54'	0.8103		22	52	24°40'	0.8347	
	24	61	26°24'	0.8893		27	75	29°48'	0.9939		28	80	30°34'	1.0171	
	30	91	32°18'	1.0687		33	108	35°42'	1.1671		33	113	36°28'	1.1887	
	35	126	38°12'	1.2368		38	146	41°36'	1.3279		39	152	42°22'	1.3477	
0.0518	1	1	2°49'	0.3042		3	3	6°15'	0.2177		4	4	7°01'	0.2473	
	6	7	8°45'	0.3042		9	12	12°11'	0.4221		10	14	12°57'	0.4482	
	12	19	14°41'	0.5070		15	27	18°07'	0.6219		16	30	18°53'	0.6473	
	18	37	20°37'	0.7042		21	48	24°03'	0.8151		22	52	24°49'	0.8394	
	24	61	26°33'	0.8940		27	75	29°59'	0.9995		28	80	30°45'	1.0226	
	30	91	32°29'	1.0741		33	108	35°55'	1.1732		33	113	36°41'	1.1948	
	35	126	38°25'	1.2423		38	146	41°51'	1.3344		39	152	42°37'	1.3552	
0.0520	1	1	2°50'	0.3060		3	3	6°17'	0.2189		4	4	7°03'	0.2455	
	6	7	8°48'	0.3060		9	12	12°15'	0.4244		10	14	13°01'	0.4505	
	12	19	14°46'	0.5098		15	27	18°13'	0.6252		16	30	18°59'	0.6506	
	18	37	20°44'	0.7080		21	48	24°11'	0.8193		22	52	24°57'	0.8437	
	24	61	26°42'	0.8986		27	75	30°09'	1.0045		28	80	30°55'	1.0276	
	30	91	32°40'	1.0795		33	108	36°07'	1.1789		33	113	36°53'	1.2021	
	35	126	38°38'	1.2487		38	146	42°05'	1.3404		39	152	42°51'	1.3632	

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	γ_2	K_1	K_2
0.0523	1	1	2°51'	0.3077		3	3	6°19'	0.2200		4	4	7°06'	7°06'	0.2472	
	6	7	8°51'	0.5126		9	12	12°19'	0.4266		10	14	13°06'	13°06'	0.4533	
	12	19	14°51'	0.7118		15	27	18°19'	0.6285		16	30	19°06'	19°06'	0.6544	
	18	37	20°51'	0.9033		21	48	24°19'	0.8236		22	52	25°06'	25°06'	0.8384	
	24	61	26°51'	1.0849		27	75	30°19'	1.0095		28	80	31°06'	31°06'	1.0231	
	30	91	32°51'	1.2546		33	108	36°19'	1.1845		33	113	37°06'	37°06'	1.2061	
35	126	38°51'	1.2604		38	146	42°19'	1.3365		39	152	43°06'	43°06'	1.3665		
0.0526	1	1	2°52'	0.3094		3	3	6°21'	0.2212		4	4	7°08'	7°08'	0.2484	
	6	7	8°54'	0.5154		9	12	12°23'	0.4289		10	14	13°10'	13°10'	0.4556	
	12	19	14°56'	0.7157		15	27	18°25'	0.6319		16	30	19°12'	19°12'	0.6577	
	18	37	20°58'	0.9080		21	48	24°27'	0.8278		22	52	25°14'	25°14'	0.8526	
	24	61	27°00'	1.0903		27	75	30°29'	1.0146		28	80	31°16'	31°16'	1.0380	
	30	91	33°02'	1.2604		33	108	36°31'	1.1901		33	113	37°18'	37°18'	1.2720	
35	126	39°01'	1.2663		38	146	42°33'	1.3525		39	152	48°20'	48°20'	1.3726		
0.0529	1	1	2°53'	0.3111		3	3	6°23'	0.2324		4	4	7°11'	7°11'	0.2501	
	6	7	8°57'	0.5182		9	12	12°27'	0.4312		10	14	13°15'	13°15'	0.4584	
	12	19	15°01'	0.7195		15	27	18°31'	0.6352		16	30	19°19'	19°19'	0.6616	
	18	37	21°05'	0.9126		21	48	24°35'	0.8320		22	52	25°23'	25°23'	0.8573	
	24	61	27°09'	1.0956		27	75	30°39'	1.0196		28	80	31°27'	31°27'	1.0435	
	30	91	33°13'	1.2663		33	108	36°43'	1.1957		33	113	37°31'	37°31'	1.2180	
35	126	39°17'	1.2722		38	146	42°47'	1.3585		38	151	43°35'	43°35'	1.3788		
0.0532	1	1	2°54'	0.3129		3	3	6°25'	0.2335		4	4	7°13'	7°13'	0.2512	
	6	7	8°00'	0.5210		9	12	12°31'	0.4334		10	14	13°19'	13°19'	0.4607	
	12	19	15°06'	0.7233		15	27	18°37'	0.6385		16	30	19°25'	19°25'	0.6619	
	18	37	21°12'	0.9173		21	48	24°43'	0.8363		22	52	25°31'	25°31'	0.8615	
	24	61	27°18'	1.1010		27	75	30°49'	1.0246		28	80	31°37'	31°37'	1.0465	
	30	91	33°24'	1.2722		33	108	36°55'	1.2013		33	113	37°43'	37°43'	1.2235	
35	126	39°30'	1.2722		38	146	43°01'	1.3644		38	151	43°49'	43°49'	1.3847		

(续)

$\frac{\phi+b}{2B}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s
0.0535	1	1	2°55'	0.3146		3	3	6°28'	0.2253		4	4	7°15'	0.2524	
	6	7	9°03'	0.5238		9	12	12°36'	0.4363		10	14	13°23'	0.4629	
	12	19	15°11'	0.7270		15	27	18°44'	0.6423		16	30	19°31'	0.6682	
	18	37	21°19'	0.9219		21	48	24°52'	0.8410		22	52	25°39'	0.8657	
	24	61	27°27'	1.1063		27	75	31°00'	1.0301		28	80	31°47'	1.0534	
	30	91	33°35'	1.2780		33	108	37°08'	1.2073		33	113	37°55'	1.2290	
	35	126	39°43'		38	146	43°16'	1.3708		38	151	44°03'	1.3906		
0.0538	1	1	2°56'	0.3163		3	3	6°30'	0.2264		4	4	7°18'	0.2541	
	6	7	9°06'	0.5266		9	12	12°40'	0.4386		10	14	13°28'	0.4658	
	12	19	15°16'	0.7308		15	27	18°50'	0.6456		16	30	19°38'	0.6720	
	18	37	21°26'	0.9266		21	48	25°00'	0.8452		22	52	26°48'	0.8705	
	24	61	27°36'	1.1116		27	75	31°10'	1.0351		28	80	31°58'	1.0539	
	30	91	33°46'	1.2838		33	108	37°20'	1.2129		33	113	38°08'	1.2350	
	35	126	39°56'		38	146	43°30'	1.3767		38	151	44°13'	1.3968		
0.0541	1	1	2°57'	0.3180		3	3	6°32'	0.2276		4	4	7°20'	0.2553	
	6	7	9°09'	0.5294		9	12	12°44'	0.4403		10	14	13°32'	0.4680	
	12	19	15°21'	0.7346		15	27	18°56'	0.6489		16	30	19°44'	0.6753	
	18	37	21°33'	0.9312		21	48	25°08'	0.8495		22	52	25°56'	0.8747	
	24	61	27°45'	1.1169		27	75	31°20'	1.0400		28	80	32°08'	1.0638	
	30	91	33°57'	1.2896		33	108	37°32'	1.2184		33	113	38°20'	1.2405	
	35	126	40°09'		38	146	43°44'	1.3826		38	151	44°32'	1.4026		
0.0544	1	1	2°58'	0.3198		3	3	6°34'	0.2287		4	4	7°23'	0.2570	
	6	7	9°12'	0.5322		9	12	12°48'	0.4431		10	14	13°37'	0.4709	
	12	19	15°26'	0.7384		15	27	19°02'	0.6522		16	30	19°51'	0.6791	
	18	37	21°40'	0.9359		21	48	25°16'	0.8537		22	52	26°05'	0.8794	
	24	61	27°54'	1.1222		27	75	31°30'	1.0450		28	80	32°19'	1.0692	
	30	91	34°08'	1.2954		33	108	37°44'	1.2240		33	113	38°33'	1.2464	
	35	126	40°22'		38	146	43°58'	1.3885		38	151	44°47'	1.4089		

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.0547	1	1	2°59'			3	3	6°36'	0.2297		4	4	7°25'	0.2582	
	6	7	9°15'	0.3215		9	12	12°52'	0.4454		10	14	13°41'	0.4731	
	12	19	15°31'	0.5350		15	27	19°08'	0.6555		16	30	19°57'	0.6824	
	18	37	21°47'	0.7422		21	48	25°24'	0.8579		22	52	26°13'	0.8838	
	24	61	28°03'	0.9405		27	75	31°40'	1.0500		28	80	32°29'	1.0741	
	30	91	34°19'	1.1275		33	108	37°56'	1.2295		38	113	38°45'	1.2518	
	35	126	40°35'	1.3011		38	146	44°12'	1.3943		38	151	45°01'	1.4146	
0.0550	1	1	2°59'			3	3	6°37'	0.2305		4	4	7°26'	0.2587	
	6	7	9°17'	0.3226		9	12	12°55'	0.4471		10	14	13°44'	0.4743	
	12	19	15°35'	0.5373		15	27	19°13'	0.6583		16	30	20°02'	0.6851	
	18	37	21°53'	0.7454		21	48	25°31'	0.8615		22	52	26°20'	0.8872	
	24	61	28°11'	0.9446		27	75	31°49'	1.0544		28	80	32°38'	1.0785	
	30	91	34°29'	1.1323		33	108	38°07'	1.2345		33	113	38°56'	1.2588	
	35	126	40°47'	1.3064		38	146	44°25'	1.3997		38	151	45°14'	1.4200	
0.0552	1	1	3°00'			3	3	6°39'	0.2316		4	4	7°29'	0.2605	
	6	7	9°20'	0.3244		9	12	12°59'	0.4493		10	14	13°49'	0.4776	
	12	19	15°40'	0.5401		15	27	19°19'	0.6616		16	30	20°09'	0.6890	
	18	37	22°00'	0.7492		21	48	25°39'	0.8657		22	52	26°29'	0.8919	
	24	61	28°20'	0.9492		27	75	31°59'	1.0593		28	80	32°49'	1.0839	
	29	90	34°40'	1.1376		33	108	38°19'	1.2400		33	113	39°09'	1.2627	
	35	125	41°00'	1.3121		38	146	44°39'	1.4055		38	151	45°29'	1.4261	
0.0555	1	1	3°01'			3	3	6°42'	0.2333		4	4	7°31'	0.2616	
	6	7	9°23'	0.3261		9	12	13°04'	0.4522		10	14	13°53'	0.4799	
	12	19	15°45'	0.5429		15	27	19°26'	0.6654		16	30	20°15'	0.6922	
	18	37	22°07'	0.7530		21	48	25°48'	0.8705		22	52	26°37'	0.8960	
	24	61	28°29'	0.9538		27	75	32°10'	1.0618		28	80	32°59'	1.0888	
	29	90	34°51'	1.1429		33	108	38°32'	1.2459		33	113	39°21'	1.2681	
	35	125	41°13'	1.3178		38	146	44°54'	1.4117		38	151	45°43'	1.4318	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.0558	1	1	3°02'			3	3	6°44'	0.2343		4	4	7°34'	0.2634	
	6	7	9°26'	0.3278		9	12	13°08'	0.4544		10	14	13°58'	0.4827	
	12	19	16°50'	0.5457		15	27	19°32'	0.6687		16	30	20°22'	0.6961	
	18	37	22°14'	0.7568		21	48	25°56'	0.8747		22	52	26°46'	0.9007	
	24	61	28°38'	0.9584		27	75	32°20'	1.0697		28	80	33°10'	1.0942	
	29	90	35°02'	1.1481		33	108	38°44'	1.2514		33	113	39°34'	1.2740	
	35	125	41°26'	1.3235		38	146	45°08'	1.4175		38	151	45°58'	1.4379	
0.0561	1	1	3°03'			3	3	6°46'	0.2357		4	4	7°36'	0.2645	
	6	7	9°29'	0.3295		9	12	13°12'	0.4567		10	14	14°02'	0.4850	
	12	19	15°55'	0.5485		15	27	19°38'	0.6720		16	30	20°28'	0.6993	
	18	37	22°21'	0.7605		21	48	26°04'	0.8788		22	52	26°54'	0.9049	
	24	61	28°47'	0.9630		27	75	32°30'	1.0746		28	80	33°20'	1.0990	
	29	90	35°13'	1.1533		33	108	38°56'	1.2568		33	113	39°46'	1.2793	
	35	125	41°39'	1.3292		38	146	45°22'	1.4232		38	151	46°12'	1.4435	
0.0564	1	1	3°04'			3	3	6°48'	0.2368		4	4	7°39'	0.2662	
	6	7	9°32'	0.3312		9	12	13°16'	0.4590		10	14	14°07'	0.4876	
	12	19	16°00'	0.5513		15	27	19°44'	0.6753		16	30	20°35'	0.7031	
	18	37	22°28'	0.7643		21	48	26°12'	0.8830		22	52	27°03'	0.9095	
	24	61	28°56'	0.9676		27	75	32°40'	1.0795		28	80	33°31'	1.1044	
	29	90	35°24'	1.1586		33	108	39°08'	1.2623		33	113	39°59'	1.2851	
	35	125	41°52'	1.3348		38	146	45°36'	1.4289		38	151	46°27'	1.4495	
0.0567	1	1	3°05'			3	3	6°50'	0.2380		4	4	7°41'	0.2674	
	6	7	9°35'	0.3330		9	12	13°20'	0.4612		10	14	14°11'	0.4901	
	12	19	16°05'	0.5541		15	27	19°50'	0.6786		16	30	20°41'	0.7064	
	18	37	22°35'	0.7681		21	48	26°20'	0.8872		22	52	27°11'	0.9137	
	24	61	29°05'	0.9722		27	75	32°50'	1.0844		28	80	33°41'	1.1092	
	29	90	35°35'	1.1638		32	107	39°20'	1.2677		33	113	40°11'	1.2905	
	35	125	42°05'	1.3404		37	144	45°50'	1.4346		38	151	46°41'	1.4551	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	H_1	H_2	
0.0570	1	1	3°06'			3	3	6°52'	0.2391		4	4	7°43'	0.2685				
	6	7	9°38'	0.3347		9	12	13°24'	0.4835		10	14	14°15'	0.4923				
	12	19	16°10'	0.5569		15	27	19°56'	0.6819		16	30	20°47'	0.7097				
	18	37	22°42'	0.7718		21	48	26°28'	0.8914		22	52	27°19'	0.9178				
	24	61	29°14'	0.9767		27	75	33°00'	1.0893		28	80	33°51'	1.1140				
	29	90	35°46'	1.1690		32	107	39°32'	1.2731		33	113	40°23'	1.2958				
	34	124	42°18'	1.3460		37	144	46°04'	1.4403		38	151	46°55'	1.4607				
	0.0573	1	1	3°07'			3	3	6°55'	0.2409		4	4	7°46'	0.2703			
		6	7	9°41'	0.3364		9	12	13°29'	0.4663		10	14	14°20'	0.4951			
		12	19	16°15'	0.5597		15	27	20°03'	0.6857		16	30	20°54'	0.7135			
18		37	22°49'	0.7756		21	48	26°37'	0.8960		22	52	27°28'	0.9225				
24		61	29°23'	0.9813		27	75	33°11'	1.0946		28	80	34°02'	1.1194				
29		90	35°57'	1.1742		32	107	39°45'	1.2789		33	113	40°36'	1.3015				
34		124	42°31'	1.3516		37	144	46°19'	1.4463		38	151	47°10'	1.4667				
0.0576		1	1	3°08'			3	3	6°57'	0.2420		4	4	7°48'	0.2714			
		6	7	9°44'	0.3381		9	12	13°33'	0.4686		10	14	14°24'	0.4974			
		12	19	16°20'	0.5625		15	27	20°09'	0.6890		16	30	21°00'	0.7167			
	18	37	22°56'	0.7793		21	48	26°45'	0.9002		22	52	27°36'	0.9266				
	24	61	29°32'	0.9859		27	75	33°21'	1.0995		28	80	34°12'	1.1242				
	29	90	36°08'	1.1793		32	107	39°57'	1.2842		33	113	40°48'	1.3068				
	34	124	42°44'	1.3572		37	144	46°33'	1.4520		38	151	47°24'	1.4722				
	0.0579	1	1	3°09'			3	3	6°59'	0.2432		4	4	7°51'	0.2732			
		6	7	9°47'	0.3398		9	12	13°37'	0.4709		10	14	14°29'	0.5002			
		12	19	16°25'	0.5652		15	27	20°15'	0.6922		16	30	21°07'	0.7205			
18		37	23°03'	0.7831		21	48	26°53'	0.9044		22	52	27°45'	0.9312				
24		61	29°41'	0.9904		27	75	33°31'	1.1044		28	80	34°23'	1.1295				
29		90	36°19'	1.1845		32	107	40°09'	1.2896		33	113	41°01'	1.3126				
34		124	42°57'	1.3627		37	144	46°47'	1.4575		38	151	47°39'	1.4781				

(续)

$\frac{\phi + \delta}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	N	ΣN	γ_4	K_1	K_2	
0.0581	1	1	3°10'	0.3416		2	3	7°01'	0.2443		4	4	7°53'	0.2743		4	4	7°53'	0.2743		
	6	7	9°50'	0.5680		9	12	13°41'	0.4731		10	14	14°33'	0.5025		14	14	14°33'	0.5025		
	12	19	16°30'	0.7868		15	27	20°21'	0.6955		16	30	21°13'	0.7235		30	30	21°13'	0.7235		
	18	37	23°10'	0.9950		21	48	27°01'	0.9085		22	52	27°33'	0.9353		52	52	27°33'	0.9353		
	24	61	29°50'	1.1896		27	75	33°41'	1.1092		28	80	34°53'	1.1343		80	80	34°53'	1.1343		
	29	90	36°30'	1.3682		32	107	40°21'	1.2949		33	113	41°13'	1.3178		113	113	41°13'	1.3178		
	34	124	43°10'	1.3738		37	144	47°01'	1.4631		38	151	47°53'	1.4836		151	151	47°53'	1.4836		
0.0584	1	1	3°11'	0.3433		3	3	7°03'	0.2455		4	4	7°55'	0.2755		4	4	7°55'	0.2755		
	6	7	9°53'	0.5708		9	12	13°45'	0.4754		10	14	14°37'	0.5047		14	14	14°37'	0.5047		
	12	19	16°35'	0.7906		15	27	20°27'	0.6988		16	30	21°19'	0.7270		30	30	21°19'	0.7270		
	18	37	23°17'	0.9995		21	48	27°09'	0.9126		22	52	28°01'	0.9375		52	52	28°01'	0.9375		
	24	61	29°59'	1.1948		27	75	33°51'	1.1140		28	80	34°43'	1.1390		80	80	34°43'	1.1390		
	29	90	36°41'	1.3738		32	107	40°33'	1.3002		33	113	41°25'	1.3231		113	113	41°25'	1.3231		
	34	124	43°23'	1.3792		37	144	47°15'	1.4686		38	151	48°07'	1.4890	0.3324	151	151	48°07'	1.4890	0.3324	
0.0587	1	1	3°12'	0.3450		3	3	7°05'	0.2466		4	4	7°58'	0.2772		4	4	7°58'	0.2772		
	6	7	9°56'	0.5736		9	12	13°49'	0.4776		10	14	14°42'	0.5075		14	14	14°42'	0.5075		
	12	19	16°40'	0.7943		15	27	20°33'	0.7021		16	30	21°26'	0.7308		30	30	21°26'	0.7308		
	18	37	23°24'	1.0040		21	48	27°17'	0.9168		22	52	28°10'	0.9441		52	52	28°10'	0.9441		
	24	61	30°08'	1.1999		27	75	34°01'	1.1189		28	80	34°54'	1.1443		80	80	34°54'	1.1443		
	29	90	36°52'	1.3792		32	107	40°45'	1.3055		33	113	41°38'	1.3287		113	113	41°38'	1.3287		
	34	124	43°36'	1.3847		37	144	47°29'	1.4742		38	151	48°22'	1.4948	0.3356	151	151	48°22'	1.4948	0.3356	
0.0590	1	1	3°13'	0.3467		3	3	7°07'	0.2478		4	4	8°00'	0.2783		4	4	8°00'	0.2783		
	6	7	9°59'	0.5764		9	12	13°53'	0.4799		10	14	14°46'	0.5098		14	14	14°46'	0.5098		
	12	19	16°45'	0.7980		15	27	20°39'	0.7053		16	30	21°32'	0.7341		30	30	21°32'	0.7341		
	18	37	23°31'	1.0086		21	48	27°25'	0.9299		22	52	28°18'	0.9482		52	52	28°18'	0.9482		
	24	61	30°17'	1.2050		27	75	34°11'	1.1237		28	80	35°04'	1.1491		80	80	35°04'	1.1491		
	29	90	37°03'	1.3847		32	107	40°57'	1.3108		33	113	41°50'	1.3339		113	113	41°50'	1.3339		
	34	124	43°49'	1.3847		37	144	47°43'	1.4797		38	151	48°36'	1.5002	0.3387	151	151	48°36'	1.5002	0.3387	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_i	K_1	K_2
0.0593	1	1	3°14'				3	3	7°10'	0.2495	0.2801	
	6	7	10°02'	0.3484			9	12	13°58'	0.4827	0.5126	
	12	19	16°50'	0.5792			15	27	20°46'	0.7091	0.7379	
	18	37	23°38'	0.8018			21	48	27°34'	0.9256	0.9528	
	24	61	30°26'	1.0131			27	75	34°22'	1.1290	1.1543	
	29	90	37°14'	1.2101		32	107	41°10'	1.3165	1.3396		
	34	124	44°02'	1.3902		37	144	47°58'	1.4855	1.5560	0.3420	
0.0596	1	1	3°15'				3	3	7°12'	0.2507	0.2812	
	6	7	10°05'	0.3502			9	12	14°02'	0.4850	0.5148	
	12	19	16°55'	0.5820			15	27	20°52'	0.7124	0.7411	
	18	37	23°45'	0.8055			21	48	27°42'	0.9297	0.9569	
	24	61	30°35'	1.0176			27	75	34°32'	1.1338	1.1590	
	29	90	37°25'	1.2152		32	107	41°22'	1.3218	1.3447		
	34	124	44°15'	1.3956		37	144	48°12'	1.4910	1.5113	0.3450	
0.0599	1	1	3°16'				3	3	7°14'	0.2518	0.2830	
	6	7	10°08'	0.3519			9	12	14°06'	0.4872	0.5176	
	12	19	17°00'	0.5847			15	27	20°58'	0.7157	0.7449	
	18	37	23°52'	0.8092			21	48	27°50'	0.9338	0.9615	
	24	61	30°44'	1.0221			27	75	34°42'	1.1386	1.1642	
	29	90	37°36'	1.2208		32	107	41°34'	1.3270	1.3503		
	34	124	44°28'	1.4010		37	144	48°26'	1.4964	1.5170	0.3483	
0.0502	1	1	3°17'				3	3	7°16'	0.2530	0.2841	
	6	7	10°11'	0.3536			9	12	14°10'	0.4895	0.5199	
	12	19	17°05'	0.5875			15	27	21°04'	0.7189	0.7481	
	18	37	23°59'	0.8129			21	48	27°58'	0.9379	0.9655	
	24	61	30°53'	1.0266			27	75	34°52'	1.1433	1.1690	
	29	90	37°47'	1.2254		32	107	41°46'	1.3322	1.3555		
	34	124	44°41'	1.4064		37	144	48°40'	1.5018	1.5223	0.3514	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_s}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	
0.0605	1	1	3°18'			3	3	7°18'	0.2541		4	4	8°12'	0.2853		
	6	7	10°14'	0.3553		9	12	14°14'	0.4917		10	14	15°08'	0.5221		
	12	19	17°10'	0.5903		15	27	21°10'	0.7222		16	30	22°04'	0.7514		
	18	37	24°06'	0.8167		21	48	28°06'	0.9420		22	52	29°00'	0.9696		
	24	61	31°02'	1.0311		27	75	35°02'	1.1481		28	80	35°56'	1.1737		
	29	90	37°58'	1.2304		32	107	41°58'	1.3374		33	113	42°52'	1.3606		
	34	124	44°54'	1.4117		37	144	48°54'	1.5071		38	151	49°48'	1.5276	0.3545	
	0.0608	1	1	3°19'			3	3	7°20'	0.2553		4	4	8°15'	0.2870	
		6	7	10°17'	0.3570		9	12	14°18'	0.4940		10	14	15°13'	0.5049	
		12	19	17°15'	0.5931		15	27	21°16'	0.7254		16	30	22°11'	0.7551	
18		37	24°13'	0.8204		21	48	28°14'	0.9461		22	52	29°09'	0.9742		
24		61	31°11'	1.0356		27	75	35°12'	1.1529		28	80	36°07'	1.1789		
29		90	38°09'	1.2354		32	107	42°10'	1.3426		33	113	43°05'	1.3661		
34		124	45°07'	1.4171		37	144	49°08'	1.5124		38	151	50°03'	1.5332	0.3579	
0.0610		1	1	3°20'			3	3	7°23'	0.2570		4	4	8°17'	0.2881	
		6	7	10°20'	0.3588		9	12	14°23'	0.4968		10	14	15°17'	0.5272	
		12	19	17°20'	0.5959		15	27	21°23'	0.7292		16	30	22°17'	0.7584	
	18	37	24°20'	0.8241		21	48	28°23'	0.9507		22	52	29°17'	0.9783		
	24	61	31°20'	1.0400		27	75	35°23'	1.1581		28	80	36°17'	1.1836		
	29	90	38°20'	1.2405		32	107	42°23'	1.3482		33	113	43°17'	1.3712		
	34	124	45°20'	1.4224		37	144	49°23'	1.5182	0.3490	38	151	50°17'	1.5384	0.3610	
	0.0613	1	1	3°21'			3	3	7°26'	0.2582		4	4	8°20'	0.2899	
		6	7	10°23'	0.3605		9	12	14°27'	0.4991		10	14	15°22'	0.5300	
		12	19	17°25'	0.5986		15	27	21°29'	0.7325		16	30	22°24'	0.7621	
18		37	24°27'	0.8278		21	48	28°31'	0.9548		22	52	29°26'	0.9828		
24		61	31°29'	1.0445		27	75	35°33'	1.1628		28	80	36°28'	1.1887		
29		90	38°31'	1.2455		32	107	42°35'	1.3633		33	113	43°30'	1.3767		
34		124	45°33'	1.4277		37	144	49°37'	1.5235	0.3521	38	151	50°32'	1.5440	0.3644	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	
0.0616	1	1	3°22'			3	3	7°27'	0.2503		4	4	8°22'	0.2910		
	6	7	10°26'	0.3622		9	12	14°31'	0.5013		10	14	15°26'	0.5322		
	12	19	17°30'	0.6014		15	27	21°35'	0.7357		16	30	22°30'	0.7654		
	18	37	24°34'	0.8315		21	48	28°39'	0.9589		22	52	29°34'	0.9860		
	24	61	31°38'	1.0490		27	75	35°43'	1.1676		28	80	36°38'	1.1934		
	29	90	38°42'	1.2505		32	107	42°47'	1.3585		33	113	43°42'	1.3818		
	34	124	45°46'	1.4330		37	144	49°51'	1.5287	0.3552		37	150	50°46'	1.5492	0.3675
	0.0619	1	1	3°23'			3	3	7°29'	0.2605		4	4	8°24'	0.2922	
		6	7	10°29'	0.3639		9	12	14°35'	0.5036		10	14	15°30'	0.5345	
		12	19	17°35'	0.6042		15	27	21°41'	0.7390		16	30	22°36'	0.7686	
18		37	24°41'	0.8352		21	48	28°47'	0.9630		22	52	29°42'	0.9909		
24		61	31°47'	1.0534		27	75	35°53'	1.1723		28	80	36°48'	1.1980		
29		90	38°53'	1.2555		32	107	42°59'	1.3636		33	113	43°54'	1.3368		
34		124	45°59'	1.4363		37	144	50°05'	1.5340	0.3593		37	150	51°00'	1.5543	0.3707
0.0622		1	1	3°24'			3	3	7°31'	0.2616		4	4	8°27'	0.2939	
		6	7	10°32'	0.3656		9	12	14°39'	0.5058		10	14	15°35'	0.5373	
		12	19	17°40'	0.6070		15	27	21°47'	0.7422		16	30	22°43'	0.7723	
	18	37	24°48'	0.8389		21	48	28°55'	0.9671		22	52	29°51'	0.9955		
	24	61	31°56'	1.0579		27	75	36°03'	1.1770		28	80	36°59'	1.2032		
	29	90	39°04'	1.2604		32	107	43°11'	1.3687		33	113	44°07'	1.3922		
	34	124	46°12'	1.4435		37	144	50°19'	1.5392	0.3615		37	150	51°15'	1.5598	0.3741
	0.0625	1	1	3°25'			3	3	7°33'	0.2628		4	4	8°29'	0.2950	
		6	7	10°35'	0.3673		9	12	14°43'	0.5081		10	14	15°39'	0.5395	
		12	19	17°45'	0.6097		15	27	21°53'	0.7454		16	30	22°49'	0.7756	
18		37	24°55'	0.8426		21	48	29°03'	0.9711		22	52	29°59'	0.9995		
24		61	32°05'	1.0623		27	75	36°13'	1.1817		28	80	37°09'	1.2078		
29		90	39°15'	1.2654		32	107	43°23'	1.3738		33	113	44°19'	1.3972		
34		124	46°25'	1.4467		36	143	50°33'	1.5444	0.3646		37	150	51°29'	1.5649	0.3773

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2
0.0628	1	1	3°26'			3	3	7°35'	0.2639		4	4	8°32'	0.2968	
	6	7	10°38'	0.3690		9	12	14°47'	0.5103		10	14	15°44'	0.5423	
	12	19	17°50'	0.6125		15	27	21°59'	0.7487		16	30	22°56'	0.7793	
	18	37	25°02'	0.8463		21	48	29°11'	0.9752		22	52	30°08'	1.0040	
	24	61	32°14'	1.0667		27	75	36°23'	1.1854		28	80	37°20'	1.2129	
	29	90	39°26'	1.2704		32	107	43°35'	1.3788		33	113	44°32'	1.4026	
	34	124	46°38'	1.4539		36	143	50°47'	1.5495	0.3677	37	150	51°44'	1.5703	0.3807
0.0631	1	1	3°26'			3	3	7°37'	0.2651		4	4	8°33'	0.2973	
	6	7	10°40'	0.3702		9	12	14°51'	0.5126		10	14	15°47'	0.5440	
	12	19	17°54'	0.6147		15	27	22°05'	0.7519		16	30	23°01'	0.7820	
	18	37	25°08'	0.8495		21	48	29°19'	0.9793		22	52	30°15'	1.0075	
	24	61	32°22'	1.0707		27	75	36°33'	1.1910		27	79	37°29'	1.2171	
	29	90	39°36'	1.2748		32	107	43°47'	1.3839		32	111	44°43'	1.4072	
	34	124	46°50'	1.4587		36	143	51°01'	1.5547	0.3709	37	148	51°57'	1.5749	0.3537
0.0634	1	1	3°27'			3	3	7°39'	0.2662		4	4	8°36'	0.2991	
	6	7	10°43'	0.3719		9	12	14°55'	0.5148		10	14	15°52'	0.5468	
	12	19	17°59'	0.6175		15	27	22°11'	0.7551		16	30	23°08'	0.7857	
	18	37	25°15'	0.8531		21	48	29°27'	0.9833		22	52	30°24'	1.0121	
	24	61	32°31'	1.0751		27	75	36°43'	1.1957		27	79	37°40'	1.2221	
	29	90	39°47'	1.2798		32	107	43°59'	1.3889		32	111	44°56'	1.4126	
	34	124	47°03'	1.4639		36	143	51°15'	1.5598	0.3741	37	148	52°12'	1.5803	0.3871
0.0637	1	1	3°28'			3	3	7°41'	0.2674		4	4	8°38'	0.3002	
	6	7	10°46'	0.3736		9	12	14°59'	0.5171		10	14	15°56'	0.5490	
	12	19	18°04'	0.6202		15	27	22°17'	0.7584		16	30	23°14'	0.7890	
	18	37	25°22'	0.8568		21	48	29°35'	0.9874		22	52	30°32'	1.0161	
	24	61	32°40'	1.0795		27	75	36°53'	1.2004		27	79	37°50'	1.2287	
	29	90	39°58'	1.2847		32	107	44°11'	1.3939		32	111	45°08'	1.4175	
	34	124	47°16'	1.4690		36	143	51°29'	1.5649	0.3773	37	148	52°26'	1.5853	0.3903

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2
0.0640	1	1	3°29'			3	3	7°43'	0.2685		4	4	8°40'	0.3014	
	6	7	10°49'	0.3753		9	12	15°03'	0.5193		10	14	16°00'	0.5531	
	12	19	18°09'	0.6230		15	27	22°28'	0.7616		16	30	23°20'	0.7922	
	18	37	25°29'	0.8605		21	48	29°43'	0.9914		22	52	30°40'	1.0201	
	24	61	32°49'	1.0839		27	75	37°03'	1.2050		27	79	38°00'	1.2313	
	29	90	40°09'	1.2896		32	107	44°23'	1.3989		32	111	45°20'	1.4224	
	34	124	47°29'	1.4742		36	143	51°43'	1.5699	0.3805	37	148	52°40'	1.5902	0.3936
0.0642	1	1	3°30'			3	3	7°45'	0.2697		4	4	8°43'	0.3031	
	6	7	10°52'	0.3770		9	12	15°07'	0.5216		10	14	16°05'	0.5541	
	12	19	18°14'	0.6259		15	27	22°29'	0.7648		16	30	23°27'	0.7959	
	18	37	25°36'	0.8642		21	48	29°51'	0.9955		22	52	30°49'	1.0246	
	24	61	32°58'	1.0823		27	75	37°13'	1.2097		27	79	38°11'	1.2364	
	29	90	40°20'	1.2945		32	107	44°35'	1.4039		33	111	45°33'	1.4277	
	34	124	47°42'	1.4793		36	143	51°57'	1.5749	0.3837	37	148	52°55'	1.5955	0.3970
0.0645	1	1	3°31'			3	3	7°47'	0.2709		4	4	8°45'	0.3042	
	6	7	10°55'	0.3788		9	12	15°11'	0.5238		10	14	16°09'	0.5563	
	12	19	18°19'	0.6285		15	27	22°35'	0.7681		16	30	23°33'	0.7991	
	18	37	25°43'	0.8678		21	48	29°59'	0.9995		22	52	30°57'	1.0286	
	24	61	33°07'	1.0927		27	75	37°23'	1.2143		27	79	38°21'	1.2439	
	29	90	40°31'	1.2993		32	107	44°47'	1.4089		32	111	45°45'	1.4326	
	33	123	47°55'	1.4843		36	143	52°11'	1.5800	0.3869	37	148	53°09'	1.6004	0.4003
0.0648	1	1	3°32'			3	3	7°50'	0.2726		4	4	8°48'	0.3060	
	6	7	10°58'	0.3805		9	12	15°16'	0.5266		10	14	16°14'	0.5591	
	12	19	18°24'	0.6313		15	27	22°42'	0.7718		16	30	23°40'	0.8028	
	18	37	25°50'	0.8715		21	48	30°06'	1.0040		22	52	31°06'	1.0331	
	24	61	33°16'	1.0971		27	75	37°34'	1.2194		27	79	38°32'	1.2459	
	29	90	40°42'	1.3042		32	107	45°00'	1.4142		32	111	45°58'	1.4379	
	33	123	48°08'	1.4894	0.3326	36	143	52°26'	1.5853	0.3903	37	148	53°24'	1.6056	0.4038

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	
0.0651	1	1	3°33'			3	3	7°52'	0.2737		4	4	8°50'	0.3071		
	6	7	11°01'	0.3822		9	12	15°20'	0.5289		10	14	16°18'	0.5613		
	12	19	18°29'	0.6341		15	27	22°48'	0.7750		16	30	23°46'	0.8060		
	18	37	25°57'	0.8752		21	48	30°16'	1.0081		22	52	31°14'	1.0370		
	24	61	33°25'	1.1014		27	75	37°44'	1.2240		27	79	38°42'	1.2505		
	29	90	40°53'	1.3090		32	107	45°12'	1.4191		32	111	46°10'	1.4427		
	33	123	48°21'	1.4944	0.3354	36	143	52°40'	1.5902	0.3936	37	148	53°38'	1.6105	0.4171	
	0.0654	1	1	3°34'			3	3	7°54'	0.2749		4	4	8°53'	0.3068	
		6	7	11°04'	0.3839		9	12	15°24'	0.5311		10	14	16°23'	0.5641	
		12	19	18°34'	0.6368		15	27	22°54'	0.7782		16	30	23°53'	0.8098	
18		37	26°04'	0.8788		21	48	30°24'	1.0121		22	52	31°23'	1.0415		
24		61	33°34'	1.1058		27	75	37°54'	1.2286		27	79	38°53'	1.2555		
29		90	41°04'	1.3139		32	107	45°24'	1.4241		32	111	46°23'	1.4479		
33		123	48°34'	1.4995	0.3383	36	143	52°54'	1.5982	0.3968	37	148	53°53'	1.6156	0.4106	
0.0657		1	1	3°35'			3	3	7°56'	0.2760		4	4	8°55'	0.3100	
		6	7	11°07'	0.3858		9	12	15°28'	0.5334		10	14	16°27'	0.5664	
		12	19	18°39'	0.6396		15	27	23°00'	0.7815		16	30	23°59'	0.8129	
	18	37	26°11'	0.8825		21	48	30°32'	1.0161		22	52	31°31'	1.0455		
	24	61	33°43'	1.1102		27	75	38°04'	1.2332		27	79	39°03'	1.2600		
	29	90	41°15'	1.3187		32	107	45°36'	1.4289		32	111	46°35'	1.4527		
	33	123	48°47'	1.5044	0.3411	36	143	53°08'	1.6001	0.4001	37	148	54°07'	1.6204	0.4139	
	0.0660	1	1	3°36'			3	3	7°58'	0.2771		4	4	8°57'	0.3111	
		6	7	11°10'	0.3873		9	12	15°32'	0.5356		10	14	16°31'	0.5686	
		12	19	18°44'	0.6423		15	27	23°06'	0.7847		16	30	24°05'	0.8161	
18		37	26°18'	0.8861		21	48	30°40'	1.0201		22	52	31°39'	1.0495		
24		61	33°52'	1.1145		27	75	38°14'	1.2377		27	79	39°13'	1.2645		
29		90	41°26'	1.3235		32	107	45°48'	1.4338		32	111	46°47'	1.4575		
33		123	49°00'	1.5094	0.3439	36	143	53°22'	1.6049	0.4033	37	148	54°21'	1.6252	0.4172	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	
0.0663	1	1	3°37'			3	3	8°00'	0.2783		4	4	9°00'	0.3129		
	6	7	11°13'	0.3890		9	12	15°36'	0.5378		10	14	16°36'	0.5714		
	12	19	18°49'	0.6451		15	27	23°12'	0.7879		16	30	24°12'	0.8198		
	18	37	26°25'	0.8898		21	48	30°48'	1.0241		22	52	31°48'	1.0539		
	24	61	34°01'	1.1189		27	75	38°24'	1.2423		27	79	39°24'	1.2695		
	29	90	41°37'	1.3283		32	107	46°00'	1.4387		32	111	47°00'	1.4627		
	33	123	49°43'	1.5144	0.3468	36	143	53°36'	1.6098	0.4066	37	148	54°36'	1.6303	0.4207	
	0.0660	1	1	3°38'			3	3	8°03'	0.2801		4	4	9°02'	0.3140	
		6	7	11°16'	0.3908		9	12	15°41'	0.5406		10	14	16°40'	0.5736	
		12	19	18°54'	0.6478		15	27	23°19'	0.7916		16	30	24°18'	0.8230	
18		37	26°32'	0.8934		21	48	30°57'	1.0286		22	52	31°56'	1.0579		
24		61	34°10'	1.1232		27	75	38°35'	1.2473		27	79	39°34'	1.2740		
29		90	41°48'	1.3331		32	107	46°13'	1.4439		32	111	47°12'	1.4675		
33		123	49°26'	1.5193	0.3497	36	143	53°51'	1.6150	0.4101	37	148	54°50'	1.6350	0.4240	
0.0669		1	1	3°39'			3	3	8°05'	0.2812		4	4	9°05'	0.3157	
		6	7	11°19'	0.3925		9	12	15°45'	0.5429		10	14	16°45'	0.5764	
		12	19	18°59'	0.6506		15	27	23°25'	0.7948		16	30	24°25'	0.8267	
	18	37	26°39'	0.8971		21	48	31°05'	1.0326		22	52	32°05'	1.0623		
	24	61	34°19'	1.1275		27	75	38°45'	1.2518		27	79	39°45'	1.2789		
	29	90	41°59'	1.3378		32	107	46°25'	1.4487		32	111	47°25'	1.4726		
	33	123	49°39'	1.5342	0.3525	36	143	54°05'	1.6197	0.4134	36	147	55°05'	1.6400	0.4276	
	0.0671	1	1	3°40'			3	3	8°07'	0.2824		4	4	9°07'	0.3169	
		6	7	11°22'	0.3942		9	12	15°49'	0.5451		10	14	16°49'	0.5785	
		12	19	19°04'	0.6533		15	27	23°31'	0.7980		16	30	24°31'	0.8299	
18		37	26°46'	0.9007		21	48	31°13'	1.0366		22	52	32°13'	1.0662		
24		61	34°28'	1.1319		27	75	38°55'	1.2564		27	79	39°55'	1.2833		
29		90	42°10'	1.3426		31	106	46°37'	1.4535		32	111	47°37'	1.4773		
33		123	49°52'	1.5291	0.3554	36	142	54°19'	1.6245	0.4167	36	147	55°19'	1.6446	0.4310	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	
0.0674	1	1	3°41'			3	3	8°09'	0.2835		4	4	9°09'	0.3180		
	6	7	11°25'	0.3959		9	12	15°53'	0.5474		10	12	16°53'	0.5808		
	12	19	19°09'	0.6561		15	27	23°37'	0.8012		16	30	24°37'	0.8331		
	18	37	26°53'	0.9044		21	48	31°21'	1.0405		22	52	32°21'	1.0702		
	24	61	34°37'	1.3162		27	75	39°05'	1.2009		27	79	40°05'	1.2378		
	29	90	42°21'	1.3473		31	106	46°49'	1.4583		32	111	47°49'	1.4820		
	33	123	50°06'	1.5340	0.3583	36	142	54°33'	1.6292	0.4200	36	147	55°33'	1.6192	0.4343	
	0.0677	1	1	3°42'			3	3	8°11'	0.2847		4	4	9°12'	0.3198	
		6	7	11°28'	0.3976		9	12	15°57'	0.5496		10	14	16°56'	0.5836	
		12	19	19°14'	0.6588		15	27	23°43'	0.8044		16	30	24°44'	0.8368	
18		37	27°00'	0.9080		21	48	31°29'	1.0445		22	52	32°30'	1.0746		
24		61	34°46'	1.1405		27	75	39°15'	1.2654		27	79	40°16'	1.2927		
29		90	42°32'	1.3520		31	106	47°01'	1.4631		32	111	48°02'	1.4871	0.3313	
33		123	50°18'	1.5388	0.3612	36	142	54°47'	1.6340	0.4233	36	147	55°48'	1.6542	0.4579	
0.0680		1	1	3°43'			3	3	8°13'	0.2858		4	4	9°14'	0.3209	
		6	7	11°31'	0.3993		9	12	16°01'	0.5518		10	14	17°02'	0.5859	
		12	19	19°19'	0.6616		15	27	23°49'	0.8076		16	30	24°50'	0.8400	
	18	37	27°07'	0.9116		21	48	31°37'	1.0485		22	52	32°38'	1.0785		
	24	61	34°55'	1.1448		27	75	39°25'	1.2699		27	79	40°26'	1.2971		
	29	90	42°43'	1.3567		31	106	47°13'	1.4679		32	111	48°14'	1.4917	0.3339	
	33	123	50°31'	1.5436	0.3642	35	141	55°01'	1.6386	0.4267	36	147	56°02'	1.6587	0.4413	
	0.0683	1	1	3°44'			3	3	8°15'	0.2870		4	4	9°17'	0.3226	
		6	7	11°34'	0.4010		9	12	16°05'	0.5541		10	14	17°07'	0.5886	
		12	19	19°24'	0.6643		15	27	23°55'	0.8108		16	30	24°57'	0.8437	
18		37	27°14'	0.9152		21	48	31°45'	1.0524		22	52	32°47'	1.0829		
24		61	35°04'	1.1491		27	75	39°35'	1.2744		27	79	40°37'	1.3020		
29		90	42°54'	1.3614		31	106	47°26'	1.4726		32	111	48°27'	1.4965	0.3367	
33		123	50°44'	1.5484	0.3671	35	141	55°15'	1.6433	0.4300	36	147	56°17'	1.6635	0.4449	

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	
0.0686	1	1	3°45'			3	3	8°18'	0.2887		4	4	9°19'	0.3238		
	6	7	11°37'	0.4027		9	12	16°10'	0.5569		10	14	17°11'	0.5909		
	12	19	19°29'	0.6671		15	27	24°02'	0.8145		16	30	25°03'	0.8462		
	18	37	27°21'	0.9188		21	48	31°54'	1.0563		22	52	32°56'	1.0868		
	24	61	35°13'	1.1533		27	75	39°46'	1.2793		27	79	40°47'	1.3064		
	29	90	43°05'	1.3661		31	106	47°38'	1.4777		32	111	48°39'	1.5014	0.3393	
	33	123	50°57'	1.5532	0.3700	35	141	55°30'	1.6483	0.4336	36	147	50°31'	1.6681	0.4483	
	0.0689	1	1	3°45'			3	3	8°10'	0.2893		4	4	9°20'	0.3244	
		6	7	11°39'	0.4039		9	12	16°13'	0.5585		10	14	17°14'	0.5925	
		12	19	19°33'	0.6693		15	27	24°07'	0.8172		16	30	25°08'	0.8495	
18		37	27°27'	0.9219		21	48	32°01'	1.0603		22	52	33°02'	1.0903		
24		61	35°21'	1.1571		27	75	39°55'	1.2833		27	79	40°56'	1.3104		
29		90	43°15'	1.3704		31	106	47°49'	1.4820		32	111	48°50'	1.5055	0.3418	
33		123	51°09'	1.5576	0.3727	35	141	55°43'	1.6525	0.4367	36	147	56°44'	1.6723	0.4515	
0.0692		1	1	3°46'			3	3	8°21'	0.2904		4	4	9°23'	0.3261	
		6	7	11°42'	0.4056		9	12	16°17'	0.5608		10	14	17°19'	0.5953	
		12	19	19°38'	0.6720		15	27	24°13'	0.8204		16	30	25°15'	0.8531	
	18	37	27°34'	0.9255		21	48	32°09'	1.0643		22	52	33°11'	1.0946		
	23	60	35°30'	1.1611		27	75	40°05'	1.2878		27	79	41°07'	1.3152		
	28	88	43°26'	1.3750		31	106	48°01'	1.4867	0.3311	32	111	49°03'	1.5106	0.3446	
	33	121	51°22'	1.5623	0.3757	35	141	55°57'	1.6571	0.4401	36	147	56°59'	1.6779	0.4551	
	0.0695	1	1	3°47'			3	3	8°23'	0.2916		4	4	9°25'	0.3272	
		6	7	11°45'	0.4037		9	12	16°21'	0.5630		10	14	17°23'	0.5975	
		12	19	19°43'	0.6747		15	27	24°19'	0.8236		16	30	25°21'	0.8563	
18		37	27°41'	0.9292		21	48	32°17'	1.0682		22	52	33°23'	1.0985		
23		60	35°39'	1.1657		27	75	40°15'	1.2922		27	79	41°17'	1.3196		
28		88	43°37'	1.3797		31	106	48°13'	1.4913	0.3337	32	111	49°15'	1.5151	0.3472	
33		121	51°35'	1.5670	0.3786	35	141	56°11'	1.6616	0.4435	36	147	57°13'	1.6814	0.4585	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	
0.0698	1	1	3°48'	0.4090		3	3	8°25'	0.2927		4	4	9°28'	0.3289		
	6	7	11°48'	0.6775		9	12	16°25'	0.5652		10	14	17°28'	0.6003		
	12	19	19°48'	0.9328		15	27	24°25'	0.8267		16	30	25°28'	0.8600		
	18	37	27°48'	1.1699		21	48	32°25'	1.0721		22	52	33°28'	1.1029		
	23	60	35°48'	1.3843		27	75	40°25'	1.2967		27	79	41°28'	1.3244		
	28	88	43°48'	1.5717		31	106	48°25'	1.4960	0.3363	32	111	49°28'	1.5201	0.3501	
	33	121	51°48'	1.5717	0.3816	35	141	56°25'	1.6662	0.4469	36	147	57°28'	1.6862	0.4622	
	0.0703	1	1	3°50'	0.4124		3	3	8°30'	0.2956		4	4	9°33'	0.3318	
		6	7	11°54'	0.6829		9	12	16°34'	0.5703		10	14	17°37'	0.6053	
		12	19	19°58'	0.9400		15	27	24°38'	0.8336		16	30	25°41'	0.8668	
18		37	28°02'	1.1784		21	48	32°42'	1.0805		22	52	33°45'	1.1111		
23		60	36°06'	1.3935		26	74	40°46'	1.3060		27	79	41°49'	1.3335		
28		88	44°10'	1.5810		31	105	48°50'	1.5056	0.3418	32	111	49°53'	1.5295	0.3557	
33		121	52°14'	1.5810	0.3876	35	140	56°54'	1.6754	0.4539	36	147	57°57'	1.6952	0.4693	
0.0709		1	1	3°52'	0.4158		3	3	8°34'	0.2979		4	4	9°37'	0.3341	
		6	7	12°00'	0.6884		9	12	16°42'	0.5747		10	14	17°45'	0.6097	
		12	19	20°08'	0.9472		15	27	24°50'	0.8400		16	30	25°53'	0.8731	
	18	37	28°16'	1.1868		21	48	32°58'	1.0883		22	52	34°01'	1.1189		
	23	60	36°24'	1.4026		26	74	41°06'	1.3148		27	79	42°09'	1.3421		
	28	88	44°32'	1.5902		31	105	49°14'	1.5148	0.3470	32	111	50°17'	1.5384	0.3610	
	33	121	52°40'	1.5902	0.3936	35	140	57°22'	1.6843	0.4607	36	147	58°25'	1.7033	0.4763	
	0.0715	1	1	3°54'	0.4192		3	3	8°38'	0.3002		4	4	9°42'	0.3370	
		6	7	12°06'	0.6939		9	12	16°50'	0.5792		10	14	17°54'	0.6147	
		12	19	20°18'	0.9543		15	27	25°02'	0.8463		16	30	26°06'	0.8799	
18		37	28°30'	1.1953		21	48	33°14'	1.0961		22	52	34°18'	1.1271		
23		60	36°42'	1.4117		26	74	41°26'	1.3235		27	79	42°30'	1.3512		
28		88	44°54'	1.5994		31	105	49°38'	1.5238	0.3523	32	111	50°42'	1.5477	0.3666	
33		121	53°06'	1.5994	0.3996	35	140	57°50'	1.6930	0.4676	36	147	58°54'	1.7125	0.4835	

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_i	K_1	K_2
0.0721	1	1	3°56'				3	3	8°42'	0.3025			4	4	9°47'	0.3393		
	6	7	12°12'	0.4226			9	12	16°38'	0.5836			10	14	18°03'	0.6197		
	12	19	26°28'	0.6993			15	27	25°14'	0.8526			16	30	26°19'	0.8367		
	18	37	28°44'	0.9615			21	48	33°30'	1.1039			22	52	31°35'	1.1373		
	23	60	37°00'	1.2036			26	74	41°46'	1.3322			27	79	42°51'	1.3302		
	28	88	45°16'	1.4208			31	105	50°02'	1.5328	0.3577		32	111	51°07'	1.5563	0.3733	
	33	121	53°32'	1.6084	0.4056	35	140	58°18'	1.7016	0.4745		35	146	59°23'	1.7212	0.4907		
0.0727	1	1	3°58'				3	3	8°47'	0.3054			4	4	9°52'	0.3427		
	6	7	12°18'	0.4261			9	12	17°07'	0.5886			10	11	18°13'	0.6217		
	12	19	26°38'	0.7048			15	27	25°27'	0.8594			16	30	26°32'	0.8331		
	18	37	28°58'	0.9686			21	48	33°47'	1.1121			22	52	34°52'	1.1463		
	23	60	37°18'	1.2120			26	74	42°07'	1.3413			27	79	43°12'	1.3691		
	28	88	45°38'	1.4298			31	105	50°27'	1.5421	0.3633		31	110	51°32'	1.5659	0.3779	
	33	121	53°58'	1.6173	0.4117	35	140	58°47'	1.7104	0.4817		35	145	59°52'	1.7297	0.4980		
0.0732	1	1	4°00'				3	3	8°51'	0.3077			4	4	9°57'	0.3456		
	6	7	12°24'	0.4295			9	12	17°15'	0.5931			10	14	18°21'	0.6296		
	12	19	20°48'	0.7102			15	27	25°39'	0.8657			16	30	26°45'	0.9002		
	18	37	29°12'	0.9757			21	48	34°03'	1.1193			22	52	35°09'	1.1514		
	23	60	37°36'	1.2203			26	74	42°27'	1.3499			27	79	43°33'	1.3780		
	28	88	46°00'	1.4387			31	105	50°51'	1.5510	0.3687		31	110	51°57'	1.5744	0.3837	
	33	121	54°24'	1.6232	0.4179	35	140	59°15'	1.7188	0.4887		35	145	60°21'	1.7381	0.5053		
0.0738	1	1	4°02'				3	3	8°55'	0.3100			4	4	10°02'	0.3481		
	6	7	12°30'	0.4329			9	12	17°23'	0.5975			10	14	18°30'	0.6346		
	12	19	20°58'	0.7156			15	27	25°51'	0.8720			16	30	26°58'	0.9069		
	18	37	29°26'	0.9228			21	48	34°19'	1.1275			22	52	35°26'	1.1595		
	23	60	37°54'	1.2286			26	74	42°47'	1.3585			27	79	43°54'	1.3868		
	28	88	46°22'	1.4475			31	105	51°15'	1.5598	0.3741		31	110	52°22'	1.5839	0.3894	
	33	121	54°50'	1.6350	0.4240	35	140	59°43'	1.7271	0.4957		35	145	60°50'	1.7434	0.5127		

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	
0.0744	1	1	4°04'			3	3	9°00'	0.3127		4	4	10°06'	0.3507		
	6	7	12°36'	0.4363		9	12	17°32'	0.6025		10	14	18°38'	0.6290		
	12	19	21°08'	0.7211		15	27	26°04'	0.8788		16	30	27°10'	0.9132		
	18	37	29°40'	0.9899		21	48	34°36'	1.1357		22	52	35°42'	1.1671		
	23	60	38°12'	1.2368		26	74	43°08'	1.3674		27	79	44°14'	1.3952		
	28	88	46°44'	1.4553		31	105	51°40'	1.5688	0.3798		110	110	52°46'	1.5924	0.3949
	33	121	55°16'	1.6436	0.4302	35	140	60°12'	1.7355	0.5030		145	145	61°18'	1.7543	0.5198
	0.0750	1	1	4°05'			3	3	9°03'	0.3146		4	4	10°10'	0.3530	
		6	7	12°41'	0.4391		9	12	17°39'	0.6064		10	14	18°46'	0.6434	
		12	19	21°17'	0.7260		15	27	26°15'	0.8846		16	30	27°22'	0.9194	
18		37	29°53'	0.9965		21	48	34°51'	1.1429		22	52	35°58'	1.1746		
23		60	38°29'	1.2446		26	74	43°27'	1.3754		27	79	44°34'	1.4035		
28		88	47°05'	1.4647		31	105	52°03'	1.5771	0.3850		110	110	53°10'	1.6008	0.4005
32		120	55°41'	1.6519	0.4362	35	140	60°39'	1.7433	0.5099		145	145	61°46'	1.7621	0.5269
0.0756		1	1	4°07'			3	3	9°07'	0.3169		4	4	10°15'	0.3559	
		6	7	12°47'	0.4425		9	12	17°47'	0.6108		10	14	18°55'	0.6481	
		12	19	21°27'	0.7314		15	27	26°27'	0.8908		16	30	27°35'	0.9261	
	18	37	30°07'	1.0035		21	48	35°07'	1.1505		22	52	36°15'	1.1826		
	23	60	38°47'	1.2528		26	74	43°47'	1.3839		27	79	44°55'	1.4122		
	28	88	47°27'	1.4734		31	105	52°27'	1.5856	0.3905		110	110	53°35'	1.6091	0.4063
	32	120	56°07'	1.6603	0.4425	35	140	61°07'	1.7512	0.5170		145	145	62°15'	1.7700	0.5344
	0.0761	1	1	4°09'			3	3	9°12'	0.3198		4	4	10°20'	0.3523	
		6	7	12°53'	0.4459		9	12	17°56'	0.6158		10	14	19°04'	0.6533	
		12	19	21°37'	0.7368		15	27	26°40'	0.8976		16	30	27°48'	0.9328	
18		37	30°21'	1.0106		21	48	35°24'	1.1586		22	52	36°32'	1.1906		
23		60	39°05'	1.2609		26	74	44°08'	1.3927		27	79	45°16'	1.4208		
28		88	47°49'	1.4820		31	105	52°52'	1.5945	0.3963		110	110	54°00'	1.6180	0.4122
32		120	56°33'	1.6687	0.4488	35	140	61°36'	1.7593	0.5244		145	145	62°44'	1.7778	0.5419

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	
0.0767	1	1	4°11'			3	3	9°16'	0.3221		4	4	10°25'	0.3616		
	6	7	12°59'	0.4493		9	12	18°04'	0.6202		10	14	19°13'	0.6583		
	12	19	21°47'	0.7422		15	27	26°52'	0.9038		16	30	28°01'	0.9395		
	18	37	30°35'	1.0176		21	48	35°40'	1.1661		22	52	36°49'	1.1985		
	23	60	39°23'	1.2690		26	74	44°28'	1.4010		27	79	45°37'	1.4284		
	28	88	48°11'	1.4906	0.3338	31	105	53°16'	1.6029	0.4019	31	110	54°25'	1.6265	0.4181	
	32	120	56°59'	1.6770	0.4551	34	139	62°04'	1.7670	0.5316	35	145	63°13'	1.7854	0.5494	
	0.0773	1	1	4°13'			3	3	9°20'	0.3244		4	4	10°30'	0.3635	
		6	7	13°05'	0.4527		9	12	18°12'	0.6247		10	14	19°22'	0.6632	
		12	19	21°57'	0.7476		15	27	27°04'	0.9101		10	30	28°14'	0.9461	
18		37	30°49'	1.0246		21	48	35°56'	1.1737		22	52	37°06'	1.2064		
23		60	39°41'	1.2771		26	74	44°48'	1.4093		27	79	45°58'	1.4379		
28		88	48°33'	1.4991	0.3380	30	104	53°40'	1.6112	0.4075	31	110	54°50'	1.6350	0.4240	
32		120	57°25'	1.6852	0.4615	34	138	62°32'	1.7746	0.5388	35	145	63°42'	1.7930	0.5569	
0.0779		1	1	4°15'			3	3	9°25'	0.3272		4	4	10°34'	0.3668	
		6	7	13°11'	0.4561		9	12	18°21'	0.6296		10	14	19°30'	0.6676	
		12	19	22°07'	0.7530		15	27	27°17'	0.9168		16	30	28°26'	0.9523	
	18	37	31°03'	1.0316		21	48	36°13'	1.1817		22	52	37°22'	1.2138		
	23	60	39°59'	1.2851		26	74	45°09'	1.4170		27	79	46°18'	1.4459		
	28	88	48°55'	1.5075	0.3428	30	104	54°05'	1.6197	0.4134	31	110	55°14'	1.6430	0.4298	
	32	120	57°51'	1.6933	0.4679	34	138	63°01'	1.7323	0.5463	35	145	64°10'	1.8001	0.5643	
	0.0785	1	1	4°17'			3	3	9°29'	0.3295		4	4	10°39'	0.3696	
		6	7	13°17'	0.4595		9	12	18°29'	0.6341		10	14	19°39'	0.6725	
		12	19	22°17'	0.7584		15	27	27°29'	0.9230		16	30	28°39'	0.9589	
18		37	31°17'	1.0385		21	48	36°29'	1.1892		22	52	37°39'	1.2217		
23		60	40°17'	1.2931		26	74	45°29'	1.4261		27	79	46°39'	1.4543		
28		88	49°17'	1.5159	0.3477	30	104	54°29'	1.6279	0.4191	31	110	55°39'	1.6512	0.4358	
32		120	58°17'	1.7013	0.4743	34	138	63°29'	1.7896	0.5535	35	145	64°39'	1.8074	0.5719	

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	
0.0790	1	1	4°18'			3	3	9°32'	0.3312		4	4	10°43'	0.3719		
	6	7	13°22'	0.4624		9	12	18°36'	0.6379		10	14	19°47'	0.6769		
	12	19	22°26'	0.7632		15	27	27°40'	0.9287		16	30	28°51'	0.9650		
	18	37	31°30'	1.0450		21	48	36°44'	1.1962		22	52	37°55'	1.2290		
	23	60	40°34'	1.3007		26	74	45°48'	1.4338		27	79	46°59'	1.4623		
	28	88	49°38'	1.5238	0.3523	30	104	54°52'	1.6356	0.4245	31	110	56°03'	1.6591	0.4415	
	32	120	58°42'	1.7089	0.4805	34	138	63°56'	1.7966	0.5606	35	145	65°07'	1.8143	0.5792	
	0.0796	1	1	4°20'			3	3	9°37'	0.3341		4	4	10°48'	0.3748	
		6	7	13°28'	0.4658		9	12	18°45'	0.6429		10	14	19°56'	0.6819	
		12	19	22°36'	0.7686		15	27	27°53'	0.9353		16	30	29°04'	0.9717	
18		37	31°44'	1.0519		21	48	37°01'	1.2041		21	51	38°12'	1.2368		
23		60	40°52'	1.3086		26	74	46°09'	1.4423		26	77	47°20'	1.4706		
28		88	50°00'	1.5321	0.3572	30	104	55°17'	1.6440	0.4305	31	108	56°28'	1.6671	0.4476	
32		120	59°08'	1.7167	0.4870	34	138	64°25'	1.8039	0.5682	34	142	65°36'	1.8214	0.5869	
0.0802		1	1	4°22'			3	3	9°41'	0.3364		4	4	10°53'	0.3776	
		6	7	13°34'	0.4692		9	12	18°53'	0.6473		10	14	20°05'	0.6868	
		12	19	22°46'	0.7740		15	27	28°05'	0.9415		16	30	29°17'	0.9783	
	18	37	31°58'	1.0589		21	48	37°17'	1.2115		21	51	38°29'	1.2446		
	23	60	41°10'	1.3165		26	74	46°29'	1.4503		26	77	47°41'	1.4789		
	28	88	50°22'	1.5403	0.3621	30	104	55°41'	1.6519	0.4362	31	108	56°53'	1.6751	0.4537	
	32	120	59°34'	1.7244	0.4935	34	138	64°53'	1.8109	0.5755	34	142	66°05'	1.8293	0.6946	
	0.0808	1	1	4°24'			3	3	9°45'	0.3387		4	4	10°58'	0.3805	
		6	7	13°40'	0.4725		9	12	19°01'	0.6517		10	14	20°14'	0.6917	
		12	19	22°56'	0.7793		15	27	28°17'	0.9477		16	30	29°30'	0.9848	
18		37	32°12'	1.0658		21	48	37°33'	1.2189		21	51	38°46'	1.2523		
23		60	41°23'	1.3244		26	74	46°49'	1.4583		26	77	48°02'	1.4871	0.3313	
28		88	50°44'	1.5484	0.3671	30	104	56°05'	1.6597	0.4420	31	108	57°18'	1.6830	0.4598	
32		120	60°00'	1.7321	0.5000	34	138	65°21'	1.8177	0.5829	34	142	66°34'	1.8350	0.6023	

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	ν_i	K_i	K_1	N	ΣN	ν_i	K_i	K_1	N	ΣN	ν_i	K_i	K_1
0.0837	1	1	4°33'			3	3	10°06'	0.3507	0.3936	4	4	11°21'		0.3936
	6	7	14°09'	0.4889		9	12	19°42'	0.6742	0.7151	10	14	20°57'		0.7151
	12	19	23°45'	0.8055		15	27	29°18'	0.9739	1.0166	16	30	30°33'		1.0166
	18	37	33°21'	1.0995		20	47	38°54'	1.2559	1.2896	21	51	40°09'		1.2896
	23	60	42°57'	1.3627		26	73	48°30'	1.4979	0.3374	26	77	49°45'		0.3539
	27	87	52°33'	1.5878	0.3919	30	103	58°06'	1.6979	0.4716	30	107	59°21'		0.4902
	31	118	62°09'	1.7683	0.5328	33	136	67°42'		0.6205	33	140	68°57'		0.6408
0.0843	1	1	4°35'			3	3	10°10'	0.3530	0.3965	4	4	11°26'		0.3965
	6	7	14°15'	0.4923		9	12	19°50'	0.6786	0.7200	10	14	21°06'		0.7200
	12	19	23°55'	0.8108		15	27	29°30'	0.9848	1.0231	16	30	30°46'		1.0231
	18	37	33°35'	1.1063		20	47	39°10'	1.2632	1.2971	21	51	40°26'		1.2971
	23	60	43°15'	1.3704		26	73	48°50'	1.5056	0.3418	26	77	50°06'		0.3586
	27	87	52°55'	1.5955	0.3970	30	103	58°30'	1.7053	0.4775	30	107	59°46'		0.4965
	31	118	62°35'	1.7754	0.5395	33	136	68°10'		0.6281	33	140	69°26'		0.6487
0.0848	1	1	4°37'			3	3	10°14'	0.3553	0.3987	4	4	11°30'		0.3987
	6	7	14°21'	0.4957		9	12	19°58'	0.6829	0.7243	10	14	21°14'		0.7243
	12	19	24°05'	0.8161		15	27	29°42'	0.9909	1.0291	16	30	30°58'		1.0291
	18	37	33°49'	1.1131		20	47	39°26'	1.2704	1.3042	21	51	40°42'		1.3042
	23	60	43°33'	1.3780		26	73	49°10'	1.5132	0.3461	26	77	50°26'		0.3639
	27	87	53°17'	1.6032	0.4021	30	103	58°54'	1.7125	0.4835	30	107	60°10'		0.5025
	31	118	63°01'	1.7823	0.5463	33	136	68°38'		0.6357	33	140	69°54'		0.6563
0.0854	1	1	4°39'			3	3	10°19'	0.3582	0.4016	4	4	11°35'		0.4016
	6	7	14°27'	0.4991		9	12	20°07'	0.6879	0.7292	10	14	21°23'		0.7292
	12	19	24°15'	0.8214		15	27	29°55'	0.9975	1.0356	16	30	31°11'		1.0356
	18	37	34°03'	1.1198		20	47	39°43'	1.2780	1.3117	21	51	40°59'		1.3117
	23	60	43°51'	1.3855		26	73	49°31'	1.5212	0.3508	26	77	50°47'		0.3678
	27	87	53°39'	1.6108	0.4073	30	103	59°19'	1.7200	0.4597	30	107	60°35'		0.5088
	31	118	63°27'	1.7891	0.5530	33	136	69°07'		0.6435	33	140	70°23'		0.6643

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.0860	1	1	4°41'			3	3	10°23'	0.3605		4	4	11°40'	0.4044	
	6	7	14°33'	0.5025		9	12	20°15'	0.6922		10	14	21°32'	0.7341	
	12	19	24°25'	0.8267		15	27	30°07'	1.0035		16	30	31°24'	1.0420	
	18	37	34°17'	1.1266		20	47	39°53'	1.2851		21	51	41°16'	1.3191	
	23	60	44°09'	1.3931		26	73	49°51'	1.5287	0.3552	26	77	51°08'	1.5572	0.3725
	27	87	54°01'	1.6184	0.4125	30	103	59°43'	1.7271	0.4957	30	107	61°00'	1.7492	0.5152
	31	118	63°53'	1.7958	0.5598	33	136	69°35'		0.6512	33	140	70°52'		0.5722
0.0866	1	2	4°43'			3	3	10°27'	0.3628		4	4	11°45'	0.4073	
	6	7	14°39'	0.5058		9	12	20°23'	0.6966		10	14	21°41'	0.7390	
	12	19	24°35'	0.8320		15	27	30°19'	1.0096		16	30	31°37'	1.0485	
	18	37	34°31'	1.1333		20	47	40°15'	1.2922		21	51	41°33'	1.3265	
	23	60	44°27'	1.4006		26	73	50°11'	1.5362	0.3597	26	77	51°29'	1.5649	0.3773
	27	87	54°23'	1.6259	0.4176	30	103	60°07'	1.7341	0.5018	30	107	61°25'	1.7562	0.5216
	31	118	64°19'	1.8024	0.5666	33	136	70°03'		0.6588	33	140	71°21'		0.6802
0.0872	1	1	4°45'	0.1656		3	3	10°32'	0.3656		4	4	11°50'	0.4101	
	6	7	14°45'	0.5092		9	12	20°32'	0.7015		10	14	21°50'	0.7438	
	12	19	24°45'	0.8373		15	27	30°32'	1.0161		16	30	31°50'	1.0549	
	18	37	34°45'	1.1400		20	47	40°32'	1.2998		21	51	41°50'	1.3339	
	23	60	44°45'	1.4080		26	73	50°32'	1.5440	0.3644	26	77	51°50'	1.5724	0.3820
	27	87	54°45'	1.6333	0.4229	30	103	60°32'	1.7413	0.5081	30	107	61°50'	1.7632	0.5280
	31	118	64°45'	1.8089	0.5734	33	136	70°32'		0.6667	33	140	71°50'		0.6882
0.0877	1	1	4°47'			3	3	10°36'	0.3679		4	4	11°55'	0.4139	
	6	7	14°51'	0.5126		9	12	20°40'	0.7059		10	14	21°59'	0.7487	
	12	19	24°55'	0.8426		15	27	30°44'	1.0221		16	30	32°03'	1.0613	
	18	37	34°59'	1.1467		20	47	40°48'	1.3868		21	51	42°07'	1.3413	
	23	60	45°03'	1.4154		26	73	50°52'	1.5514	0.3689	26	77	52°11'	1.5800	0.3869
	27	87	55°07'	1.6406	0.4281	30	103	60°56'	1.7481	0.5142	30	107	62°15'	1.7700	0.5344
	31	118	65°11'	1.8153	0.5803	32	135	71°00'		0.6744	33	140	72°19'		0.6962

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	N	ΣN	γ_4	K_1	K_2		
0.0883	1	1	4°49'			3	3	10°40'	0.3702		4	4	11°53'	0.4153		4	4	12°03'	0.4175			
	6	7	14°57'	0.5160		9	12	20°48'	0.7102		10	14	22°07'	0.7530		10	14	22°15'	0.7573			
	12	19	25°05'	0.8479		15	27	30°56'	1.0281		16	30	32°15'	1.0672		16	30	32°27'	1.0731			
	18	37	35°13'	1.1533		20	47	41°04'	1.3139		21	51	42°23'	1.3482		21	51	42°39'	1.3550			
	23	60	45°21'	1.4228		25	72	51°12'	1.5587	0.3734	26	77	52°31'	1.5871	0.3915	26	77	52°51'	1.5941	0.3961		
	27	87	55°29'	1.6479	0.4334	29	101	61°20'	1.7549	0.5203	30	107	62°39'	1.7764	0.5406	30	107	63°03'	1.7828	0.5468		
	31	118	65°37'	1.8216	0.5872	32	133	71°28'		0.6821	32	139	72°47'		0.7040	32	139	73°15'		0.7118		
	0.0889	1	1	4°50'			3	3	10°43'	0.3719		4	4	12°03'	0.4175		4	4	12°03'	0.4175		
		6	7	15°02'	0.5188		9	12	20°55'	0.7140		10	14	22°15'	0.7573		10	14	22°15'	0.7573		
		12	19	25°14'	0.8526		15	27	31°07'	1.0336		16	30	32°27'	1.0731		16	30	32°27'	1.0731		
18		37	35°26'	1.1595		20	47	41°19'	1.3204		21	51	42°39'	1.3550		21	51	42°39'	1.3550			
23		60	45°38'	1.4298		25	72	51°31'	1.5656	0.3777	26	77	52°51'	1.5941	0.3961	26	77	52°51'	1.5941	0.3961		
27		87	55°50'	1.6548	0.4384	29	101	61°43'	1.7612	0.5262	30	107	63°03'	1.7828	0.5468	30	107	63°03'	1.7828	0.5468		
31		118	66°02'	1.8276	0.5938	32	133	71°55'		0.6396	32	139	73°15'		0.7118	32	139	73°15'		0.7118		
0.0895		1	1	4°52'			3	3	10°48'	0.3748		4	4	12°03'	0.4204		4	4	12°03'	0.4204		
		6	7	15°08'	0.5221		9	12	21°04'	0.7189		10	14	22°24'	0.7621		10	14	22°24'	0.7621		
		12	19	25°24'	0.8579		15	27	31°20'	1.0400		16	30	32°40'	1.0795		16	30	32°40'	1.0795		
	17	36	35°40'	1.1661		20	47	41°36'	1.3279		21	51	42°56'	1.3623		21	51	42°56'	1.3623			
	23	59	45°56'	1.4371		25	72	51°52'	1.5732	0.3825	26	77	53°12'	1.6015	0.4010	26	77	53°12'	1.6015	0.4010		
	27	86	56°12'	1.6620	0.4437	29	101	62°08'	1.7681	0.5326	30	107	63°23'	1.7893	0.5533	30	107	63°23'	1.7893	0.5533		
	30	116	66°28'	1.8328	0.6007	32	133	72°24'		0.6976	32	139	73°44'		0.7199	32	139	73°44'		0.7199		
	0.0801	1	1	4°54'			3	3	10°52'	0.3770		4	4	12°13'	0.4232		4	4	12°13'	0.4232		
		6	7	15°14'	0.5255		9	12	21°12'	0.7232		10	14	22°33'	0.7670		10	14	22°33'	0.7670		
		12	19	25°34'	0.8631		15	27	31°32'	1.0460		16	30	32°53'	1.0859		16	30	32°53'	1.0859		
17		36	35°54'	1.1727		20	47	41°52'	1.3348		21	51	43°13'	1.3696		21	51	43°13'	1.3696			
23		59	46°14'	1.4443		25	72	52°12'	1.5803	0.3871	26	77	53°33'	1.6058	0.4050	26	77	53°33'	1.6058	0.4050		
27		86	56°34'	1.6691	0.4490	29	101	62°32'	1.7716	0.5388	30	107	63°53'	1.7958	0.5583	30	107	63°53'	1.7958	0.5583		
30		116	66°54'	1.8396	0.6077	32	133	72°52'		0.7054	32	139	74°13'		0.7269	32	139	74°13'		0.7269		

(续)

$\frac{a+b}{2R_1}$	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	N	ΣN	ν_1	K_1	K_2	
0.0930	1	1	5°04'			3	3	11°14'	0.3256		4	4	12°37'	0.4359		
	6	7	15°44'	0.5423		9	12	21°54'	0.7460		10	14	23°17'	0.7906		
	12	19	26°24'	0.8893		15	27	32°34'	1.0786		16	30	33°57'	1.1169		
	17	36	37°04'	1.2055		20	47	43°14'	1.3699		21	51	44°37'	1.4047		
	22	58	47°44'	1.4800		25	72	53°54'	1.6160	0.4108	26	77	55°17'	1.6440	0.4305	
	27	85	58°24'	1.7035	0.4760	29	101	64°34'	1.8052	0.5705	29	106	65°57'	1.8261	0.5925	
	30	115	69°04'		0.6427	31	132	75°14'		0.7451	32	138	76°37'		0.7685	
	0.0935	1	1	5°08'			3	3	11°18'	0.3919		4	4	12°42'	0.4397	
		6	7	15°50'	0.5457		9	12	22°02'	0.7503		10	14	23°26'	0.7954	
		12	19	26°34'	0.8945		15	27	32°46'	1.0824		16	30	34°10'	1.1232	
17		36	37°18'	1.2120		20	47	43°30'	1.3767		21	51	44°54'	1.4117		
22		58	48°02'	1.4871	0.3313	25	72	54°14'	1.6228	0.4155	26	77	55°38'	1.6509	0.4355	
27		85	58°46'	1.7101	0.4815	29	101	64°58'	1.8121	0.5769	29	106	66°22'	1.8323	0.5991	
30		115	69°30'		0.6498	31	132	75°42'		0.7530	32	138	77°06'		0.7768	
0.0941		1	1	5°08'			3	3	11°22'	0.3942		4	4	12°47'	0.4425	
		6	7	15°56'	0.5490		9	12	22°10'	0.7546		10	14	23°35'	0.8002	
		12	19	26°44'	0.8997		15	27	32°58'	1.0883		16	30	34°23'	1.1295	
	17	36	37°32'	1.2184		20	47	43°46'	1.3834		21	51	45°11'	1.4187		
	22	58	48°20'	1.4941	0.3352	25	72	54°34'	1.6296	0.4202	25	76	55°59'	1.6577	0.4406	
	26	84	59°08'	1.7167	0.4870	28	100	65°22'	1.8180	0.5832	29	105	66°47'	1.8380	0.6058	
	30	114	69°56'		0.6569	31	131	76°10'		0.7609	31	136	77°35'		0.7850	
	0.0947	1	1	5°09'			3	3	11°26'	0.3965		4	4	12°51'	0.4448	
		6	7	16°01'	0.5518		9	12	22°18'	0.7589		10	14	23°43'	0.8044	
		12	19	26°53'	0.9044		15	27	33°10'	1.0943		16	30	34°35'	1.1352	
17		36	37°45'	1.2244		20	47	44°02'	1.3902		21	51	45°27'	1.4253		
22		58	48°37'	1.5006	0.3389	25	72	54°54'	1.6363	0.4250	25	76	56°19'	1.6642	0.4454	
26		84	59°29'	1.7230	0.4922	28	100	65°46'	1.8238	0.5896	29	105	67°11'	1.8421	0.6122	
30		114	70°21'		0.6637	31	131	76°38'		0.7688	31	136	78°03'		0.7929	

(續)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.0953	1	1	5°11'			3	3	11°30'	0.3987		4	4	12°56'	0.4476	
	6	7	16°07'	0.5552		9	12	22°26'	0.7632		10	14	23°52'	0.8092	
	12	19	27°03'	0.9095		15	27	33°22'	1.1000		16	30	34°48'	1.1414	
	17	36	37°59'	1.2309		20	47	44°18'	1.3968		21	51	45°44'	1.4322	
	22	58	48°55'	1.5075	0.3428	25	72	55°14'	1.6430	0.4298	25	76	56°40'	1.6710	0.4505
	26	84	59°51'	1.7292	0.4977	28	100	66°10'	1.8294	0.5959	29	105	67°36'	1.8989	0.6189
	30	114	70°47'	0.6709	0.6709	31	131	77°06'		0.7768	31	136	78°22'		0.8012
0.0953	1	1	5°13'			3	3	11°34'	0.4010		4	4	13°00'	0.4499	
	6	7	16°13'	0.5585		9	12	22°34'	0.7675		10	14	24°00'	0.8135	
	12	19	27°13'	0.9147		15	27	33°34'	1.1058		16	30	35°00'	1.1472	
	17	36	38°13'	1.2373		20	47	44°34'	1.4035		21	51	46°00'	1.4387	
	22	58	49°13'	1.5144	0.3468	25	72	55°34'	1.6496	0.4346	25	76	57°00'	1.6773	0.4551
	26	84	60°13'	1.7358	0.5033	28	100	66°34'	1.8350	0.6023	29	105	68°00'	1.8989	0.6254
	30	114	71°13'	0.6780	0.6780	31	131	77°34'		0.7847	31	136	79°00'		0.8092
0.0964	1	1	5°15'			3	3	11°39'	0.4039		4	4	13°05'	0.4527	
	6	7	16°19'	0.5619		9	12	22°43'	0.7723		10	14	24°09'	0.8183	
	12	19	27°23'	0.9199		15	27	33°47'	1.1121		16	30	35°13'	1.1533	
	17	36	38°27'	1.2437		20	47	44°51'	1.4105		21	51	46°17'	1.4455	
	22	58	49°31'	1.5212	0.3508	25	72	55°55'	1.6564	0.4396	25	76	57°21'	1.6840	0.4605
	26	84	60°35'	1.7421	0.5088	28	100	66°59'	1.8408	0.6090	29	105	68°25'	1.8989	0.6322
	30	114	71°39'	0.6852	0.6852	31	131	78°03'		0.7929	31	136	79°29'		0.8175
0.0970	1	1	5°17'			3	3	11°43'	0.4061		4	4	13°10'	0.4556	
	6	7	16°25'	0.5652		9	12	22°51'	0.7766		10	14	24°18'	0.8230	
	12	19	27°33'	0.9250		15	27	33°59'	1.1179		16	30	35°26'	1.1595	
	17	36	38°41'	1.2500		20	47	45°07'	1.4171		21	51	46°34'	1.4523	
	22	58	49°49'	1.5280	0.3548	25	72	56°15'	1.6629	0.4444	25	76	57°42'	1.6905	0.4657
	26	84	60°57'	1.7484	0.5144	28	100	67°23'	1.8462	0.6154	29	105	68°50'	1.8989	0.6389
	29	113	72°05'	0.6924	0.6924	31	131	78°31'		0.8009	31	136	79°58'		0.8258

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	
0.0976	1	1	5°19'			3	3	11°47'	0.4084		4	4	13°15'	0.4534		
	6	7	16°31'	0.5686		9	12	22°59'	0.7809		10	14	24°27'	0.8278		
	12	19	27°43'	0.9302		15	27	34°11'	1.1237		16	30	35°39'	1.1637		
	17	36	38°55'	1.2564		20	47	45°23'	1.4236		21	51	46°51'	1.4591		
	22	58	50°07'	1.5347	0.3588	25	72	56°35'	1.6694	0.4493	25	76	58°03'	1.6970	0.4708	
	26	84	61°19'	1.7546	0.5200	28	100	67°47'		0.6219	29	105	69°15'		0.6457	
	29	113	72°31'		0.6996	30	130	78°59'		0.8089	31	136	80°27'		0.8341	
	0.0982	1	1	5°21'			3	3	11°52'	0.4113		4	4	13°20'	0.4612	
		6	7	16°37'	0.5719		9	12	23°08'	0.7857		10	14	24°36'	0.8326	
12		19	27°53'	0.9353		15	27	34°24'	1.1299		16	30	35°52'	1.1710		
17		36	39°09'	1.2627		20	47	45°40'	1.4306		21	51	47°08'	1.4630		
22		58	50°25'	1.5414	0.3628	25	72	56°56'	1.6761	0.4544	25	76	58°24'	1.7035	0.4760	
26		84	61°41'	1.7607	0.5257	28	100	68°12'		0.6286	29	105	69°40'		0.6525	
29		113	72°57'		0.7068	30	130	79°28'		0.8172	31	136	80°56'		0.8421	
0.0987		1	1	5°23'			3	3	11°56'	0.4135		4	4	13°25'	0.4641	
		6	7	16°43'	0.5753		9	12	23°16'	0.7900		10	14	24°45'	0.8273	
	12	19	28°03'	0.9405		15	27	34°36'	1.1357		16	30	36°05'	1.1779		
	17	36	39°23'	1.2690		20	47	45°56'	1.4371		21	51	47°25'	1.4726		
	22	58	50°43'	1.5480	0.3668	25	72	57°16'	1.6824	0.4593	25	76	58°45'	1.7098	0.4812	
	26	84	62°03'	1.7667	0.5313	28	100	68°36'		0.6351	29	105	70°05'		0.6594	
	29	113	73°23'		0.7140	30	130	79°56'		0.8252	31	136	81°25'		0.8507	
	0.0993	1	1	5°25'			3	3	12°00'	0.4158		4	4	13°29'	0.4663	
		6	7	16°49'	0.5786		9	12	23°24'	0.7943		10	14	24°53'	0.8415	
12		19	28°13'	0.9456		15	27	34°48'	1.1414		16	30	36°17'	1.1836		
17		36	39°37'	1.2753		20	47	46°12'	1.4485		21	51	47°41'	1.4789		
22		58	51°01'	1.5547	0.3709	24	71	57°36'	1.6887	0.4642	25	76	59°05'	1.7158	0.4862	
26		84	62°25'	1.7727	0.5370	28	99	69°00'		0.6416	28	104	70°29'		0.6659	
29		113	73°49'		0.7213	30	129	80°24'		0.8332	31	135	81°53'		0.8588	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	
0.0999	1	1	5°27'			3	3	12°04'	0.4181		4	4	13°34'	0.4692		
	6	4	16°55'	0.5820		9	12	23°32'	0.7986		10	14	25°02'	0.8463		
	12	19	28°23'	0.9507		15	27	35°00'	1.1472		16	30	36°30'	1.1896		
	17	36	39°51'	1.2816		20	47	46°28'	1.4499		21	51	47°58'	1.4855		
	22	58	51°19'	1.5612	0.3750	24	71	57°56'	1.6949	0.4691	25	76	59°26'	1.7221	0.4915	
	26	84	62°47'	1.7786	0.5426	28	99	69°24'		0.6482	28	104	70°54'	0.6728	0.6728	
	29	113	74°15'		0.7286	30	129	80°52'		0.8413	31	135	82°22'	0.8672	0.8672	
	0.1005	1	1	5°29'			3	3	12°09'	0.4209		4	4	13°39'	0.4720	
		6	7	17°01'	0.5853		9	12	23°41'	0.8034		10	14	25°11'	0.8510	
12		19	28°33'	0.9559		15	27	35°13'	1.1533		16	30	36°43'	1.1887		
17		36	40°05'	1.2878		20	47	46°45'	1.4567		21	51	48°15'	1.4921	0.3341	
22		58	51°37'	1.5677	0.3791	24	71	58°17'	1.7013	0.4643	25	76	59°47'	1.7283	0.3967	
26		84	63°09'	1.7844	0.5483	28	99	69°49'		0.6550	28	104	71°19'	0.6797	0.6797	
29		113	74°41'		0.7359	30	129	81°21'		0.8496	31	135	82°51'	0.8755	0.8755	
0.1011		1	1	5°31'			3	3	12°13'	0.4232		4	4	13°44'	0.4748	
		6	7	17°07'	0.5886		9	12	23°49'	0.8076		10	14	25°20'	0.8558	
	12	19	28°43'	0.9610		15	27	35°25'	1.1590		16	30	36°56'	1.2018		
	17	36	40°19'	1.2940		20	47	47°01'	1.4631		21	51	48°32'	1.4987	0.3378	
	22	58	51°55'	1.5742	0.3832	24	71	58°37'	1.7074	0.4792	25	76	60°08'	1.7344	0.5020	
	26	84	63°31'	1.7901	0.5541	28	99	70°13'		0.6615	28	104	71°44'	0.6866	0.6866	
	29	113	75°07'		0.7432	30	129	81°49'		0.8577	31	135	83°20'	0.8839	0.8839	
	0.1016	1	1	5°33'			3	3	12°17'	0.4256		4	4	13°49'	0.4776	
		6	4	17°13'	0.5920		9	12	23°57'	0.8119		10	14	25°29'	0.8605	
12		19	28°53'	0.9661		15	27	35°37'	1.1647		16	30	37°09'	1.2078		
17		36	40°33'	1.3002		20	47	47°17'	1.4694		21	51	48°49'	1.5052	0.3415	
22		58	52°13'	1.5807	0.3873	24	71	58°57'	1.7134	0.4842	25	76	60°29'	1.7404	0.5073	
26		84	63°53'	1.7958	0.5598	28	99	70°37'		0.6681	28	104	72°09'	0.6935	0.6935	
29		113	75°33'		0.7505	30	129	82°17'		0.8657	30	134	83°49'	0.8923	0.8923	

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.1219	1	1	6°39'	0.7053		3	3	14°44'	0.5086		4	4	16°35'	0.5708	
	5	6	20°39'	1.1371		9	12	28°44'	0.9615		10	14	30°35'	1.0176	
	12	18	34°39'	1.5014		15	27	42°44'	1.3572		15	29	44°35'	1.4039	0.4787
	17	35	48°39'	1.7764	0.3393	19	46	56°44'	1.6723	0.4515	29	49	58°35'	1.7068	0.7097
	21	56	62°39'	1.7764	0.5406	23	69	70°44'		0.6700	23	72	72°35'		0.9404
	24	80	76°39'		25	94	84°44'		0.9082	25	97	86°35'			
0.1227	1	1	6°41'	0.7097		3	3	14°50'	0.5120		4	4	16°41'	0.5742	
	5	6	20°47'	1.1438		9	12	28°56'	0.9676		10	14	30°47'	1.0236	
	12	18	34°53'	1.5090		15	27	43°02'	1.3648		15	29	44°53'	1.4113	
	17	35	48°59'	1.7833	0.3437	19	46	57°08'	1.6799	0.4573	20	49	58°59'	1.7140	0.4847
	21	56	63°05'		0.5473	23	69	71°14'		0.6783	23	72	73°05'		0.7099
	24	80	77°11'		25	94	85°20'		0.9186	25	97	87°11'		0.9509	
0.1236	1	1	6°44'	0.7146		3	3	14°56'	0.5154		4	4	16°48'	0.5781	
	5	6	20°56'	1.1510		9	12	29°08'	0.9737		10	14	31°00'	1.0301	
	11	17	35°08'	1.5170		15	27	43°20'	1.3725		15	29	45°12'	1.4191	
	17	34	49°20'	1.7904	0.3463	19	46	57°32'	1.6674	0.4632	20	49	59°24'	1.7215	0.4910
	21	55	63°32'		0.5543	23	69	71°44'		0.6866	23	72	73°36'		0.7177
	24	79	77°44'		25	94	85°56'		0.9291	25	97	87°48'		0.9616	
0.1245	1	1	6°47'	0.7195		3	3	15°03'	0.5193		4	4	16°55'	0.5820	
	5	6	21°05'	1.1581		9	12	29°21'	0.9803		10	14	31°13'	1.0366	
	11	17	35°23'	1.5250		15	27	43°39'	1.3805		15	29	45°31'	1.4269	
	17	34	49°41'	1.7973	0.3530	19	46	57°57'	1.6952	0.4693	20	49	59°49'	1.7288	0.4972
	21	55	63°59'		0.5614	22	68	72°15'		0.6951	23	72	74°07'		0.7263
	24	79	78°17'		25	93	86°33'		0.9398	24	96	88°25'		0.9723	

(23)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.1253	1	1	6°50'			3	3	15°09'	0.5227		4	4	17°03'	0.5864	
	5	6	21°14'	0.7243		9	12	29°33'	0.9864		10	14	31°27'	1.0485	
	11	17	35°38'	1.1652		15	27	43°57'	1.3881		15	29	45°51'	1.4350	
	17	34	50°02'	1.5328	0.3577	19	46	58°21'	1.7025	0.4753	20	49	60°15'	1.7364	0.5038
	21	55	64°26'	1.8042	0.5684	22	68	72°45'		0.7035	23	72	74°39'		0.7353
	23	78	78°50'		0.8063	25	93	87°09'		0.9503	24	96	89°03'		0.9834
0.1262	1	1	6°53'			3	3	15°16'	0.5266		4	4	17°10'	0.5903	
	5	6	21°23'	0.7292		9	12	29°46'	0.9829		10	14	31°40'	1.0500	
	11	17	35°53'	1.1723		15	27	44°16'	1.3960		15	29	46°10'	1.4427	
	17	34	50°23'	1.5407	0.3624	19	46	58°46'	1.7101	0.4815	20	49	60°40'	1.7436	0.5101
	20	54	64°53'	1.8109	0.5755	22	68	73°16'		0.7121	23	72	75°10'		0.7449
	23	77	79°23'		0.8158	25	93	87°46'		0.9610	24	96	89°40'		0.9912
0.1271	1	1	6°56'			3	3	15°22'	0.5300		4	4	17°17'	0.5942	
	5	6	21°32'	0.7341		9	12	29°58'	0.9890		10	14	31°53'	1.0564	
	11	17	36°08'	1.1793		15	27	44°34'	1.4035		15	29	46°29'	1.4503	
	17	34	50°44'	1.5484	0.3671	19	46	59°10'	1.7173	0.4875	20	49	61°05'	1.7506	0.5165
	20	54	65°20'	1.8175	0.5827	22	68	73°46'		0.7205	23	72	75°41'		0.7527
	23	77	79°56'		0.8252	25	93	88°22'		0.9715					
0.1279	1	1	6°59'			3	3	15°29'	0.5339		4	4	17°24'	0.5981	
	5	6	21°41'	0.7390		9	12	30°11'	1.0055		10	14	32°06'	1.0628	
	11	17	36°23'	1.1864		15	27	44°53'	1.4113		15	29	46°48'	1.4579	
	17	34	51°05'	1.5551	0.3718	19	46	59°35'	1.7247	0.4937	20	49	61°30'	1.7576	0.5223
	20	54	65°47'	1.8240	0.5898	22	68	74°17'		0.7291	23	72	76°12'		0.7615
	23	77	80°29'		0.8347	25	93	88°59'		0.9823					

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.1357	1	1	7°24'			3	3	16°25'	0.5932		4	4	18°28'	0.6335	
	5	6	23°00'	0.7815		9	12	32°01'	1.0603		10	14	34°04'	1.1203	
	11	17	38°36'	1.2478		15	27	47°37'	1.4773		15	29	49°40'	1.5245	0.3528
	16	33	54°12'	1.6221	0.4150	19	46	63°13'	1.7854	0.5494	19	48	65°16'	1.8165	0.5816
	20	53	69°48'		0.6547	22	68	78°49'		0.8061	22	70	80°52'		0.8413
	22	75	85°24'		0.9198										
0.1366	1	1	7°27'			3	3	16°31'	0.5666		4	4	18°35'	0.6374	
	5	6	23°09'	0.7863		9	12	32°13'	1.0662		10	14	34°17'	1.1266	
	11	17	38°51'	1.2546		15	27	47°55'	1.4843		15	29	49°59'	1.5217	0.3570
	16	33	54°33'	1.6292	0.4200	19	46	63°37'	1.7917	0.5556	19	48	65°41'	1.8226	0.5882
	20	53	70°15'		0.6621	22	68	79°19'		0.8146	22	70	81°23'		0.8503
	22	75	85°37'		0.9294										
0.1374	1	1	7°30'			3	3	16°38'	0.5725		4	4	18°43'	0.6418	
	5	6	23°18'	0.7911		9	12	32°26'	1.0726		10	14	34°31'	1.1333	
	11	17	39°06'	1.2614		15	27	43°14'	1.4917	0.3339	15	29	50°19'	1.5392	0.3615
	16	33	54°54'	1.6363	0.4250	19	46	64°02'	1.7381	0.5622	19	48	66°07'	1.8287	0.5951
	20	53	70°42'		0.6695	22	68	79°50'		0.8235	22	70	81°55'		0.8594
	22	75	86°30'		0.9390										
0.1383	1	1	7°33'			3	3	16°44'	0.5758		4	4	18°50'	0.6456	
	5	6	23°27'	0.7959		9	12	32°38'	1.0785		10	14	34°44'	1.1395	
	11	17	39°21'	1.2681		15	27	48°32'	1.4987	0.3378	15	29	50°38'	1.5462	0.3657
	16	33	55°15'	1.6433	0.4300	19	46	64°26'	1.8042	0.5684	19	48	66°32'	1.8346	0.6018
	20	53	71°09'		0.6769	22	68	80°20'		0.8321	22	70	82°26'		0.8683
	22	75	87°03'		0.9485										

(续)

$\frac{d+b}{2B}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2	N	ΣN	γ_4	K_1	K_2	N	ΣN	γ_5	K_1	K_2	
0.1392	1	1	7°36'	0.8007		3	3	16°51'	0.5793		4	4	18°57'	0.6495		4	4	19°07'	0.6552							
	5	6	23°36'	0.8007		9	12	32°51'	1.0819		10	14	35°15'	1.1513		10	14	35°32'	1.1624							
	11	17	39°36'	1.2748		14	26	48°51'	1.5060	0.3420	15	29	51°23'	1.5627	0.3759	15	29	51°48'	1.5717	0.3816						
	16	33	55°36'	1.6502	0.4350	19	45	64°51'	1.8104	0.5750	19	48	68°01'	1.8261	0.6176	19	48	68°01'	1.8261	0.6265						
	20	53	71°36'	0.6814	0.6814	22	67	80°51'	0.9581	0.8410	21	69	84°20'	0.8643	0.8894	21	69	84°20'	0.8643	0.8913						
	22	75	87°36'	0.9581	0.9581	22	67	81°31'	0.9709	0.8525	21	69	83°39'	0.8525	0.8894	21	69	83°39'	0.8525	0.8894						
0.1403	1	1	7°40'	0.8071		3	3	16°59'	0.5842		4	4	19°07'	0.6552		4	4	19°07'	0.6552							
	5	6	23°48'	0.8071		9	12	33°07'	1.0927		10	14	35°15'	1.1513		10	14	35°15'	1.1513							
	11	17	39°56'	1.2838		14	26	49°15'	1.5151	0.3472	15	29	51°23'	1.5627	0.3759	15	29	51°23'	1.5627	0.3759						
	16	33	56°04'	1.6594	0.4413	19	45	65°23'	1.8182	0.5835	19	48	67°31'	1.8182	0.6176	19	48	67°31'	1.8182	0.6176						
	20	53	72°12'	0.6943	0.6943	22	67	81°31'	0.9709	0.8525	21	69	83°39'	0.8525	0.8894	21	69	83°39'	0.8525	0.8894						
	22	75	88°20'	0.9709	0.9709	22	67	81°31'	0.9709	0.8525	21	69	83°39'	0.8525	0.8894	21	69	83°39'	0.8525	0.8894						
0.1415	1	1	7°44'	0.8135		3	3	17°08'	0.5892		4	4	19°16'	0.6599		4	4	19°16'	0.6599							
	5	6	24°00'	0.8135		9	12	33°24'	1.1010		10	14	35°32'	1.1624		10	14	35°32'	1.1624							
	11	17	40°16'	1.2927		14	26	49°40'	1.5246	0.3528	15	29	51°48'	1.5717	0.3816	15	29	51°48'	1.5717	0.3816						
	16	33	56°32'	1.6684	0.4486	19	45	65°56'	1.8261	0.5922	19	48	68°01'	1.8261	0.6265	19	48	68°01'	1.8261	0.6265						
	20	53	72°48'	0.7043	0.7043	21	66	82°12'	0.9837	0.8643	21	69	84°20'	0.8643	0.9013	21	69	84°20'	0.8643	0.9013						
	21	74	89°04'	0.9837	0.9837	21	66	82°12'	0.9837	0.8643	21	69	84°20'	0.8643	0.9013	21	69	84°20'	0.8643	0.9013						
0.1426	1	1	7°47'	0.8193		3	3	17°16'	0.5936		4	4	19°25'	0.6649		4	4	19°25'	0.6649							
	5	6	24°11'	0.8193		9	12	33°46'	1.1087		10	14	35°49'	1.1701		10	14	35°49'	1.1701							
	11	17	40°35'	1.3011		14	26	50°04'	1.5336	0.3581	15	29	52°13'	1.5807	0.3873	15	29	52°13'	1.5807	0.3873						
	16	33	59°59'	1.6770	0.4551	19	45	66°28'	1.8337	0.6007	19	48	68°37'	1.8337	0.6354	19	48	68°37'	1.8337	0.6354						
	20	53	73°23'	0.7140	0.7140	21	66	82°52'	0.9962	0.8758	21	69	85°01'	0.8758	0.9131	21	69	85°01'	0.8758	0.9131						
	21	74	89°47'	0.9962	0.9962	21	66	82°52'	0.9962	0.8758	21	69	85°01'	0.8758	0.9131	21	69	85°01'	0.8758	0.9131						

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.1438	1	1	7°51'			3	3	17°24'	0.5381		4	4	19°35'	0.6704	
	5	6	24°23'	0.8257		9	12	33°56'	1.1165		10	14	36°07'	1.1789	
	11	17	40°55'	1.3099		14	26	50°28'	1.5125	0.3635	15	29	52°39'	1.5890	0.3933
	16	33	57°27'	1.6858	0.4620	19	45	67°00'	1.8110	0.6093	19	48	69°11'		0.6448
	19	52	73°59'		0.7241	21	66	83°32'		0.8874	21	69	85°43'		0.9253
0.1449	1	1	7°55'			3	3	17°33'	0.6031		4	4	19°45'	0.6758	
	5	6	24°35'	0.8320		9	12	34°18'	1.1216		10	14	36°25'	1.1873	
	11	17	41°15'	1.3187		14	26	50°53'	1.5517	0.3691	15	29	53°05'	1.5990	0.3994
	16	33	57°55'	1.6946	0.4689	19	45	67°33'		0.6181	19	48	69°45'		0.6539
	19	52	74°35'		0.7342	21	66	81°13'		0.8992	21	69	86°25'		0.9375
0.1461	1	1	7°59'			3	3	17°42'	0.6081		4	4	19°54'	0.6808	
	5	6	24°47'	0.8384		9	12	34°30'	1.1328		10	14	36°42'	1.1953	
	11	17	41°35'	1.3274		14	26	51°18'	1.5609	0.3748	15	29	53°30'	1.6077	0.4052
	16	33	58°23'	1.7031	0.4758	19	45	68°06'		0.6270	19	48	70°18'		0.6829
	19	52	75°11'		0.7443	21	66	84°54'		0.9111	21	69	87°06'		0.9494
0.1472	1	1	8°03'			3	3	17°50'	0.6125		4	4	20°04'	0.6862	
	5	6	24°50'	0.8447		9	12	34°46'	1.1405		10	14	37°00'	1.2036	
	11	17	41°55'	1.3361		14	26	51°42'	1.5616	0.3802	15	29	53°56'	1.6167	0.4173
	16	33	58°51'	1.7116	0.4827	19	45	68°33'		0.6357	19	48	70°52'		0.6727
	19	52	75°47'		0.7514	21	66	85°31'		0.9227	21	69	87°49'		0.9616

(54)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.1484	1	1	8°06'			3	3	17°58'	0.6169		4	4	20°13'	0.6914	
	5	6	25°10'	0.8505		9	12	35°02'	1.1481		10	11	37°17'	1.2115	
	11	17	42°14'	1.3443		14	26	52°06'	1.5782	0.3857	15	29	54°21'	1.6252	0.4172
	16	33	59°38'	1.7197	0.4895	19	45	69°10'		0.6444	18	47	71°25'		0.6813
	19	52	76°22'		0.7643	21	66	86°14'			21	68	88°29'		0.9735
0.1495	1	1	8°10'			3	3	18°07'	0.6219		4	4	20°23'	0.6966	
	5	6	25°22'	0.8568		9	12	35°19'	1.1562		10	14	37°35'	1.2198	
	11	17	42°34'	1.3529		14	26	52°31'	1.5871	0.3915	15	29	54°47'	1.6340	0.4233
	16	33	59°46'	1.7280	0.4965	19	45	69°43'		0.6533	18	47	71°59'		0.6907
	19	52	76°58'		0.7745	21	66	86°55'		0.9452	21	68	89°11'		0.9857
0.1507	1	1	8°14'			3	3	18°15'	0.6263		4	4	20°32'	0.7015	
	5	6	25°34'	0.8631		9	12	35°35'	1.1638		10	14	37°52'	1.2277	
	11	17	42°54'	1.3614		14	26	52°55'	1.5955	0.3970	15	29	55°12'	1.6423	0.4293
	16	33	60°14'	1.7361	0.5035	19	45	70°15'		0.6621	18	47	72°32'		0.6999
	19	52	77°34'		0.7847	21	66	87°35'		0.9578	21	68	89°52'		0.9977
0.1518	1	1	8°18'			3	3	18°24'	0.6313		4	4	20°42'	0.7069	
	5	6	25°46'	0.8694		9	12	35°52'	1.1718		10	14	38°10'	1.2359	
	11	17	43°14'	1.3699		14	26	53°20'	1.6042	0.4028	15	29	55°38'	1.6509	0.4355
	16	33	60°42'	1.7441	0.5106	19	45	70°48'		0.6711	18	47	73°06'		0.7093
	19	52	78°10'		0.7949	21	66	88°16'		0.9698	21	68			

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_2}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.1530	1	1	8°22'			3	3	18°32'	0.6357		4	4	20°52'	0.7124	
	5	6	25°58'	0.8757		9	12	36°08'	1.1793		10	14	38°28'	1.2441	
	11	17	43°34'	1.3784		14	26	53°44'	1.6125	0.4885	15	29	56°04'	1.6591	0.4418
	16	33	61°10'	1.7521	0.5177	19	45	71°20'		0.6799	18	47	73°40'		0.7188
	19	52	78°46'		0.8052	21	66	88°56'		0.9814					
0.1541	1	1	8°25'			3	3	18°40'	0.6401		4	4	21°00'	0.7167	
	5	6	26°09'	0.8814		9	12	36°24'	1.1868		10	14	38°44'	1.2514	
	11	17	43°53'	1.3864		14	26	54°08'	1.6208	0.4141	15	29	56°28'	1.6671	0.4476
	16	33	61°37'	1.7596	0.5216	19	45	71°52'		0.6898	18	47	74°12'		0.7277
	19	52	79°21'		0.8152	20	65	89°36'							
0.1553	1	1	8°29'			3	3	18°49'	0.6451		4	4	21°10'	0.7222	
	5	6	26°21'	0.8877		9	12	36°41'	1.1948		10	14	39°02'	1.2595	
	11	17	44°13'	1.3947		14	26	54°33'	1.6292	0.4200	15	29	56°54'	1.6754	0.4539
	16	33	62°05'	1.7673	0.5318	18	44	72°25'		0.6979	18	47	74°46'		0.7373
	19	52	79°57'		0.8255										
0.1564	1	1	8°33'			3	3	18°57'	0.6495		4	4	21°20'	0.7276	
	5	6	26°33'	0.8940		9	12	36°57'	1.2022		10	14	39°20'	1.2677	
	11	17	44°33'	1.4031		14	26	54°57'	1.6373	0.4257	15	29	57°20'	1.6836	0.4602
	16	33	62°33'	1.7748	0.5390	18	44	72°57'		0.7068	18	47	75°20'		0.7468
	19	52	80°33'		0.8358										

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2					
0.1622	1	1	8°51'	0.9240 1.4451 1.8104	0.5750 0.8871	3	3	19°39'	0.6725 1.2400 1.6770	0.4551 0.7522	4	4	22°07'	0.7530 1.3064 1.7224	0.4917 0.7941	5	6	38°19'	4	22°16'	0.7578	1.3139			
	11	17	46°11'			14	26	56°59'			15	29	59°27'			10	14	41°04'					14	28	41°52'
	16	33	64°51'			18	44	75°39'			17	46	78°07'			15	29	59°27'					15	29	59°27'
	18	51	83°31'			18	44	75°39'			17	46	78°07'			17	46	78°07'					17	46	78°07'
0.1633	1	1	8°55'	0.9302 1.4511 1.8173	0.5824 0.8975	3	3	19°47'	0.6769 1.2473 1.6846	0.4619 0.7612	4	4	22°16'	0.7578	0.4980 0.8035	5	6	27°43'	4	22°16'	0.7578	1.3139			
	11	17	46°31'			14	26	57°23'			15	29	59°52'			10	14	41°04'					14	28	41°52'
	15	32	65°19'			18	44	76°11'			17	46	78°40'			15	29	59°52'					15	29	59°52'
	18	50	84°07'			18	44	76°11'			17	46	78°40'			17	46	78°40'					17	46	78°40'
0.1645	1	1	8°59'	0.9364 1.4591 1.8240	0.5898 0.9079	3	3	19°58'	0.6819 1.2550 1.6924	0.4671 0.7705	4	4	22°26'	0.7632	0.5045 0.8132	5	6	27°55'	4	22°26'	0.7632	1.3218			
	11	17	46°51'			14	26	57°48'			15	29	60°18'			10	14	41°22'					14	28	41°52'
	15	32	65°47'			18	44	76°44'			17	46	79°14'			15	29	60°18'					15	29	60°18'
	18	50	84°43'			18	44	76°44'			17	46	79°14'			17	46	79°14'					17	46	79°14'
0.1656	1	1	9°03'	0.9425 1.4671 1.8306	0.5973 0.9184	3	3	20°05'	0.6863 1.2627 1.7001	0.4733 0.7799	4	4	22°36'	0.7686	0.5111 0.8229	5	6	28°07'	4	22°36'	0.7686	1.3296			
	11	17	47°11'			14	26	58°13'			15	29	60°44'			10	14	41°40'					14	28	41°52'
	15	32	66°15'			18	44	77°17'			17	46	79°46'			15	29	60°44'					15	29	60°44'
	18	50	85°19'			18	44	77°17'			17	46	79°46'			17	46	79°46'					17	46	79°46'

(续)

$\frac{a+b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.1714	1	1	9°22'	0.9727 1.5056	0.3418 0.6346 0.9703	3	3	20°47'	0.7097 1.2993 1.7364	0.5038 0.8261	4	4	23°23'	0.7938 1.3670 1.7756	0.5137 0.8709
	5	6	29°06'			9	12	40°31'			10	14	43°07'		
	11	17	48°50'			14	26	60°15'			14	28	62°51'		
	15	32	68°34'			17	43	79°59'			17	45	82°35'		
	18	50	88°18'			17	43	79°59'			17	45	82°35'		
0.1725	1	1	9°25'	0.9783 1.5128	0.3459 0.6419 0.9805	3	3	20°54'	0.7135 1.3060 1.7430	0.5096 0.8350	4	4	23°32'	0.7986 1.3742 1.7862	0.5502 0.8804
	5	6	29°17'			9	12	40°46'			10	14	43°24'		
	11	17	49°09'			14	26	60°38'			14	28	63°16'		
	15	32	69°01'			17	43	80°30'			17	45	83°08'		
	18	50	88°53'			17	43	80°30'			17	45	83°08'		
0.1736	1	1	9°29'	0.9843 1.5264	0.3503 0.6495 0.9910	3	3	21°03'	0.7184 1.3134 1.7501	0.5130 0.8444	4	4	23°42'	0.8039 1.3818 1.7930	0.5569 0.8903
	5	6	29°29'			9	12	41°03'			10	14	43°42'		
	11	17	49°29'			14	26	61°03'			14	28	63°42'		
	15	32	69°29'			17	43	81°03'			17	45	83°42'		
	18	50	89°29'			17	43	81°03'			17	45	83°42'		
0.1751	1	1	9°34'	0.9919 1.5298	0.3559 0.6591	3	3	21°14'	0.7243 1.3226 1.7587	0.5239 0.8562	4	4	23°54'	0.8103 1.3910 1.8011	0.5653 0.9024
	5	6	29°44'			9	12	41°24'			10	14	44°04'		
	11	17	49°54'			14	26	61°34'			14	28	64°14'		
	15	32	70°04'			17	43	81°44'			17	45	84°24'		
	15	32	70°04'			17	43	81°44'			17	45	84°24'		

(续)

$\frac{a+b}{2R_1}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.1765	1	1	9°39'			3	3	21°25'	0.7303		4	4	24°06'	0.8167	
	5	6	29°59'	0.9995		9	12	41°45'	1.3318		10	14	44°26'	1.4002	
	11	17	50°19'	1.5392	0.2615	14	26	62°05'	1.7673	0.5318	14	28	65°46'	1.8092	0.5737
	15	32	70°39'	0.6687	0.6687	17	43	82°25'		0.8680	17	45	85°06'		0.9146
0.1779	1	1	90°44'			3	3	21°35'	0.7357		4	4	24°19'	0.8236	
	5	6	30°14'	1.0070		9	12	42°05'	1.3404		10	14	54°35'	1.4097	
	11	17	50°44'	1.5484	0.3671	14	26	62°35'	1.7754	0.5395	14	28	65°19'	1.8173	0.5824
	15	32	71°14'	0.6783	0.6783	17	43	83°05'		0.8796	17	45	85°49'		0.9271
0.1794	1	1	9°49'			3	3	21°46'	0.7417		4	4	24°31'	0.8299	
	5	6	30°29'	1.0146		9	12	42°26'	1.3495		10	14	45°11'	1.4187	
	11	17	51°09'	1.5576	0.3727	14	26	63°08'	1.7836	0.5476	14	28	65°51'	1.8250	0.5909
	15	32	71°49'	0.6879	0.6879	17	43	83°46'		0.8914	17	45	86°31'		0.9392
0.1808	1	1	9°53'			3	3	21°56'	0.7471		4	4	24°42'	0.8357	
	5	6	30°43'	1.0216		9	12	42°46'	1.3580		10	14	45°32'	1.4273	
	11	17	51°33'	1.5663	0.3782	14	26	63°36'	1.7914	0.5554	14	28	66°22'	1.8323	0.5991
	15	32	72°23'	0.6974	0.6974	17	43	84°26'		0.9030	17	45	87°12'		0.9512
0.1822	1	1	9°58'			3	3	22°07'	0.7530		4	4	24°54'	0.8421	
	5	6	30°58'	1.0291		9	12	43°07'	1.3670		10	14	45°54'	1.4363	
	11	17	51°58'	1.5753	0.3839	14	26	64°07'	1.7994	0.5635	14	28	66°54'	1.8396	0.6077
	15	32	72°58'	0.7071	0.7071	17	43	85°07'		0.9149	17	45	87°54'		0.9634

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.1837	1	1	10°03'			3	3	22°18'	0.7589		4	4	25°06'	0.8484	
	5	6	31°13'	1.0366		9	12	43°28'	1.3759		10	14	46°16'	1.4451	
	11	17	52°23'	1.5842	0.3896	14	26	64°38'	1.8072	0.5716	14	28	67°26'	1.8469	0.6162
	15	32	73°33'		0.7168	17	43	85°48'		0.9268	16	44	88°36'		0.9756
0.1851	1	1	10°08'			3	3	22°28'	0.7643		4	4	25°18'	0.8547	
	5	6	31°28'	1.0440		9	12	43°48'	1.3843		10	14	46°38'	1.4539	
	11	17	52°48'	1.5931	0.3954	14	26	65°08'	1.8146	0.5795	14	28	67°58'		0.6249
	15	32	74°08'		0.7266	17	43	86°28'		0.9384	16	44	89°18'		0.9878
0.1865	1	1	10°12'			3	3	22°38'	0.7697		4	4	25°30'	0.8610	
	5	6	31°42'	1.0509		9	12	44°08'	1.3927		10	14	47°00'	1.4627	
	11	17	53°12'	1.6015	0.4010	14	26	65°38'	1.8218	0.5874	14	28	68°30'		0.6335
	15	32	74°42'		0.7361	17	43	87°08'		0.9500	16	44	90°00'		1.0000
0.1880	1	1	10°17'			3	3	22°49'	0.7756		4	4	25°42'	0.8673	
	5	6	31°57'	1.0584		9	12	44°29'	1.4014		10	14	47°22'	1.4714	
	11	17	53°37'	1.6101	0.4068	14	26	66°09'	1.8292	0.5957	14	28	69°02'		0.6422
	15	32	75°17'		0.7460	17	43	87°49'		0.9619					
0.1894	1	1	10°22'			3	3	23°00'	0.7815		4	4	25°54'	0.8736	
	5	6	32°12'	1.0658		9	12	44°50'	1.4101		10	14	47°44'	1.4800	
	11	17	54°02'	1.6187	0.4127	14	26	66°40'	1.8364	0.6039	14	28	69°34'		0.6509
	15	32	75°52'		0.7558	17	43	88°30'		0.9738					

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s	N	ΣN	γ_i	K_i	K_s
0.1979	1	1	10°51'			3	3	24°04'	0.8156		4	4	27°06'	0.9111	
	5	6	33°41'	1.1092		9	12	46°54'	1.4603		9	13	49°56'	1.5306	0.3563
	11	17	56°31'	1.6681	0.4483	14	26	69°44'		0.6536	14	27	72°46'		0.7038
	14	31	79°21'		0.8152										
0.1994	1	1	10°55'			3	3	24°14'	0.8209		4	4	27°18'	0.9173	
	5	6	33°55'	1.1160		9	12	47°14'	1.4683		9	13	50°18'	1.5388	0.3612
	11	17	56°55'	1.6758	0.4541	14	26	70°14'		0.6618	14	27	73°18'		0.7126
	14	31	79°55'		0.8249										
0.2008	1	1	11°00'			3	3	24°24'	0.8262		4	4	27°30'	0.9235	
	5	6	34°10'	1.1232		9	12	47°34'	1.4761		9	13	50°40'	1.5469	0.3662
	11	17	57°20'	1.6836	0.4603	14	26	70°44'		0.6700	14	27	73°50'		0.7216
	14	31	80°30'		0.8350										
0.2022	1	1	11°05'			3	3	24°35'	0.8320		4	4	27°42'	0.9297	
	5	6	34°25'	1.1304		9	12	47°55'	1.4843		9	13	51°02'	1.5550	0.3711
	11	17	57°45'	1.6915	0.4664	14	26	71°15'		0.6786	14	27	74°22'		0.7305
	14	31	81°05'		0.8450										
0.2036	1	1	11°10'			3	3	24°46'	0.8378		4	4	27°54'	0.9359	
	5	6	34°40'	1.1376		9	12	48°16'	1.4925		9	13	51°24'	1.5630	0.3761
	11	17	58°10'	1.6992	0.4726	14	26	71°46'		0.6871	14	27	74°54'		0.7395
	14	31	81°40'		0.8551										

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2	N	ΣN	ν_i	K_1	K_2
0.2051	1	1	11°14'	1.1443 1.7065	0.4785 0.8649	3	3	24°56'	0.8431 1.5002	0.3387 0.6954	4	4	28°05'	0.9415 1.5706	0.3809 0.7482
	5	6	34°54'			9	12	48°36'			9	13	51°45'		
	11	17	58°34'			14	26	72°16'			14	27	75°25'		
	14	31	82°14'												
0.2065	1	1	11°19'	1.1514 1.7140	0.4847 0.8750	3	3	25°07'	0.8489 1.5083	0.3433 0.7040	4	4	28°18'	0.9482 1.5789	0.3862 0.7575
	5	6	35°09'			9	12	48°57'			9	13	52°08'		
	11	17	58°59'			14	26	72°47'			14	27	75°58'		
	14	31	82°48'												
0.2079	1	1	11°24'	1.1586 1.7215	0.4910 0.8851	3	3	25°18'	0.8547 1.5163	0.3479 0.7126	4	4	28°30'	0.9543 1.5867	0.3912 0.7666
	5	6	35°24'			9	12	49°18'			9	13	52°30'		
	11	17	59°24'			13	25	73°18'			13	26	76°30'		
	14	31	83°24'												
0.2093	1	1	11°29'	1.1657 1.7288	0.4972 0.8952	3	3	25°28'	0.8600 1.5238	0.3523 0.7210	4	4	28°42'	0.9604 1.5945	0.3963 0.7756
	5	6	35°39'			9	12	49°38'			9	13	52°52'		
	11	17	59°49'			13	25	73°48'			13	26	77°02'		
	14	31	83°59'												
0.2108	1	1	11°33'	1.1723 1.7358	0.5033 0.9050	3	3	25°38'	0.8652 1.5313	0.3568 0.7294	4	4	28°53'	0.9661 1.6018	0.4012 0.7844
	5	6	35°53'			9	12	49°58'			9	13	53°13'		
	11	17	60°13'			13	25	74°18'			13	26	77°33'		
	14	31	84°33'												

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.2122	1	1	11°38'	1.1793		3	3	25°49'	0.8710		4	4	29°06'	0.9727	
	5	6	36°08'	1.7430		9	12	50°19'	1.5392		9	13	53°36'	0.6093	0.4066
	11	17	60°38'			13	25	74°49'			13	26	78°06'		0.7938
	14	31	85°08'												
0.2136	1	1	11°43'	1.1864		3	3	26°00'	0.8767		4	4	29°18'	0.9733	
	5	6	36°23'	1.7501		9	12	50°40'	1.5469		9	13	53°58'	1.6173	0.4117
	11	17	61°03'			13	25	75°20'			13	26	78°38'		0.8029
	14	31	85°43'												
0.2150	1	1	11°48'	1.1934		3	3	26°11'	0.8825		4	4	29°30'	0.9848	
	5	6	36°38'	1.7571		9	12	51°01'	1.5547		9	13	54°20'	1.6248	0.4169
	11	17	61°23'			13	25	75°51'			13	26	79°10'		0.8121
	14	31	86°18'												
0.2164	1	1	11°53'	1.2004		3	3	26°21'	0.8877		4	4	29°42'	0.9909	
	5	6	36°53'	1.7640		9	12	51°21'	1.5620		9	13	54°42'	1.6323	0.4221
	10	16	61°53'			13	25	76°21'			13	26	79°42'		0.8212
	13	29	86°53'												
0.2179	1	1	11°57'	1.2069		3	3	26°31'	0.8929		4	4	29°54'	0.9970	
	5	6	37°07'	1.7705		9	12	51°41'	1.5692		9	13	55°04'	1.6396	0.4274
	10	16	62°17'			13	25	76°51'			13	26	80°14'		0.8304
	13	29	87°27'												

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.2267	1	1	12°27'			3	3	27°37'	0.9271		4	4	31°09'	1.0246	
	5	6	38°39'	1.2491		9	12	53°49'	1.6143	0.4096	9	13	57°21'	1.6320	0.4695
	10	16	64°51'	1.8104	0.5750	12	24	80°01'		0.8266	13	26	83°33'		0.8877
0.2284	1	1	12°33'			3	3	27°50'	0.9338		4	4	31°23'	1.0115	
	5	6	38°57'	1.2373		9	12	54°14'	1.6228	0.4155	9	13	57°47'	1.6921	0.4659
	10	16	65°21'	1.8177	0.5829	12	24	80°38'		0.8373	13	26	84°11'		0.8937
0.2301	1	1	12°38'			3	3	28°02'	0.9400		4	4	31°37'	1.0185	
	5	6	39°14'	1.2650		9	12	54°38'	1.6309	0.4212	9	13	58°13'	1.7001	0.4733
	10	16	65°50'	1.8247	0.5906	12	24	81°14'		0.8476	13	26	84°45'		0.5037
0.2317	1	1	12°44'			3	3	28°15'	0.9466		4	4	31°52'	1.0559	
	5	6	39°32'	1.2731		9	12	55°03'	1.6393	0.4271	9	13	58°30'	1.7083	0.4800
	10	16	66°20'	1.8318	0.5986	12	24	81°51'		0.8582	13	26	85°28'		0.9210
0.2334	1	1	12°49'			3	3	28°27'	0.9528		4	4	32°05'	1.0628	
	5	6	39°49'	1.2807		9	12	55°27'	1.6473	0.4329	9	13	59°06'	1.7161	0.4865
	10	16	66°49'	1.8385	0.6063	12	24	83°27'		0.8686	13	26	86°06'		0.5320
0.2351	1	1	12°55'			3	3	28°40'	0.9594		4	4	32°20'	1.0697	
	5	6	40°07'	1.2887		9	12	55°52'	1.6555	0.4389	9	13	59°32'	1.7233	0.4930
	10	16	67°19'	1.8453	0.6144	12	24	83°04'		0.8793	13	26	86°44'		0.9430

(续)

$\frac{a+b}{2h}$	N	ΣN	r_1	K_1	K_2	N	ΣN	r_1	K_1	K_2	N	ΣN	r_1	K_1	K_2
0.2368	1	1	13°00'			3	3	28°52'	0.9655		4	4	32°34'	1.0766	
	5	6	40°24'	1.2962		9	12	56°16'	1.6633	0.4447	9	13	59°58'	1.7315	0.4995
	10	16	67°48'		0.6222	12	24	83°40'		0.8897	13	26	97°22'		0.9541
0.2385	1	1	13°06'			3	3	29°05'	0.9722		4	4	32°49'	1.0839	
	5	6	40°42'	1.3042		9	12	56°41'	1.6713	0.4507	9	31	60°25'	1.7393	0.5063
	10	16	68°18'		0.6303	12	24	84°17'		0.9004	13	26	88°01'		0.9654
0.2402	1	1	13°12'			3	3	29°18'	0.9788		4	4	33°04'	1.0912	
	5	6	41°00'	1.3121		9	12	57°06'	1.6792	0.4568	9	31	60°52'	1.7470	0.5132
	10	16	68°48'		0.6384	12	24	84°54'		0.9111	13	26	88°40'		0.9797
0.2419	1	1	13°17'			3	3	29°30'	0.9848		4	4	33°17'	1.0976	
	5	6	41°17'	1.3196		8	11	57°30'	1.6868	0.4627	9	13	61°17'	1.7510	0.5195
	10	16	69°17'		0.6463	12	23	85°30'		0.9215	12	25	89°17'		0.9875
0.2436	1	1	13°23'			3	3	29°43'	0.9914		4	4	33°32'	1.1048	
	5	6	41°35'	1.3274		8	11	57°55'	1.6946	0.4689	9	13	61°41'	1.7615	0.5261
	10	16	69°47'		0.6544	12	23	86°07'		0.9322	12	25	89°56'		0.9938
0.2453	1	1	13°29'			3	3	29°56'	0.9980		4	4	33°47'	1.1121	
	5	6	41°53'	1.3352		8	11	58°20'	1.7022	0.4750	9	13	62°11'	1.7689	0.5334
	10	16	70°17'		0.6626	12	23	86°44'		0.9430					

(續)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.2470	1	1	13°35'	1.3430	0.6709	3	3	30°09'	1.0045	0.4812	4	4	34°02'	1.1101	0.5403	4	4	34°02'	1.1101	0.5403
	5	6	52°11'			8	11	58°45'			9	13	62°38'			9	13	62°38'		
	10	16	70°47'			12	23	87°21'			12	23				12	23			
0.2487	1	1	13°40'	1.3503	0.6788	3	3	30°21'	1.0105	0.4872	4	4	34°15'	1.1250	0.5468	4	4	34°15'	1.1250	0.5468
	5	6	42°28'			8	11	59°09'			9	13	63°03'			9	13	63°03'		
	10	16	71°16'			12	23	87°57'			12	23				12	23			
0.2504	1	1	13°46'	1.3580	0.6871	3	3	30°34'	1.0171	0.4935	4	4	34°20'	1.1328	0.5538	4	4	34°20'	1.1328	0.5538
	5	6	42°46'			8	11	59°34'			9	13	63°30'			9	13	63°30'		
	10	16	71°46'			12	23	88°34'			12	23				12	23			
0.2521	1	1	13°52'	1.3657	0.6954	3	3	30°47'	1.0236	0.4998	4	4	34°45'	1.1400	0.5608	4	4	34°45'	1.1400	0.5608
	5	6	43°04'			8	11	59°59'			9	13	63°57'			9	13	63°57'		
	10	16	72°16'			12	23	89°11'			12	23				12	23			
0.2538	1	1	13°58'	1.3733	0.7037	3	3	31°00'	1.0301	0.5061	4	4	35°00'	1.1472	0.5679	4	4	35°00'	1.1472	0.5679
	5	6	43°22'			8	11	60°24'			9	13	64°24'			9	13	64°24'		
	10	16	72°46'			12	23	89°48'			12	23				12	23			
0.2554	1	1	14°03'	1.3805	0.7118	3	3	31°12'	1.0361	0.5121	4	4	35°14'	1.1538	0.5748	4	4	35°14'	1.1538	0.5748
	5	6	43°39'			8	11	60°48'			9	13	64°50'			9	13	64°50'		
	10	16	73°15'			12	23				12	23				12	23			

(续)

$\frac{\phi+b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.2672	1	1	14°43'	1.4318	0.7702	3	3	32°41'	1.0800	0.5567	4	4	36°55'	1.2013	0.6311
	5	6	45°43'			8	11	63°11'			9	13	67°55'		
	10	16	76°43'			8	11	63°11'			9	13	67°55'		
0.2689	1	1	14°49'	1.4391	0.7787	3	3	32°54'	1.0863	0.5632	4	4	37°10'	1.2083	0.6313
	5	6	46°01'			8	11	64°06'			9	13	68°22'		
	10	16	77°13'			8	11	64°06'			9	13	68°22'		
0.2706	1	1	14°54'	1.4459	0.7870	3	3	33°06'	1.0922	0.5695	4	4	37°24'	1.2143	0.6384
	5	6	46°18'			8	11	64°30'			9	13	68°48'		
	10	16	77°42'			8	11	64°30'			9	13	68°48'		
0.2723	1	1	15°00'	1.5531	0.7955	3	3	33°19'	1.0985	0.5761	4	4	37°39'	1.2217	0.6457
	5	6	46°36'			8	11	64°55'			9	13	69°15'		
	10	16	78°12'			8	11	64°55'			9	13	69°15'		
0.2740	1	1	15°05'	1.4599	0.8038	3	3	33°32'	1.1048	0.5827	4	4	37°53'	1.2281	0.6528
	5	6	46°53'			8	11	65°20'			9	13	69°41'		
	10	16	78°41'			8	11	65°20'			9	13	69°41'		
0.2756	1	1	15°11'	1.4671	0.8123	3	3	33°45'	1.1111	0.5893	4	4	38°08'	1.2350	0.6602
	5	6	47°11'			8	11	65°45'			9	13	70°08'		
	10	16	79°11'			8	11	65°45'			9	13	70°08'		

(续)

$\frac{a+b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.2874	1	1	15°51'	1.5151	0.3472	3	3	35°14'	1.1538	0.6357	4	4	39°50'	1.2811	0.7115
	5	6	49°15'			8	11	68°38'			9	13	73°14'		
	9	15	82°39'		0.8721										
0.2890	1	1	15°57'	1.5219	0.3512	3	3	35°27'	1.1600	0.6425	4	4	40°05'	1.2878	0.7191
	5	6	49°33'			8	11	69°03'			9	13	73°41'		
	9	15	83°09'		0.8807										
0.2907	1	1	16°02'	1.5283	0.3550	3	3	35°39'	1.1657	0.6490	4	4	40°18'	1.2936	0.7260
	5	6	49°50'			8	11	69°27'			9	13	74°06'		
	9	15	83°38'		0.8891										
0.2924	1	1	16°08'	1.5351	0.3590	3	3	35°52'	1.1718	0.6558	4	4	40°33'	1.3002	0.7336
	5	6	50°08'			8	11	69°52'			9	13	74°33'		
	9	15	84°08'		0.8978										
0.2952	1	1	16°18'	1.5462	0.3657	3	3	36°14'	1.1822	0.6673	4	4	40°58'	1.3112	0.7462
	5	6	50°38'			8	11	70°14'			9	13	75°18'		
	9	15	84°58'		0.9123										
0.2979	1	1	16°27'	1.5569	0.3723	3	3	36°34'	1.1915	0.6783	4	4	41°22'	1.3218	0.7588
	5	6	51°07'			8	11	71°14'			9	13	76°02'		
	9	15	85°47'		0.9265										

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.3173	1	1	17°33'			3	3	39°03'	1.2600		4	4	44°13'	1.3947	
	5	6	54°33'	1.6292	0.4200	8	11	76°03'		0.7589	8	12	81°13'		0.8473
0.3201	1	1	17°42'			3	3	39°23'	1.2690		4	4	44°37'	1.4047	
	5	6	55°02'	1.6390	0.4269	8	11	76°43'		0.7702	8	12	81°57'		0.8600
0.3228	1	1	17°52'			3	3	39°45'	1.2789		4	4	45°02'	1.4150	
	5	6	55°32'	1.6489	0.4341	8	11	77°25'		0.7821	8	12	82°42'		0.8729
0.3256	1	1	18°01'			3	3	40°06'	1.2882		4	4	45°26'	1.4249	
	5	6	56°01'	1.6584	0.4410	8	11	78°06'		0.7938	8	12	83°26'		0.8856
0.3283	1	1	18°11'			3	3	40°28'	1.2980		4	4	45°51'	1.4350	
	5	6	56°31'	1.6681	0.4483	8	11	78°48'		0.8058	8	12 _m	84°11'		0.8987
0.3311	1	1	18°20'			3	3	40°48'	1.3068		4	4	46°15'	1.4447	
	5	6	57°00'	1.6773	0.4554	8	11	79°28'		0.8172	8	12	84°55'		0.9114
0.3338	1	1	18°30'			3	3	41°10'	1.3165		4	4	46°40'	1.4547	
	5	6	57°30'	1.6868	0.4627	8	11	80°10'		0.8292	8	12	85°40'		0.9244

(续)

$\frac{\phi + b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2
0.3365	1	1	18°39'			3	3	41°31'	1.3257		4	4	47°04'		
	5	6	57°59'	1.6958	0.4698	8	11	80°51'		0.8410	8	12	86°24'	1.4643	0.9372
0.3393	1	1	18°38'			3	3	41°52'	1.3348		4	4	47°28'		
	5	6	58°28'	1.7047	0.4770	8	11	81°32'		0.8528	8	12	87°08'	1.4738	0.9500
0.3420	1	1	18°57'			3	3	42°13'	1.3439		4	4	47°53'		
	5	6	58°57'	1.7134	0.4842	8	11	82°13'		0.8646	8	12	87°53'	1.4836	0.9631
0.3453	1	1	19°09'			3	3	42°39'	1.3550		4	4	48°23'		
	5	6	59°33'	1.7241	0.4932	8	11	83°03'		0.8790	8	12	88°47'	1.4952	0.9788
0.3486	1	1	19°20'			3	3	43°04'	1.3657		4	4	48°52'		
	5	6	60°08'	1.7344	0.5020	8	11	83°52'		0.8932	8	12	89°40'	1.5054	0.9942
0.3518	1	1	19°31'			3	3	43°29'	1.3763		4	4	49°21'		
	5	6	60°43'	1.7444	0.5109	8	11	84°41'		0.9073	8	12	89°52'	1.5174	0.3486
0.3551	1	1	19°43'			3	3	43°56'	1.3876		4	4	49°52'		
	5	6	61°19'	1.7546	0.5200	8	11	85°32'		0.9221	8	12	90°24'	1.5291	0.3554

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.3584	1 5	1 6	19°54' 61°54'	1.7643	0.5290	3 7	3 10	44°21' 86°21'	1.3981	0.9363	4	4	50°21'	1.5399	0.3619
0.3616	1 5	1 6	20°06' 62°30'	1.7740	0.5383	3 7	3 10	44°47' 87°11'	1.4089	0.9509	4	4	50°52'	1.5514	0.3689
0.3649	1 5	1 6	20°17' 63°05'	1.7833	0.5473	3 7	3 10	45°12' 88°00'	1.4191	0.9651	4	4	51°21'	1.5620	0.3754
0.3683	1 5	1 6	20°28' 63°40'	1.7925	0.5564	3 7	3 10	45°38' 88°50'	1.4298	0.9796	4	4	51°50'	1.5724	0.3821
0.3714	1 5	1 6	20°39' 64°15'	1.8014	0.5656	3 7	3 10	46°03' 89°39'	1.4399	0.9939	4	4	52°20'	1.5832	0.3889
0.3746	1 5	1 6	20°50' 64°50'	1.8101	0.5747	3	3	46°28'	1.4499		4	4	52°50'	1.5938	0.3959
0.3786	1 5	1 6	21°04' 65°34'	1.8209	0.5864	3	3	47°00'	1.4627		4	4	53°27'	1.6067	0.4015

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2	N	ΣN	γ	K_1	K_2
0.3827	1 5	1 6	21°19' 66°19'	1.8316	0.5983	3	3	47°32'	1.4753		4	4	54°05'	1.6197	0.4134
0.3867	1 5	1 6	21°33' 67°03'	1.8417	0.6101	3	3	48°04'	1.4878	0.3317	4	4	54°42'	1.6323	0.4221
0.3907	1 5	1 6	21°47' 67°47'		0.6219	3	3	48°36'	1.5002	0.3387	4	4	55°20'	1.6450	0.4312
0.3947	1 3	1 6	22°01' 68°31'		0.6338	3	3	49°08'	1.5125	0.3457	4	4	55°57'	1.6571	0.4401
0.3987	1 3	1 6	22°16' 69°16'		0.6460	3	3	49°41'	1.5250	0.3530	4	4	56°36'	1.6697	0.4495
0.4027	1 5	1 6	22°29' 69°59'		0.5577	3	3	50°12'	1.5365	0.3599	4	4	57°12'	1.6811	0.4583
0.4067	1 5	1 6	22°43' 70°43'		0.6688	3	3	50°44'	1.5484	0.3671	4	4	57°50'	1.6930	0.4676

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.4107	1 5	1 6	22°57' 71°27'		0.6819	3	3	51°16'	1.5601	0.3743	4	4	58°28'	1.7047	0.4770
0.4147	1 5	1 6	23°11' 72°11'		0.6940	3	3	51°48'	1.5717	0.3816	4	4	59°05'	1.7158	0.4862
0.4187	1 5	1 6	23°26' 72°56'		0.7065	3	3	52°21'	1.5835	0.3892	4	4	59°44'	1.7274	0.4960
0.4226	1 5	1 6	23°41' 73°41'		0.7188	3	3	52°53'	1.5948	0.3966	4	4	60°22'	1.7384	0.5056
0.4266	1 5	1 6	23°54' 74°24'		0.7311	3	3	53°25'	1.6060	0.4040	4	4	61°00'	1.7492	0.5152
0.4305	1 5	1 6	24°08' 75°08'		0.7434	3	3	53°57'	1.6170	0.4115	4	4	61°38'	1.7599	0.5249
0.4344	1 5	1 6	24°27' 75°52'		0.7558	3	3	54°29'	1.6279	0.4191	4	4	62°17'	1.7705	0.5349

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.4384	1 5	1 6	24°36' 76°36'		0.7683	3	3	55°01'	1.6386	0.4267	4	4	62°55'	1.7807	0.5447
0.4436	1 5	1 6	24°55' 77°35'		0.7850	3	3	55°44'	1.6529	0.4370	4	4	63°46'	1.7940	0.5580
0.4488	1 5	1 6	25°14' 78°34'		0.8018	3	3	56°27'	1.6668	0.4473	4	4	64°38'	1.8072	0.5716
0.4540	1 5	1 6	25°32' 79°32'		0.8183	3	3	57°09'	1.6802	0.4576	4	4	65°29'	1.8197	0.5850
0.4592	1 5	1 6	25°51' 80°31'		0.8352	3	3	57°52'	1.6936	0.4681	4	4	66°21'	1.8320	0.5989
0.4643	1 5	1 6	26°09' 81°29'		0.8519	3	3	58°34'	1.7065	0.4785	4	4	67°12'	1.8437	0.6125
0.4695	1 5	1 6	26°28' 82°28'		0.8689	3	3	59°18'	1.7197	0.4895	4	4	68°04'		0.6265

(续)

$\frac{\phi+b}{2R_i}$	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2	N	ΣN	γ_i	K_1	K_2
0.4746	1 5	1 6	26°47' 83°27'		0.8859	3	3	60°01'	1.7323	0.5003	4	4	68°57'		0.6408
0.4797	1 5	1 6	27°06' 81°26'		0.9030	3	3	60°44'	1.7447	0.5111	4	4	69°49'		0.6550
0.4848	1 5	1 6	27°25' 85°25'		0.9201	3	3	61°28'	1.7571	0.5223	4	4	70°42'		0.6695
0.4899	1 5	1 6	27°43' 86°23'		0.9369	3	3	62°10'	1.7686	0.5331	4	4	71°34'		0.6838
0.4950	1 5	1 6	28°01' 87°21'		0.9538	3	3	62°52'	1.7799	0.5439	4	4	72°27'		0.6985
0.5000	1 5	1 6	28°20' 88°20'		0.9709	3	3	63°36'	1.7914	0.5554	4	4	73°20'		0.7132
0.5050	1 5	1 6	28°39' 88°19'		0.9881	3	3	64°19'	1.8024	0.5666	4	4	74°14'		0.7283

(续)

$\frac{\phi + \bar{\phi}}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_2	K_1	K_2	N	ΣN	γ_3	K_1	K_2
0.5100	1	1	28°58'			3	3	65°01'	1.8129	0.5777	4	4	75°08'		0.7434
0.5150	1	1	29°17'			3	3	65°45'	1.8235	0.5893	4	4	76°01'		0.7584
0.5200	1	1	29°36'			3	3	66°28'	1.8337	0.6007	4	4	76°56'		0.7739
0.5250	1	1	29°54'			3	3	67°11'	1.8421	0.6122	4	4	77°50'		0.7892
0.5299	1	1	30°13'			3	3	67°55'		0.6241	4	4	78°45'		0.8049
0.5348	1	1	30°32'			3	3	68°39'		0.6359	4	4	79°40'		0.8206
0.5398	1	1	30°50'			3	3	69°22'		0.6476	4	4	80°35'		0.8364
0.5446	1	1	31°08'			3	3	70°04'		0.6591	4	4	81°30'		0.8522
0.5519	1	1	31°37'			3	3	71°11'		0.6775	4	4	82°55'		0.8767

(续)

$\frac{\phi + b}{2R}$	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2	N	ΣN	γ_1	K_1	K_2
0.5592	1	1	32°05'			3	3	72°16'			4	4	81°20'		0.9913
0.5664	1	1	32°32'			3	3	73°21'			4	4	85°45'		0.9259
0.5736	1	1	33°00'			3	3	74°27'			4	4	87°12'		0.9512
0.5807	1	1	33°28'			3	3	75°33'			4	4	88°40'		0.9767
0.5878	1	1	33°55'			3	3	76°38'							
0.5948	1	1	34°23'			3	3	77°44'							
0.6018	1	1	34°51'			3	3	78°50'							
0.6088	1	1	35°18'			3	3	79°56'							
0.6157	1	1	35°46'			3	3	81°03'							

三、夹 模

图 4-43~45 是用粘结法固定棱镜的粗磨夹模，材料为铸铝 ZL 7 或硬铝 LY 11，连接螺纹由机床决定。图 4-46 是用压紧法固定棱镜的夹模。图 4-47 是镶有嵌条的粘结夹模，嵌条材料为 20 钢，利用电磁吸盘对嵌条的吸力而将夹模固定住。粗磨用夹模角度公差为 $\pm 5'$ ，槽与槽之间深度差在 0.05 mm 内。

图 4-48 是抛光夹模，棱镜用胶粘在槽中。夹模本体由 ZL 7 制造，边长在 100~350 mm 之间。

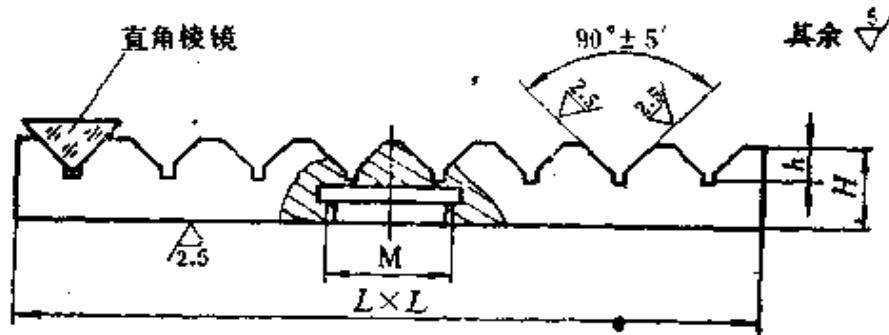


图 4-43 90°夹模

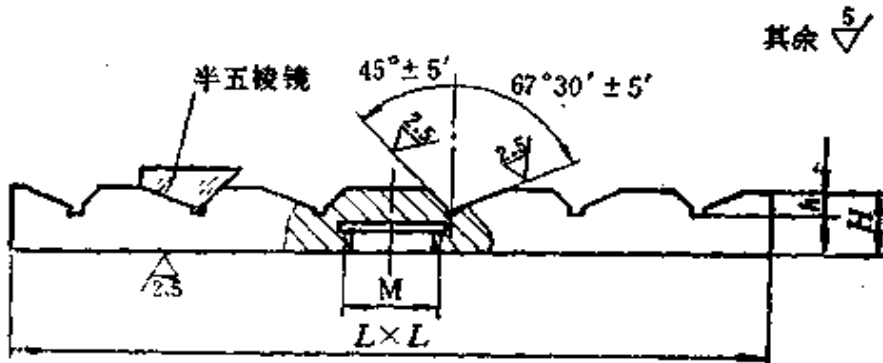


图 4-44 加工半五棱镜夹模

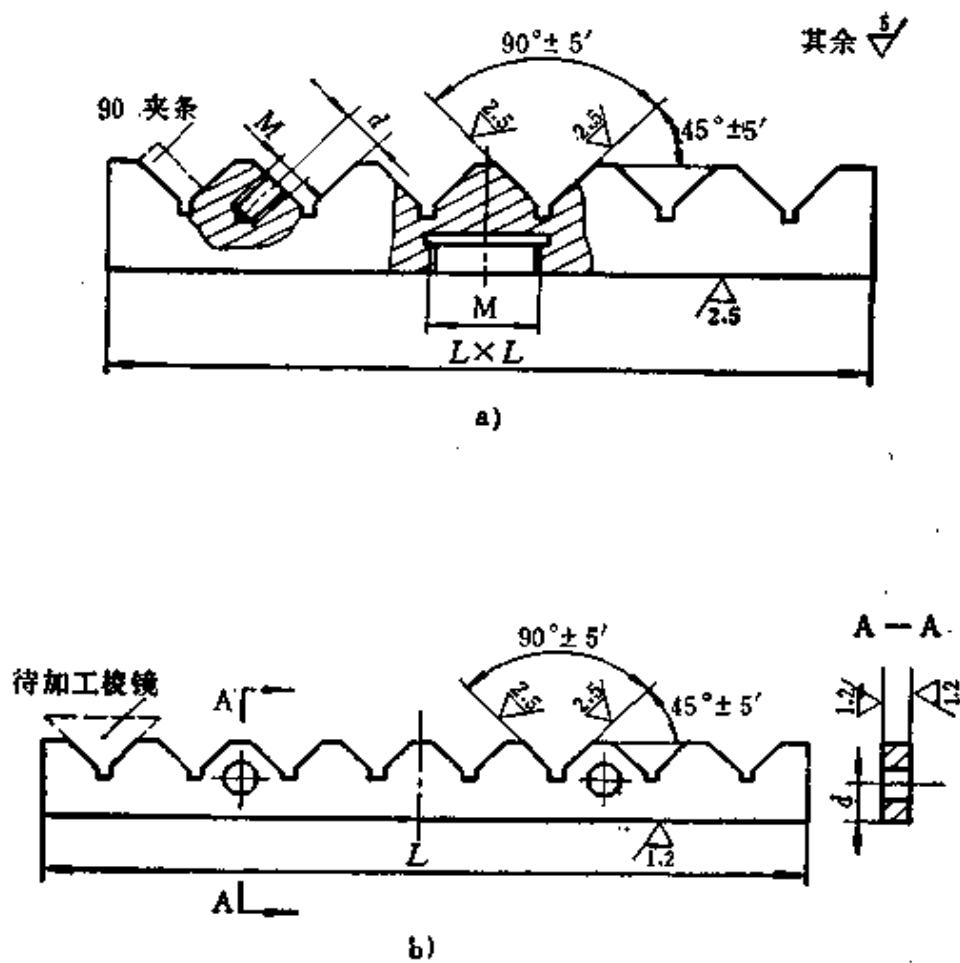


图 4-45 开屋脊夹模
a) 90°夹模 b) 90°夹条

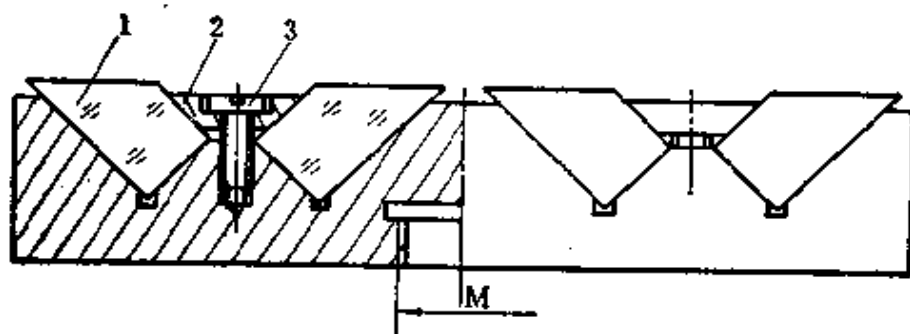


图 4-46 机械法固定夹模
1—工件 2—压板 3—螺钉

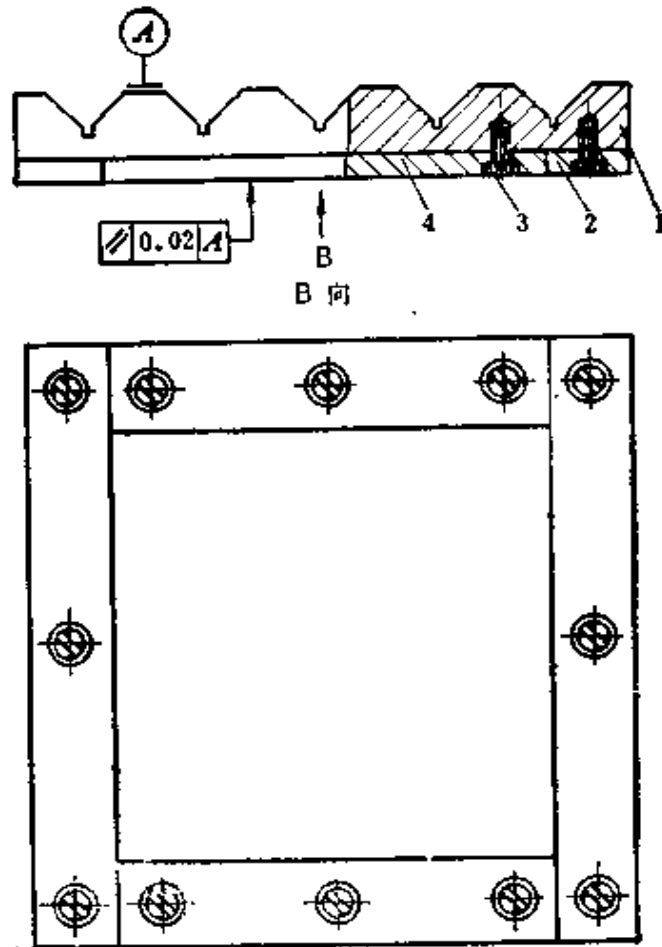


图 4-47 嵌条夹模

1—本体 2—长嵌条 3—螺钉 4—短嵌条

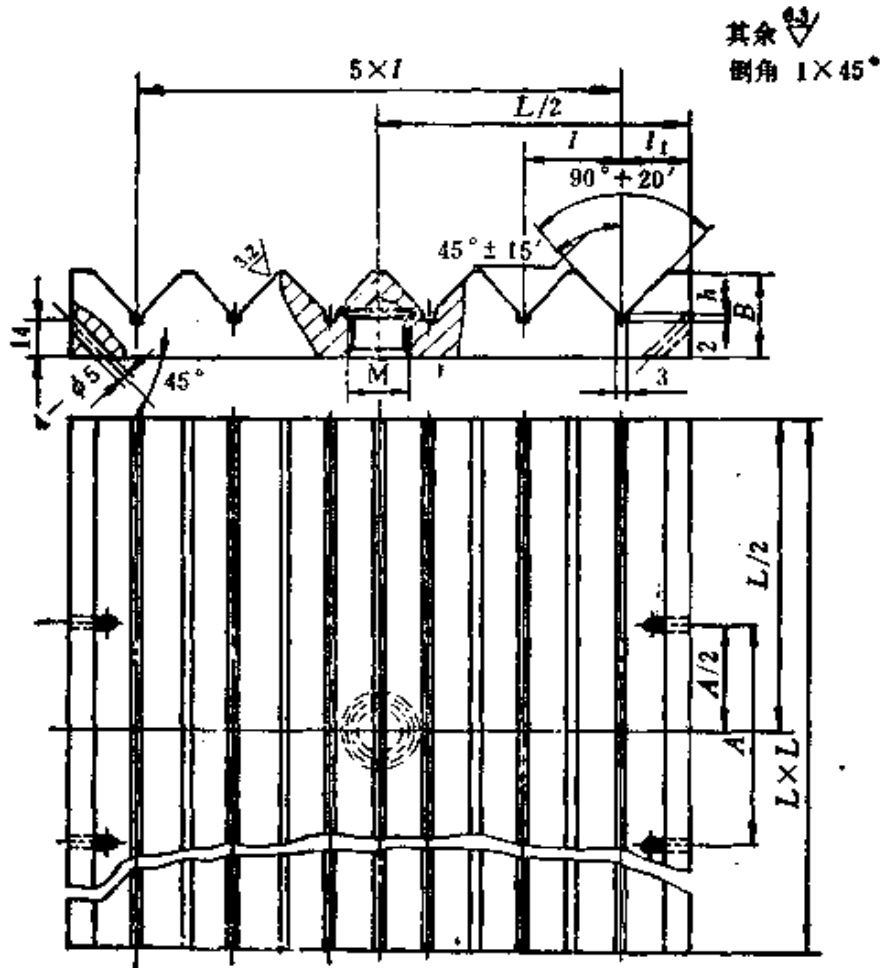


图 4-48 抛光夹模

四、圆弧样板

圆弧样板由 20 钢制成，渗碳淬火 HRC 50~64。各种不同曲率半径的样板形状及参数如图 4-49~50 和表 4-36。

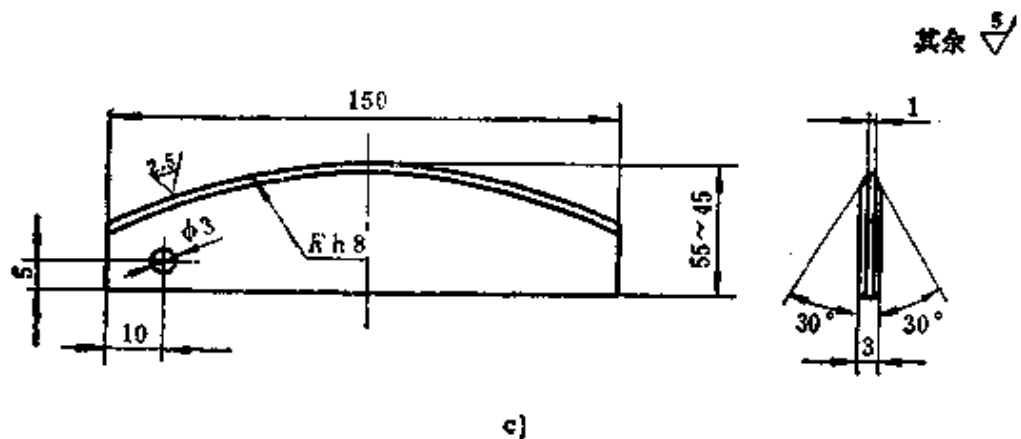
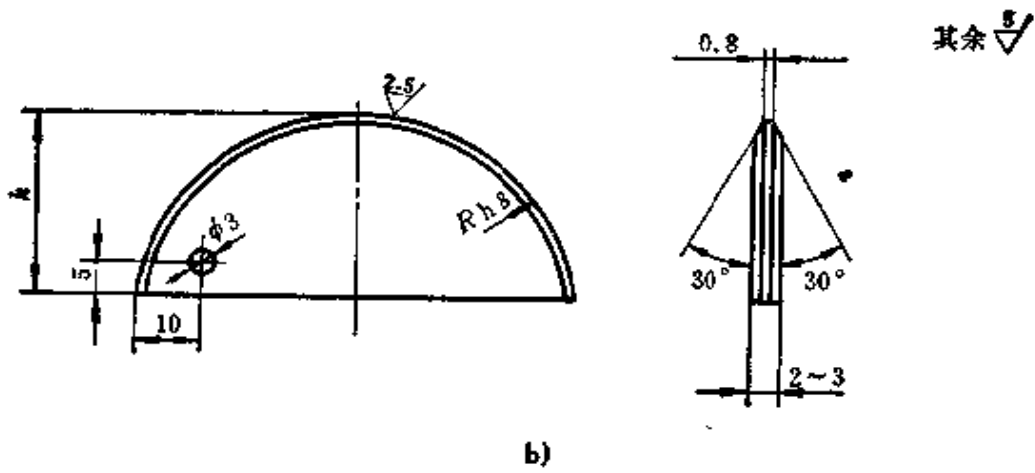
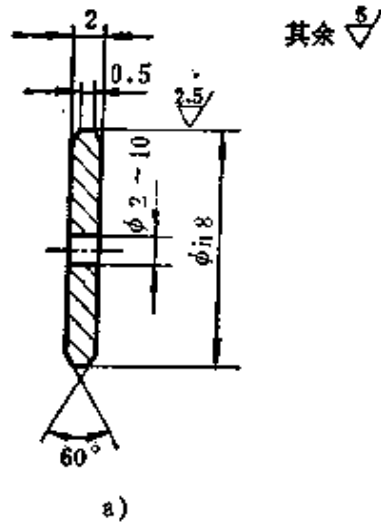


图 4-49 凸样板

- a) 用于 $R 4 \sim 30$
- b) 用于 $R 30 \sim 80$, 取 $h = 0.85 \sim 0.80 R$
- c) 用于 $R > 80$

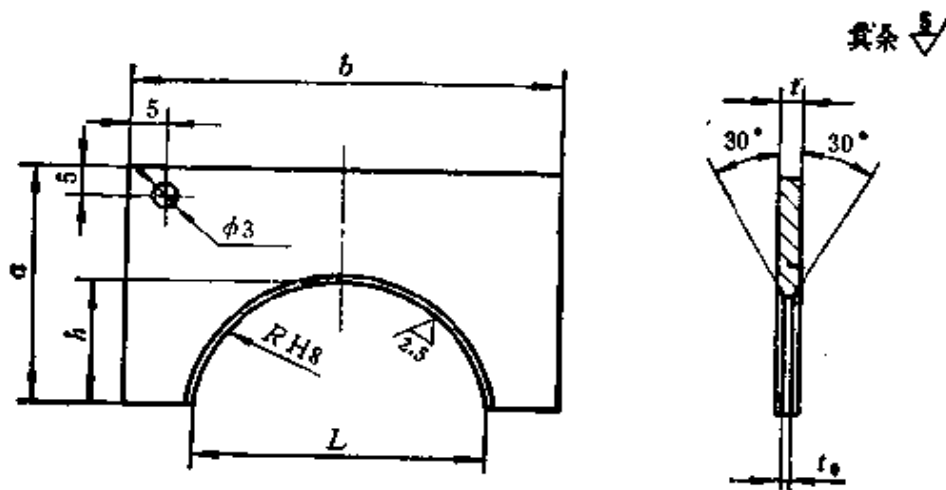


图 4-50 凹样板

表 4-36 凹样板尺寸

(mm)

R	a	b	h	L	t	t_0
$> 3 \sim 15$	25	40	$0.9R$		1.5	0.5
$> 15 \sim 30$	$R + 12$	$2R + 16$	$0.9R$		2	0.6
$> 30 \sim 50$	$R + 14$	$2R + 18$	$0.85R$		2	0.7
$> 50 \sim 80$	$R + 15$	$2R + 20$	$0.8R$		3	0.8
$> 80 \sim 100$	$30 + h$	160		140	3	1
> 100	$30 + h$	160		150	3	1

附录 I 磨料粒度与磨料层厚度

本附录为国外资料，供参考。

附表 1

磨料编号	磨料层厚度(mm)		磨料编号	磨料层厚度(mm)	
	研磨模在 上面时	研磨模在 下面时		研磨模在 上面时	研磨模在 下面时
80	0.200	0.450	270	0.057	0.071
100	0.168	0.306	W40	0.047	0.059
120	0.140	0.204	W28	0.029	0.038
140	0.116	0.156	W20	0.020	0.027
170	0.096	0.123	W14	0.013	0.019
200	0.080	0.101	W10	0.008	0.014
230	0.068	0.083	W 7	0.005	0.011

注：本表磨料编号与国内编号略有不同，为便于查找，已将W40以下编号按我国相应编号改写。270以上，仍保留原编号。附表2的情况亦如此。

附录 II 各号刚玉对 K 9 玻璃的

毛面深度及与其他牌号玻璃的换算系数

本附录为国外资料，供参考。

1. 各号刚玉对 K 9 玻璃的毛面深度如附表 2 所示。

附表 2

磨料编号	毛面深度 (mm)	磨料编号	毛面深度 (mm)	磨料编号	毛面深度 (mm)	磨料编号	毛面深度 (mm)
80	0.230	170	0.079	W40	0.035	W10	0.007
100	0.166	200	0.062	W28	0.022	W7	0.005
120	0.122	230	0.051	W20	0.015		
140	0.096	270	0.043	W14	0.010		

2. K9 玻璃的毛面深度对其他牌号的换算系数如附表 3 所示。

附表 3

玻璃牌号	换算系数	玻璃牌号	换算系数	玻璃牌号	换算系数	玻璃牌号	换算系数	玻璃牌号	换算系数
K9	1.00	BaF3	1.13	ZK8	1.24	F2	1.28	ZF1	1.40
BaK3	1.04	BaK7	1.16	ZK6	1.27	F3	1.31	ZF2	1.48
ZK3	1.11	BaK8	1.20	QF3	1.28	F4	1.35	ZF3	1.68
								ZF5	1.80

第五章 光学冷加工工艺

一、开 料

1. 手工切割

图 5-1 是手工切割示意图。它的优点是设备简单，不需装夹。缺点是劳动强度大，切口平整性差。在切割棱镜毛坯时，常利用专用夹具。图 5-2 是用这种夹具切割等腰棱镜毛坯的示意图。

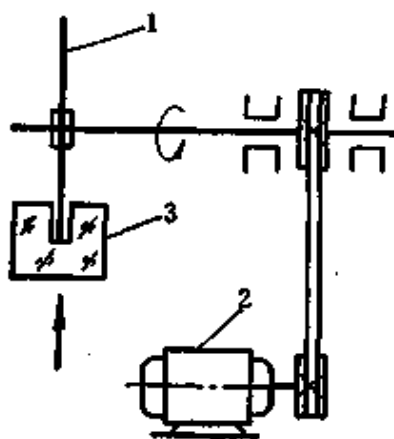


图 5-1 简易切割机示意图
1—锯片 2—电机 3—玻璃

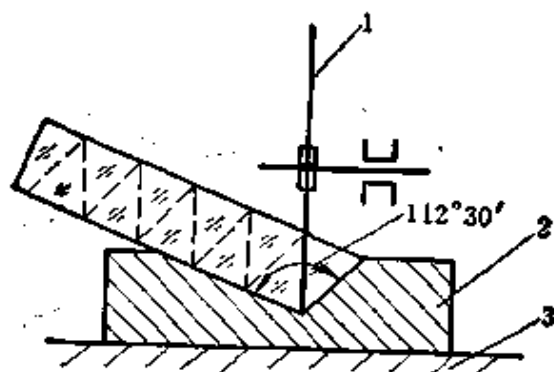


图 5-2 用夹具切割等腰棱镜毛坯
1—锯片 2—夹具 3—工作台

切割用金刚石锯片的结构尺寸见图 5-3 和表 5-1。

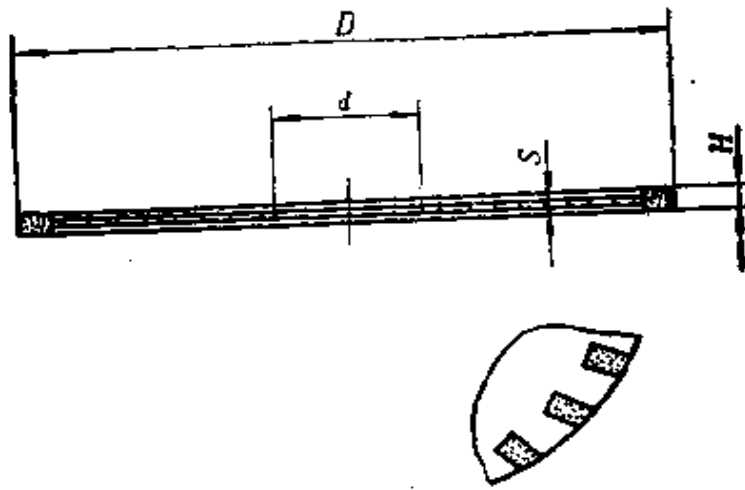


图 5-3 金刚石锯片

表 5-1 金刚石锯片尺寸

(mm)

D	d	H	S
100	16	0.8	0.5
150	16	0.8	0.5
200	20	1	0.5
300	32	1.6	1
400	40	2	1.5

金刚石锯片基体选用 A3 钢。金刚石粒度为 60[#]~80[#]，浓度为 75~100%，青铜结合剂。

手工切割中常出现的问题见表 5-2。

表 5-2 手工切割常出现的问题

常见的问题	产生原因
锯口不直	1. 推力不平衡；2. 锯片摆动；3. 推力过大
崩角	1. 推力过大或不匀；2. 锯片不圆；3. 切削结束时用力过大
切削率低	1. 锯片不锋利；2. 冷却水不足；3. 锯片粒度细，转速低

2. 外圆切割机切割

利用外圆切割机切割玻璃的优点是切口平整性好，劳动强度低。缺点是装夹费事，尤其是切小块料更显得不方便。表 5-3 是国产外圆切割机的主要技术参数。表 5-4 是锯片厚度与切口宽度的关系。图 5-4 是切大块料时的压紧装夹。图 5-5 是粘结法装夹。图 5-6 是用排锯一次切割多块平行薄片。

表 5-3 国产外圆切割机主要技术参数

设备名称	型号	加工范围 (mm)	锯片 直径 (mm)	锯片转速 (r/min)	纵向进 给范围 (mm)	进给 方式	电 机 总功率 (kW)
外圆切割机	QG 040 (Q8040)	300×250×150	300 400	3 000 2 000	300	液压	2 350
多片外圆切割机	QG 120 (Q8020)	φ50×200	150 200	4 400 3 500	400	液压	2 000

表 5-4 锯切宽度 (mm)

锯片金刚石层厚度	1	1.5	2
切口宽度	1.4	1.9	2.5

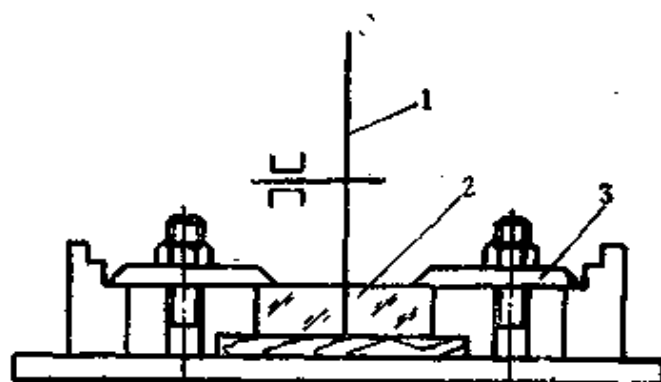


图 5-4 压紧装夹

1—锯片 2—玻璃块料 3—压板

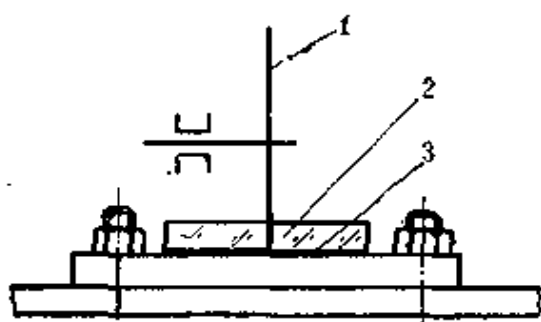


图 5-5 粘结装夹
1—铜片 2—玻璃块料 3—胶层

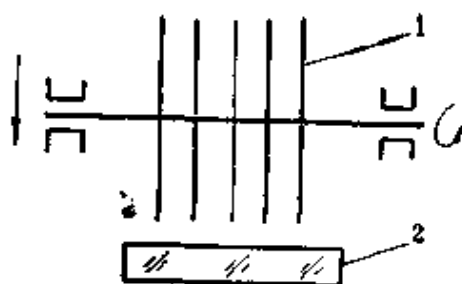


图 5-6 排锯切削
1—锯片 2—玻璃板

3. 内圆切割机切割

内圆切割的优点是切口平整,粗糙度好,锯口窄(约0.3mm),尺寸精度高,平行度好。缺点是不适于切大块料,锯片使用寿命短,工件装夹费事。

国产 J 5060 型内圆切割机的主要技术参数如下:

最大加工尺寸	$\phi 60 \times 75 \text{ mm}$
横向行程	120 mm
纵向行程	100 mm
主轴转速	3 000; 4 000; 5 000 r/min
切割片平行度	0.005 mm

图 5-7 是电镀内圆锯片的规格尺寸。锯片基体选用 45 钢,粒度范围为 280[#]~W40, 每片含金刚石 0.1 g。

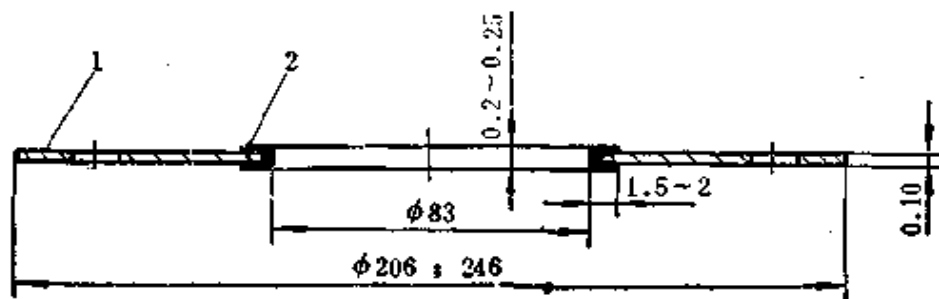


图 5-7 电镀内圆锯片
1—基体 2—电镀金刚石层

4. 静压切割

静压切割适用于棒料。它是在棒料上先用金刚石刀刻出划痕，然后在棒料上均匀涂一层煤油后送入切割器，加压到 $49 \times 10^6 \text{Pa}$ 的径向压力下，在划痕处折断，如图 5-8 所示。静压切割的优点是效率高，无切屑，但目前尚处于初步推广阶段。

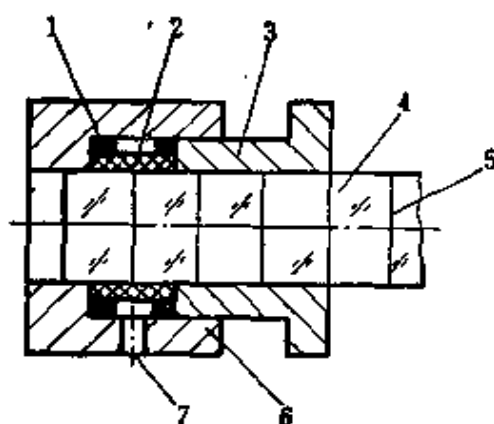


图 5-8 静压切割示意图

1—O 型密封环 2—承压套 3—法兰盖 4—玻璃棒料 5—金刚石刀划痕 6—切割器座 7—进油孔道

QG 3100 型静压切割机技术参数如下：

加工范围	$\phi 15 \sim \phi 42 \text{ mm}$ ，长 200mm
切片直径与厚度比	≤ 4.5
切片周期	8 s
超高压压力	$\leq 98 \times 10^6 \text{ Pa}$
断面平面度	$\leq 0.5 \text{ mm}$

5. 毛玻璃板划切

划切是用金刚石刀或硬质合金滚刀(见图 5-9)在毛玻璃上(表面已磨过 240[#]或更细的砂)划出痕迹，然后从划痕处折断的方法。毛玻璃板厚度小于 10 mm 时，可用一般划玻璃的金刚石刀划切，厚度大于 10 mm 时，用滚刀划切。厚度小于 2 mm 的毛玻璃，划后用手掰开。大于 2 mm 时，用小扁锤从划痕背面轻击，使之裂开。

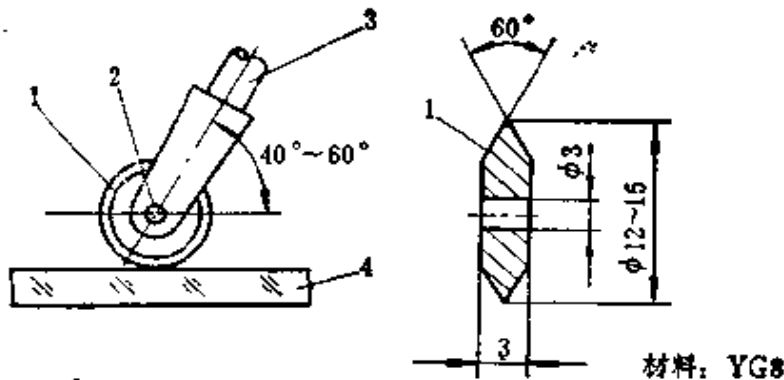


图 5-9 滚刀划切及滚轮

1—滚轮 2—滚轮轴 3—刀杆 4—玻璃

划切时应注意：

(1) 金刚石刀划到边缘时应提起，以免刀子撞到玻璃边缘而损坏刀刃。

(2) 不要重划同一划痕。划方料时，应从正反面分别划相互垂直的线条后再断开。

(3) 划切一般适用于边长与厚度之比大于 3:1 的工件。

划切常见的疵病及其原因如表 5-5 所示。

表 5-5 划切常出现的问题及原因

常出现的问题	产生原因
断裂面过大	1. 划切角度不对；2. 划痕不深；3. 滚轮左右摆动
刀具损坏	1. 玻璃表面太粗；2. 刀尖碰上已有划痕的表面；3. 划至玻璃末端仍用力，刀具碰到玻璃边缘
不按划痕折断	1. 划痕间断，划切时用力不均匀；2. 折断时划痕两侧用力不均；3. 敲击扩大裂痕时用力过猛

6. 窗玻璃划圆

在玻璃上划圆是用专用划圆机进行的，如图 5-10 所示。

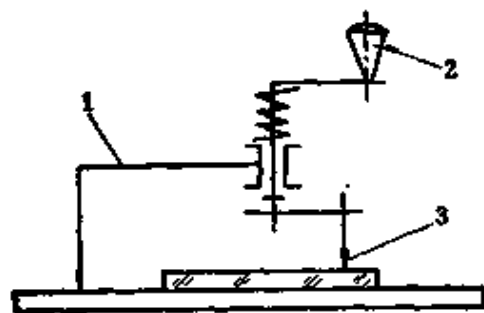


图 5-10 划圆机

1—支架 2—手柄 3—金刚石刀

二、磨 外 圆

1. 手工滚圆

手工滚圆的优点是设备简单。缺点是圆度精度低，效率不高。图 5-11 是滚圆示意图。

滚圆前零件先用松香蜡胶成条，在平模上磨成四方、八方、十六方，然后滚圆。为了提高圆度，当滚圆余量在 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ 时，进行转胶。其方法是在圆柱面上划一直线，经加热后使工件相互错开一角度(见图 5-12)，放到 90° 槽中挤正(见图 5-13)。冷却后再滚圆到规定尺寸。转胶的次数越多，圆度越好。

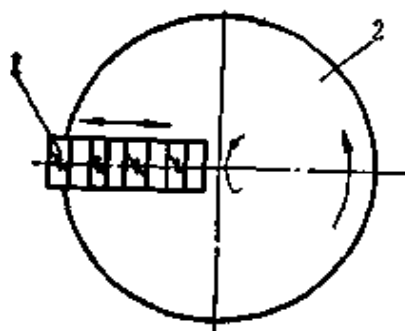


图 5-11 手工滚圆

1—玻璃胶条 2—平模

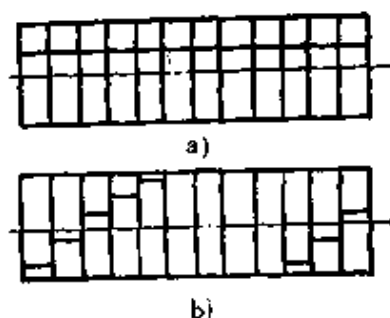


图 5-12 转胶

a) 转胶前 b) 转胶后的直线错位

为了提高圆度和圆柱度，最后留下 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 余量时，在 V 形槽或半圆槽中用木板加磨料搓，如图 5-14 所示。

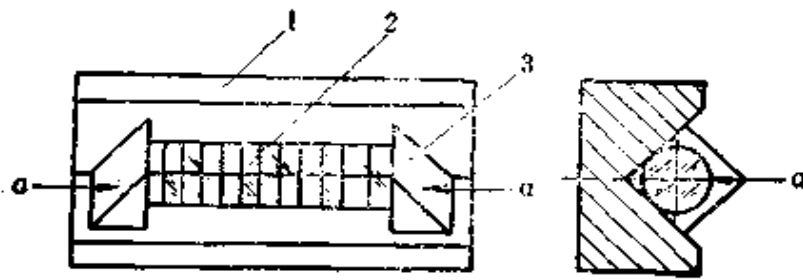


图 5-13 胶条

1—90°槽 2—工件 3—直角靠块 a—加压方向

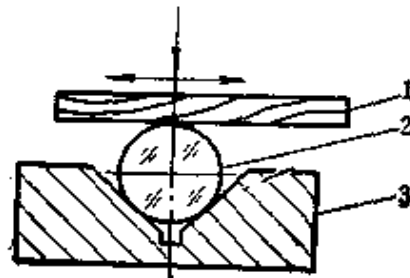


图 5-14 搓外圆

1—木板 2—玻璃条 3—V形槽

2. 机器磨外圆

(1) 外圆磨床加工外圆 图 5-15 是利用外圆磨床磨外圆的示意图。图 5-16、5-17 是磨外圆的顶套和接头。

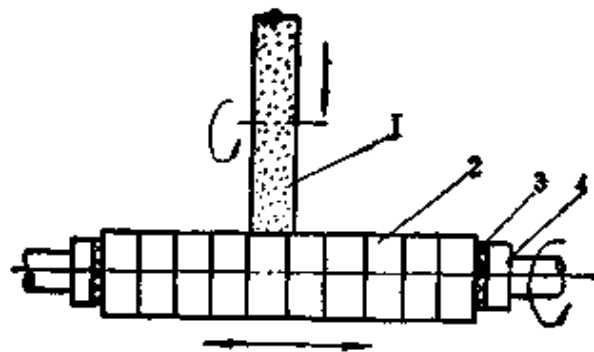


图 5-15 在磨床上磨外圆

1—砂轮 2—工件 3—毛毡 4—接头

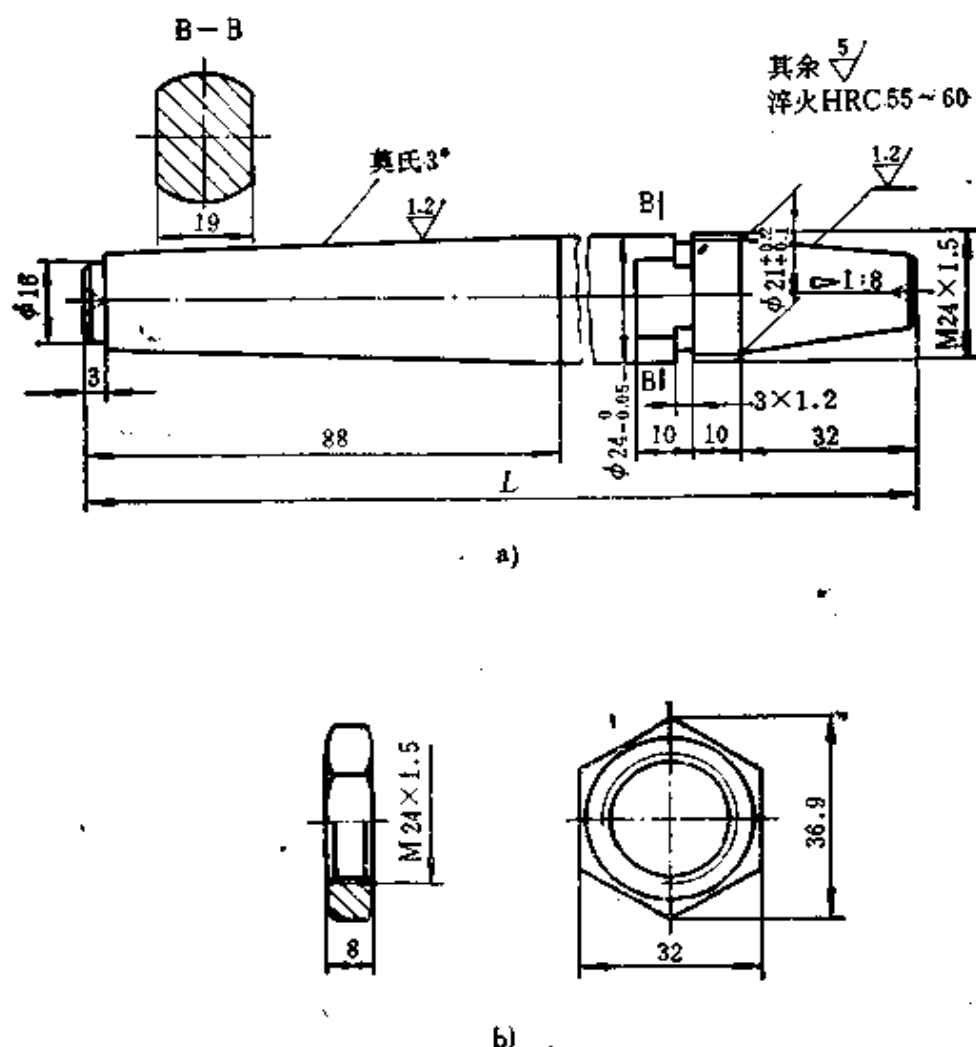


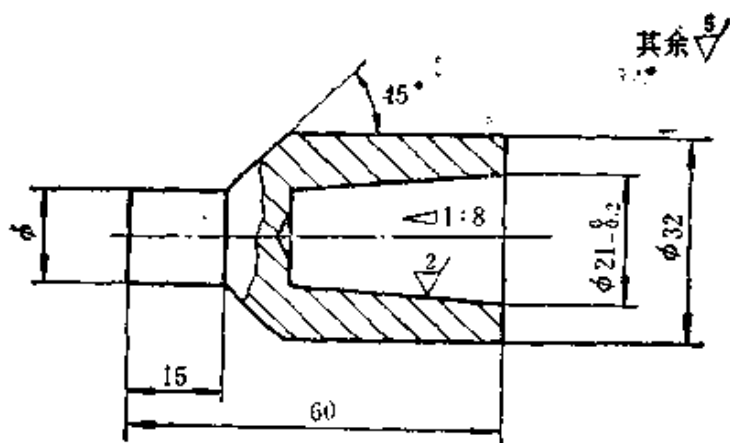
图 5-16 顶套

a) 顶套体 b) 螺母

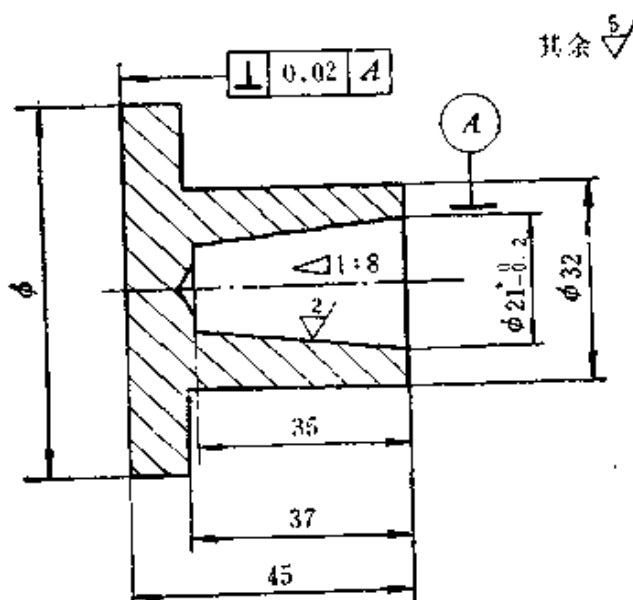
 L 为 150, 200, 250 mm

加工时的基本工艺参数如下:

工件转速	60~150 r/min
工件线速度	0.3~1.5 m/s
往复速度	0.8~1.7 m/min
最大磨削量	0.01~0.05 mm
砂轮	金刚石粒度 80#~100#, 浓度 100%, 青铜结合剂
	碳化硅砂轮粒度 60#~100#, 中软 ZR ₁ ~ZR ₂



a)



b)

图 5-17 磨外圆接头

a)图中 ϕ 为5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 24; 28; 32 mm b)图中 ϕ 为40; 50; 65; 80; 100 mm

金刚石砂轮的形状和规格尺寸见图 5-18 和表 5-6;

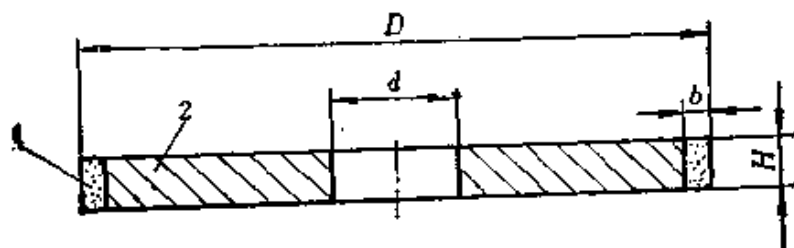


图 5-18 金刚石平形砂轮

1—金刚石层 2—基体

表 5-6 平形砂轮尺寸 (mm)

D	H	b	d
100	6; 8; 10; 16	4	20
125	6; 8; 10; 16	4	32
150	6; 8; 10; 16; 20	4	32
200	8; 10; 16; 20	4	32; 75
250	10; 16; 20; 25	5	75; 127
300	10; 16; 20; 25	5	127; 203

(2) 外圆铣磨机加工外圆 外圆铣磨机采用光学筒形砂轮, 在磨削时砂轮与工件旋转轴形成某一角度(平常为 30° 左右)使一次磨削量增大, 如图 5-19 所示。

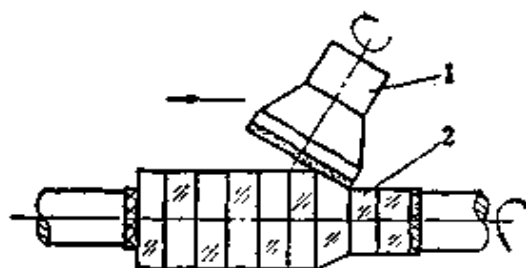


图 5-19 外圆铣磨
1—光学筒形砂轮 2—工件

XM 08 (Q 818) 外圆铣磨机主要技术参数如下:

工件最大长度	300 mm
工件加工直径	$\phi 10 \sim \sim \phi 80$ mm
工件轴转速	40; 57; 78; 91; 129; 175 r/min
工件进给速度	5.7~1 730 mm/min (液压无级调速)
砂轮转速	8 400 r/min
砂轮直径	$\phi 70$ mm
砂轮粒度	70#

直径大于 250 mm 的工件，采用平夹铣磨外圆，如图 5-20 所示。柱面母线的直线度可通过调整金刚石砂轮的纵向位置来实现。砂轮直径越大，柱面母线的直线度越好。

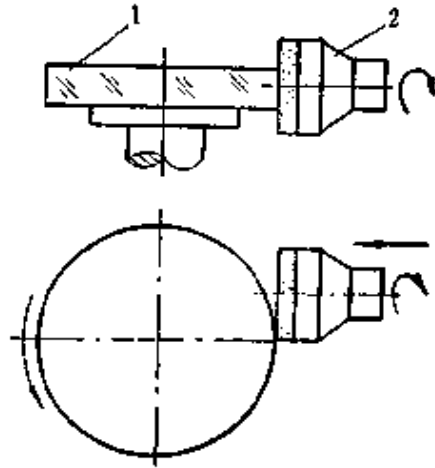


图 5-20 大工件铣磨外圆
1—工件 2—筒形砂轮

(3) 无心磨床加工外圆 图 5-21 是无心磨床加工外圆示意图。它主要用于加工直径小于 7 mm 的工件。工件的进给速度由导轮与砂轮轴线之间的夹角决定(一般为 $1^{\circ} \sim 6^{\circ}$)。最大磨削量和进给速度见表 5-7。

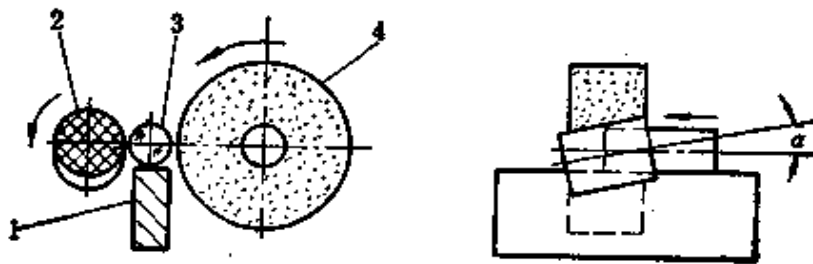


图 5-21 无心磨床磨外圆
1—支板 2—导轮 3—工件 4—砂轮

表 5-7 无心磨床磨削量

加工类别	一次最大磨削量(mm)	工件进给速度(mm/min)
去 棱 角	0.2~0.3	140~180
粗磨外圆	0.2~0.3	120~140
精磨外圆	0.1~0.3	110~120

3. 外圆加工余量及公差

外圆加工余量见表 5-8。

表 5-8

工件直径 (mm)	加工种类	余 量 (mm)
3~10	无心磨床	0.4~0.6
6~40	手工滚圆 外圆磨床 外圆铣磨机	1.5~2.5
大于40	外圆磨床 外圆铣磨机	2.5~4

磨外圆公差见表 5-9。

表 5-9

工 件 种 类	外圆公差 (mm)
一般透镜毛坯	$\pm 0.05 \sim \pm 0.2$
真空吸附装夹的透镜毛坯	-0.1
平面镜、分划板等不再加工外圆的零件	按图纸要求

4. 外圆加工常见的问题

见表5-10。

表 5-10

常见的问题	产生原因
玻璃条断裂	1. 砂轮表面不平; 2. 磨削量过大; 3. 玻璃条过长; 4. 玻璃条粘结强度不够(胶层不均匀, 粘结温度低)
圆度、圆柱度不好	1. 接头跳动; 2. 活顶尖松动; 3. 顶尖轴线与进给导轨不平行; 4. 无心磨床支板过低; 5. 手工滚圆时调头少, 转胶次数少
表面粗糙度不好	1. 砂轮粒度粗、进刀过快、磨削量过大; 2. 砂轮钝化、冷却液不足
端面与圆柱轴线不垂直	1. 玻璃条夹紧时倾斜; 2. 胶层不均匀; 3. 胶条或转胶时端面与玻璃条轴线不垂直
玻璃条不转	1. 玻璃条两端垫片的摩擦力小; 2. 被动顶尖的转动阻力大; 3. 玻璃条直径过小; 4. 夹紧压力不够大

三、粗磨平面

1. 散粒磨料多片加工

将粘盘(见图5-22)加热, 用石蜡或松香蜡将平面工件上盘并加工平面(见图5-23)。粘盘中心要凹。

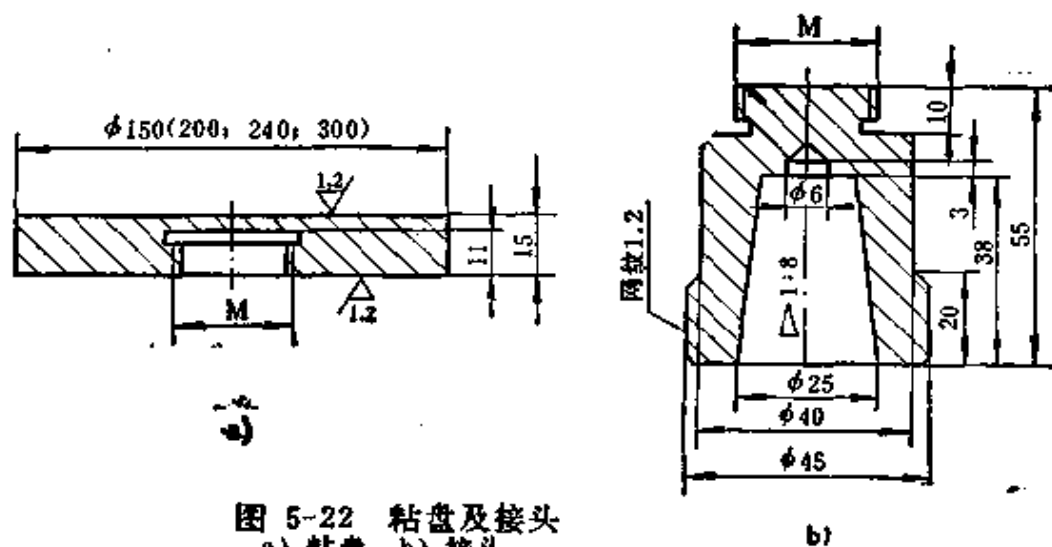


图 5-22 粘盘及接头
a) 粘盘 b) 接头

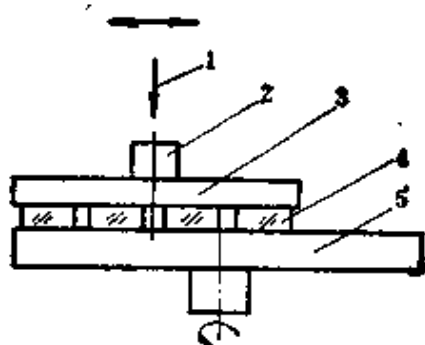


图 5-23 用散粒磨料磨平面

1—铁笔加压 2—接头 3—粘盘 4—工件 5—平模

2. 散粒磨料单件加工

直径大于150 mm的工件，可用小平模粘结单件加工，如图5-24所示。如外圆较规则，可不必粘结，装在套模内加工即可，如图5-25所示。

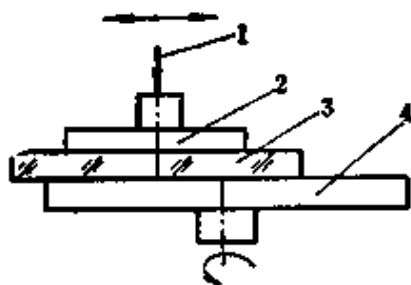


图 5-24 大工件磨平面

1—铁笔加压 2—小平模
3—工件 4—平模

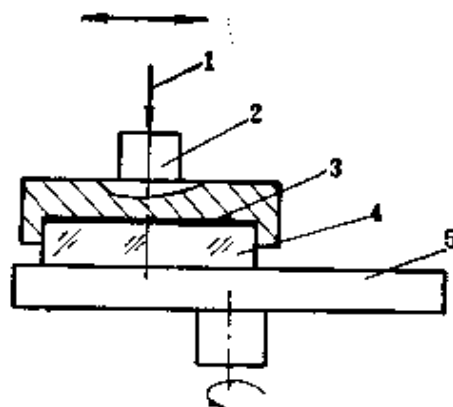


图 5-25 用套模装夹磨平面

1—铁笔加压 2—套模 3—呢布垫
4—工件 5—平模

3. 环形工件加工

度盘一类环形工件，可采用专用工具以中心孔为装夹定位加工，如图5-26所示。

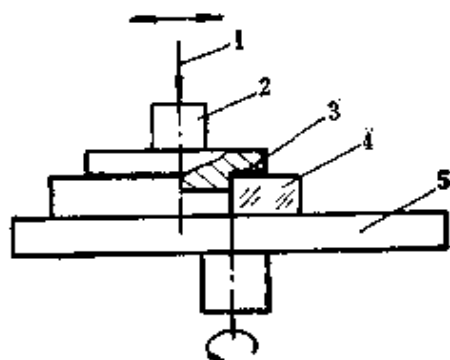


图 5-26 环形玻璃磨平面

1—铁笔加压 2—夹具 3—呢布垫 4—工件 5—平模

4. 双面加工

在行星研磨机上，同时研磨工件两面(见图5-27)。图中隔圈材料为夹布胶木，隔圈的工件孔与中心不对称，以实现均匀磨削。

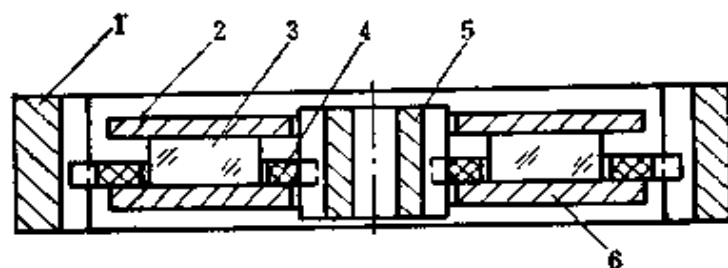


图 5-27 双面研磨示意图

1—内齿轮 2—上研磨盘 3—工件 4—隔圈 5—中心齿轮
6—下研磨盘

6. 铣磨加工

(1) 用XM 250(PM 500)铣磨机加工平面 平面铣磨如图 5-28所示。

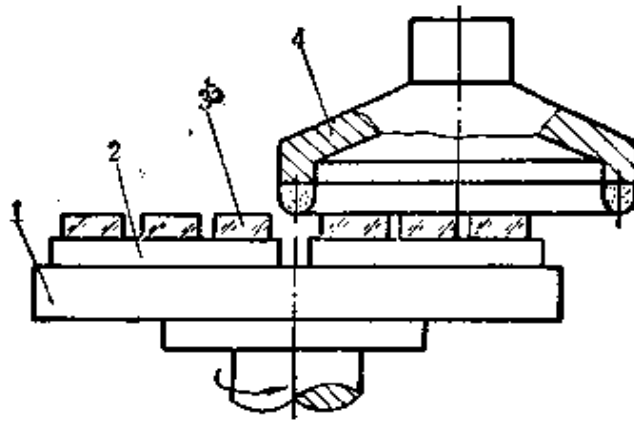


图 5-28 平面铣磨原理
1—电磁吸盘 2—粘盘 3—工件 4—砂轮

XM 250 平面铣磨机主要技术参数如下：

砂轮(图5-29)直径	$\phi 300 \text{ mm}$
转速	2400 r/min
粒度	$60\# \sim 80\#$
浓度	100%
加工最大直径	$\phi 500 \text{ mm}$
磨头最大行程	200 mm
磨头快速进退速度	420 mm/min
磨头进给量	$0.4; 0.6; 1; 1.4 \text{ mm/r}$
工作台转速	$0.67; 0.47; 0.28; 0.19 \text{ r/min}$

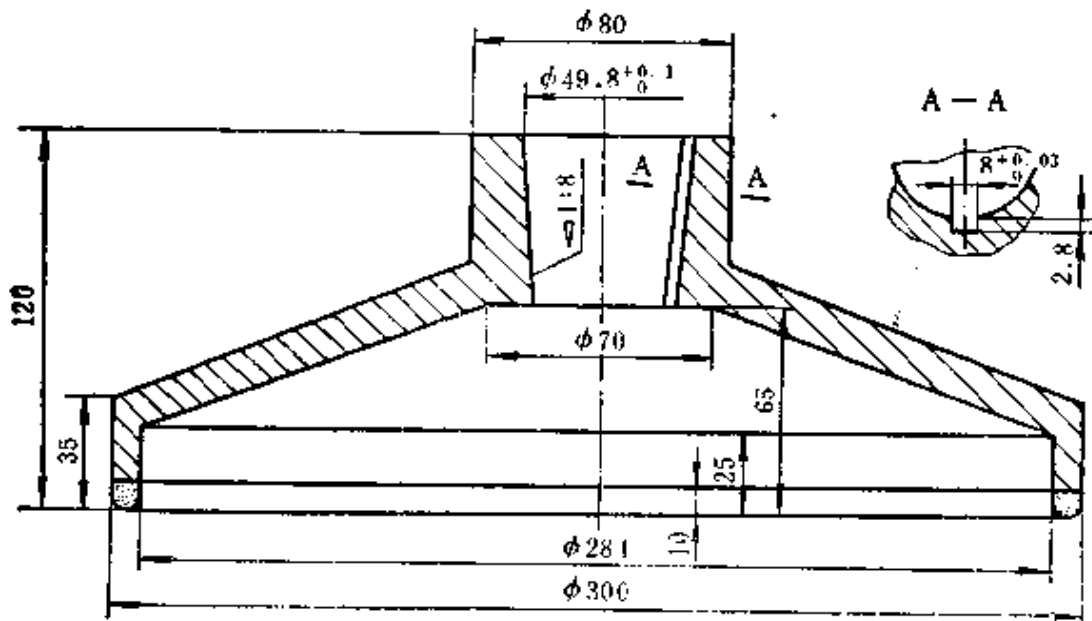


图 5-29 XM250用砂轮

工件装夹:

工件用石蜡或松香蜡粘结于平行粘盘上,粘盘置于机床电磁吸盘工作台上。粘盘可以做成圆形、方形、扇形(见图5-30)。扇形粘盘对电磁工作台利用率最高。

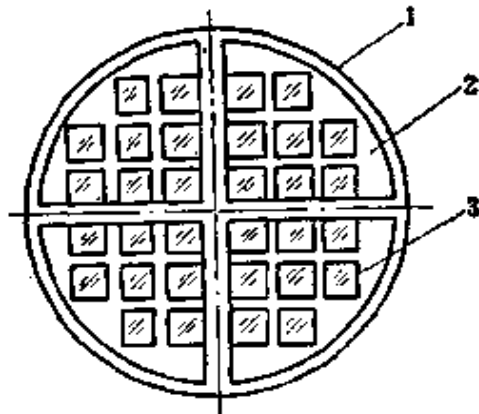


图 5-30 扇形粘盘装夹
1—磁力工作台 2—扇形粘盘 3—工件

大工件可直接放在电磁吸盘工作台上,依靠导磁挡块将工件固定住,如图5-31所示。

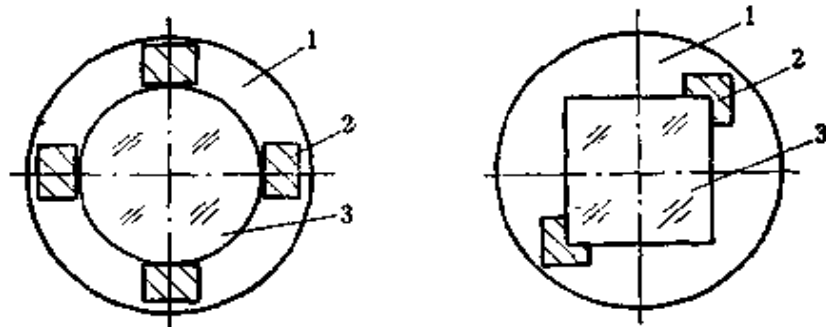


图 5-31 用导磁挡块装夹工件
1—磁力工作台 2—导磁挡块 3—工件

(2) 用 XM 130(QM 30)铣磨机加工平面 XM 130 型是球面、平面两用铣磨机,其主要技术参数如下:

砂轮(图5-32)中径	160~190 mm
加工最大直径	300mm

砂轮转速	4 350r/min
磨头最大行程	300mm
磨头快速进退速度	210 mm/min
磨头进给量	2.5; 1 mm/r
工作台转速	0.14; 0.21; 0.29; 0.45; 0.67; 0.94 r/min

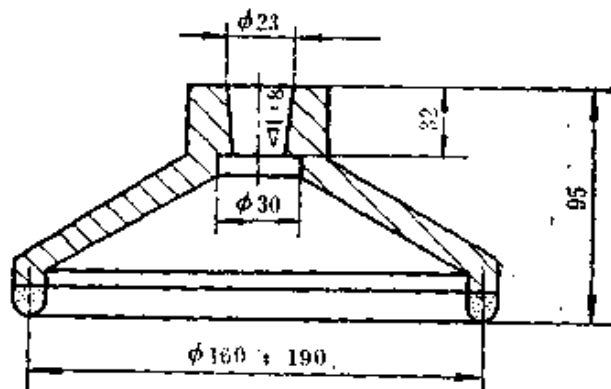


图 5-32 XM 130 平铣用砂轮

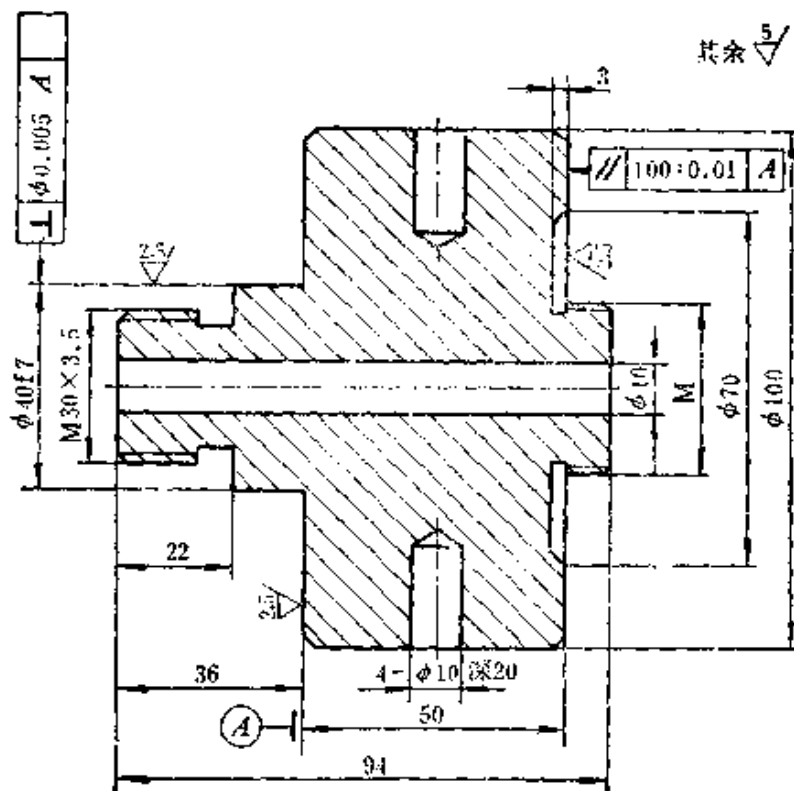


图 5-33 中间接头

工件装夹:

工件用石蜡或松香蜡粘在粘盘上,粘盘通过中间接头(见图5-33)与机床主轴连接。

真空吸附如图5-34、5-35所示。

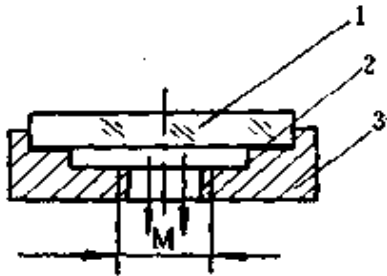


图 5-34 单片真空吸附
1—工件 2—耐油橡皮 3—胎具

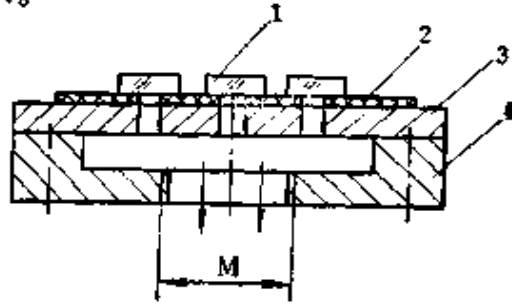


图 5-35 平板玻璃的吸附
1—工件 2—耐油橡皮 3—平板 4—底座

(3) 注意事项

1) 磨头快速下降变慢速进给时,一定要离镜盘最高点 1~3 mm。

2) 第一次试磨时,应给百分表和控制尺寸的基准块之间留出充足的距离,以免间距过小而挤坏百分表。

3) 冷却液喷射位置应正确(见图5-36),否则会影响磨削效果。

4) 为了防止冷却液着火,应选用闪点高的冷却液。夏天油温过高时,可采用吹风冷却油箱或在油箱内装螺旋形自来水管降温。

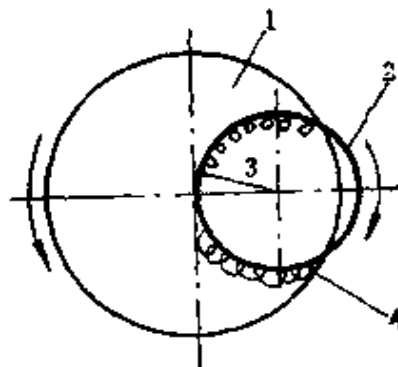


图 5-36 正确的喷射位置
1—镜盘 2—砂轮刃口 3—内喷位置 4—外喷位置

6. 粗磨平面疵病产生原因

见表5-11。

表 5-11

常见疵病	产 生 原 因	
	用散粒磨料粗磨平面	铣磨平面
粗糙度不好	1. 磨料不纯, 粒度不均匀; 2. 砂号间隔大, 且研磨时间不足; 3. 换砂时未清洗干净	1. 砂轮粒度粗; 2. 机床振动较大; 3. 冷却液喷射位置不当或流量不足; 4. 进刀量过大; 5. 光刀时间不足
平行度、平面度不好	1. 粘盘的平行度、平面度差; 2. 粘结胶层不均匀; 3. 平模平面度差; 4. 镜盘摆动不当	1. 磨头轴与工件轴不平行; 2. 粘盘平行度、平面度差; 3. 胎具工作面与主轴不垂直; 4. 真空吸附用橡皮垫圈厚度不均匀

四、粗磨棱镜及斜面

1. 夹模

成批粗磨棱镜时, 将棱镜毛坯在夹模内机械夹紧或粘结上盘, 再用散粒磨料或铣磨机加工。夹模主要技术要求参看第四章第三节。

2. 平模

用散粒磨料 (150[#]~W 28) 粗磨时, 常用平模直径为 300~400 mm, 材料为铸铁, 转速为 400~500 r/min。

3. 铣磨棱镜

除了将夹模装于铣磨机主轴上加工各种棱镜外, 还可用专用棱镜铣磨机直接铣磨成形, 如 XM 26.4 型平面铣磨机 (Q 882) 型棱镜铣磨机) 采用四个磨头, 一次装夹同时铣磨四个面。铣磨机主要技术参数如下:

加工范围	250 × 60 × 50 mm
进给速度	12~100 mm/min
磨头转速	11500 r/min
工作台行程	500 mm

4. 磨斜面

平面镜侧面需要磨出一个斜面时，可将粗磨好的毛面镜粘成长条，放入图5-37所示直角靠模内，依靠角度靠块，将平面镜倾斜成 α 角，冷却后磨去虚线以下部位即成。

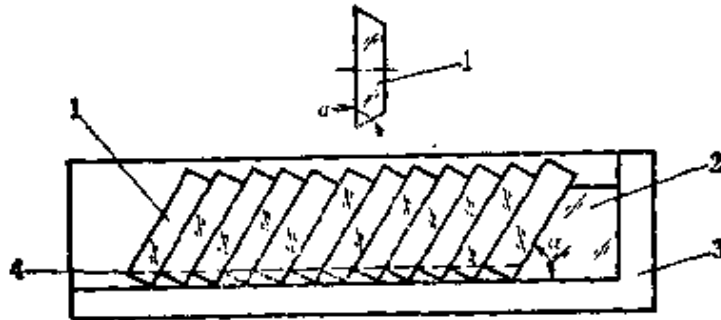


图 5-37 玻璃条磨成角度(α)前的粘结
1—工件 2—角度靠块 3—角板 4—磨掉部位

5. 磨椭圆反射镜斜面

侧面有斜角的椭圆反射镜的粗磨加工，一般在外圆磨床上进行(见图5-38)。

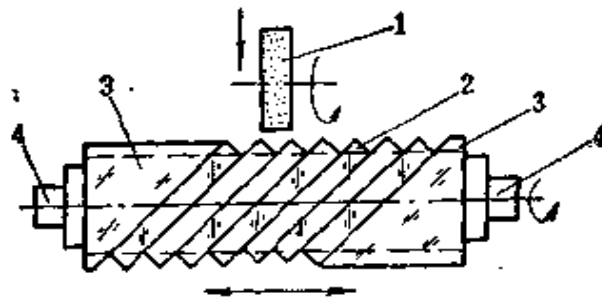


图 5-38 椭圆斜面加工
1—砂轮 2—工件 3—靠块 4—接头

五、粗磨球面

1. 单件手工加工

图5-39是用散粒磨料单件粗磨球面。球模在主轴上。其主要工艺技术参数如表5-12所示。

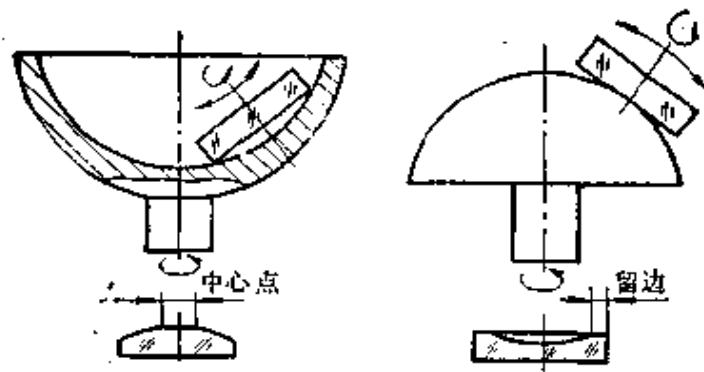


图 5-39 手工粗磨球面

表 5-12 磨球面工艺技术参数

(mm)

球面矢高径	<1	<0.5	<0.1
项目			
磨料粒度	150*~180*	240*~280*	W40~W28
单面磨削量	0.3~0.4	0.1~0.2	0.05~0.1
凸面中心点直径	2~3	1~2	0
凹面边宽	1~1.5	0.3~0.5	0

图 5-40 是用于测量透镜边厚差的装置。

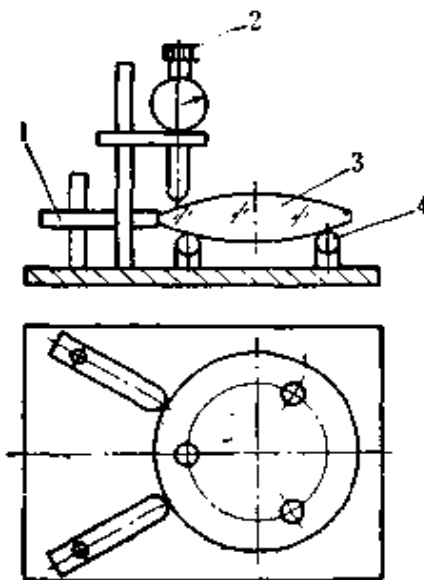


图5-40 测量透镜边厚差装置

1—定位块 2—千分表
3—透镜 4—支撑钢球

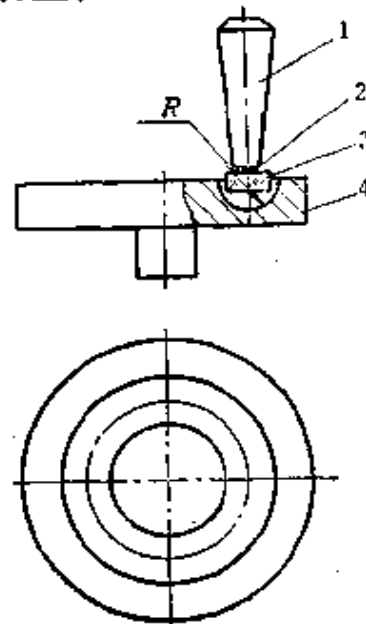


图 5-41 用沟槽模粗磨球面

1—铝棍 2—胶层 3—工件
4—沟槽模

2. 沟槽模加工

直径小于 8mm、半径小于 6mm、矢高大于 $0.5R$ 的球面，可采用图 5-41 所示沟槽模加工。这种加工方法，整个平模上可同时开多条槽。槽深等于或小于曲率半径 R 。研磨时，粘棍顺着槽倾斜 $60^\circ \sim 70^\circ$ 左右，同时围绕自身轴线转动。在沟槽中磨到 $180^\# \sim 240^\#$ 砂，留中心点 $\phi 1 \sim \phi 2$ mm 时，改用球模加工，最后用 W23 砂磨去中心检验点。

3. 整盘粗磨球面

对直径小而曲率半径大的球面，可以用弹性胶粘结平面毛坯，然后整盘粗磨。

(1) 磨凸面 工件贴于凹模上，将凸粘结模加热，涂胶上盘。用半径为 R 的凹模进行研磨。模具计算如下（参看图 5-42），

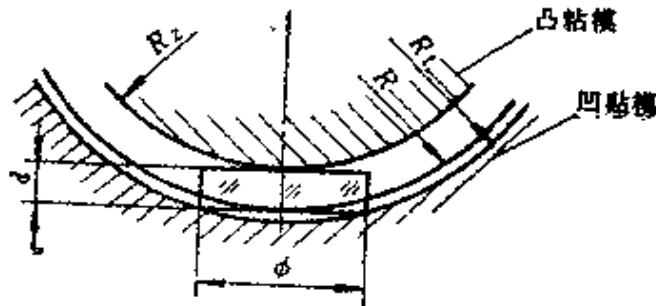


图 5-42

$$\text{凹贴置模半径 } R_2 = \sqrt{R^2 + (\phi/2)^2} \quad (5-1)$$

$$\text{凸粘结模半径 } R_1 = R - d \quad (5-2)$$

式中 R ——粗磨曲率半径；
 ϕ ——工件直径；
 d ——工件中心厚度。

(2) 磨凹面 工件粘在凹模上，用半径 R 的凸模进行研磨。模具计算如下（参看图 5-43），

$$\text{凹粘结模半径 } R_2 = \sqrt{(R + d)^2 + (\phi/2)^2} \quad (5-3)$$

4. 铣磨球面

(1) 球面铣磨原理 图 5-44 是球面铣磨成形示意图。球面半径 R 与砂轮倾斜角 α 之间关系如下:

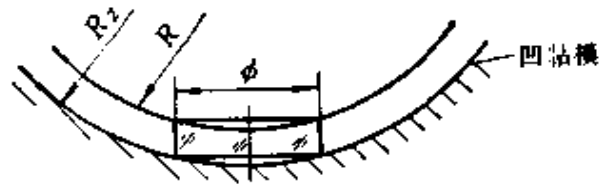


图 5-43

$$\sin \alpha = \frac{D}{2(R \pm r)} \quad (5-4)$$

式中 α ——砂轮倾斜角;
 D ——砂轮中径;
 r ——砂轮刃口圆弧半径(凸面取“+”,凹面取“-”);
 R ——工件曲率半径。

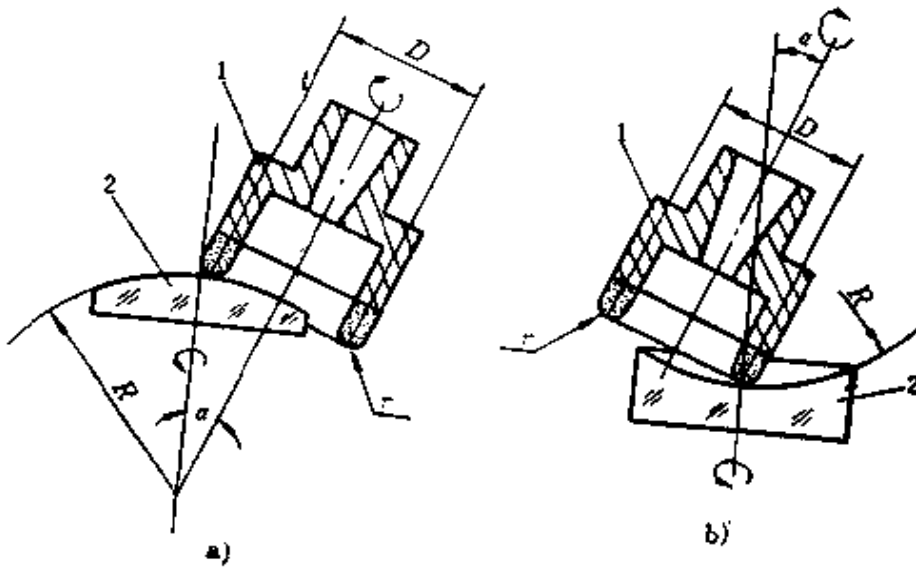


图 5-44 球面铣磨原理

1—金钢石砂轮 2—工件

(2) 铣磨机 铣磨机的主要技术参数见表 5-13。

(3) 机床调整

1) 砂轮轴倾斜角度 α 的调整 将砂轮轴调到按式(5-4)计算得到的倾斜角 α 位置, 反复调角试磨, 直到工件曲率半径符合技术要求为止。

2) 中心调整 当砂轮刃口的顶点不在工件旋转中心时, 工

表 5-13 球面铣磨机主要技术参数

机床型号	XM 13 (Q 813)	XMP 18 (QM 08 A)	XM 130 (QM 30)	XM 16 (Q 826)
加工范围(mm)	$\phi 4 \sim \phi 30$	$\phi 15 \sim \phi 80$	$\phi 60 \sim \phi 300$	$\phi 20 \sim \phi 60$
加工最小曲率半径(mm)	R3.5(凸) R5 (凹)	R7.5(凸) R9 (凹)	R30(凸) R33(凹)	
最大进给量(mm)	12	4; 6	10	
磨头最大倾斜角($^{\circ}$)	46	50	50	45
磨头转速(r/min)	14 000	14 000	4 350	12 000
工件轴转速 (r/min)	3; 6	0.9~8	0.14; 0.21; 0.29; 0.45; 0.67; 0.94	1~5
电机总功率(kW)	0.55	1.675	3.925	2.1

件表面中心会出现凸包(见图 5-45)。根据凸包是在砂轮磨纹的弧线外面或里面, 来判断砂轮刃口顶点是超过工件中心还是未到工件中心。图 5-45a 为砂轮刃口顶点未到工件中心, 称外凸包; 图 5-45b 为砂轮刃口顶点超过工件中心, 称内凸包。调整时, 从磨纹判断内、外凸包, 并估计凸包的直径, 取 1/2 凸包直径来调整横向位置。角度调整和中心调整互有影响, 所以必须交叉进行, 反复试磨。

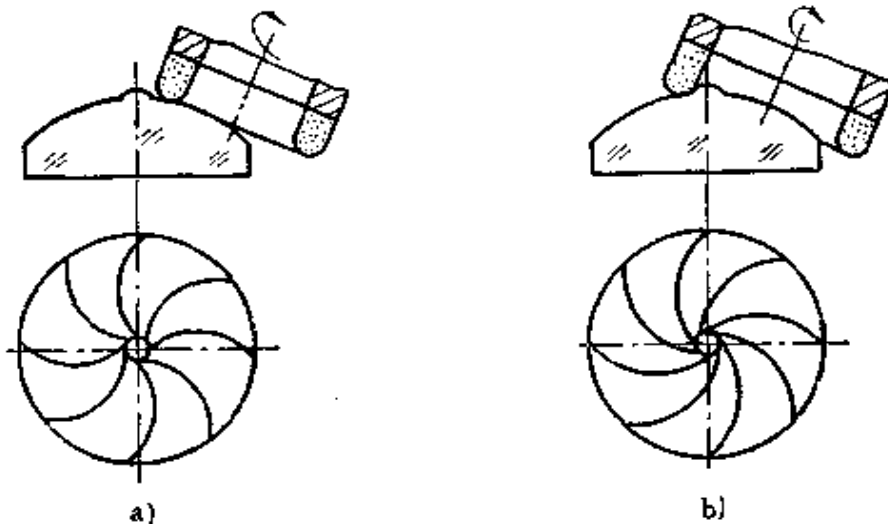


图 5-45 工件中心凸包

a) 外凸包 b) 内凸包

(4) 砂轮 粗磨用光学筒形砂轮粒度为 $60^{\#} \sim 100^{\#}$, 浓度为

100%，系青铜结合剂(代号Q)。砂轮形状和尺寸见图 5-46 及表 5-14。新砂轮使用时，可装在砂轮轴上用手持碳化硅砂轮修整，然后用硝酸银(AgNO_3)溶液腐蚀。注意溶液不许超过磨削环高度 h 。

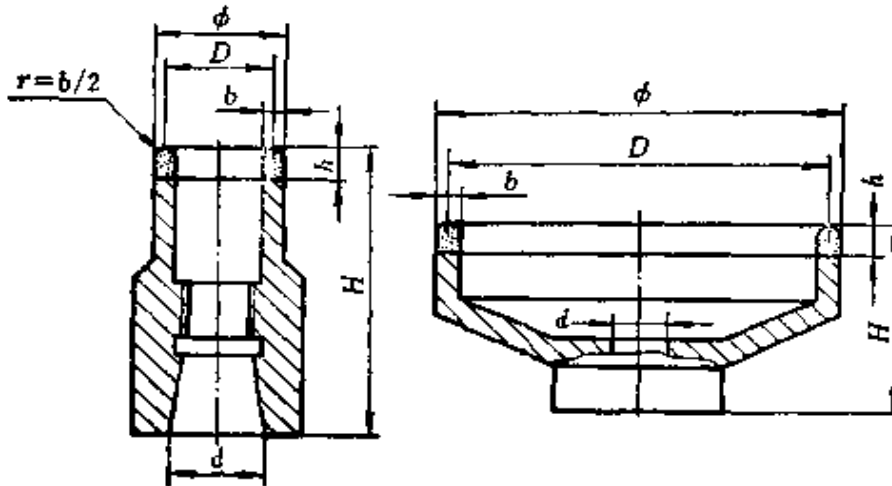


图 5-46 光学筒形砂轮

表 5-14 光学筒形砂轮主要尺寸 (mm)

ϕ	D	H	d	b	h	ϕ	D	H	d	b	h	
8	6	55	15.5 (18)	2	4	74	70	95	23 (28)	4	7	
10	8					84	80					
12	10					94	90					
14.5	12			2.5	6	115	110			5		
16.5	14					135	130					
18.5	16					165	160					
20.5	18			7	7	195	190			7		10
22.5	20					227	220					
28	25					257	250					
33	30			18 (23)	3	307	300					
43	40											
53	50											
63	60											

(5) 铣磨主要技术参数

砂轮线速度	12~35m/s
工件边缘线速度	150~250mm/min
真空吸附真空度	$6.66\sim 8 \times 10^4 \text{Pa}$
冷却液喷射量	3~5L/min(小工件)
	5~8L/min(大工件)

(6) 夹具

1) 真空单片夹具(图 5-47) 材料选用 45 钢, D 与 D_1 的同轴度之差不大于 0.02mm, h 取工件边缘厚度的 1/2~1/3, 另加橡皮垫厚度。

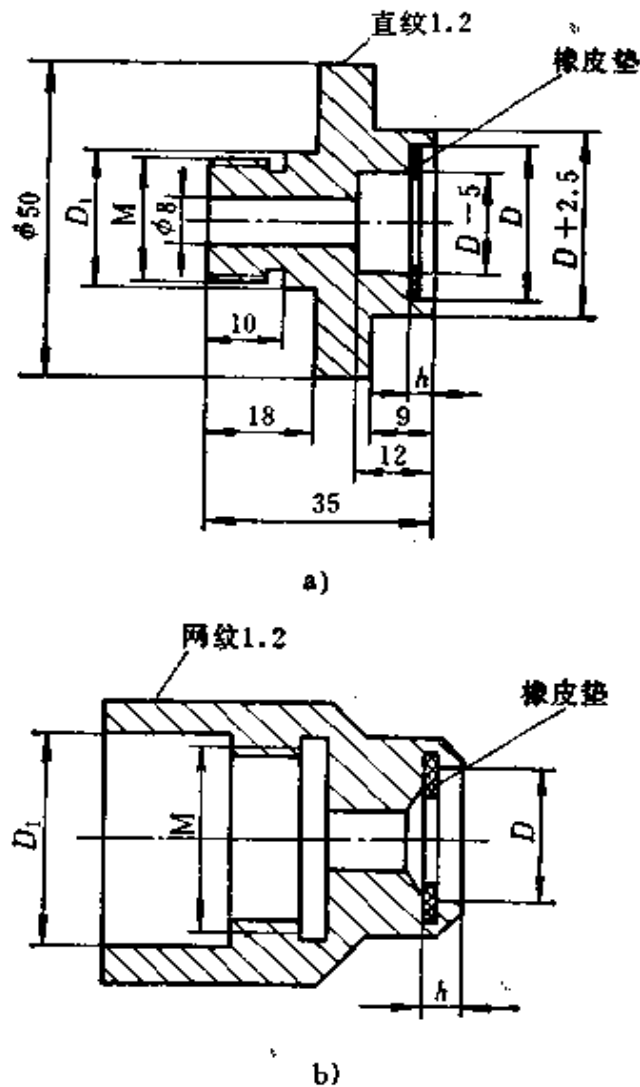


图 5-47 真空单片夹具

a) 带过渡接头时用 b) 直接连接工件轴时使用

2) 真空成盘夹具 成盘夹具目前由于制造及操作上的困难, 不易保证透镜中心厚度的一致性和偏心问题, 故常用于透镜第一面加工, 第二面常用单片铣磨。图 5-48 为带承座的成盘夹具, 其球模半径 R_M 为

$$R_M = \sqrt{(R - d - \delta - h)^2 + (D/2)^2} \quad (5-5)$$

式中 R ——球面曲率半径;
 d ——工件中心厚度;
 δ ——橡皮垫的厚度;
 h ——承座两基准面间的高度;
 D ——承座与球模接触圈之直径。

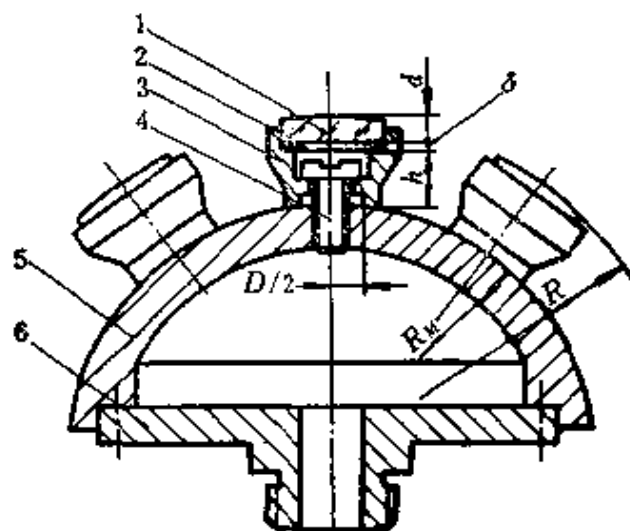


图 5-48 有承座的真空夹具

1—工件 2—橡皮垫 3—承座 4—空心连接螺钉
 5—球模 6—法兰盘

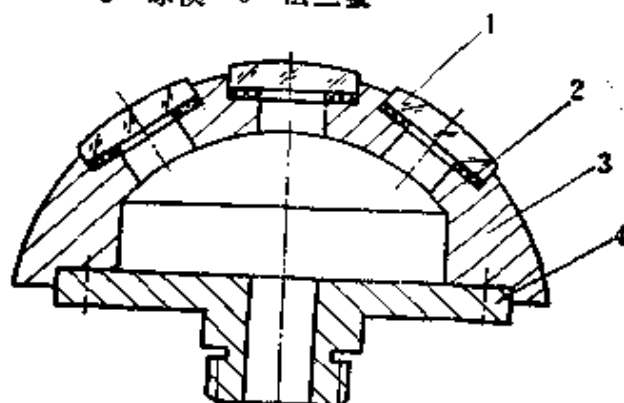


图 5-49 无承座的真空夹具

1—工件 2—橡皮垫 3—球模 4—法兰盘

图 5-49 为不带承座的真空夹具。

3) 弹性夹具 图 5-50 为收管夹具，由收管、锥套组成。有时配上衬套使用。当工件口径变化不大时，不必更换夹具，只需更换衬套即可。

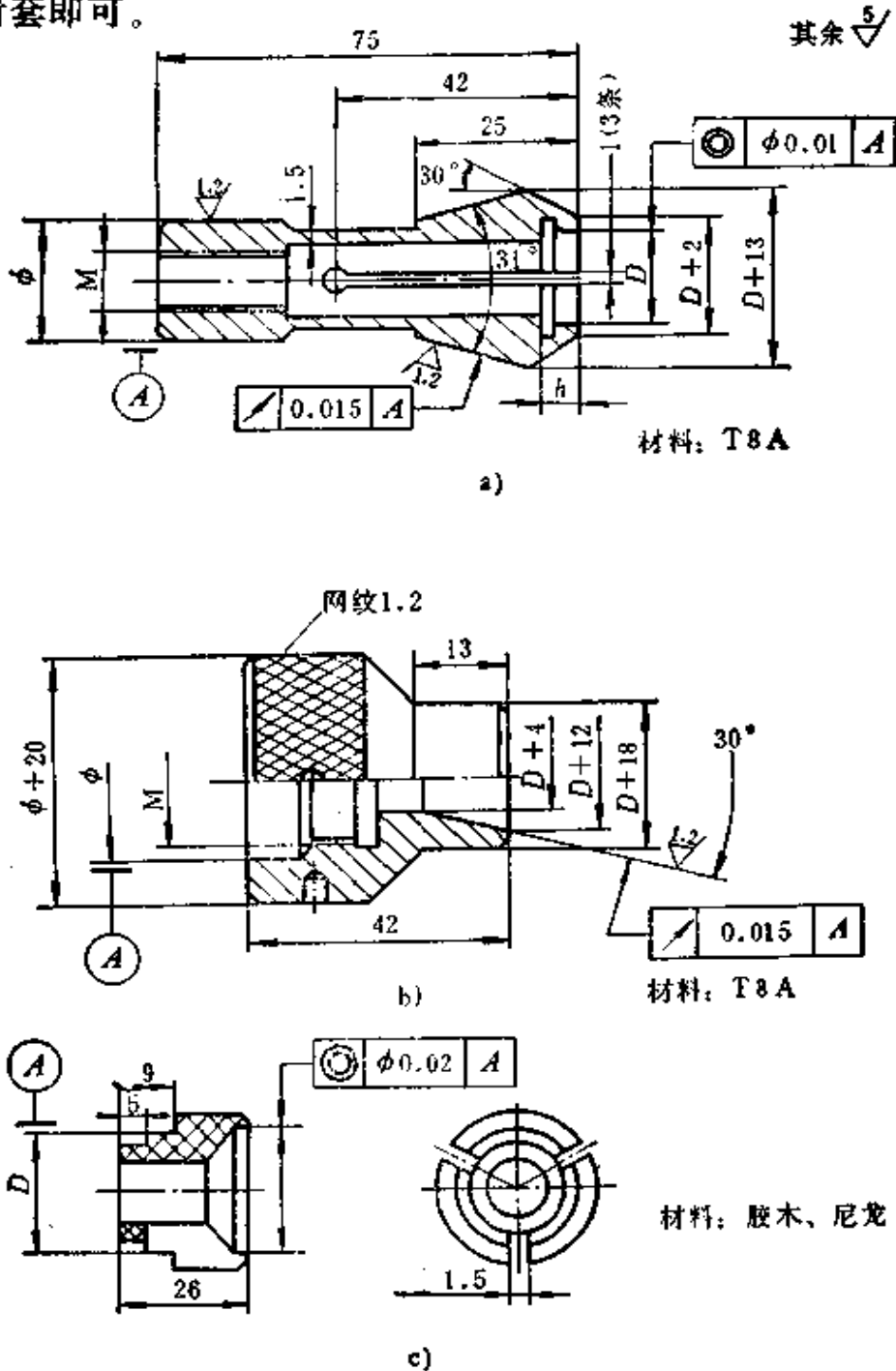


图 5-50 收管夹具

a) 收管 b) 锥套 c) 衬套

图 5-51 为卡管夹具，由卡头和卡帽组成。

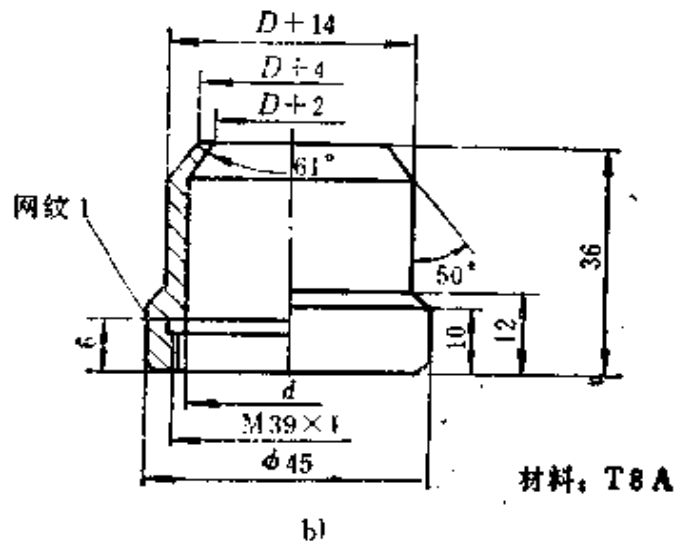
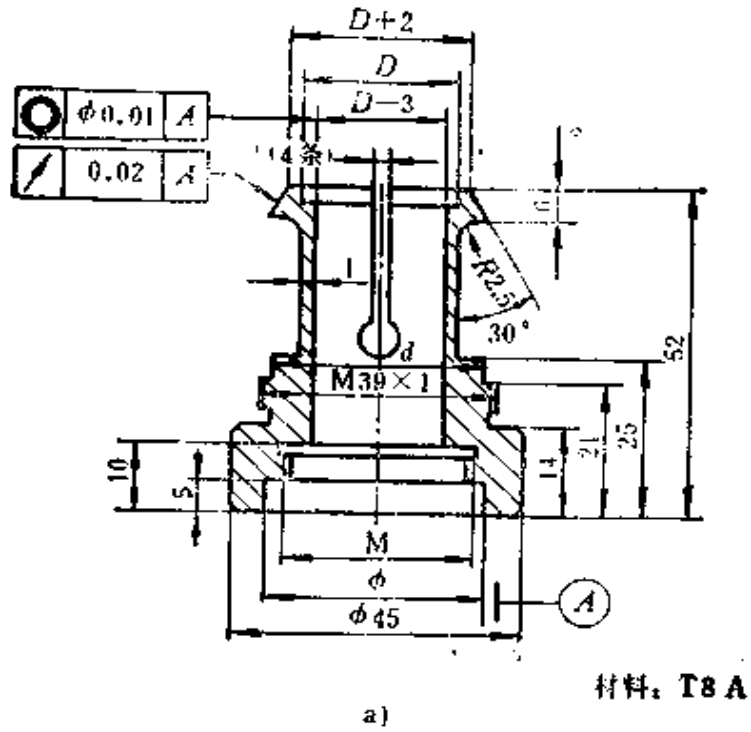


图 5-51 卡管夹具

a) 卡头 b) 卡帽

5. 铣磨冷却液

见表 5-15。

表 5-15

冷却液名称	配 方	性 能
煤油加机油	煤油50~80% 机油(10 [#]) 50~20% 气温高, 机油含 量高	磨削效果良好, 但油雾气味 大, 对皮肤有刺激, 易着火
特种高速切削油 (俗称玫瑰油)	特制轻质矿物油	磨削效果良好, 冷却、润滑 性能好
特种油墨溶剂油 (简称特油溶)	馏程 95%, 250~280°C	磨削效果良好, 玻璃屑沉淀 快, 不易着火。对皮肤有腐蚀 现象
柴油加机油	容量比为 2:1, 1~5%乙 基硅油	冷却、润滑性能好, 气味小, 不易着火, 玻璃屑沉淀快
乳化液	乳化油 1 份, 水 5~10 份	洗涤差, 易起泡沫, 对机床 有锈蚀
401 切削液	401 切削油 5%, 软水 95%	冷却性能良好, 无毒。对机 床有锈蚀, 易起泡
XM-1 冷却液	XM-1 冷却液 1 份, 自来 水 25 份	无毒, 无污染, 冷却效果好, 清洗性能好

6. 铣磨中常见的问题

见表 5-16。

表 5-16

常见的问题	产 生 原 因
粗糙度不好	1. 砂轮粒度粗; 2. 机床振动大; 3. 冷却液不佳或流量不足; 4. 吃刀(进给)量过大; 5. 砂轮轴松动; 6. 砂轮轴轴承磨损或 无润滑油; 7. 光刀圈数不够
工件偏心	1. 夹具定位面与工件轴不垂直; 2. 夹具与工件配合过松; 3. 橡皮垫圈不规矩或不等厚
面形不规则	1. 两个轴不在同一平面上; 2. 砂轮轴松动

7. 面形检验

(1) 用金属弧形样板检验

曲率半径较小的球面, 每道工序应有专用弧形样板, 其曲率半径应按第四章介绍的均匀磨损原则设计。

曲率半径较大的球面, 如用曲率半径为基本尺寸的弧形样板

检验，则各道工序应按均匀磨损原则给出擦贴度。

(2) 用简易球径计测量矢高(参看图 5-52)。

用简易球径计测量矢高 h ，然后代入下式求得半径 R ：

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}$$

式中 r ——球径计测环内径(测凸面时)或外径(测凹面时)之半。

或者用标准件作矢高比较测量，这时不必计算 R 。矢高计算公式如下：

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

面形的规则程度通过测量表面不同区域的 h 值，经比较而求得。

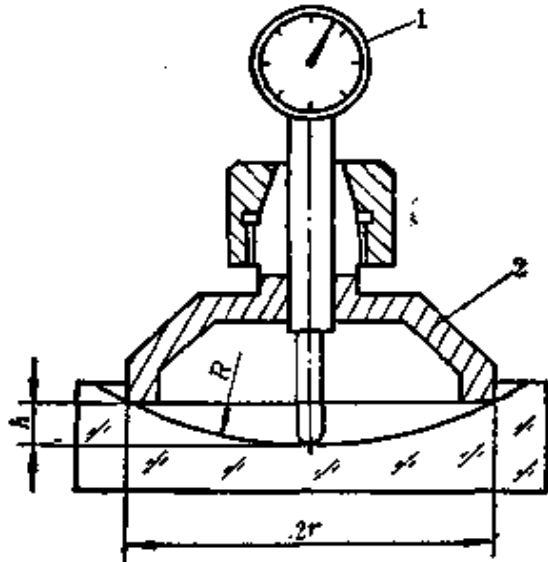


图 5-52 用简易球径计测量矢高
1—千分表 2—钢环

8. 砂轮轴倾斜角 α 表

将球面半径 R 、砂轮中径 D 代入式(5-4)计算所得倾斜角 α 。见表 5-17。

查表说明：选取砂轮中径为透镜直径或镜盘的 $2/3 \sim 3/4$ 。根据砂轮中径 D 与所铣磨曲率半径 R ，取凹面在 $-R$ 栏内最接近并小一点的 R ；取凸面在 $+R$ 栏内最接近并大一点的 R 值，然后查得 R 所对应的角度 α 。

表 5-17 砂轮傾斜角度 α (mm)

$D = 6$ $r = 1.00$			$D = 6$ $r = 1.00$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	344.78	342.78	23.00	8.68	6.68
1.00	172.90	170.90	23.50	8.52	6.52
1.50	115.60	113.60	24.00	8.38	6.38
2.00	86.96	84.96	24.50	8.23	6.23
2.50	69.78	67.78	25.00	8.10	6.10
3.00	58.32	56.32	25.50	7.97	5.97
3.50	50.14	48.14	26.00	7.84	5.84
4.00	44.01	42.01	26.50	7.72	5.72
4.50	39.24	37.24	27.00	7.61	5.61
5.00	35.42	33.42	27.50	7.50	5.50
5.50	32.30	30.30	28.00	7.39	5.39
6.00	29.70	27.70	28.50	7.29	5.29
6.50	27.50	25.50	29.00	7.19	5.19
7.00	25.62	23.62	29.50	7.09	5.09
7.50	23.98	21.98	30.00	7.00	5.00
8.00	22.56	20.56	30.50	6.91	4.91
8.50	21.30	19.30	31.00	6.82	4.82
9.00	20.18	18.18	31.50	6.74	4.74
9.50	19.18	17.18	32.00	6.66	4.66
10.00	18.28	16.28	32.50	6.58	4.58
10.50	17.46	15.46	33.00	6.51	4.51
11.00	16.72	14.72	33.50	6.44	4.44
11.50	16.05	14.05	34.00	6.36	4.36
12.00	15.43	13.43	34.50	6.30	4.30
12.50	14.86	12.86	35.00	6.23	4.23
13.00	14.34	12.34	35.50	6.17	4.17
13.50	13.85	11.85	36.00	6.10	4.10
14.00	13.40	11.40	36.50	6.04	4.04
14.50	12.98	10.98	37.00	5.98	3.98
15.00	12.59	10.59	37.50	5.93	3.93
15.50	12.23	10.23	38.00	5.87	3.87
16.00	11.88	9.88	38.50	5.82	3.82
16.50	11.56	9.56	39.00	5.77	3.77
17.00	11.26	9.26	39.50	5.72	3.72
17.50	10.98	8.98	40.00	5.67	3.67
18.00	10.71	8.71	40.50	5.62	3.62
18.50	10.45	8.45	41.00	5.57	3.57
19.00	10.21	8.21	41.50	5.53	3.53
19.50	9.99	7.99	42.00	5.48	3.48
20.00	9.77	7.77	42.50	5.44	3.44
20.50	9.57	7.57	43.00	5.40	3.40
21.00	9.37	7.37	43.50	5.36	3.36
21.50	9.19	7.19	44.00	5.32	3.32
22.00	9.01	7.01	44.50	5.28	3.28
22.50	8.84	6.84	45.00	5.24	3.24

(续)

$D = 8$ $r = 1.00$			$D = 8$ $r = 1.00$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	459.37	457.37	23.00	11.24	9.24
1.00	230.19	228.19	23.50	11.03	9.03
1.50	153.81	151.81	24.00	10.83	8.83
2.00	115.61	113.61	24.50	10.65	8.65
2.50	92.70	90.70	25.00	10.46	8.46
3.00	77.43	75.43	25.50	10.29	8.29
3.50	66.52	64.52	26.00	10.12	8.12
4.00	58.34	56.34	26.50	9.96	7.96
4.50	51.98	49.98	27.00	9.81	7.81
5.00	46.89	44.89	27.50	9.66	7.66
5.50	42.73	40.73	28.00	9.52	7.52
6.00	39.27	37.27	28.50	9.38	7.38
6.50	36.33	34.33	29.00	9.25	7.25
7.00	33.82	31.82	29.50	9.12	7.12
7.50	31.65	29.65	30.00	9.00	7.00
8.00	29.74	27.74	30.50	8.88	6.88
8.50	28.06	26.06	31.00	8.77	6.77
9.00	26.57	24.57	31.50	8.66	6.66
9.50	25.24	23.24	32.00	8.55	6.55
10.00	24.04	22.04	32.50	8.44	6.44
10.50	22.95	20.95	33.00	8.34	6.34
11.00	21.96	19.96	33.50	8.25	6.25
11.50	21.06	19.06	34.00	8.15	6.15
12.00	20.24	18.24	34.50	8.06	6.06
12.50	19.48	17.48	35.00	7.97	5.97
13.00	18.78	16.78	35.50	7.89	5.89
13.50	18.13	16.13	36.00	7.81	5.81
14.00	17.53	15.53	36.50	7.72	5.72
14.50	16.98	14.98	37.00	7.65	5.65
15.00	16.45	14.45	37.50	7.57	5.57
15.50	15.97	13.97	38.00	7.50	5.50
16.00	15.51	13.51	38.50	7.43	5.43
16.50	15.08	13.08	39.00	7.36	5.36
17.00	14.68	12.68	39.50	7.29	5.29
17.50	14.30	12.30	40.00	7.22	5.22
18.00	13.94	11.94	40.50	7.16	5.16
18.50	13.61	11.61	41.00	7.10	5.10
19.00	13.29	11.29	41.50	7.04	5.04
19.50	12.98	10.98	42.00	6.98	4.98
20.00	12.70	10.70	42.50	6.92	4.92
20.50	12.42	10.42	43.00	6.87	4.87
21.00	12.16	10.16	43.50	6.81	4.81
21.50	11.91	9.91	44.00	6.76	4.76
22.00	11.68	9.68	44.50	6.71	4.71
22.50	11.45	9.45	45.00	6.66	4.66

(续)

$D=10$ $r=1.00$			$D=10$ $r=1.00$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	573.97	571.97	23.00	13.80	11.80
1.00	287.49	285.49	23.50	13.54	11.54
1.50	192.01	190.01	24.00	13.29	11.29
2.00	144.27	142.27	24.50	13.06	11.06
2.50	115.63	113.63	25.00	12.83	10.83
3.00	96.54	94.54	25.50	12.61	10.61
3.50	82.90	80.90	26.00	12.41	10.41
4.00	72.68	70.68	26.50	12.21	10.21
4.50	64.73	62.73	27.00	12.01	10.01
5.00	58.37	56.37	27.50	11.83	9.83
5.50	53.17	51.17	28.00	11.65	9.65
6.00	48.83	46.83	28.50	11.48	9.48
6.50	45.17	43.17	29.00	11.31	9.31
7.00	42.03	40.03	29.50	11.15	9.15
7.50	39.31	37.31	30.00	11.00	9.00
8.00	36.93	34.93	30.50	10.85	8.85
8.50	34.83	32.83	31.00	10.71	8.71
9.00	32.96	30.96	31.50	10.57	8.57
9.50	31.29	29.29	32.00	10.44	8.44
10.00	29.79	27.79	32.50	10.31	8.31
10.50	28.44	26.44	33.00	10.18	8.18
11.00	27.20	25.20	33.50	10.06	8.06
11.50	26.08	24.08	34.00	9.94	7.94
12.00	25.05	23.05	34.50	9.83	7.83
12.50	24.10	22.10	35.00	9.72	7.72
13.00	23.23	21.23	35.50	9.61	7.61
13.50	22.42	20.42	36.00	9.51	7.51
14.00	21.67	19.67	36.50	9.41	7.41
14.50	20.97	18.97	37.00	9.31	7.31
15.00	20.32	18.32	37.50	9.21	7.21
15.50	19.71	17.71	38.00	9.12	7.12
16.00	19.14	17.14	38.50	9.03	7.03
16.50	18.60	16.60	39.00	8.95	6.95
17.00	18.10	16.10	39.50	8.86	6.86
17.50	17.63	15.63	40.00	8.78	6.78
18.00	17.18	15.18	40.50	8.70	6.70
18.50	16.76	14.76	41.00	8.62	6.62
19.00	16.36	14.36	41.50	8.55	6.55
19.50	15.98	13.98	42.00	8.47	6.47
20.00	15.62	13.62	42.50	8.40	6.40
20.50	15.28	13.28	43.00	8.33	6.33
21.00	14.95	12.95	43.50	8.26	6.26
21.50	14.64	12.64	44.00	8.20	6.20
22.00	14.35	12.35	44.50	8.13	6.13
22.50	14.07	12.07	45.00	8.07	6.07

(续)

$D=12$ $r=1.25$			$D=12$ $r=1.25$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	688.81	686.31	23.00	16.61	14.11
1.00	345.04	342.54	23.50	16.30	13.80
1.50	230.46	227.96	24.00	16.00	13.50
2.00	173.17	170.67	24.50	15.72	13.22
2.50	138.80	136.30	25.00	15.45	12.95
3.00	115.89	113.39	25.50	15.19	12.69
3.50	99.53	97.03	26.00	14.94	12.44
4.00	87.26	84.76	26.50	14.70	12.20
4.50	77.72	75.22	27.00	14.47	11.97
5.00	70.09	67.59	27.50	14.24	11.74
5.50	63.85	61.35	28.00	14.03	11.53
6.00	58.65	56.15	28.50	13.82	11.32
6.50	54.25	51.75	29.00	13.63	11.13
7.00	50.48	47.98	29.50	13.43	10.93
7.50	47.22	44.72	30.00	13.25	10.75
8.00	44.36	41.86	30.50	13.07	10.57
8.50	41.84	39.34	31.00	12.90	10.40
9.00	39.60	37.10	31.50	12.73	10.23
9.50	37.60	35.10	32.00	12.57	10.07
10.00	35.80	33.30	32.50	12.42	9.92
10.50	34.17	31.67	33.00	12.27	9.77
11.00	32.70	30.20	33.50	12.12	9.62
11.50	31.35	28.85	34.00	11.98	9.48
12.00	30.11	27.61	34.50	11.84	9.34
12.50	28.97	26.47	35.00	11.71	9.21
13.00	27.92	25.42	35.50	11.58	9.08
13.50	26.95	24.45	36.00	11.46	8.96
14.00	26.05	23.55	36.50	11.34	8.84
14.50	25.21	22.71	37.00	11.22	8.72
15.00	24.43	21.93	37.50	11.11	8.61
15.50	23.70	21.20	38.00	11.00	8.50
16.00	23.02	20.52	38.50	10.89	8.39
16.50	22.38	19.88	39.00	10.78	8.28
17.00	21.77	19.27	39.50	10.68	8.18
17.50	21.20	18.70	40.00	10.58	8.08
18.00	20.67	18.17	40.50	10.49	7.99
18.50	20.16	17.66	41.00	10.40	7.90
19.00	19.68	17.18	41.50	10.30	7.80
19.50	19.22	16.72	42.00	10.22	7.72
20.00	18.79	16.29	42.50	10.13	7.63
20.50	18.38	15.88	43.00	10.05	7.55
21.00	17.99	15.49	43.50	9.97	7.47
21.50	17.62	15.12	44.00	9.89	7.39
22.00	17.27	14.77	44.50	9.81	7.31
22.50	16.93	14.43	45.00	9.74	7.24

(续)

$D = 14$ $\tau = 1.25$			$D = 14$ $\tau = 1.25$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	203.40	800.90	23.00	19.17	16.67
1.00	402.34	399.84	23.50	18.80	16.30
1.50	268.66	266.16	24.00	18.46	15.96
2.00	201.83	199.33	24.50	18.13	15.63
2.50	161.73	159.23	25.00	17.81	15.31
3.00	135.00	132.50	25.50	17.51	15.01
3.50	115.91	113.41	26.00	17.22	14.72
4.00	101.60	99.10	26.50	16.94	14.44
4.50	90.47	87.97	27.00	16.67	14.17
5.00	81.57	79.07	27.50	16.41	13.91
5.50	74.28	71.78	28.00	16.16	13.66
6.00	68.22	65.72	28.50	15.92	13.42
6.50	63.09	60.59	29.00	15.69	13.19
7.00	58.69	56.19	29.50	15.47	12.97
7.50	54.88	52.38	30.00	15.25	12.75
8.00	51.55	49.05	30.50	15.04	12.54
8.50	48.61	46.11	31.00	14.84	12.34
9.00	46.00	43.50	31.50	14.65	12.15
9.50	43.66	41.16	32.00	14.46	11.96
10.00	41.56	39.06	32.50	14.28	11.78
10.50	39.66	37.16	33.00	14.10	11.60
11.00	37.94	35.44	33.50	13.93	11.43
11.50	36.36	33.86	34.00	13.77	11.27
12.00	34.92	32.42	34.50	13.61	11.11
12.50	33.59	31.09	35.00	13.45	10.95
13.00	32.37	29.87	35.50	13.30	10.80
13.50	31.24	28.74	36.00	13.16	10.66
14.00	30.18	27.68	36.50	13.02	10.52
14.50	29.21	26.71	37.00	12.88	10.38
15.00	28.30	25.80	37.50	12.75	10.25
15.50	27.44	24.94	38.00	12.62	10.12
16.00	26.65	24.15	38.50	12.49	9.99
16.50	25.90	23.40	39.00	12.37	9.87
17.00	25.19	22.69	39.50	12.25	9.75
17.50	24.53	22.03	40.00	12.14	9.64
18.00	23.90	21.40	40.50	12.03	9.53
18.50	23.31	20.81	41.00	11.92	9.42
19.00	22.75	20.25	41.50	11.81	9.31
19.50	22.22	19.72	42.00	11.71	9.21
20.00	21.72	19.22	42.50	11.61	9.11
20.50	21.24	18.74	43.00	11.51	9.01
21.00	20.78	18.28	43.50	11.42	8.92
21.50	20.35	17.85	44.00	11.33	8.83
22.00	19.94	17.44	44.50	11.24	8.74
22.50	19.54	17.04	45.00	11.15	8.65

(续)

$D = 16$ $r = 1.25$			$D = 16$ $r = 1.25$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	917.99	915.49	23.00	21.72	19.22
1.00	459.64	457.14	23.50	21.31	18.81
1.50	306.86	304.36	24.00	20.92	18.42
2.00	230.48	227.98	24.50	20.54	18.04
2.50	184.65	182.15	25.00	20.18	17.68
3.00	154.11	151.61	25.50	19.83	17.33
3.50	132.29	129.79	26.00	19.50	17.00
4.00	115.93	113.43	26.50	19.18	16.68
4.50	103.21	100.71	27.00	18.87	16.37
5.00	93.04	90.54	27.50	18.58	16.08
5.50	84.72	82.22	28.00	18.29	15.79
6.00	77.78	75.28	28.50	18.02	15.52
6.50	71.92	69.42	29.00	17.75	15.25
7.00	66.89	64.39	29.50	17.50	15.00
7.50	62.54	60.04	30.00	17.25	14.75
8.00	58.73	56.23	30.50	17.01	14.51
8.50	55.37	52.87	31.00	16.78	14.28
9.00	52.39	49.89	31.50	16.56	14.06
9.50	49.72	47.22	32.00	16.35	13.85
10.00	47.32	44.82	32.50	16.14	13.64
10.50	45.15	42.65	33.00	15.94	13.44
11.00	43.18	40.68	33.50	15.74	13.24
11.50	41.38	38.88	34.00	15.56	13.06
12.00	39.73	37.23	34.50	15.37	12.87
12.50	38.21	35.71	35.00	15.20	12.70
13.00	36.81	34.31	35.50	15.03	12.53
13.50	35.52	33.02	36.00	14.86	12.36
14.00	34.32	31.82	36.50	14.70	12.20
14.50	33.20	30.70	37.00	14.54	12.04
15.00	32.16	29.66	37.50	14.39	11.89
15.50	31.19	28.69	38.00	14.24	11.74
16.00	30.27	27.77	38.50	14.10	11.60
16.50	29.42	26.92	39.00	13.93	11.46
17.00	28.61	26.11	39.50	13.83	11.33
17.50	27.85	25.35	40.00	13.70	11.20
18.00	27.14	24.64	40.50	13.57	11.07
18.50	26.46	23.96	41.00	13.44	10.94
19.00	25.82	23.32	41.50	13.32	10.82
19.50	25.22	22.72	42.00	13.21	10.71
20.00	24.64	22.14	42.50	13.09	10.59
20.50	24.09	21.59	43.00	12.98	10.48
21.00	23.57	21.07	43.50	12.87	10.37
21.50	23.08	20.58	44.00	12.77	10.27
22.00	22.61	20.11	44.50	12.66	10.16
22.50	22.16	19.66	45.00	12.56	10.06

(续)

$D=18$ $r=1.25$			$D=18$ $r=1.25$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	1032.59	1030.09	23.00	24.28	21.78
1.00	516.94	514.44	23.50	23.82	21.32
1.50	346.06	342.56	24.00	23.38	20.88
2.00	259.13	256.63	24.50	22.95	20.45
2.50	207.58	205.08	25.00	22.55	20.05
3.00	173.22	170.72	25.50	22.16	19.66
3.50	148.67	146.17	26.00	21.78	19.28
4.00	130.27	127.77	26.50	21.42	18.92
4.50	116.96	113.46	27.00	21.07	18.57
5.00	104.51	102.01	27.50	20.74	18.24
5.50	95.15	92.65	28.00	20.42	17.92
6.00	87.35	84.85	28.50	20.11	17.61
6.50	80.75	78.25	29.00	19.81	17.31
7.00	75.10	72.60	29.50	19.53	17.03
7.50	70.20	67.70	30.00	19.25	16.75
8.00	65.92	63.42	30.50	18.98	16.48
8.50	62.14	59.64	31.00	18.72	16.22
9.00	58.78	56.28	31.50	18.47	15.97
9.50	55.78	53.28	32.00	18.23	15.73
10.00	53.08	50.58	32.50	18.00	15.50
10.50	50.64	48.14	33.00	17.77	15.27
11.00	48.42	45.92	33.50	17.56	15.06
11.50	46.39	43.89	34.00	17.34	14.84
12.00	44.54	42.04	34.50	17.14	14.64
12.50	42.83	40.33	35.00	16.94	14.44
13.00	41.26	38.76	35.50	16.75	14.25
13.50	39.80	37.30	36.00	16.56	14.06
14.00	38.45	35.95	36.50	16.38	13.88
14.50	37.20	34.70	37.00	16.20	13.70
15.00	36.02	33.52	37.50	16.03	13.53
15.50	34.93	32.43	38.00	15.87	13.37
16.00	33.90	31.40	38.50	15.71	13.21
16.50	32.94	30.44	39.00	15.55	13.05
17.00	32.03	29.53	39.50	15.40	12.90
17.50	31.18	28.68	40.00	15.25	12.75
18.00	30.37	27.87	40.50	15.11	12.61
18.50	29.61	27.11	41.00	14.97	12.47
19.00	28.89	26.39	41.50	14.83	12.33
19.50	28.21	25.71	42.00	14.70	12.20
20.00	27.56	25.06	42.50	14.57	12.07
20.50	26.95	24.45	43.00	14.45	11.95
21.00	26.36	23.86	43.50	14.32	11.82
21.50	25.81	23.31	44.00	14.21	11.71
22.00	25.28	22.78	44.50	14.09	11.59
22.50	24.77	22.27	45.00	13.98	11.48

(续)

$D = 20$ $r = 1.25$			$D = 20$ $r = 1.25$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	1147.18	1144.68	23.00	26.84	24.34
1.00	574.24	571.74	23.50	26.33	23.83
1.50	383.27	380.77	24.00	25.84	23.34
2.00	287.79	285.29	24.50	25.36	22.86
2.50	230.51	228.01	25.00	24.91	22.41
3.00	192.32	189.82	25.50	24.48	21.98
3.50	165.05	162.55	26.00	24.06	21.56
4.00	144.61	142.11	26.50	23.66	21.16
4.50	128.70	126.20	27.00	23.28	20.78
5.00	115.99	113.49	27.50	22.91	20.41
5.50	105.58	103.08	28.00	22.55	20.05
6.00	96.92	94.42	28.50	22.21	19.71
6.50	89.59	87.09	29.00	21.88	19.38
7.00	83.31	80.81	29.50	21.56	19.06
7.50	77.86	75.36	30.00	21.25	18.75
8.00	73.10	70.60	30.50	20.95	18.45
8.50	68.90	66.40	31.00	20.67	18.17
9.00	65.17	62.67	31.50	20.39	17.89
9.50	61.84	59.34	32.00	20.12	17.62
10.00	58.84	56.34	32.50	19.86	17.36
10.50	56.12	53.62	33.00	19.61	17.11
11.00	53.66	51.16	33.50	19.37	16.87
11.50	51.41	48.91	34.00	19.13	16.63
12.00	49.35	46.85	34.50	18.91	16.41
12.50	47.45	44.95	35.00	18.68	16.18
13.00	45.70	43.20	35.50	18.47	15.97
13.50	44.09	41.59	36.00	18.26	15.76
14.00	42.59	40.09	36.50	18.06	15.56
14.50	41.19	38.69	37.00	17.87	15.37
15.00	39.89	37.39	37.50	17.68	15.18
15.50	38.67	36.17	38.00	17.49	14.99
16.00	37.53	35.03	38.50	17.31	14.81
16.50	36.46	33.96	39.00	17.14	14.64
17.00	35.45	32.95	39.50	16.97	14.47
17.50	34.51	32.01	40.00	16.81	14.31
18.00	33.61	31.11	40.50	16.65	14.15
18.50	32.77	30.27	41.00	16.49	13.99
19.00	31.97	29.47	41.50	16.34	13.84
19.50	31.21	28.71	42.00	16.19	13.69
20.00	30.49	27.99	41.50	16.05	13.55
20.50	29.80	27.30	43.00	15.91	13.41
21.00	29.15	26.65	43.50	15.78	13.28
21.50	28.54	26.04	44.00	15.65	13.15
22.00	27.94	25.44	44.50	15.52	13.02
22.50	27.38	24.88	45.00	15.39	12.89

(续)

$D=25$ $r=1.50$			$D=25$ $r=1.50$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	1433.91	1430.91	23.00	33.49	30.49
1.00	717.73	714.73	23.50	32.85	29.85
1.50	479.02	476.02	24.00	32.23	29.23
2.00	359.67	356.67	24.50	31.64	28.64
2.50	288.07	285.07	25.00	31.08	28.08
3.00	240.34	237.34	25.50	30.54	27.54
3.50	206.26	203.26	26.00	30.01	27.01
4.00	180.69	177.69	26.50	29.51	26.51
4.50	160.82	157.82	27.00	29.03	26.03
5.00	144.92	141.92	27.50	28.57	25.57
5.50	131.92	128.92	28.00	28.13	25.13
6.00	121.08	118.08	28.50	27.70	24.70
6.50	111.92	108.92	29.00	27.28	24.28
7.00	104.07	101.07	29.50	26.88	23.88
7.50	97.27	94.27	30.00	26.50	23.50
8.00	91.32	88.32	30.50	26.13	23.13
8.50	86.07	83.07	31.00	25.77	22.77
9.00	81.41	78.41	31.50	25.42	22.42
9.50	77.24	74.24	32.00	25.09	22.09
10.00	73.48	70.48	32.50	24.76	21.76
10.50	70.09	67.09	33.00	24.45	21.45
11.00	67.01	64.01	33.50	24.15	21.15
11.50	64.20	61.20	34.00	23.85	20.85
12.00	61.62	58.62	34.50	23.57	20.57
12.50	59.25	56.25	35.00	23.29	20.29
13.00	57.07	54.07	35.50	23.03	20.03
13.50	55.05	52.05	36.00	22.77	19.77
14.00	53.17	50.17	36.50	22.51	19.51
14.50	51.42	48.42	37.00	22.27	19.27
15.00	49.80	46.80	37.50	22.03	19.03
15.50	48.27	45.27	38.00	21.80	18.80
16.00	46.85	43.85	38.50	21.58	18.58
16.50	45.51	42.51	39.00	21.36	18.36
17.00	44.25	41.25	39.50	21.15	18.15
17.50	43.07	40.07	40.00	20.95	17.95
18.00	41.95	38.95	40.50	20.75	17.75
18.50	40.89	37.89	41.00	20.55	17.55
19.00	39.89	36.89	41.50	20.36	17.36
19.50	38.95	35.95	42.00	20.18	17.18
20.00	38.05	35.05	42.50	20.00	17.00
20.50	37.19	34.19	43.00	19.83	16.83
21.00	36.38	33.38	43.50	19.66	16.66
21.50	35.61	32.61	44.00	19.49	16.49
22.00	34.87	31.87	44.50	19.33	16.33
22.50	34.16	31.16	45.00	19.18	16.18

(续)

$D=30$ $r=1.50$			$D=30$ $r=1.50$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	1726.40	1717.40	23.00	39.89	36.89
1.00	860.98	857.98	23.50	39.12	36.12
1.50	574.52	571.52	24.00	38.38	35.38
2.00	431.31	428.31	24.50	37.67	34.67
2.50	345.38	342.38	25.00	36.99	33.99
3.00	288.11	285.11	25.50	36.34	33.34
3.50	247.21	244.21	26.00	35.72	32.72
4.00	216.53	213.53	26.50	35.12	32.12
4.50	192.68	189.68	27.00	34.54	31.54
5.00	173.61	170.61	27.50	33.99	30.99
5.50	158.00	155.00	28.00	33.45	30.45
6.00	145.00	142.00	28.50	32.94	29.94
6.50	134.01	131.01	29.00	32.44	29.44
7.00	124.58	121.58	29.50	31.96	28.96
7.50	116.42	113.42	30.00	31.50	28.50
8.00	109.28	106.28	30.50	31.05	28.05
8.50	102.98	99.98	31.00	30.62	27.62
9.00	97.39	94.39	31.50	30.21	27.21
9.50	92.38	89.38	32.00	29.81	26.81
10.00	87.88	84.88	32.50	29.42	26.42
10.50	83.81	80.81	33.00	29.04	26.04
11.00	80.11	77.11	33.50	28.68	25.68
11.50	76.74	73.74	34.00	28.32	25.32
12.00	73.65	70.65	34.50	27.98	24.98
12.50	70.80	67.80	35.00	27.65	24.65
13.00	68.18	65.18	35.50	27.33	24.33
13.50	65.75	62.75	36.00	27.02	24.02
14.00	63.50	60.50	36.50	26.72	23.72
14.50	61.41	58.41	37.00	26.42	23.42
15.00	59.46	56.46	37.50	26.14	23.14
15.50	57.63	54.63	38.00	25.86	22.86
16.00	55.92	52.92	38.50	25.60	22.60
16.50	54.31	51.31	39.00	25.34	22.34
17.00	52.80	49.80	39.50	25.08	22.08
17.50	51.38	48.38	40.00	24.84	21.84
18.00	50.04	47.04	40.50	24.60	21.60
18.50	48.77	45.77	41.00	24.36	21.36
19.00	47.57	44.57	41.50	24.14	21.14
19.50	46.44	43.44	42.00	23.92	20.92
20.00	45.36	42.36	42.50	23.70	20.70
20.50	44.33	41.33	43.00	23.49	20.49
21.00	43.36	40.36	43.50	23.29	20.29
21.50	42.43	39.43	44.00	23.09	20.09
22.00	41.54	38.54	44.50	22.90	19.90
22.50	40.70	37.70	45.00	22.71	19.71

(续)

$D = 40$ $r = 1.50$			$D = 40$ $r = 1.50$		
$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$	$\alpha (^{\circ})$	$-R =$	$+R =$
0.50	2293.36	2290.36	23.00	52.69	49.69
1.00	1147.47	1144.47	23.50	51.66	48.66
1.50	765.53	762.53	24.00	50.67	47.67
2.00	574.57	571.57	24.50	49.73	46.73
2.50	460.01	457.01	25.00	48.82	45.82
3.00	383.65	380.65	25.50	47.96	44.96
3.50	329.11	326.11	26.00	47.12	44.12
4.00	288.21	285.21	26.50	46.32	43.32
4.50	256.41	253.41	27.00	45.55	42.55
5.00	230.97	227.97	27.50	44.81	41.81
5.50	210.17	207.17	28.00	44.10	41.10
6.00	192.84	189.84	28.50	43.41	40.41
6.50	178.17	175.17	29.00	42.75	39.75
7.00	165.61	162.61	29.50	42.12	39.12
7.50	154.73	151.73	30.00	41.50	38.50
8.00	145.21	142.21	30.50	40.91	37.91
8.50	136.81	133.81	31.00	40.33	37.33
9.00	129.35	126.35	31.50	39.78	36.78
9.50	122.68	119.68	32.00	39.24	36.24
10.00	116.68	113.68	32.50	38.72	35.72
10.50	111.25	108.25	33.00	38.22	35.22
11.00	106.32	103.32	33.50	37.74	34.74
11.50	101.82	98.82	34.00	37.27	34.27
12.00	97.69	94.69	34.50	36.81	33.81
12.50	93.90	90.90	35.00	36.37	33.37
13.00	90.41	87.41	35.50	35.94	32.94
13.50	87.17	84.17	36.00	35.53	32.53
14.00	84.17	81.17	36.50	35.12	32.12
14.50	81.38	78.38	37.00	34.73	31.73
15.00	78.77	75.77	37.50	34.35	31.35
15.50	76.34	73.34	38.00	33.99	30.99
16.00	74.06	71.06	38.50	33.63	30.63
16.50	71.92	68.92	39.00	33.28	30.28
17.00	69.91	66.91	39.50	32.94	29.94
17.50	68.01	65.01	40.00	32.61	29.61
18.00	66.22	63.22	40.50	32.30	29.30
18.50	64.53	61.53	41.00	31.99	28.99
19.00	62.93	59.93	41.50	31.68	28.68
19.50	61.41	58.41	42.00	31.39	28.39
20.00	59.98	56.98	42.50	31.10	28.10
20.50	58.61	55.61	43.00	30.83	27.83
21.00	57.31	54.31	43.50	30.55	27.55
21.50	56.07	53.07	44.00	30.29	27.29
22.00	54.89	51.89	44.50	30.03	27.03
22.50	53.76	50.76	45.00	29.78	26.78

(续)

$D=50$ $r=1.50$			$D=50$ $r=1.50$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	2866.33	2863.33	23.00	65.48	62.48
1.00	1433.97	1430.97	23.50	64.20	61.20
1.50	956.54	953.54	24.00	62.96	59.96
2.00	717.84	714.84	24.50	61.79	58.79
2.50	574.64	571.64	25.00	60.66	57.66
3.00	479.18	476.18	25.50	59.57	56.57
3.50	411.01	408.01	26.00	58.53	55.53
4.00	359.89	356.89	26.50	57.53	54.53
4.50	320.14	317.14	27.00	56.57	53.57
5.00	288.34	285.34	27.50	55.64	52.64
5.50	262.34	259.34	28.00	54.75	51.75
6.00	240.67	237.67	28.50	53.89	50.89
6.50	222.34	219.34	29.00	53.07	50.07
7.00	206.64	203.64	29.50	52.27	49.27
7.50	193.03	190.03	30.00	51.50	48.50
8.00	181.13	178.13	30.50	50.76	47.76
8.50	170.64	167.64	31.00	50.04	47.04
9.00	161.31	158.31	31.50	49.35	46.35
9.50	152.97	149.97	32.00	48.68	45.68
10.00	145.47	142.47	32.50	48.03	45.03
10.50	138.69	135.69	33.00	47.40	44.40
11.00	132.52	129.52	33.50	46.80	43.80
11.50	126.90	123.90	34.00	46.21	43.21
12.00	121.74	118.74	34.50	45.64	42.64
12.50	117.01	114.01	35.00	45.09	42.09
13.00	112.64	109.64	35.50	44.55	41.55
13.50	108.59	105.59	36.00	44.03	41.03
14.00	104.84	101.84	36.50	43.53	40.53
14.50	101.35	98.35	37.00	43.04	40.04
15.00	98.09	95.09	37.50	42.57	39.57
15.50	95.05	92.05	38.00	42.11	39.11
16.00	92.20	89.20	38.50	41.66	38.66
16.50	89.52	86.52	39.00	41.23	38.23
17.00	87.01	84.01	39.50	40.80	37.80
17.50	84.64	81.64	40.00	40.39	37.39
18.00	82.40	79.40	40.50	39.99	36.99
18.50	80.29	77.29	41.00	39.61	36.61
19.00	78.29	75.29	41.50	39.23	36.23
19.50	76.39	73.39	42.00	38.86	35.86
20.00	74.60	71.60	42.50	38.50	35.50
20.50	72.89	69.89	43.00	38.16	35.16
21.00	71.26	68.26	43.50	37.82	34.82
21.50	69.71	66.71	44.00	37.49	34.49
22.00	68.24	65.24	44.50	37.17	34.17
22.50	66.83	63.83	45.00	36.86	33.86

(续)

$D=60$ $r=1.50$			$D=60$ $r=1.50$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	3439.29	3436.29	23.00	78.28	75.28
1.00	1720.46	1717.46	23.50	76.74	73.74
1.50	1147.55	1144.55	24.00	75.26	72.26
2.00	861.11	858.11	24.50	73.84	70.84
2.50	689.27	686.27	25.00	72.49	69.49
3.00	574.72	571.72	25.50	71.18	68.18
3.50	492.91	489.91	26.00	69.94	66.94
4.00	431.57	428.57	26.50	68.73	65.73
4.50	383.86	380.86	27.00	67.58	64.58
5.00	345.71	342.71	27.50	66.47	63.47
5.50	314.50	311.50	28.00	65.40	62.40
6.00	288.50	285.50	28.50	64.37	61.37
6.50	266.51	263.51	29.00	63.38	60.38
7.00	247.67	244.67	29.50	62.42	59.42
7.50	231.34	228.34	30.00	61.50	58.50
8.00	217.06	214.06	30.50	60.61	57.61
8.50	204.46	201.46	31.00	59.75	56.75
9.00	193.27	190.27	31.50	58.92	55.92
9.50	183.27	180.27	32.00	58.11	55.11
10.00	174.28	171.28	32.50	57.33	54.33
10.50	166.12	163.12	33.00	56.58	53.58
11.00	158.73	155.73	33.50	55.85	52.85
11.50	151.98	148.98	34.00	55.15	52.15
12.00	145.79	142.79	34.50	54.47	51.47
12.50	140.11	137.11	35.00	53.80	50.80
13.00	134.86	131.86	35.50	53.16	50.16
13.50	130.01	127.01	36.00	52.54	49.54
14.00	125.51	122.51	36.50	51.94	48.94
14.50	121.32	118.32	37.00	51.35	48.35
15.00	117.41	114.41	37.50	50.78	47.78
15.50	113.76	110.76	38.00	50.23	47.23
16.00	110.34	107.34	38.50	49.69	46.69
16.50	107.13	104.13	39.00	49.17	46.17
17.00	104.11	101.11	39.50	48.66	45.66
17.50	101.27	98.27	40.00	48.17	45.17
18.00	98.58	95.58	40.50	47.69	44.69
18.50	96.05	93.05	41.00	47.23	44.23
19.00	93.65	90.65	41.50	46.77	43.77
19.50	91.37	88.37	42.00	46.33	43.33
20.00	89.21	86.21	42.50	45.91	42.91
20.50	87.16	84.16	43.00	45.49	42.49
21.00	85.21	82.21	43.50	45.08	42.08
21.50	83.36	80.36	44.00	44.69	41.69
22.00	81.58	78.58	44.50	44.30	41.30
22.50	79.89	76.89	45.00	43.93	40.93

(续)

$D=70$ $r=2.00$			$D=70$ $r=2.00$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	4012.76	4008.76	23.00	91.58	87.58
1.00	2007.45	2003.45	23.50	89.77	85.77
1.50	1339.05	1335.05	24.00	88.05	84.05
2.00	1004.88	1000.88	24.50	86.40	82.40
2.50	804.40	800.40	25.00	84.82	80.82
3.00	670.76	666.76	25.50	83.30	79.30
3.50	575.31	571.31	26.00	81.84	77.84
4.00	503.75	499.75	26.50	80.44	76.44
4.50	448.09	444.09	27.00	79.09	75.09
5.00	403.58	399.58	27.50	77.80	73.80
5.50	367.17	363.17	28.00	76.55	72.55
6.00	336.84	332.84	28.50	75.35	71.35
6.50	311.18	307.18	29.00	74.19	70.19
7.00	289.19	285.19	29.50	73.08	69.08
7.50	270.15	266.15	30.00	72.00	68.00
8.00	253.49	249.49	30.50	70.96	66.96
8.50	238.79	234.79	31.00	69.96	65.96
9.00	225.74	221.74	31.50	68.99	64.99
9.50	214.06	210.06	32.00	68.05	64.05
10.00	203.56	199.56	32.50	67.14	63.14
10.50	194.06	190.06	33.00	66.26	62.26
11.00	185.43	181.43	33.50	65.41	61.41
11.50	177.55	173.55	34.00	64.59	60.59
12.00	170.34	166.34	34.50	63.79	59.79
12.50	163.71	159.71	35.00	63.02	59.02
13.00	157.59	153.59	35.50	62.27	58.27
13.50	151.93	147.93	36.00	61.55	57.55
14.00	146.67	142.67	36.50	60.84	56.84
14.50	141.79	137.79	37.00	60.16	56.16
15.00	137.23	133.23	37.50	59.49	55.49
15.50	132.97	128.97	38.00	58.85	54.85
16.00	128.98	124.98	38.50	58.22	54.22
16.50	125.23	121.23	39.00	57.62	53.62
17.00	121.71	117.71	39.50	57.02	53.02
17.50	118.39	114.39	40.00	56.45	52.45
18.00	115.26	111.26	40.50	55.89	51.89
18.50	112.30	108.30	41.00	55.35	51.35
19.00	109.50	105.50	41.50	54.82	50.82
19.50	106.85	102.85	42.00	54.31	50.31
20.00	104.33	100.33	42.50	53.81	49.81
20.50	101.94	97.94	43.00	53.32	49.32
21.00	99.66	95.66	43.50	52.85	48.85
21.50	97.50	93.50	44.00	52.38	48.38
22.00	95.43	91.43	44.50	51.94	47.94
22.50	93.46	89.46	45.00	51.50	47.50

(续)

$D=80$ $r=2.00$			$D=80$ $r=2.00$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	4585.72	4581.72	23.00	104.37	100.37
1.00	2293.95	2289.95	23.50	102.31	98.31
1.50	1530.06	1526.06	24.00	100.34	96.34
2.00	1148.15	1144.15	24.50	98.46	94.46
2.50	919.02	915.02	25.00	96.65	92.65
3.00	766.29	762.29	25.50	94.91	90.91
3.50	657.22	653.22	26.00	93.25	89.25
4.00	575.42	571.42	26.50	91.65	87.65
4.50	511.82	507.82	27.00	90.11	86.11
5.00	460.95	456.95	27.50	88.63	84.63
5.50	419.34	415.34	28.00	87.20	83.20
6.00	384.67	380.67	28.50	85.83	81.83
6.50	355.35	351.35	29.00	84.51	80.51
7.00	330.22	326.22	29.50	83.23	79.23
7.50	308.45	304.45	30.00	82.00	78.00
8.00	289.41	285.41	30.50	80.81	76.81
8.50	272.62	268.62	31.00	79.66	75.66
9.00	257.70	253.70	31.50	78.56	74.56
9.50	244.35	240.35	32.00	77.48	73.48
10.00	232.35	228.35	32.50	76.45	72.45
10.50	221.50	217.50	33.00	75.44	71.44
11.00	211.63	207.63	33.50	74.47	70.47
11.50	202.63	198.63	34.00	73.53	69.53
12.00	194.39	190.39	34.50	72.62	68.62
12.50	186.81	182.81	35.00	71.74	67.74
13.00	179.82	175.82	35.50	70.88	66.88
13.50	173.35	169.35	36.00	70.05	66.05
14.00	167.34	163.34	36.50	69.25	65.25
14.50	161.76	157.76	37.00	68.47	64.47
15.00	156.55	152.55	37.50	67.71	63.71
15.50	151.68	147.68	38.00	66.97	62.97
16.00	147.12	143.12	38.50	66.26	62.26
16.50	142.84	138.84	39.00	65.56	61.56
17.00	138.81	134.81	39.50	64.89	60.89
17.50	135.02	131.02	40.00	64.23	60.23
18.00	131.44	127.44	40.50	63.59	59.59
18.50	128.06	124.06	41.00	62.97	58.97
19.00	124.86	120.86	41.50	62.37	58.37
19.50	121.83	117.83	42.00	61.78	57.78
20.00	118.95	114.95	42.50	61.21	57.21
20.50	116.22	112.22	43.00	60.65	56.65
21.00	113.62	109.62	43.50	60.11	56.11
21.50	111.14	107.14	44.00	59.58	55.58
22.00	108.78	104.78	44.50	59.07	55.07
22.50	106.53	102.53	45.00	58.57	54.57

(续)

$D=90$ $r=2.00$			$D=90$ $r=2.00$		
$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$	$\alpha(^{\circ})$	$-R=$	$+R=$
0.50	5158.69	5154.69	23.00	117.17	113.17
1.00	2580.44	2576.44	23.50	114.85	110.85
1.50	1721.07	1717.07	24.00	112.64	108.64
2.00	1291.42	1287.42	24.50	110.51	106.51
2.50	1033.65	1029.65	25.00	108.48	104.48
3.00	861.83	857.83	25.50	106.53	102.53
3.50	739.12	735.12	26.00	104.65	100.65
4.00	647.10	643.10	26.50	102.85	98.85
4.50	575.55	571.55	27.00	101.12	97.12
5.00	518.32	514.32	27.50	99.46	95.46
5.50	471.50	467.50	28.00	97.85	93.85
6.00	432.50	428.50	28.50	96.31	92.31
6.50	399.52	395.52	29.00	94.82	90.82
7.00	371.25	367.25	29.50	93.38	89.38
7.50	346.76	342.76	30.00	92.00	88.00
8.00	325.34	321.34	30.50	90.66	86.66
8.50	306.45	302.45	31.00	89.37	85.37
9.00	289.66	285.66	31.50	88.12	84.12
9.50	274.65	270.65	32.00	86.92	82.92
10.00	261.14	257.14	32.50	85.75	81.75
10.50	248.93	244.93	33.00	84.62	80.62
11.00	237.84	233.84	33.50	83.53	79.53
11.50	227.71	223.71	34.00	82.47	78.47
12.00	218.44	214.44	34.50	81.45	77.45
12.50	209.91	205.91	35.00	80.46	76.46
13.00	202.04	198.04	35.50	79.49	75.49
13.50	194.76	190.76	36.00	78.56	74.56
14.00	188.01	184.01	36.50	77.65	73.65
14.50	181.73	177.73	37.00	76.77	72.77
15.00	175.87	171.87	37.50	75.92	71.92
15.50	170.39	166.39	38.00	75.09	71.09
16.00	165.26	161.26	38.50	74.29	70.29
16.50	160.44	156.44	39.00	73.51	69.51
17.00	155.91	151.91	39.50	72.75	68.75
17.50	151.65	147.65	40.00	72.01	68.01
18.00	147.62	143.62	40.50	71.29	67.29
18.50	143.82	139.82	41.00	70.59	66.59
19.00	140.22	136.22	41.50	69.91	65.91
19.50	136.81	132.81	42.00	69.25	65.25
20.00	133.57	129.57	42.50	68.61	64.61
20.50	130.50	126.50	43.00	67.98	63.98
21.00	127.57	123.57	43.50	67.37	63.37
21.50	124.78	120.78	44.00	66.78	62.78
22.00	122.13	118.13	44.50	66.20	62.20
22.50	119.59	115.59	45.00	65.64	61.64

注: D —砂轮中径; r —砂轮刃口圆弧半径; $-R$ —凹面曲率半径 (mm);
 $+R$ —凸面曲率半径 (mm)。

六、打 孔

1. 硬质合金钻头

材料为钨钴合金 YG6、YG8、形状为棱锥形和直槽形(见图 5-53)。

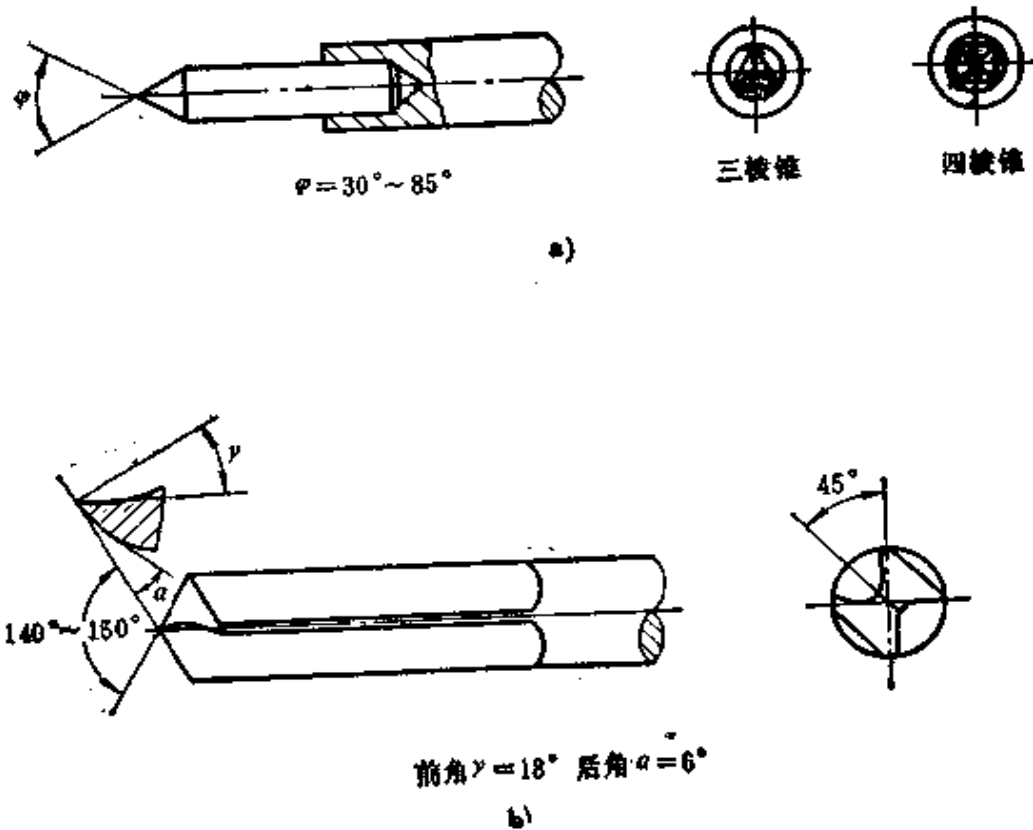


图 5-53 硬质合金钻头
a) 棱锥钻头 b) 直槽钻头

2. 空心钻头

HPb59-1 黄铜材料用于直径小于 10mm 的钻头；低碳钢 A3 或 20 钢用于直径大于 10mm 的钻头(见图 5-54)。

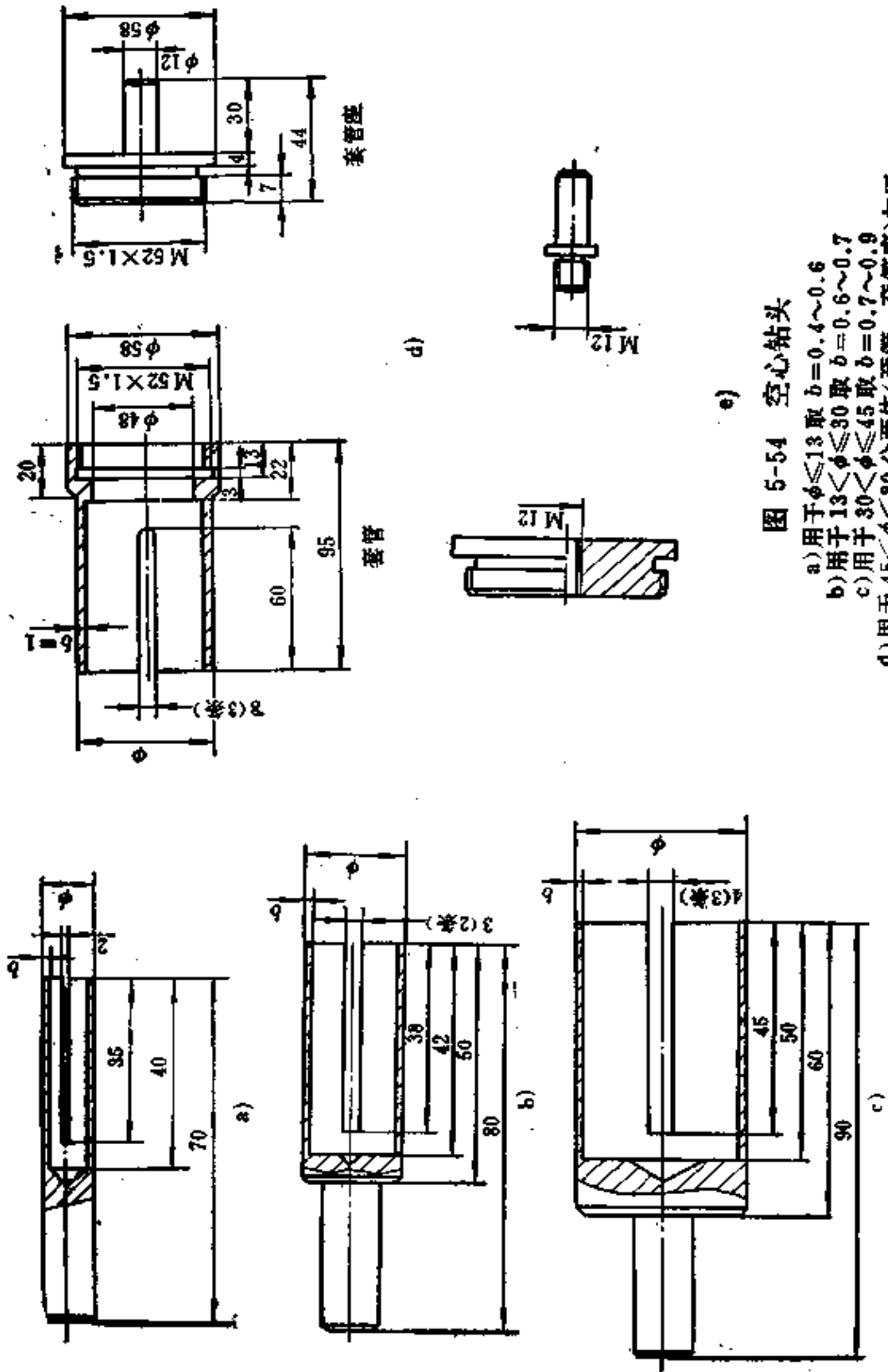


图 5-54 空心钻头

- a) 用于 $\phi \leq 13$ 取 $b = 0.4 \sim 0.6$
- b) 用于 $13 < \phi \leq 30$ 取 $b = 0.6 \sim 0.7$
- c) 用于 $30 < \phi \leq 45$ 取 $b = 0.7 \sim 0.9$
- d) 用于 $45 < \phi < 80$ 分两体(套管、套管座)加工
- e) 用于 $\phi > 80$ 套管座分成两体加工

3. 金刚石空心钻头

金刚石空心钻分电镀和烧结两种(图 5-55)。前者金刚石粒度较细(240#~280#),打出的孔粗糙度好,但使用寿命不如后者长。

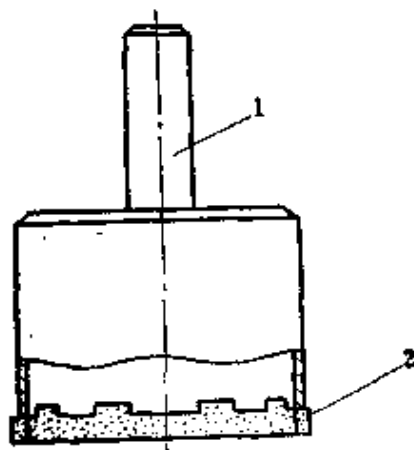


图 5-55 金刚石空心钻头
1—夹头 2—金刚石烧结层

4. 台钻打孔

在台钻上打孔时的技术参数如表 5-18。

表 5-18 台钻上打孔规范

加工方法		加工范围 (mm)	冷却润滑	转速 (r/min)	磨料粒度
实心钻头	金刚石钻头	$\phi 0.5 \sim \phi 3$	煤油	3000~4000	—
	硬质合金钻头	$\phi 2 \sim \phi 5$	松节油	2000~2700	—
空心钻头	散粒磨料	$\phi 4 \sim \phi 200$	水	500~1500	180°
	金刚石固着磨料	$\phi 4 \sim \phi 200$	煤油	1000~4000	80°

5. 超声波打孔

图 5-56 是超声波打孔示意图。超声波打孔的特点是可以打异形孔和小孔。打圆孔时,新近出现的钻头旋转,加上超声波振动,因而与普通超声波打孔相比有更高的生产效率。超声波打孔钻头常用 45 钢,壁厚一般为 0.1~1mm。磨料用碳化硅或碳化

硼，粒度为 $180^{\#} \sim 280^{\#}$ ，磨料和水的重量比为 1:3。

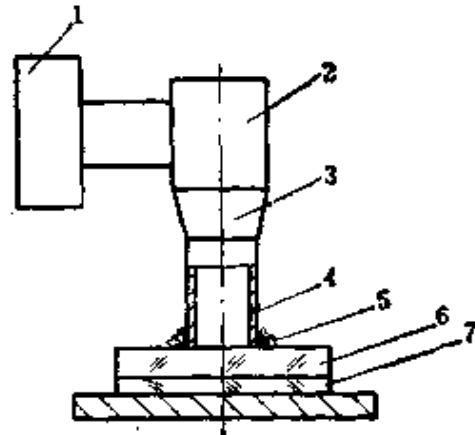


图 5-56 超声波打孔示意图

1—超声波发生器 2—换能器 3—变幅杆 4—钻头 5—磨料和水
6—工件 7—保护玻璃

T 3060-1 型 1 kW 立式超声波加工机的技术参数如下：

声学头移动	50 mm
工作台调整(x, y 方向)	100 × 150 mm
加工最小孔径	0.8 mm
加工最大孔径	60 mm
加工最大深度	120 mm

6. 打孔余量

打孔余量指加工出的孔径与钻头外径之差值，见表 5-19。

表 5-19 打孔余量 (mm)

加工方法	内孔直径	>0.5~4	>4~20	>20~50	>50~100	>100~200
		实心钻头	0.05~0.1			
空心钻头	180°磨料		0.1~0.2	0.2~0.5	0.5~0.8	0.8~1.5
	180°固着磨料		0.1	0.1~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5
	280°超声波加工	0.1	0.1	0.1~0.15		

7. 打孔常见的问题

见表5-20。

表 5-20 打孔常见问题

常见问题	产生原因
椭圆	1. 钻头变形或摆动大；2. 夹具台松动
中心偏	1. 夹具没定心好；2. 工件与夹具配合公差大；3. 钻头轴线与台面不垂直
锥形	1. 钻头有锥形或使用时间长而磨损变形；2. 工件厚度大，使加砂后上端磨得多，下端磨得少
炸裂	1. 进刀量过大；2. 冷却液不足；3. 工件厚度大，冷却液及砂子进不去；4. 钻头转速过快

七、铣槽及磨圆弧

1. 铣槽

图 5-57 是铣槽示意图。机床可利用一般金属加工用卧式铣床或 PM 25 型平行铣磨机。用 PM 25 加工时，需将磨头轴加长，以便装夹铣刀。当铣对称槽时，可用图 5-58 所示定位夹具。

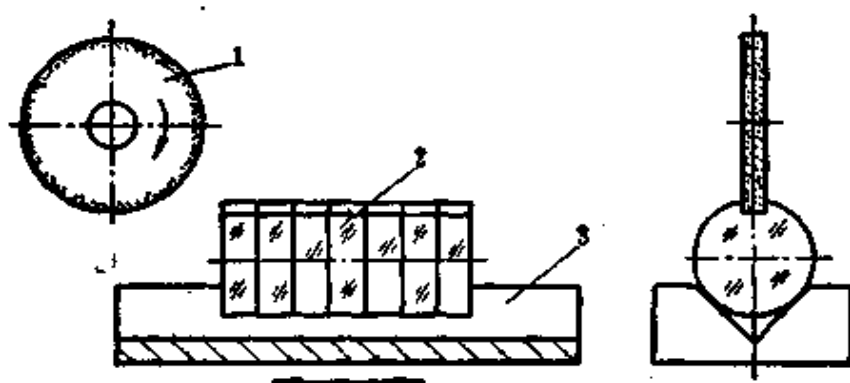


图 5-57 铣槽示意图

1—铣刀 2—工件 3—夹具

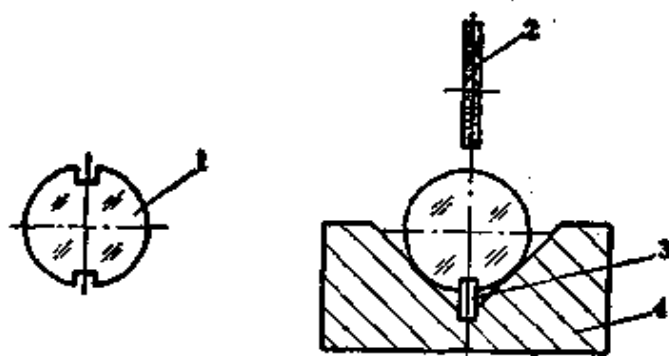


图 5-58 对称槽的定位

1—工件形状 2—铣刀 3—定位块 4—夹具

2. 铣刀

图 5-59 为电镀金刚石铣刀。它可根据工件的槽形决定形状。基体选用 45 钢，粒度为 240[#]~180[#]，电镀层厚度为 0.1 mm。

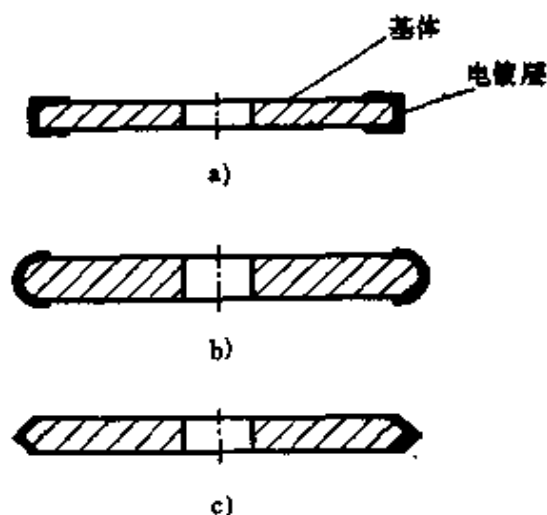


图 5-59 电镀铣刀

a)平铣刀 b)圆弧铣刀 c)双斜边铣刀

图 5-60 为烧结金刚石成型铣刀。基体选用 45 钢，金刚石粒度选用 100[#]~180[#]，为青铜结合剂。

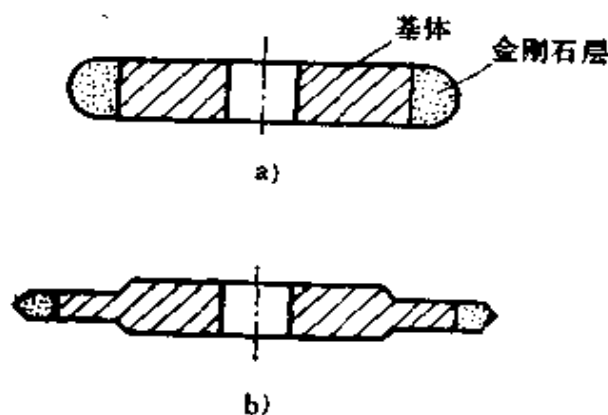


图 5-60 金刚石成型铣刀

a) 圆弧铣刀 b) 双斜边铣刀

3. 磨圆弧

图 5-61 是在平模上用散粒磨料手工磨圆弧；图 5-62 是高精度的圆弧用散粒磨料在圆弧槽内研磨；图 5-63 是工件绕水平轴旋转 180° 机械磨圆弧；图 5-64 是工件绕垂直轴旋转 180° 机械磨圆弧；图 5-65 是用筒形砂轮磨圆弧。

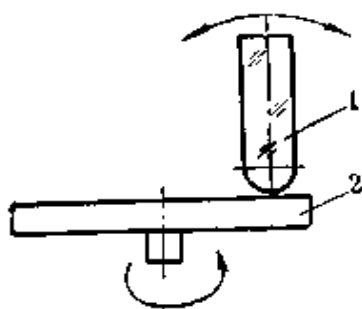


图 5-61 手工磨圆弧

1—工件 2—平模

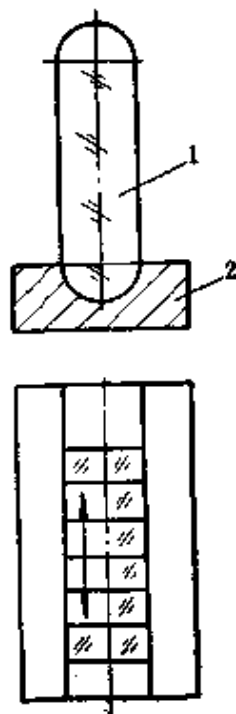


图 5-62 圆弧槽内研磨

1—玻璃条 2—半圆研磨槽

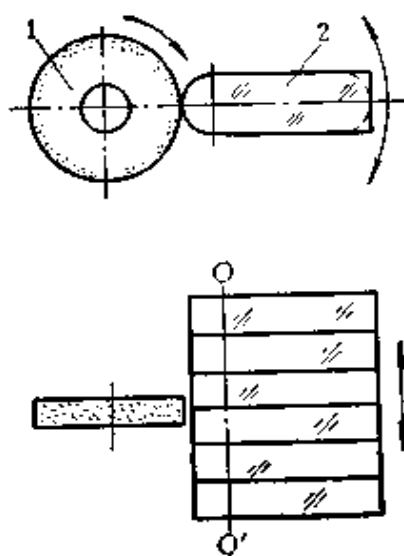


图 5-63 工件绕水平轴旋转
180°磨圆弧
1—砂轮 2—工件

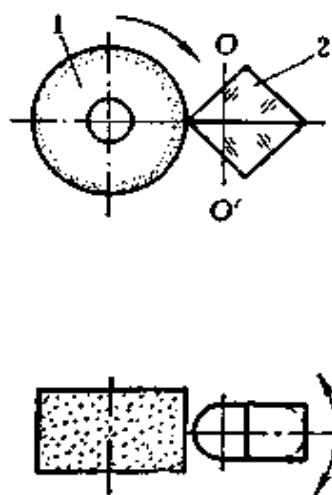


图 5-64 工件绕垂直轴旋转
180°磨圆弧
1—砂轮 2—工件

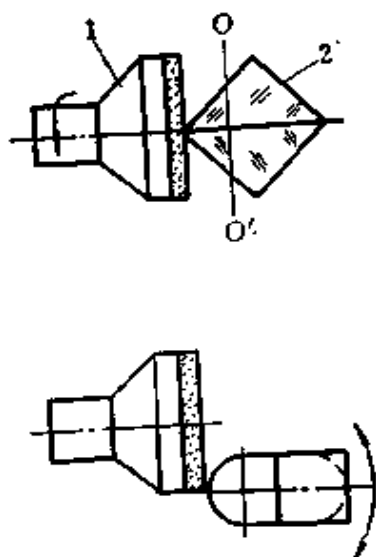


图 5-65 用筒形砂轮磨圆弧
1—砂轮 2—工件

八、粗磨加工余量及公差

1. 粗磨余量

见表 5-21。

表 5-21 粗磨单面加工余量 (mm)

直 径 (边长)		<50	>50~100	>100~200
透 镜	块 料	1	1.2	1.5
	滴料成型	0.6	0.7	0.8
	二次成型	1	1.2	1.5
平 面 镜 梭 镜	块 料	1	1.5	2
	滴料成型	0.7	0.8	1
	二次成型	1.2	1.5	2

2. 开球面余量

从整平到开球面的加工余量见表 5-22。

表 5-22 单面开球面余量 (mm)

球面种类	加工方法	散粒磨料加工	固着磨料加工
	凸 面		0.05~0.10
凹 面		0~0.10	0.15~0.30

3. 粗磨尺寸公差

粗磨完工后的余量与完工时的最后一道磨料粒度及玻璃材料性质、工件形状等有关。表 5-23 是一般的经验数据(最后一道磨料为 W 40)。

表 5-23 透镜、平面镜粗磨完工后厚度的余量及公差

最后一道磨料粒度	粗磨完工后厚度的余量及公差 (mm)	
	硬 料	软 料
W40	$0.2^{+0.1}$	$0.25^{+0.1}$

注：表中余量为双面总余量。

九、上 盘

1. 平行平面上盘

(1) 松香蜂蜡胶上盘法

此法的优点是操作简便，缺点是平行度精度不高，也不适用于面形精度要求较高的薄片。其平行度误差与粘结模材料、胶层厚度及粘结面平度有关。一般说来，粘结模的膨胀系数越小，胶层越薄，粘结面越平，则工件的平行度和面形精度就越高。

具体上盘方法有两种：

1) 先将粘结模擦净，加热后涂上一层粘结胶，再放上已预热的工件，加一定压力挤去多余的胶(如图 5-66 所示)。这种方法常用于粗磨过程的上盘以及光圈、平行度要求不高的零件的细磨抛光前的上盘。当粘结已抛光好的第一面时，为了避免下盘时擦伤抛光面，可在工件与粘结模之间垫一层均匀薄纸。

2) 先将粘结模擦净，然后放上擦净的工件，再将粉末状粘结胶洒在零件缝隙处，加热粘结模，使粘结胶融化后从零件边缘渗入(如图 5-67 所示)。这种方法的平行度和平面度较上述第一种好些。

上盘注意事项：

- 1) 粘结模表面不应有毛刺或局部突出点；
- 2) 粘结模加热程度以能融化粘结胶，达到均匀流布为准，不宜温度过高；
- 3) 粘上工件后，应避免冷风直吹工件或玻璃粘结模；

- 4) 不要用冷物体接触热工件；
- 5) 工件应避免受力不均匀或局部受力；
- 6) 工件升温和降温都不宜过快。

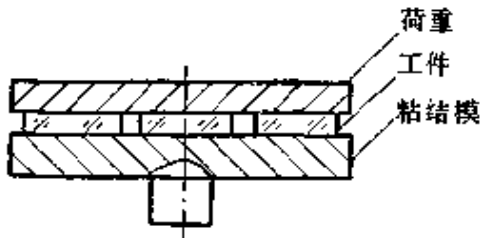


图 5-66 松香蜂蜡胶上盘之一

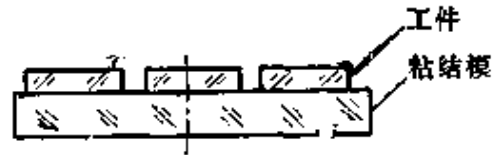


图 5-67 松香蜂蜡胶上盘之二

(2) 点胶上盘法

此法的优点是可获得较好的面形 ($N \approx 0.5$) 和平行度 ($\theta \approx 30''$)。缺点是承受不了高速高压的加工条件，怕震动，易“走动”，室内温度梯度不能太大。

粘结胶有软、硬两种，软胶即一般抛光胶，硬胶即火漆。前者光圈变形较后者小，但粘结力不如后者强。软胶点子不宜太大、太高。图 5-68 为软点胶粘结示意图。图 5-69 为硬点胶粘结示意图。

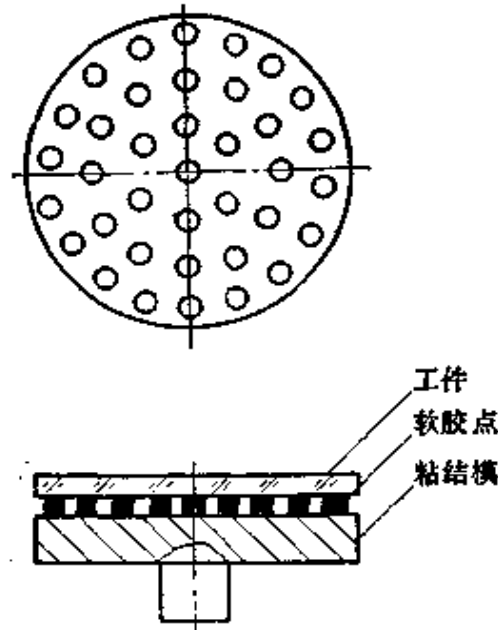


图 5-68 软点胶粘结

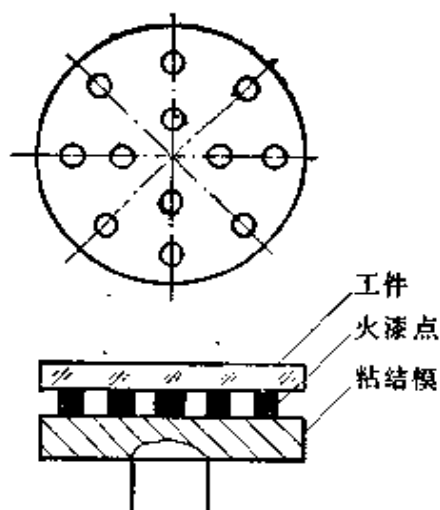


图 5-69 硬点胶(火漆)粘结

操作方法如下:

加热工件到能粘住粘结点子的温度, 然后视工件大小, 均匀排列胶点。冷却后, 擦净待加工面, 将它贴置于涂有薄层油的贴置模上, 再放上已加热的粘结模, 让其自然下落到贴置模四周的定位条上, 待其自然冷却后, 沿水平方向拉下镜盘即成。

注意事项:

- 1) 胶点分布应以使表面各区域受力均匀为原则;
- 2) 粘结模加温至能融化胶点即可, 不宜过高;
- 3) 易腐蚀玻璃应尽量避免采用此法或有可靠的保护措施后再用;
- 4) 加工过程中, 应避免剧烈震动或温度剧变, 以免引起脱胶或“走动”。

(3) 浮胶上盘法(俗称假光胶)

此法的特点是工件和粘结平板都不需加温, 工件还可达到较高的平行度和面形精度($N \leq 0.5$, $\theta \leq 10''$), 缺点是承受不了高速高压的加工条件。

操作方法如下:

首先将粘结平板擦净, 再放上擦净的零件(图 5-70)。如是抛光面, 即能看到清晰的光圈(可在粘结平板下放一平面镜, 通

过反射观察)，然后将融化的粘结胶滴入零件间的空隙处（胶层厚度应略小于零件厚度）。冷却后，刮净零件待加工表面的胶即成。粘结胶的配比视室温及加工条件而定，一般是松香与蜂蜡之比为4:1至8:1。

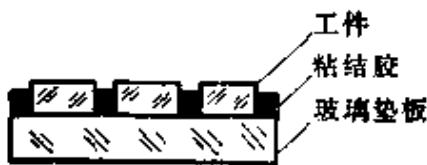


图 5-70 浮胶粘结

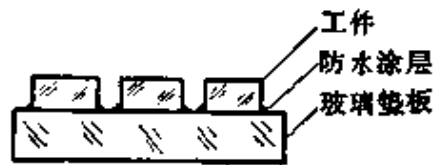


图 5-71 光胶上盘

注意事项:

- 1) 粘结平板的平面度及平行度要好，表面不应有局部突出点，一般以两面抛光的玻璃板为宜。
- 2) 粘结胶加温至熔化即可，不宜过高。
- 3) 用此法上盘返修工件时，如工件厚度一致，可不必细磨。为避免粘结胶滴落到返修面上，可用吸管滴胶。

(4) 光胶法上盘

此法的优点是平行度和平面度均可达到很高的精度($N < 0.5$, $\theta < 5''$)。缺点是对光胶面表面疵病等级有一定影响，怕剧烈震动和骤冷骤热。

操作方法如下:

将零件光胶面擦净后放到光胶垫板上，当呈现清晰的光圈后，从零件一边稍许加压，以排出光胶面间的空气而形成光胶。如发现光胶面间有气泡、白点，可用酒精灯局部加热工件，拆胶后重新擦净，再胶。工件光胶好后，应在接缝处涂防水磁漆或松香丙酮溶液，以防水渗入光胶面(也可再涂一层沥青汽油溶液以提高防水效果)。图 5-71 是平行平面光胶在垫板上的情形。

注意事项:

当光胶面间有气泡、白点而不易光胶时,切勿用力过度,勉强光胶,以免损伤抛光面或薄片下盘后使光圈变形。

2. 透镜上盘

(1) 弹性法上盘

此法的优点是粘结模较简单,通用性较大。缺点是不能承受高速高压工艺条件,效率较低,工房温度梯度不能太大。

弹性胶法的胶层最薄处约为工件直径的 $0.1 \sim 0.2$ 。

操作方法:

先按透镜形状做好各种火漆团,如图 5-72 所示。加热透镜至能粘结火漆后,放上备好的火漆团,待其自然冷却,然后擦净待加工面,按事先确定的排列方式,将透镜贴稳于已涂有一薄层油的贴置模内,放上已加热的粘结模,待其下沉到四周边缘的定位件后,迅速用水冷却粘结模。

对于较小的透镜,也可不做火漆团,而是先将透镜在凹模内贴稳,透镜间隙处涂上滑石粉,然后倒入熔化的火漆,冷却后放上热粘结模,下沉到规定的高度后迅速用水冷却粘结模即成。

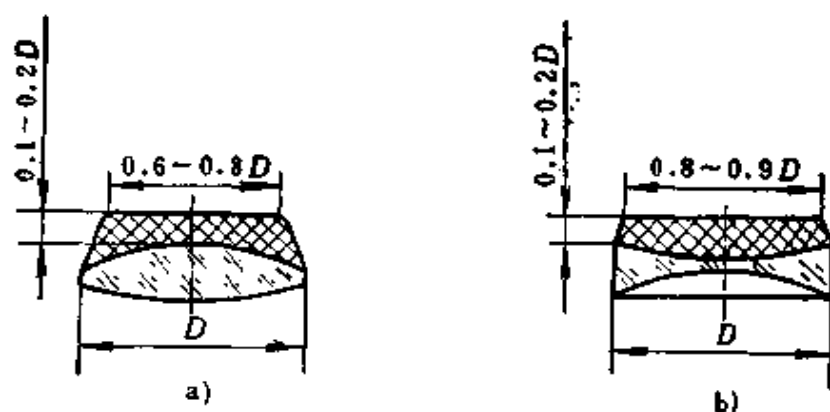


图 5-72 火漆团

注意事项:

① 粘结模温度不宜过高; ② 粘结模要放正。特别是需进行高速精磨的镜盘,可用图 5-73 所示专用装置上盘,以确保定位

精度。

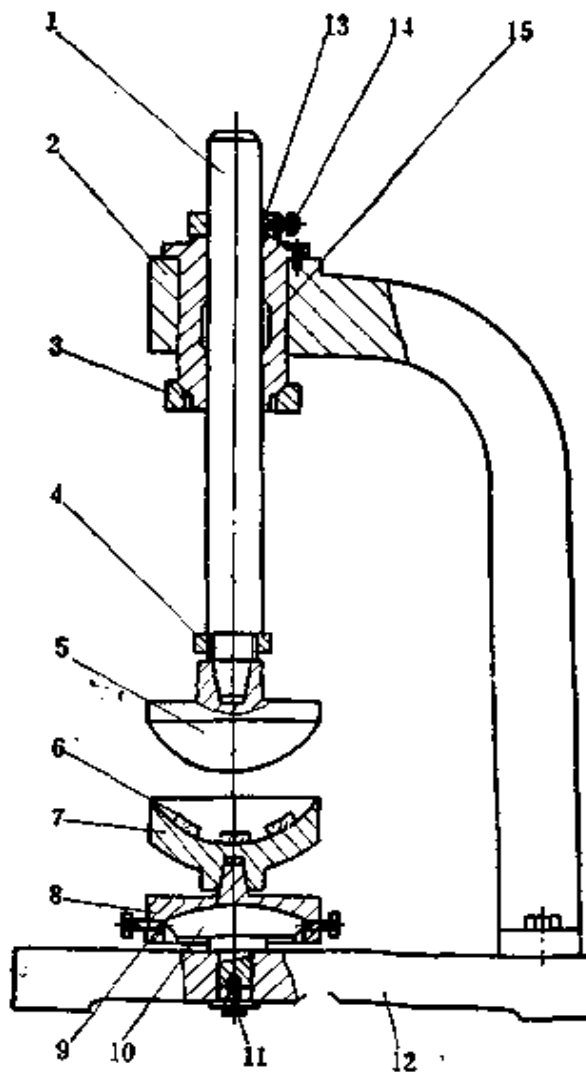


图 5-73 上盘装置

1—主轴 2—支架 3—调隙螺母 4—卸模螺母 5—粘结模 6—工件 7—贴置模 8—调节座 9—调节螺钉 10—调节盘 11—吊紧螺钉 12—底座 13—定位圈 14—定位螺钉 15—轴套

(2) 刚性法上盘

此法的优点是上盘过程简单，粗磨可以成盘加工，能承受较高的速度和压力。缺点是粘结模专用性强，加工模具较费事。

刚性上盘的胶层厚度：第一面约为 0.05 mm，第二面约为 0.2~0.3 mm。

上盘操作方法：将粘结模加热后，涂上粘结胶或放上专用粘结纸片，放上透镜后冷却即成。如果粘结的是抛光面，则必须用粘结纸，或涂粘结胶后放上保护纸片或布片后再放透镜。图4-17是各种不同面形透镜的刚性法上盘示意图。

上盘注意事项：

- 1) 镜片在球窝或平台上要放正。
- 2) 镜片间胶层厚度差要尽量小。

3. 棱镜上盘

(1) 夹模上盘法

此法的优点是上盘操作简单。缺点是只适用于中、低精度的零件，对形状复杂的零件也有一定局限性。

粗磨过程中的上盘方法有两种：一是压紧法。只需将棱镜毛坯放入夹模槽内，用螺钉压紧即可（如图4-46）。二是粘结法。将专用夹模加热后，在粘结槽内涂上粘结胶，放上已预热的棱镜毛坯即可（参看图4-43~45）。

细磨抛光过程中的上盘：首先将零件加热后在粘结面上粘上火漆条（图5-74），待其冷却后按夹模槽位置在贴置平模上排列好，四周放上厚约2mm的限位条，将夹模加热到火漆能熔化的温度后准确地放到排好的零件上，待其徐徐下落到限位条，自然冷却即可（图5-75）。



图 5-74 棱镜粘火漆条

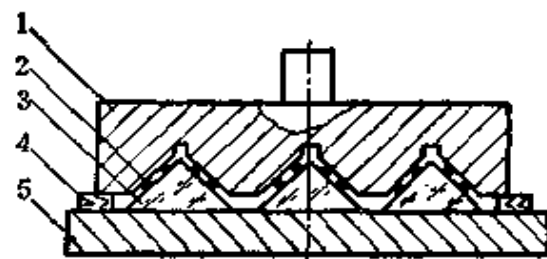


图 5-75 棱镜弹性上盘

1—夹模 2—火漆条 3—棱镜 4—垫条 5—平板

注意事项：

- 1) 棱镜毛坯上盘时，表面不应有局部突出部分。

- 2) 细磨抛光上盘时，火漆条粗细要一致。
- 3) 夹模温度以能熔化火漆条为准，不宜过高。
- 4) 采用火漆条粘结法时，加工过程中应避免撞击。

(2) 石膏模上盘法

此法用于细磨抛光过程时的优点是棱镜的形状可以任意，其缺点是角度精度不高；对抛光面需有较好的保护措施，否则易被腐蚀。

上盘方法如下：首先将待加工面擦净后放在涂有一薄层油的贴置模上，然后在棱镜间空隙处洒上厚约 2 mm 的木屑，在贴置模周围放上橡皮圈，将已调匀的石膏浆倒入橡皮圈内，淹没棱镜约 30 mm，在石膏浆未完全凝固前放上托置平模(如图 5-76)，约过 24 h，待石膏浆完全凝固后，解去橡皮圈，沿水平方向从贴置模上拉下石膏模，刷去木屑，再在裸露的石膏模表面涂一层熔化的蜡，以防水侵蚀石膏模。

上述橡皮圈亦可用铁皮圈代替，只不过常常把铁皮圈和托置模固定在一起，在托置模上开孔并灌石膏浆(如图 5-77)。石膏浆凝固后铁皮圈、托置模和石膏模成一整体，直至石膏模加工完毕才取下铁皮圈。

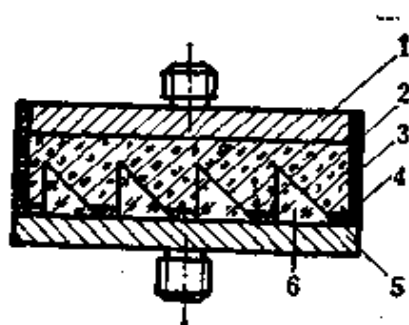


图 5-76 石膏盘之一

1—粘结构 2—橡皮圈 3—石膏浆
4—木屑层 5—贴置模 6—棱镜

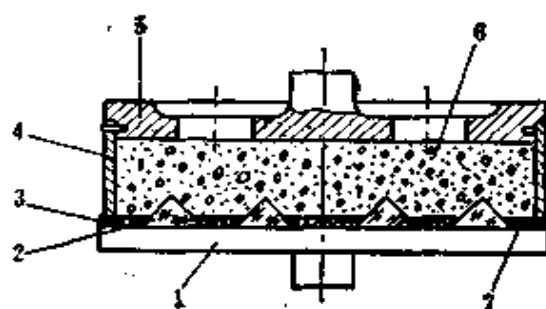


图 5-77 石膏盘之二

1—贴置模 2—棱镜 3—垫圈
4—铁皮圈 5—粘结构 6—石膏浆
7—木屑

由于石膏在凝固过程中的膨胀作用，使棱镜各个方向受力不一致，在石膏模中发生偏斜。为此，常在石膏粉中加入6%~25%的水泥，利用水泥凝固过程中的收缩作用，减轻棱镜因石膏膨胀而引起的影响。

调和石膏浆时的用水量 Q ，可参考式 (5-6) 或表 3-38。由于石膏在存放过程中有吸水作用，式 (5-6) 给的用水量需再通过实验作一些修正。

$$Q = \left(1 - \frac{P}{2250}\right)A + kx \text{ (g)} \quad (5-6)$$

式中 P ——1 L 石膏重量 (g)；

x ——加入水泥重量 (g)；

2 250——1 L 石膏硬化后的重量 (g)；

k ——水泥每克之用水系数 (波特兰水泥 k 取平均数 0.4)；

A ——石膏重量，由石膏模的容积 (cm^3) 乘以石膏密度 (2.32 g/cm^3) 求得。

注意事项：

- 1) 棱镜抛光面一定要有效保护，否则易受腐蚀；
- 2) 对形状不对称的棱镜，如果角度精度要求高，可加配重棱镜，使棱镜在石膏模里周围的受力均匀 (图 5-78)。
- 3) 石膏浆加水量一定要适量。水太多，粘结力降低；水太少，既使操作困难，又影响角度精度。

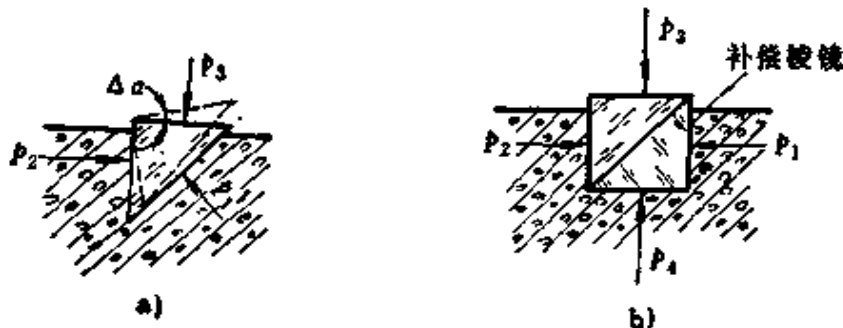


图 5-78 棱镜配重

a) 未加补偿棱镜 b) 加了补偿棱镜

(3) 光胶上盘法

此法的优点是能得到较高的角度精度。缺点是要求有较高精度的光胶工具；操作有一定的难度；对表面疵病要求高的棱镜，其光胶面有一定局限性；光胶盘不宜受到剧烈震动和温度剧变。

上盘过程如下：首先将光胶工具（如长方体）擦净后放在垫板上（垫板只需磨过W 10），然后将擦净的棱镜光胶面贴到工具光胶面上（如图 5-79 所示），这时出现清晰的干涉条纹，轻轻用力挤去光胶面间的空气，条纹即消失，形成光胶。再将光胶工具光胶到垫板上（参看图 5-80），最后在所有光胶面缝隙处涂防水漆即完成光胶过程。

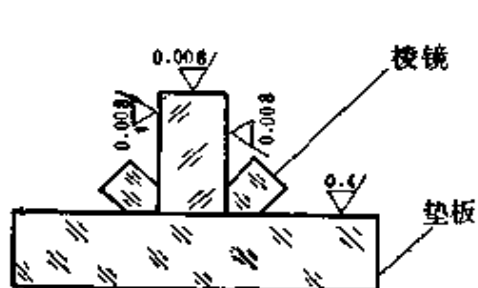


图 5-79 棱镜光胶到长方体上

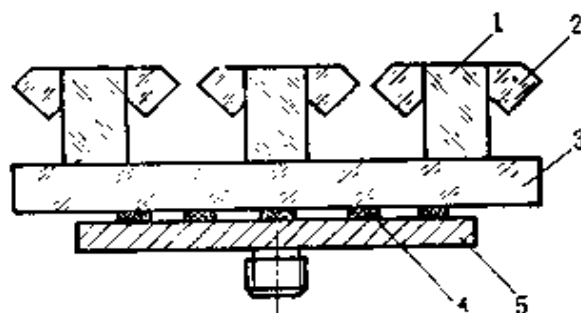


图 5-80 光胶盘

1—长方体 2—屋脊棱镜

3—光胶平板 4—火漆点 5—平模

注意事项：

1) 当光胶面间空气挤不出去时，勿使劲猛挤，以免损伤抛光面，而应重新擦试，并检查光圈是否合适。

2) 光胶面间如有白点，说明未擦净。如白点较多，应拆开重胶。此时可用酒精灯局部加热棱镜即可脱胶。

(4) 靠体上盘法

这是近年来在上述光胶法基础上发展起来的一种棱镜上盘方法。其优点是：1) 加工精度高。2) 对已抛光面不易腐蚀。3) 不需单件手工修整角度。4) 有些工件胶上靠体后，只需翻胶靠体就可连续加工 2~3 个面，这对第一和第二光学平行差要求高的

棱镜尤其适用。图 5-81 是将已抛光好弦面的直角棱镜，光胶在靠体上，再将靠体光胶在平行垫板上，通过控制整盘平行度来控制棱镜的第一和第二光学平行差。加工好一个直角面后，将靠体连同棱镜一起从光胶垫板上取下，再将靠体另一面光胶到垫板上，加工另一直角面。由于靠体的第一和第二光学平行差精度较高，因此，棱镜随之也能获得较高的光学平行差精度。为了保证棱镜在靠体上胶正，棱镜在胶到靠体上时，可用图 5-82 所示工具进行定位。图 5-83 是直角屋脊棱镜在加工好两个屋脊面后，再光胶到靠体上加工两个人射面，即光胶 A 面加工 a 面，光胶 B 面加工 b 面。图 5-84 是利用靠体加工等腰屋脊棱镜，将已抛光好的入射面光胶到靠体上，加工另一个人射面到要求后，不取下棱镜，而是连续翻胶靠体二次，加工二个屋脊面。对于某些第一和第二光学平行差要求为中等精度的棱镜，工件在胶到靠体上时也可不用光胶法，而改用松香蜂蜡混合胶。

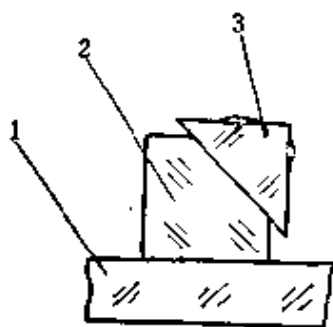


图 5-81 棱镜光胶到靠体上
1—平行垫板 2—靠体 3—棱镜

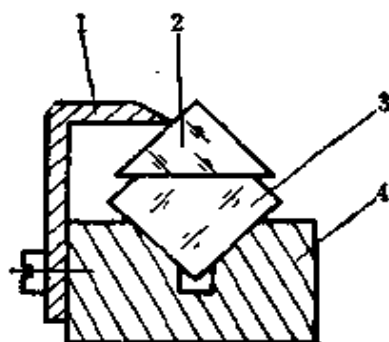


图 5-82 棱镜光胶时定位
1—挡板 2—工件 3—靠体 4—定位工具

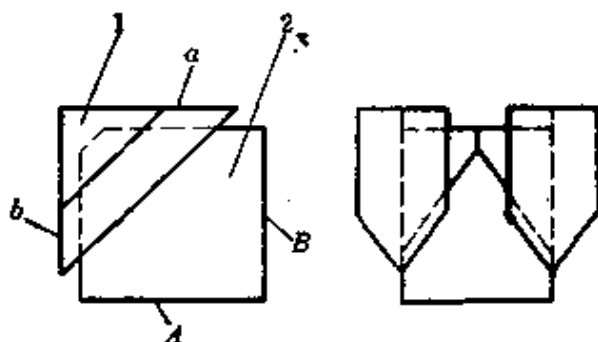


图 5-83 用靠体加工直角屋脊棱镜两个人射面
1—工件 2—靠体

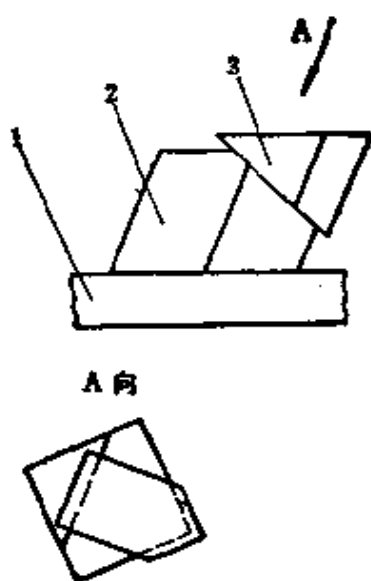


图 5-84 用靠体连续加工等腰屋脊棱镜三个面

1—平行垫板 2—靠体 3—棱镜

十、散粒磨料细磨(精磨)

1. 细磨抛光机

表5-24列出了常用的平面摆动式细磨抛光机。表中H016型和Q8412A型在同一栏内是因为两者的技术参数完全相同，其差别仅在于前者机床台面大、有工具箱，后者台面小，无工具箱。表中最大镜盘一项，根据镜盘表面形状，还可在机床功率和砂盆直径允许范围内，再增大10~20%。

表 5-24 平面摆动式细磨抛光机

机床名称	两轴细磨 抛光机	四轴细磨 抛光机	五轴细磨 抛光机	六轴细磨 抛光机	二十轴细 磨抛光机	单轴细磨抛光机
型 号	H015 (JP025.2)	H016 (JP012.4) Q8412A	H017	H018 (JP02.6)	Q8405	JP 050
加工最大镜盘 (mm)	φ 250	φ 120	φ 80	φ 30	φ 5	φ 500

(续)

机床名称	两轴细磨 抛光机	四轴细磨 抛光机	五轴细磨 抛光机	六轴细磨 抛光机	二十轴细 磨抛光机	单轴细磨抛光机
主轴转速 (r/min)	16~40	18~290	38~150	55~250	728~1153	3.37, 6.85, 7, 9.8, 14.6, 20.5
主轴锥度	1:10	1:10	1:20	1:20	1:10	
摆轴转速 (r/min)	18~50	29~186	18~310	32~470	92~148	主轴的3倍
摆轴 偏心距 (mm)	0~100	0~45	0~40	0~12	0~40	
砂盆直径 (mm)	φ508	φ290	φ226	φ140	φ138	
功率 (W)	800	800	800	800	800	主轴电机1100 摆轴电机1100
体积 (m ³)	2.2×1.0 ×1.15	2.27×1.0 ×1.13	2.27×0.88 ×1.3	2.1×0.72 ×1.02	2.1×0.72 ×1.02	1.2×1.25×1.2
重量 (kg)	约850	约800	约600	约600	约400	约1000

注：括号内的数字为新的型号代号。

2. 磨料

玻璃及软质晶体常用四川乐山坚信金刚砂厂的天然磨料—钻石牌金刚砂。对于硬质晶体可用人造碳化硼作细磨磨料。

细磨磨料最粗粒度为W40。最后一道磨料的粒度视工艺条件而定，一般光学玻璃为W14。某些晶体当采用玻璃研磨模时，可采用更细的磨料，如W10或更细。

从第一道磨料到最后道磨料并不是依次将所有相邻编号的磨料都要用上，而是可以有一定的选用间隔。例如，磨完W40，不必再磨W28，而可用W20接着磨。这种间隔的选用原则是：能迅速除去上一道磨料的粗糙表面，从而得到均匀的细毛面。某一道磨料应磨去的玻璃量 Δ 按下式计算：

$$\Delta = 1,2(M_n - M_{n-1}) \quad (5-7)$$

式中 M_n ——用第 n 号磨料磨后的破坏层深度；

M_{n-1} ——用比 n 号更细一号的磨料磨后的破坏层深度。

系数 1、2 是考虑到研磨过程可能出现粗砂眼和划痕而采用的安全系数。

3. 模具

为了获得均匀磨削，特别是对于那些张角大于 140° 的球面模具，应参照第四章的有关原则通过计算确定球面半径。

常用的模具材料有铸铁HT20—40，黄铜H62，硅黄铜HSi 80—3。用铜模具比用铸铁模具磨得的毛面细，但铜模具易磨损，磨损后可用刮削加对研的方法进行修整。加工硬质晶体时常用45钢作模具。某些软质晶体的模具可用玻璃料，以降低表面粗糙度并减少划痕。较大直径的平面模具表面可铣出一些槽(参看图4-7)，以便于磨料流通和排除磨下的材料。

模具的修改方法：当表面变形较大时，可先用刮刀、废砂轮块等刮削，然后对研。球模是凹凸对研，平模是三块对研。

凹凸对研时，凹模在上，曲率半径变小；凸模在上，则变大。

三块对研时，两块误差同号时，上盘中心通过下盘中心，摆动中等；误差异号时，中心凸起的在上，凹下的在下，上盘中心偏离下盘中心。

4. 注意事项

- (1) 磨料粒度的均匀性很重要，它是细磨质量的关键之一。
- (2) 每次添磨料时，要均匀散开，不宜成团添加。
- (3) 磨料悬浮液不应太稀或太稠，否则易出划痕。
- (4) 磨料或正在细磨的模具表面或镜盘表面切忌落入粗硬异物，以免引起划痕。
- (5) 每次更换磨料时，工具及镜盘均应刷洗干净，机器台面也应擦拭干净。
- (6) 细磨完毕，应用放大镜检查表面有无粗砂眼或划痕。
- (7) 应经常检查细磨面的曲率半径或平面度，发现变化较大

时，应及时修整模具。

5. 常见疵病产生原因及克服办法

表5-25列出了散粒磨料细磨过程中常见的几种疵病的产生原因及克服办法。

表 5-25 细磨常见疵病原因及克服办法

疵 病	产 生 原 因	克 服 办 法
划 痕	1. 磨料中混有超出规定的大颗粒 2. 磨料悬浮液添得太稠或太稀 3. 模具表面嵌有大颗粒磨料或坚硬异物 4. 工作环境不干净	1. 对购入的磨料应复检或试用，超标者不能发放 2. 磨料悬浮液应浓淡适当。用毛刷添加后，应在模具表面形成一薄层磨料 3. 新加工的模具或用粗磨料对研过的模具，应用细磨料对研或用废玻璃研磨后再使用 4. 做好工作环境的清洁工作
粗砂眼	1. 细磨时间不够 2. 砂号选择不当 3. 上道砂磨后的面形不合适	1. 玻璃磨去量不少于式 5-7 所规定的数值 2. 两道磨料之间相隔的磨料号不要太多(一般1~2个号) 3. 每道磨料都应从镜盘边缘磨起
塌 角	1. 磨料添加不均匀 2. 磨料堆集在镜盘边缘	1. 添磨料时应用毛刷均匀散开 2. 模具表面开槽
面形不合要求	1. 模具表面形状不合要求 2. 模具和镜盘的相对位置、速度不当	1. 修改模具到光圈符合要求 2. 调节摆幅和转速

十一、固着磨料精磨

固着磨料精磨（又称高速精磨）的优点是效率高，表面粗糙度小，适用于大批量生产。

1. 机床

见表5-26。

2. 精磨片

精磨片的形状及主要技术参数如图5-85及表5-27和表5-28。

表 5-26 高速精磨抛光机

名称	型号	加工范围 (mm)	摆动方式	最大顶针力 (N)	主轴转速 (r/min)	摆幅范围	最大摆幅	摆动频率 (次/min)	功率 (kW)	
									电机	加热器
球面精磨抛光机	JP11.2	R2~R10	准球心	50	2 000, 3 500, 5 000	-25°~+45°	45°	36	0.75	1
	JP15.2A	R7~R50	准球心	500(弹簧) 800(气压)	600, 800, 1 200, 1 560, 1 800, 2 400	-20°~+50°	45°	30	1.22	1
	JP112.2	R50~R120	准球心	1600(气压)	500, 700, 1000	-10°~+40°	35°	20	1.77	1
	JP012	R120~∞	准球心与平 动相结合	1600(气压)	400, 600, 800, 1 200	0~±40mm	30°	22	2.87	3
平面精磨抛光机	JP032A	φ320	平 动	240~1600 (气压)	200, 250, 330, 410, 560, 690	-15°~+15°	前后位移 80 mm	19 33	3.67	3

其中图5-85a、b适用于较大半径的球面磨盘；c、d适用于小半径的凹面单件精磨；e、f适用于小半径的凸面单件精磨，g、h适用于平面磨盘，也可用于大半径球面磨盘。图中 R_l 为金属基模半径， R_m 为磨盘表面半径。带有金属基底的a、b、h图三种精磨片对充分利用金刚石层有利。金属基底厚度为2mm。

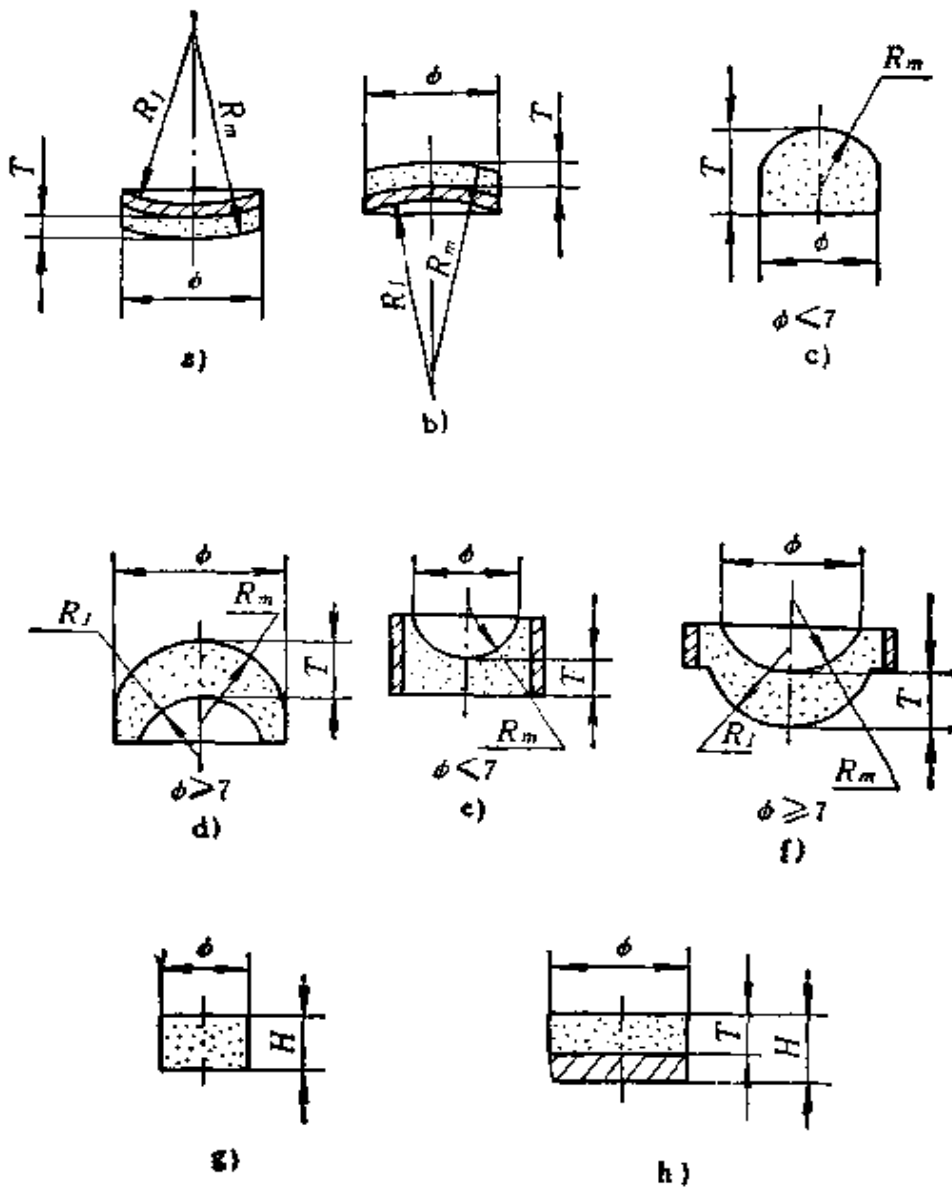


图 5-85 精磨片

表 5-27 精磨片尺寸

ϕ	4	6	8	10	12	15	18
H	3	3	5	5	5	5	5
T	3	3	3	3	3	3	3

注：根据用户需要，也可做成 $4 \times 2.5, 6 \times 3.5, 8 \times 3.5, 8 \times 4 \times 3$ 等。

表 5-28 精磨片参数

名称	磨料	粒度	浓度(%)	结合剂	备注
精磨片	JR	W40, W28	100~50	Q	粗精磨用
		W20, W14	75~50		精磨用
		W14, W10	50~35		
超精磨片	JR	W10, W7, W5	50~25	S	超精磨用

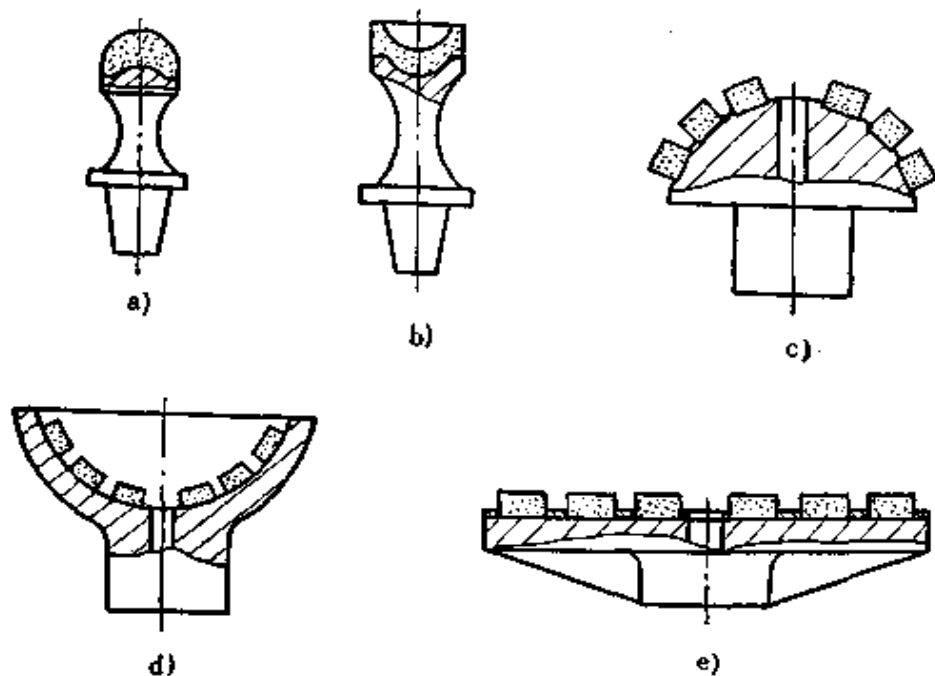


图 5-86 精磨盘

a)、b) 用于小半径 c)、d) 用于较大半径
e) 平面精磨盘

9. 磨盘

图5-86a、b为用于小球面的单片型精磨磨盘；c、d为用于较大半径的球面磨盘；e为平面磨盘。

(1) 精磨片直径与磨盘半径关系(表5-29)

表 5-29 精磨片直径与磨盘半径 (mm)

磨盘半径 R	<10	10~20	20~30	30~50	50~120	120~180	>180
精磨片直径	4~6或同磨具	4~6	6~8	8~10	10~12	12~15	15~18
精磨片厚度	3	3	3	5	5	5	5

注：厚度3mm的精磨片不带金属基底。

(2) 磨盘直径

磨盘直径决定于镜盘直径。球面镜盘的直径除少数小半径镜盘外，一般以半张角 γ_j 不超过 70° 为宜。磨盘的半张角 γ_m 与镜盘的半张角 γ_j 的关系为：

$$\gamma_m = K \gamma_j \quad (5-8)$$

式中 k ——磨盘相对镜盘的比例系数，它可从表5-30查得。

球面磨盘直径 D_m 可按下式计算：

$$D_m = 2R_m \sin \gamma_m \quad (5-9)$$

式中 R_m ——磨盘曲率半径。

平面磨盘直径 D_m 的计算公式如下：

$$D_m = K D_j \quad (5-10)$$

式中 D_j ——平面镜盘直径。

(3) 磨盘的覆盖比 λ

覆盖比 λ 与曲率半径 R 的关系可参考表5-31。

(4) 磨盘上精磨片总数

精磨片的总数量 N 可由覆盖比 λ 求出。对于球面磨盘：

$$N = \lambda \frac{H}{h} \quad (5-11)$$

式中 H ——磨盘的矢高；

表 5-30 精磨盘对镜盘的比例系数

磨盘位置	镜盘半张角	磨盘形状	K
在 下 (主 动)	$\gamma_i < 60^\circ$	凸	1.40~1.30
		凹	1.30~1.20
	$60^\circ \leq \gamma_i \leq 70^\circ$	凸	1.30~1.15
		凹	1.20~1.15
	$70^\circ < \gamma_i \leq 80^\circ$	凸、凹	1.15~1.05
	$80^\circ < \gamma_i < 90^\circ$	凸、凹	1.05~1.0 ($> 90^\circ$)
在 上 (从 动)	$\gamma_i < 60^\circ$	凹	0.98~0.95
	$60 \leq \gamma_i \leq 80^\circ$		0.95~0.90
在下(主动)		平	1.10~1.25

表 5-31 覆盖比 λ 与曲率半径关系

磨盘半径R(mm)	<10	10~30	30~50	50~120	>120
精磨 λ (%)	100~55	60~40	45~35	40~20	<25
超精磨 λ (%)	100~60	65~45	50~40	45~25	<30

h ——精磨片的矢高。

对于平面磨盘：

$$N = \lambda \frac{D^2}{d^2} \quad (5-12)$$

式中 D ——磨盘直径；

d ——精磨片直径。

(5) 精磨片的排列

考虑精磨片排列的依据是：保持磨盘曲率的稳定性；有利于冷却液的流通等。

众所周知，对于球面镜盘来说，为了得到均匀磨削，镜盘在磨每一道砂时其曲率半径是不同的；反之，若磨每一道砂时的曲率半径相同，就不能得到整个表面的均匀磨削。而球面磨盘希望

磨很多盘玻璃后其表面曲率半径始终不变或变化甚微，也就是说保持镜盘光圈在一定范围之内。由上可知，这只有保持球面磨盘上各个不同带区的磨损不同，才能随着精磨片厚度的变化而磨盘曲率不变。由图5-87可知，要保持球面磨盘光圈稳定，必须随着精磨片的变薄而中间磨损量大于边缘，即边缘磨损量为中心磨损量乘以边缘精磨片所处位置的夹角的余弦。通常称之为余弦磨损。

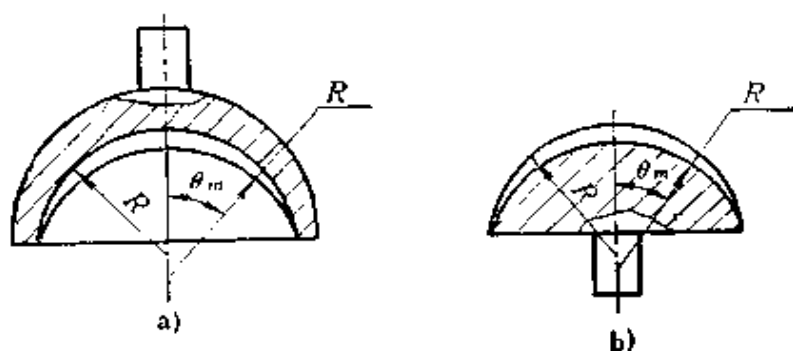


图 5-87 球面磨盘保持 R 不变的表面不均匀磨损
a) 凹磨盘 b) 凸磨盘

要使磨盘表面不同带区的磨损符合余弦磨损的规律，可通过调整各行之间精磨片的密度来实现。为此，我们先将按覆盖比 λ 求得的精磨片总数，在基体上按同心圆均匀分布，求出行数（可将精磨片当作镜片，利用表4-35求得）。然后，将各行精磨片数 n_m 除以行角余弦 $\cos\theta_m$ ，得到调整数 n'_m ，再乘以系数 $\frac{\sum n_m}{\sum n'_m}$ ，即得到每行实际上应放置的精磨片数 n''_m ，即：

$$n'_m = \frac{n_m}{\cos\theta_m} \quad (5-13)$$

$$n''_m = n'_m \frac{\sum n_m}{\sum n'_m} \quad (5-14)$$

式中 n_m ——按同心圆均匀分布时，第 m 行的精磨片数；
 θ_m ——精磨片的行角。

对于平面精磨盘，影响其光圈稳定性的因素主要有压力、相对线速度和精磨片与镜盘所接触的时间等。当压力和相对线速度

恒定（对于摆角较小的上盘随动系统，可近似认为相对线速度恒定）时，精磨片与镜盘接触的实际磨削时间是影响磨盘表面平度的一个首要因素。精磨片的实际磨削时间可用镜盘对精磨盘的覆盖角 $2\bar{\theta}_i$ 表示（见图5-88）。第 i 行的精磨片数量 n_i 可按下式求出：

$$n_i = \frac{\pi R_i \bar{\theta}_i}{180d} \quad (5-15)$$

式中 R_i ——第 i 行精磨片构成的圆的半径（以过精磨片圆心计）。

精磨片的行间距和片间距均为 $2d$ ；

d ——精磨片直径。

$\bar{\theta}_i$ ——镜盘对 i 行精磨片的覆盖角平均值之半，它由下式求出：

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \theta_{ij} \quad (5-16)$$

式中 k ——摆角 φ_j 的 j 的总数（参看图5-88）。

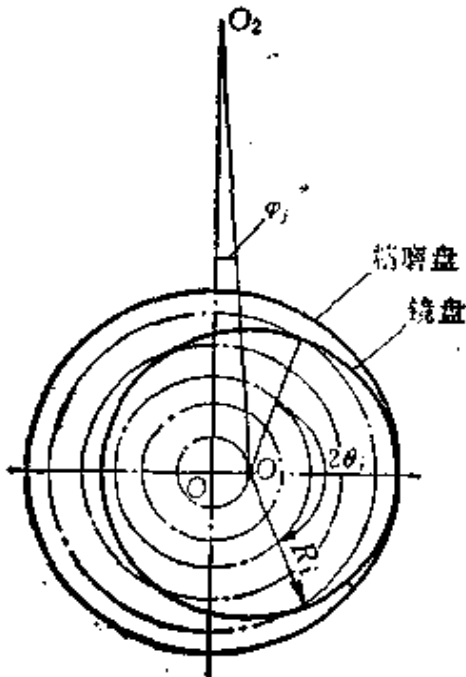


图 5-88 镜盘对精磨盘的覆盖
 的流向。当机床是逆时针旋转时，顺时针排列的磨具冷却液向外流，有利于排屑；逆时针排列的磨具冷却液涌向中心，有利于中心区域的冷却和润滑。

精磨片的排列形式有直线形、同心圆形、单头及多头螺旋线形、放射线形及同心圆径向重叠排列等，如图5-89所示。其中a、b、c图适用于半径较小的中、小球面磨盘，但b图存在磨出的镜面有明暗相间的带区误差的缺陷。c克服了b图的这一缺陷。d图和e图适用于大半径球面和平面磨盘，螺旋线的方向有顺时针和逆时针两种，它们的区别在于冷却液

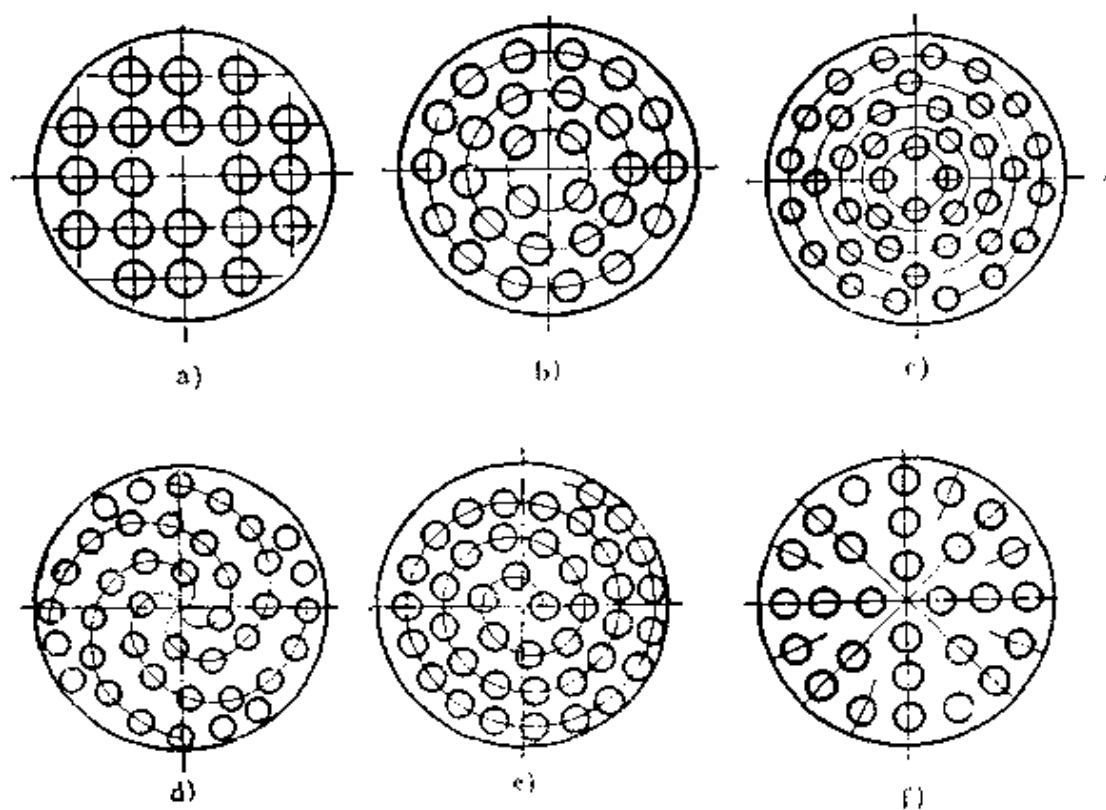


图 5-89 精磨片排列情况

a) 纵横平行等距排列 b) 同心圆等距排列 c) 同心圆径向重叠排列 d) 多头螺旋线排列 e) 单头螺旋线排列 f) 放射线排列

下面简单介绍行间距(螺距)和片间距均为 $2d$ (以过精磨片中心计)的螺旋线简易作图法(分离圆心法)。

将圆心在 O 、行间距为 $2d$ 的同心圆排列改为单头螺旋线排列时,可将圆心 O 分离为 O_1 和 O_2 两个, O_1 和 O_2 各偏离 O 为 $d/2$ (见图 5-90),以 O_1 和 O_2 为圆心分别作小半圆和大半圆,小半圆的半径 R' 和大半圆的半径 R'' 和相应的同心圆的半径 R 的关系如下:假如 n 行的同心圆的半径为 $R_n = 2nd$,那末, n 行小半圆的半径 $R'_n = 2nd - d/2$; n 行大半圆的半径 $R''_n = 2nd + d/2$ 。 n 行同心圆的周长等于 n 行小半圆的弧长加上 n 行大半圆的弧长。螺旋线的行间距(螺距)仍为 $2d$ 。

如要将行间距和片间距为 $2d$ 的同心圆排列改为头数为 z 的多

头螺旋线排列, 可将螺距(行间距)取为 $2zd$, 各头起始位置相差 $\left(\frac{360}{z}\right)^\circ$, 各头相应 i 行上分布的精磨片数为 n_i/z 。这里, 第一圈的螺旋线不易用分离圆心法画出, 可依螺旋线方程直接画出。

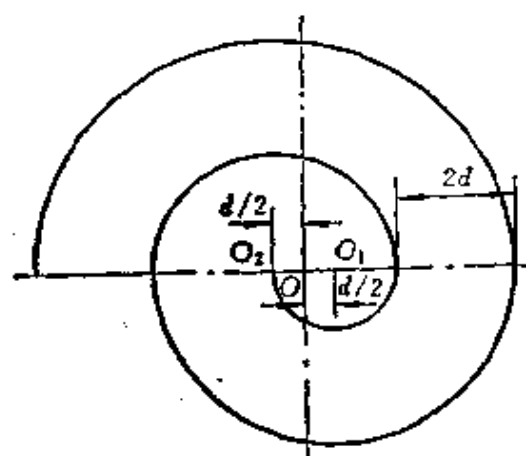


图 5-90 分离圆心简易作图法
 d —精磨片直径

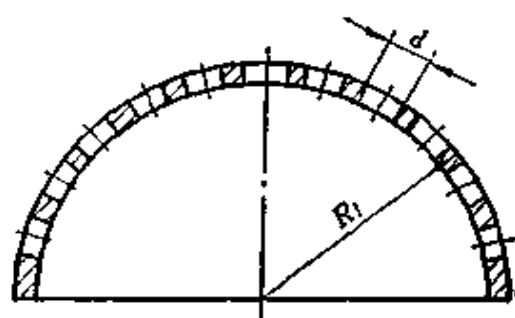


图 5-91 碗形定位罩
 R_1 —基模半径 d —精磨片直径

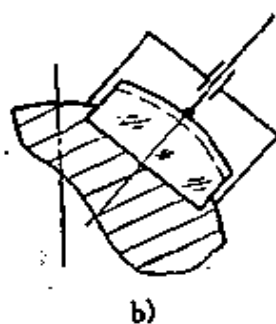
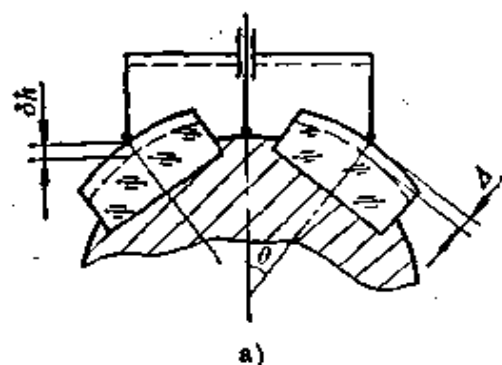


图 5-92 测量磨削量
a) 整盘 b) 单件

(6) 精磨片的粘结

精磨片可直接粘在基模上, 如图 5-86d 所示。这时, 精磨片粘结面应和基模有数值相同而符号相反的曲率。也可在基模上加工出定位凹窝, 将精磨片粘在凹窝内(如图 5-86c)。凹窝直径比精磨片直径大 $0.05\sim 0.1$ mm, 凹窝深 $0.3\sim 0.5$ mm。类似于凹窝的方法, 是用 $0.5\sim 0.8$ mm 的铝板制成碗形定位罩, 粘在凹基

模或凸基模上(如图 5-91), 罩上预先按计算好的位置开有磨片孔, 孔径 d 比磨片大 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。精磨片连同碗形罩一起粘在基模上。常用粘结胶如表 5-32 所示。

表 5-32 常用精磨片粘结胶

成分及配比	固化条件		特 性
	温 度	时 间	
502胶 (α -氰基丙烯酸乙酯)	室温	几秒钟固化12~24 h 后强度最高	固化快, 使用方便, 但耐冲击力差
HY-914粘结剂	室温	1 h 变硬, 3 h 完全固化	使用方便, 粘结强度高
环氧树脂 E-44, 10 g 650 聚酰胺 5~8 g	室温 120°C	24 h 3 h	粘结强度高, 但使用麻烦, 脱模较难
环氧树脂 E-44 100% 邻苯二甲酸二丁酯 4~8% 乙二胺 7~15%	室温 100°C	3天 3 h	同上

精磨片粘结时注意事项:

- 1) 粘结面一定要用乙醇或丙酮等有机溶剂很好地脱脂, 否则, 将影响粘结牢固度。
- 2) 粘结面不宜太光滑,
- 3) 粘结剂不宜用量过多。
- 4) 精磨片全部粘完后, 应用标准曲率半径模具静压定型, 以控制面形。
- 5) 粘结剂固化后, 可在精磨片之间的空隙处涂一层石蜡或硝基漆等保护层, 以防水及碱性冷却液侵蚀粘结胶而影响牢固度。

(7) 精磨盘的修整

固化后的精磨盘, 其曲率半径尚需用散粒磨料和相应的凸或凹或平面模具(见表 5-33)作进一步修整。为了保证精磨盘的同轴度, 修整精磨盘的主轴应用径向圆柱面和轴向端面作定位面。当球

面精磨盘为主动时，其同轴度误差应小于 0.05 mm，平面精磨盘对定位端面的不垂直度应小于 0.1 mm。

表 5-33 修整球模材料和砂号

磨盘种类	粗 修		精 修	
	修整模材料	砂 号	修整模材料	砂 号
精磨盘	HT22-24或A3	240*~280*	HT22-24或 A3	W40~W28
超精磨盘	A3	W40*	A3 或H62	W28~W20

磨盘修整过程中用手持式球径计初测曲率半径，用玻璃样板检查试磨件光圈精测曲率半径。表 5-34 是手持式球径计各种测环的口径。

表 5-34 球径计测环口径

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
外径 (mm)	8	11	16	20	25	32	40	50	63	71	80	90	100
内径 (mm)	5	8	11	16	20	25	32	40	50	63	71	80	90

测环的选用可参照式(5-17)：

$$\phi = (2.15 \sim 2.3) R \sin \frac{\gamma_s}{2} \quad (5-17)$$

式中 ϕ ——测环口径；
 R ——被测球面半径；
 γ_s ——镜盘半张角。

用测环测量镜盘面形时，可采用和标准球面比较，观察其矢高变化量的方法来决定曲率变化情况和修整方法。用测环测量工件磨削量可参照图 5-92，其中 a 用于多件成盘时测量，b 则用于单件或多件大间隙时。磨削量可按下式近似计算：

$$\Delta = \delta h \cos \theta \quad (5-18)$$

式中 Δ ——工件磨削量；

δh ——测环百分表二次读数差(矢高差);

θ ——测环半张角。

式(5-18)只是一个近似值,但其精度已能满足实际使用要求。

4. 冷却液

对冷却液的基本要求:

- (1) 具有良好的冷却、润滑、清洗性能。
- (2) 对磨盘有一定的化学自锐作用。
- (3) 良好的消泡、防锈、凝聚悬浮的硅酸凝胶使之沉淀等性能。
- (4) 无毒、无污染、无腐蚀作用、稳定性好。
- (5) 易于配制,价格低廉。

常用精磨冷却液如表 5-35。

表 5-35 冷却液

用 途	成分及配比 (重量比)	特 性
精 磨	三乙醇胺:水=2~3:100	化学自锐性好,但对机床有腐蚀
	丙三醇:三乙醇胺:水=1~2:1: 100	有良好的化学自锐性和防锈作用
	乙二醇:三乙醇胺:水=1~2:1: 100	有化学自锐性和防锈作用
	F68-2:水=2~3:100	有一定的化学自锐性和防锈作用
超精磨	成分同上,但有效药品含量减少 50~70%	

5. 主要工艺参数

(1) 线速度

精磨和超精磨的最大线速度 v 参见表 5-36。

表 5-36 精磨和超精磨线速度

工 序	$v(\text{m/sec})$	$R(\text{mm})$			
		<10	10~50	50~120	>120
精 磨		1~4	3~8	5~10	8~15
超 精 磨		1~3	2~7	4~8	6~12

(2) 压力

精磨和超精磨的磨削压力 P 参见表5-37。

表 5-37 精磨和超精磨压力

工 序	$P(10^4\text{Pa})$	$R(\text{mm})$			
		<10	10~50	50~120	>120
精 磨		10~15	5~15	3~10	2~7
超 精 磨		2~5	1.5~5	1~4	0.7~3

(3) 加工时间

精磨和超精磨的磨削时间有一个较佳参数，过分地延长加工时间反而不利。表5-38是各工序磨削加工时间。

表 5-38 加工时间

工 序	时间 (min)	$R(\text{mm})$			
		<10	10~50	50~120	>120
精 磨		0.5~1	0.25~0.7	0.5~1	1~3
超 精 磨		0.3~0.7	0.7~1.5	1~2	1.5~3

(4) 光圈匹配

所谓光圈匹配，是指镜盘各道工序的曲率与最后完工的曲率之间的差别。一般曲率半径较小的镜盘粗精磨后的光圈比完工光圈低 4~6 个；曲率半径较大或镜盘上零件行数较多时 ($R/\phi > 2$)，粗精磨后的光圈比完工光圈低 2~4 个较合适。

(5) 表面粗糙度及加工余量(表 5-39)

表 5-39 加工余量

玻璃的 可磨性	分 类	工 序		
		粗精磨	精精磨	超精磨
差	表面粗糙度 $Ra(\mu\text{m})$	1.6~0.4	0.4~0.1	0.05~0.025
	加工余量(mm)	0.04~0.06	0.01~0.02	0.005~0.01
好	表面粗糙度 $Ra(\mu\text{m})$	3.2~0.8	0.8~0.2	0.1~0.025
	加工余量(mm)	0.06~0.08	0.015~0.03	0.01~0.02

6. 常见疵病产生原因及克服办法

见表 5-40。

表 5-40 常见疵病产生原因及克服办法

名 称	产 生 原 因	克 服 办 法
划 痕	<ol style="list-style-type: none"> 1. 磨片中有大颗粒金刚石或制造时混料不匀或结合剂对磨料粘结力不够。 2. 磨片结合剂与被加工的玻璃不适应 3. 冷却不充分或冷却液有杂质 4. 磨片钝化 5. 光圈匹配不当 6. 压力过小或磨盘不同轴而动平衡差 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 选用高质量微粉；混料要充分；工具模具分号专用；精磨片烧结温度及浓度应符合规定 2. 应按玻璃特性选用相应的磨片结合剂 3. 冷却液流量及喷射要适当；若不洁要及时更换；粘度要适当 4. 选用不易钝化的磨片或更换适当的冷却液 5. 按前述规定确定光圈匹配数 6. 增加磨削压力，改善动平衡状态

(续)

名称	产生原因	克服办法
麻点	1. 加工余量不够或初始表面粗糙度匹配不当 2. 光圈匹配不当, 局部磨削量不够	1. 按规定留出各工序余量和确定适当的粗糙度匹配 2. 按规定确定合适的光圈匹配
光圈稳定性差	磨片耐磨性差或磨片排列不合理或磨盘与镜盘口径、光圈匹配等不当或磨片覆盖比太小	选用耐磨性好的磨片, 合理排列磨片或调整磨盘与镜盘的口径比和光圈匹配数, 增大磨片的覆盖比
光圈不规则	磨盘不规则或基体刚性差	修整磨盘使之规则; 改善基体结构
磨盘钝化	磨片结合剂对磨粒粘接力过大或冷却液化学自锐作用差或初始表面粗糙度过小等	选用适当的结合剂或选用较粗磨料; 改善冷却液的化学自锐作用; 确定合理的初始表面粗糙度
表面粗糙度差	磨片粒度太粗或磨料脱落太快或冷却液浓度太高, 化学自锐作用太强	选用适当细粒度磨料或适当自锐性的磨片; 控制冷却液的化学自锐作用
厚度超差	测量误差或刚性盘精度低	控制测量误差提高刚性盘精度
工件破边或脱落或磨片脱落	上道工序光圈太低, 合模压力太大或作主动的磨盘或镜盘径向跳动太大或粘结不牢固	光圈要合理匹配, 合模压力要小, 机床主轴、接头、磨盘或镜盘径向跳动应在规定范围内; 磨片或镜片粘结要牢固

十二、平面摆动式抛光

1. 抛光机

参看表5-24。

2. 抛光辅料

(1) 抛光粉

常用的玻璃抛光粉为氧化铈 (CeO_2) (参看第三章第六节)。

手修零件、对板或样板时常用氧化铁 (Fe_2O_3)。

晶体抛光粉视晶体材料而异 (参见晶体加工一节)。

抛光粉常加水制成悬浮液使用。常用氧化铈悬浮液和加水量的比例约为 1:5。氧化铁悬浮液的加水量到密度 1.1 左右。

抛光粉悬浮液的 pH 值一般在 3~9 间。氧化铈悬浮液常取 pH 值为 5~6。悬浮液中加入某些添加剂有提高抛光效率的作用(参看第三章第六节)。

(2) 沥青松香抛光胶

这是用得最多的一种抛光胶,能获得较理想的面形及表面疵病等级。添加少量蜂蜡(约 1%)对提高表面疵病等级有一定好处。此外还可添加少量其他物质(如碳酸钙 CaCO_3 、羊毛等)来提高抛光效率。抛光胶经熬制后,必须用二层纱布夹一层棉花过滤方可使用。工房温度与抛光胶的软化点关系,如表 5-41 所示。

表 5-41 工房温度与抛光胶软化点关系

工房温度(°C)	抛光胶软化点(°C)	工房温度(°C)	抛光胶软化点(°C)
35~30	77~74	25~22	70~68
30~25	74~70	22~18	68~65

(3) 毛毡或毛呢料

主要用于低精度零件抛光或其他精度零件的粗抛。其特点是抛光效率较高,表面疵病也可达较高等级(I级甚至0级),但面形精度较低。毛毡或毛呢厚度约为 2~4 mm。

(4) 沥青松香羊毛混合胶

这种胶的特点是能承受高速高压的工艺条件,适用于面形和表面疵病中等精度的零件。羊毛的含量约 1~5% (以重量计)。如无合适的羊毛,也可用碎毛料代替。

(5) 香豆酮-茛树脂(又称固马龙树脂)混合胶

这种胶的特点是较沥青松香混合胶能承受更高的速度和压力,适用于面形精度要求较高、表面疵病要求中等的零件。其配方如表 5-42 所示。

表 5-42 香豆酮-茛树脂胶配方

材 料 名 称	规 格	用 量 (g)	主 要 作 用
香豆酮-茛树脂	YB313—64	100	抛光
邻苯二甲酸二丁脂	HG 2-465—67	4~8	增韧
环氧树脂	HG 2-741—72	3~5	粘结、增韧

配制过程：按表 5-42 配比称好后，将固马龙加热熔化后过滤，然后加入邻苯二甲酸二丁脂和环氧树脂，搅拌均匀后倒在抛光模基底上即可。

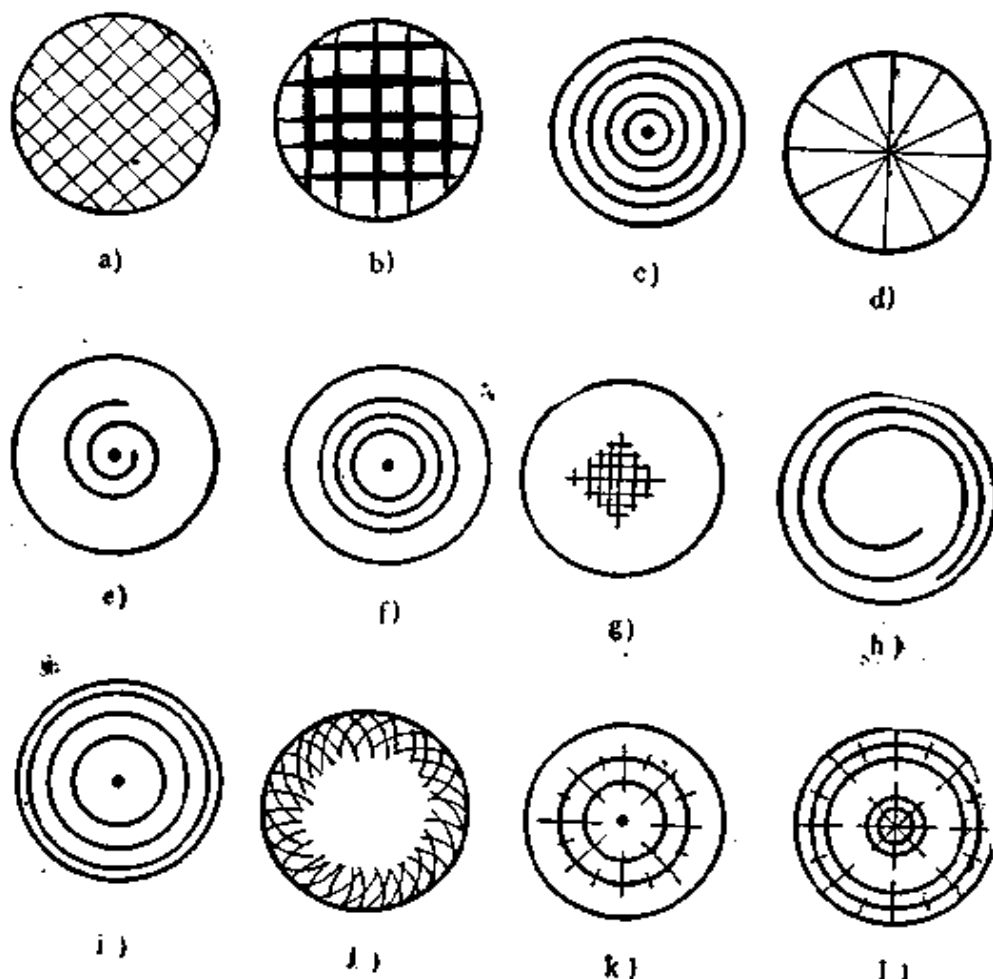


图 5-93 抛光模表面开槽情形

a) 用于大镜盘 b) 改大镜盘低光圈 c) 用于中、小球面镜盘
d)、e)、f)、g) 改镜盘低光圈用 h)、i)、j) 改镜盘高光圈用
k) 中腰低改高 l) 中腰高改低

(6) 聚氨酯

常做成厚度 2~3 mm 的薄片。其特点是能承受高速高压的工艺条件（较固马龙或羊毛混合胶要高），光圈稳定性也较好，适用于中等精度的零件。

(7) 沥青松香塑料粉混合胶

在以沥青松香为主的抛光胶中，加入 3~6%（以重量计）的 PNA（聚乙烯醇）-124 型塑料粉后，抛光模的面形变化小，适用于制作高精度平面抛光模。要注意的是加塑料粉时，抛光胶温度不宜过高，以 60~85°C 间为宜。过高的温度会烧焦塑料粉。塑料粉应分多次加入，每次宜少不宜多，边加边搅拌，充分搅拌均匀即可倒入已预热（70°C 左右）的抛光模基底上待用。

3. 抛光模

球面和平面抛光模如表 4-14 插图所示。图 5-93 是抛光模表面开槽情形。图 5-94 是环形抛光模，将抛光模中间挖掉了一块。基底材料是经过精密退火的 HT 20-40 铸铁，表面平度在 5 μm 以内。

4. 修改光圈要领

表 5-43 为按镜盘相对于抛光模的不同位置，当光圈是高或低时的修改要领。其他各种不同的光圈的修改方法，可根据这一要领，结合整个镜盘光圈情况，采取调整摆幅、转速、摆轴转速、顶针位置和刮削抛光盘等措施进行修改。

5. 常见疵病产生原因及克服办法

见表 5-44。

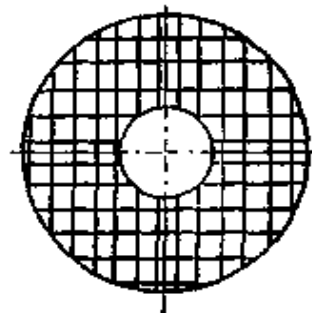
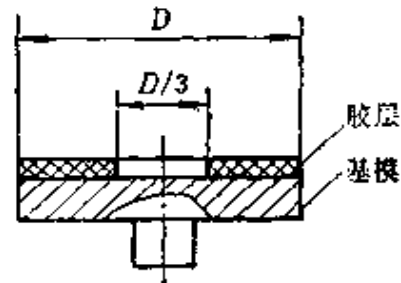
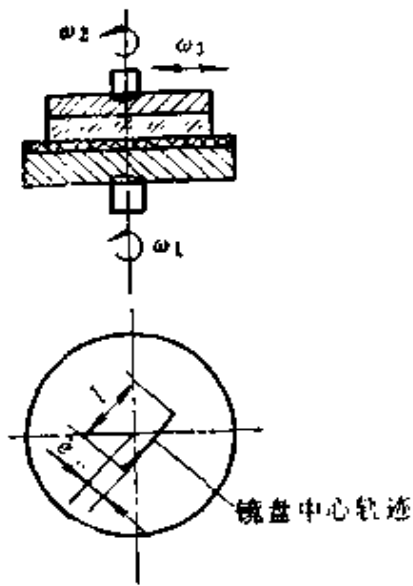
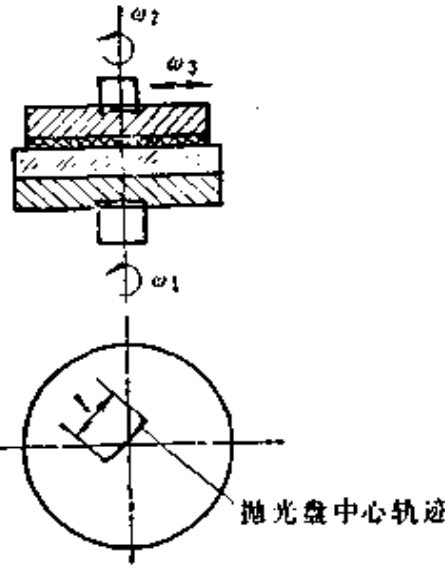


图 5-94 环形抛光模

表 5-43 改光圆要领

加工方式	图 示	表面特征	调 整 方 法
镜盘在上	 <p>镜盘中心轨迹</p>	光圈高	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光模边缘多开槽 2. 摆动时, 镜盘中心对抛光模中心有一位移量 e 3. 增大摆幅 l 4. 降低主轴转速 ω_1, 提高摆速 ω_2
镜盘在下	 <p>抛光盘中心轨迹</p>	光圈高	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光模边缘多开槽 2. 摆动时, 抛光模中心通过镜盘中心 3. 减小摆幅 l 4. 降低主轴转速 ω_1, 提高摆速 ω_2

(续)

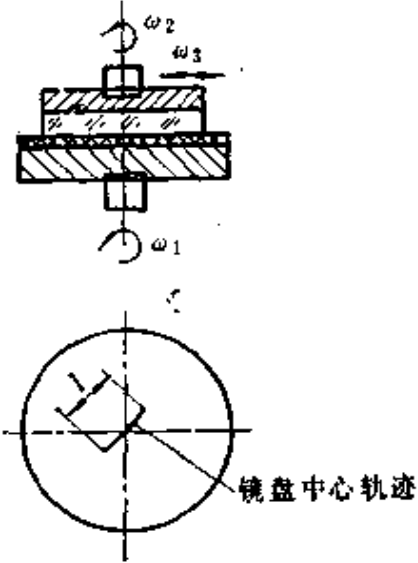
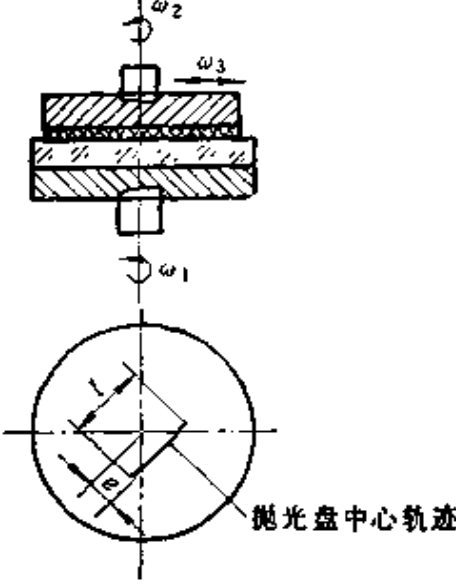
加工方式	图 示	表面特征	调 整 方 法
镜盘在上		光圈低	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光模中间多开槽 2. 摆动时镜盘中心通过抛光模中心 3. 减小摆幅l 4. 提高主轴转速ω_1, 降低摆速ω_2
镜盘在下		光圈低	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光模中间多开槽 2. 摆动时抛光模中心对镜盘中心有一位移量e 3. 增大摆幅l 4. 提高主轴转速ω_1, 降低摆速ω_2

表 5-44 常见疵病原因及克服办法

类 型	原 因	克 服 办 法
划 痕	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光粉粒度不均匀或混有大颗粒机械杂质 2. 工房环境不洁净 3. 抛光胶或毛毡、聚氨酯等不洁净 4. 擦布不干净 5. 操作者从外部带入灰尘 6. 细磨后清洗不彻底 7. 检查光圈时未擦净而样板又滑动 8. 细磨遗留划痕未抛掉 9. 抛光胶太硬 10. 抛光模与镜盘吻合不好 11. 抛光模使用时间太久, 表面起硬壳 12. 抛光模边缘有干硬堆积物 13. 下盘时擦伤 14. 清洗时擦伤 15. 保护漆不干净 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 选用粒度均匀的抛光粉 2. 做好环境清洁工作 3. 仔细过滤并保管好抛光胶。选用洁净毛毡、聚氨酯 4. 擦布应洗净, 并放入盒内 5. 穿戴好工作服和帽子 6. 细磨后要洗净 7. 样板要擦净, 勿在工件上滑动 8. 细磨完工, 一定要仔细检查 9. 选用合适的抛光胶 10. 修刮或重新压抛光模 11. 刮去硬壳层, 重新压抛光模 12. 及时除去抛光模边缘堆积物 13. 下盘前, 涂好保护漆 14. 清洗液应干净, 而且不要使劲硬擦 15. 选用清洁的保护漆
麻 点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光时间不够 2. 细磨时间不充分 3. 细磨面粗细不均匀, 尤其是边缘与中间差别太大 4. 有粗划痕抛断后的残迹 5. 方形或长方形零件细磨后塌角 6. 零件“走动”(常发生于弹性胶法) 7. 细磨面形误差太大, 尤其是偏高, 易形成边缘抛光不充分 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 应有足够的抛光时间 2. 细磨时, 应将上道磨料的粗砂眼全部磨去 3. 每一道磨料细磨时, 均应从边缘先磨起 4. 抛光过程中发现粗划痕后, 应先标出方位后再抛 5. 用开槽平模细磨, 并注意所添的砂要均匀地撒开 6. 选用适当粘度的粘结胶; 控制工房温度梯度, 使其勿太大; 镜盘勿骤冷骤热, 粘结胶厚度应符合计算要求 7. 细磨后, 面形应控制在规定误差范围内, 以避免高光圈
印 迹	<ol style="list-style-type: none"> 1. 抛光模与镜盘吻合不好, 出现油斑痕迹 2. 玻璃化学稳定性不好 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 选用合适粘度的抛光胶, 修刮抛光模, 使之与镜盘吻合 2. 抛光中产生的印迹, 可用适当的添加剂(参看添加剂一节, 而完

(续)

类型	原因	克服办法
印迹	3. 水珠、唾沫星、抛光液等未及时擦净	工后产生的印迹, 采用可靠的保护漆(参看保护漆一节)去除 3. 避免对着完工零件谈话; 零件下盘前如应盘不干, 应及时擦净
光圈变形	1. 粘结力不合适 2. 光圈未稳定即下盘	1. 光圈变形主要发生在较薄的零件或不规则的零件, 故此类零件上盘前应考虑各部位受力情况, 采用适当的上盘方法(参看上盘一节) 2. 应按零件大小, 给予一定的光圈稳定时间

6. 平行薄片的双面抛光

对于厚度与直径之比小于 $1/10$ 的平行薄片, 为了避免因上盘原因而引起的光圈变形或损伤表面, 可采用双面抛光法。双面抛光装置如图 5-95 所示, 工件 4 连同夹板 3 均置于下抛光模上, 在抛光过程中, 上抛光模 5 始终压在工件上。聚四氟乙烯挡圈 2 的高度应超过上抛光模。夹板的形状如图 5-96 所示, 孔的直径比工件直径大 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$, 厚度比工件小 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$, 材料为聚四氟乙烯。夹板在制造过程中, 由于切削加工等原因而有翘曲现象, 可将它夹在两块平模中间加温到 120°C , 然后自然冷却, 达到校平的目的。

在抛光过程中, 由于下抛光盘边缘受力小于中间, 同时为了使下抛光盘经常保持微凸, 故常常将边缘的槽开得比中间宽些(如图 5-97)。上抛光盘开槽的情况与下盘相反, 中间较边缘宽(如图 5-98)。

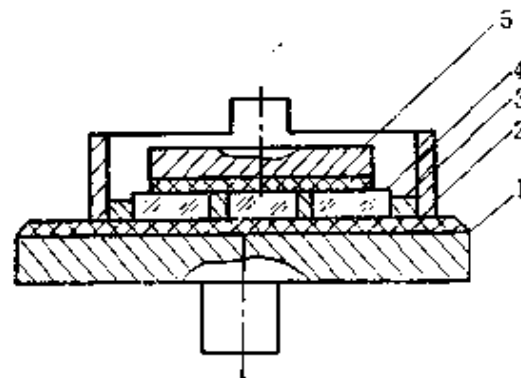


图 5-95 双面抛光

1—下抛光模 2—挡圈 3—夹板
4—工件 5—上抛光模

抛光过程中, 为了改善工件的平行度, 需间隔一定时间(15~

30 min, 视工件大小而定) 将工件翻面并互换位置。上抛光模的直径约比包括全部夹板孔在内的圆的直径小 5~10%。下抛光模的直径约比挡圈直径大 25%。抛光胶比常规抛光胶要软一些。

双面抛光的缺点是去除砂眼较慢。为了提高效率, 可先用常规方法去除砂眼, 再用双面抛光法提高平行度和平面度。

如果将上下抛光模换成铸铁模(模子表面也应开槽), 就可以进行双面细磨。

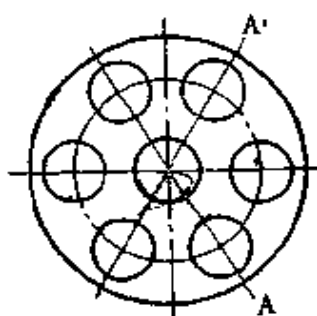


图 5-96 夹板

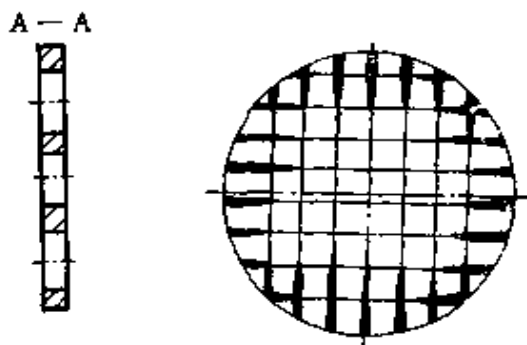


图 5-97 下抛光模开槽情形

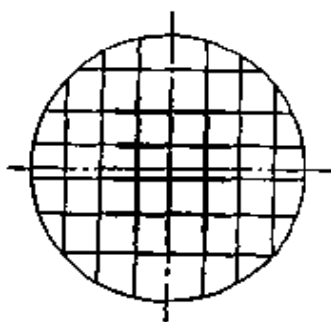


图 5-98 上抛光模开槽情形

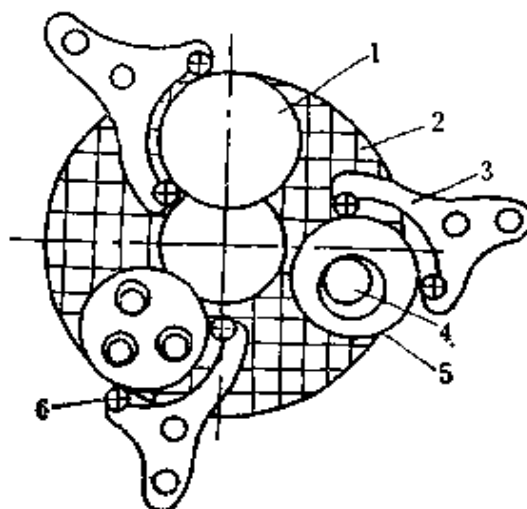


图 5-99 环形抛光模抛光

1—校正板 2—环形抛光模 3—可调支架
4—工件 5—分离器 6—滚轮

7. 环形抛光模抛光

利用环形抛光模(参看图 5-94)和分离器可以加工出较高精度的平面。由于环形抛光模口径都较大(1 m 以上), 故机床转速

较低 ($0\sim 4$ r/min)。由于环形抛光模上的分离器只转动(从动),不摆动,故需有一块校正板协助保持抛光模的面形。加工中通过改变校正板中心相对抛光模中心的距离,来控制抛光模的面形。校正板直径约为抛光模直径的 0.55 左右。图 5-99 是分离器在环形抛光模上抛光的示意图。

十三、固着磨料抛光

1. 抛光机

参看表 5-26。

2. 抛光片

抛光片由结合剂和抛光粉(或可称为磨料)两部分组成。常用的结合剂有环氧树脂、酚醛树脂等。常用抛光粉为氧化铈。结合剂约占抛光片总重量的 $8\sim 12\%$ 。抛光片直径、厚度及其与镜盘曲率半径关系与精磨片相同。

制作抛光片的方法有浇铸法、热压法、烧结法等,其中烧结法效果较好。它是将固体结合剂粉碎、过筛,然后按比例配料、混合,再用压力机压制成型(成型压力为 $9.8\sim 19.6\times 10^7$ Pa),最后放入电热箱内烧结,烧结温度根据结合剂性质而定,一般加热到略高于结合剂的软化温度再保温 1 h。如果结合剂中含有固化剂,可均匀升温到固化温度后保温 1~2 h。

3. 抛光模

抛光模类似于精磨盘。抛光片的排列形式可参照精磨片的排列形式。抛光模的覆盖比如表 5-45。

表 5-45 抛光模的覆盖比

镜盘半径 R (mm)	<10	10~30	30~50	50~120	>120
抛光模覆盖比 λ (%)	100~65	70~50	60~45	50~30	<35

抛光片的粘结方法同精磨片,其修整方法也是用球模对磨。球模材料为 A3 或 H 62。对磨用磨料粒度为 W 10~W 20。对磨

过程中用手持式球径计初测曲率半径,并用样板检查试抛件光圈,然后确定所需抛光模面形。最后应用氧化铈在球模上精修,除去嵌入抛光片里的粗砂粒后,再抛几盘废玻璃,以除去残留在抛光片里的少数金刚砂,此时抛光模即可正式启用。

4. 冷却液

固着磨料抛光冷却液配方正在不断完善。这里介绍两种正在使用中的配方(重量比):

- (1) 丙三醇 0.3~0.5
 水 100
- (2) 硝酸铈 0.2~0.5
 水 100

此外,也可单独用水作冷却液。

5. 主要工艺参数

- (1) 最大线速度(表 5-46)

表 5-46 最大线速度

曲率半径 $R(\text{mm})$	<10	10~50	50~120	>120
线速度 $v(\text{m/sec})$	1~2	2~6	3~7	5~10

- (2) 压力(表 5-47)

表 5-47 压力

曲率半径 $R(\text{mm})$	<10	10~50	50~120	>120
压力 (10^4Pa)	1.5~3	1~3	0.7~2	0.5~1.5

- (3) 加工时间(表 5-48)

表 5-48 加工时间

曲率半径 R (mm)	<10	10~50	50~120	>120
加工时间 (min)	2~3	2~5	3~7	5~10

(4) 加工余量

加工余量与表面粗糙度有关，而表面粗糙度不仅与磨料粒度有关，还与玻璃性质有关。表 5-49 是按玻璃可磨性分类的加工余量。

表 5-49 加工余量

可磨性	表面粗糙度 $Ra(\mu\text{m})$	加工余量 (mm)
差	小于0.01	0.003~0.005
好	小于0.01	0.005~0.01

(5) 抛光液温度

一般为 $23\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。

6. 常见疵病产生原因及克服办法

见表 5-50。

表 5-50 常见疵病原因及克服办法

名称	产生原因	克服办法
划痕	1. 氧化铈质量差或混料不均匀 2. 抛光片与玻璃不匹配 3. 抛光片中有异物 4. 抛光片钝化 5. 冷却液不清洁 6. 抛光液温度偏低 7. 精磨遗留的划痕	1. 选用优质氧化铈并充分混料 2. 应根据玻璃性能选用相应的抛光片 3. 制作抛光片时要严格防止坚硬异物混入 4. 改善抛光片的自锐性 5. 防止异物落入抛光液并加强过滤，必要时更换冷却液 6. 提高液温 7. 精磨后一定要仔细检查

(续)

名称	产生原因	克服办法
划痕	8. 光圈匹配不当 9. 镜盘或抛光模径向跳动大 10. 压力不够 11. 冷却液流量不足或大镜盘缺内喷, 形成中心冷却、润滑, 清洗功能不足	8. 光圈匹配不宜过低或过高 9. 控制径向跳动 10. 控制压力到规定范围 11. 增加流量和内喷
麻点 (砂眼)	1. 抛光片抛光作用差 2. 超精磨面质量差 3. 抛光时间不充分 4. 光圈匹配不当	1. 更换抛光片 2. 超精磨完工后必须仔细检查, 合格后再转入抛光 3. 严格按正常工艺规程掌握抛光时间 4. 严格按工艺规程确定光圈匹配
光圈不稳定	1. 抛光片耐磨性差 2. 抛光片排列不合适 3. 抛光盘口径不合适或摆幅不合适 4. 抛光盘覆盖比太小或压力太大 5. 冷却液温度太高 6. 超精磨面光圈误差太大, 致使抛光模变形快	1. 提高抛光片耐磨性 2. 改变抛光片排列形式 3. 选择适当口径的抛光盘或调整摆幅 4. 增大覆盖比, 控制压力 5. 降低冷却液温度 6. 严格控制超精磨面光圈在规定范围内
光圈不规则	1. 抛光模不规则 2. 抛光时间不够, 超精磨遗留的局部误差未完全消除 3. 压力太大	1. 修整抛光模 2. 控制抛光时间在规定范围内 3. 控制压力在规定范围内
抛光片钝化	抛光片自锐性差或树脂量过多强度过高	改进抛光片配方, 合理控制树脂量和强度

7. 国内首批生产线加工透镜技术要求和加工指标

见表 5-51。

十四、下盘和清洗

1. 加热法下盘

用松香、蜂蜡(或石蜡)混合胶粘结的镜片, 常用加热法下盘。加热过程中要防止冷风直吹零件或玻璃垫板, 以免炸裂, 同

表 5-51 国内首批生产线加工透镜技术要求和加工指标

生产线号	JNX-1	JGZ-1	JGZ-2	JGZ-3	JGZ-4	NYF-4	NYF-3
玻璃牌号	K9	ZK11	F1	OF4	ZBaF10	QF11	K5
曲率半径R(mm)	20.14 20.14	18.57	-33.58-16.996	-16.36	25	16.36	4±.46
透镜直径φ(mm)	15	19.9	17.8	17.3	16.7	34	30
透镜中心厚度(mm)	3.8±0.10	4.62±0.07	1.08±0.07	1.08±0.07	4.51±0.07	8.62±0.10	11.76±0.10
光圈数N	3	3	3	3	3	5	5
局部光圈ΔN	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5
表面疵病等级B	IV~V	V	V	V	V	V	V
成盘块数	6	6	11	3	7	3	7
透镜半张角	75°	72°	69°	70°	70°	71°	67.2°
加工时间	3.5	3.5	3	2.5	3	2	4.75
铣磨(min)	0.38	0.38	0.83	0.33	0.5	0.33	1.33
精磨(min)	0.38	0.38	1.33	1	1.2	1	1
超精磨(min)	4.5	4.5	4	3	4	3	5
抛光(min)	10	10	11	8	10	7.5	13.5
每盘通过生产线时间(min)	93以上	100以上	100以上	100	100以上	230	50以上
磨具加工的稳定性(盘)	95.83	93.4	89.6	92	86.96	95	91
一次成品合格率(%)							

注: 对于加工一个面的生产线, 合格率指单面合格率。

时也要防止加热的零件或玻璃垫板直接接触冷的物体。

2. 冷冻法下盘

平面镜的浮胶法、透镜和棱镜的弹性胶法等，均可采用低温冷冻使之与粘结模分离而下盘的方法。

3. 局部加热法下盘

光胶零件，用酒精灯火焰加热工件局部，使之脱开即可实现下盘。

4. 敲击法下盘

石膏盘在完工后，撬去平面托模，从背面用木槌轻击使其裂开，即可取出零件。

当透镜和棱镜用弹性法上盘时，若无冷冻下盘条件，也可采用敲击法下盘，但需注意应敲击火漆团(条)。当用浮胶法时，若无低温冷冻条件下盘，可先用锋利小刀铲去零件周围的粘结胶再取下。个别不易取下的条件，可用小木棍顶住边缘轻击木棍顶端，使之离开垫板。

5. 清洗

(1) 手工清洗

手工清洗的优点是简便易行，缺点是效率低。清洗剂的选择根据清洗对象而定（参看有机溶剂一节）。

除了一般有机溶剂外，粗磨零件的清洗也可用碱溶液。当用碱溶液时，零件连同溶液一起加热至 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，附着于零件上的松香、蜂蜡混合胶就溶解于碱溶液中了。

由于清洗过程中大量使用有机溶剂（酒精、汽油等），故清洗室内应有良好的通风设施，并注意防火。

清洗化学稳定性差的玻璃，应尽量缩短零件的浸泡时间。

(2) 超声波清洗

超声波清洗比手工清洗的生产率高，适用于大批量生产。超声波清洗的关键是清洗液。下面介绍一种八槽清洗机的各槽清洗液成分及作用。

第一槽：0.65%浓度的氢氧化钠水溶液，再溶入 0.5%F 68

聚醚。槽内装有管状加热器，控制液温至 40~50°C。槽内并装有输入功率为 250 W 的超声波发生器。氢氧化钠水溶液主要是清洗镜片上的粘结胶，F 68 聚醚是一种表面活性剂，利用它的亲水性、渗透性及分散性，可使工件上附着的氧化铈及其他污物松散并与工件脱离。

第二槽：0.65%浓度的氢氧化钾水溶液，由管状加热器加热溶液，控制液温至 50°C。槽内装有输入功率为 250 W 的超声波发生器。该槽的作用是清洗第一槽未洗净的污物。为了提高清洗效果，此槽也可加入 0.5%的 F 68 聚醚。

第三槽：自来水。主要清洗氢氧化钾及其他附着物。自来水最好经过软化处理，水需流动，以便及时带走污物。

第四槽：1.3%的硅-钠混合液，主要清洗油脂及污物。液温由管状加热器加温至 40°C。超声波发生器输入功率为 250W。

硅-钠混合液配方如下：

十二烷基硫酸钠	23%
乙二胺四乙酸二钠盐	40%
磷酸钠	31%
硅酸钠	6%

第五槽：自来水。清洗第四槽洗下的污物。自来水最好经过软化处理，并需是流动的。槽内装有输入功率为 250 W 的超声波发生器。

第六槽：酒精。其主要作用是脱水并清洗前几槽未溶解的污物。槽内配有回形冷凝管，以降低酒精温度，减少挥发，同时还装有输入功率为 250 W 的超声波发生器。

第七槽：酒精。作用同第六槽，目的是进一步清洗工件。

第八槽：三氟三氯乙烷（氟利昂 F 113）气化清洗。此槽的作用是利用热蒸气使工件升温，将工件表面的酒精、水分等迅速挥发，同时依靠气体在工件表面往复回流，带走表面污物。三氟三氯乙烷由槽内的管形加热器加热至沸腾，从而产生大量蒸气。槽内配备有回形冷凝管，使流经工件表面的气体再冷却成液体，

回流入槽，减少损耗，为了防止三氟三氯乙烷气体沸腾时飞溅到工件表面而污染工件，在槽的中部装有不锈钢丝网或铜丝网。

对于那些易被碱性溶液腐蚀的玻璃，亦有用 200 号油漆溶剂油代替碱性溶液的，这时用循环自来水作冷却液，使液温保持在 20°C 以下。

超声波清洗中，如果工件边缘附着的氧化铈不易洗掉，可以先用酸性清洗液将氧化铈溶解生成硝酸铈后再清洗。酸性清洗液的配方如下：

硝酸(12N)	1.6%
双氧水(32%)	16.0%
F68聚醚	0.4%
水	82.0%

对于工件边缘的红粉，可用稀硝酸清洗。

超声清洗后的工件，若少数表面有“水印”，可用 3~5% 的醋酸水溶液清洗。

十五、定心和磨边

透镜的定心磨边就是使其光轴（两球面曲率中心的连线）与圆柱面几何轴线相重合，同时把外圆磨到给定的尺寸。

1. 定心方法

(1) 表面反射象定心

用肉眼观察表面反射象是一种最简便易行的方法，缺点是定心精度不高，一般为 0.05 mm 左右。图 5-100 是一个胶在接头上的有偏心的透镜，当透镜转动时，表面反射象也随之转动，移动透镜直至球心位于转动轴线上时，反射象就不再转动。一般情况下，透镜粘结面的定心主要

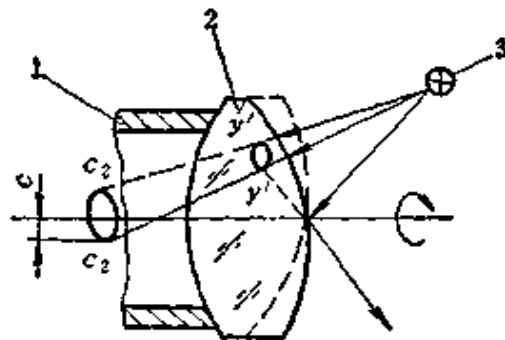


图 5-100 表面反射象定心原理

1—定心接头 2—透镜 3—光源

靠接头端面的修整精度来保证。

(2) 自准直球心象定心

用自准直显微镜观察球面的球心象的跳动来定心，具有较高的定心精度。图 5-101 是 TD 型透镜定心仪光路图。表 5-52 是其技术参数。

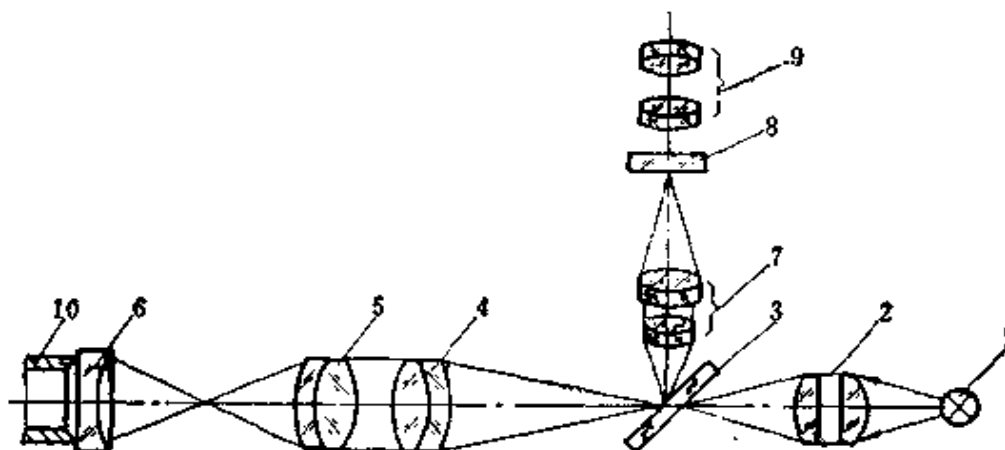


图 5-101 TD 型透镜定心仪

1—光源 2—聚光镜 3—分划反射镜 4—固定物镜 5—可调物镜
6—工件 7—10×物镜 8—分划板 9—10×目镜 10—接头

表 5-52 TD 型定心仪技术参数

(mm)

可调物镜焦距 f_2	物镜焦距 f_1	定心精度 mm/格	示值误差
432	440	0.01	<0.004
-227	-220	0.02	<0.002
212.5	220	0.02	<0.002
-116	-110	0.01	<0.001
103	110	0.01	<0.001
52	55	0.005	<0.0005

透镜中心差用下式计算：

$$c = bn/4\beta \quad (5-19)$$

或

$$c = na \quad (5-20)$$

式中 b ——分划板实际格值；

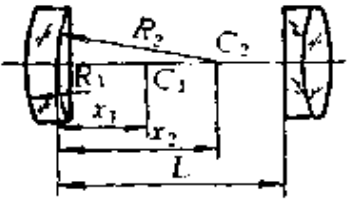
- n —— 球心象跳动格数；
 β —— 显微镜物镜放大率；
 a —— 分划板计算格值。

用自准直球心象定心时，球心象及定心仪的位置，可按表 5-53 中所列的公式计算。

表 5-53 透镜表面球心象位置计算

零件类别	校正点位置示意图	球心象位置 X	定心仪位置 L
平凸透镜		$X_1 = R_2/n - 1$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f + X_1$ $L_2 = l_f - R_2$
平凹透镜		$X_1 = R_2/n - 1$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f - X_1$ $L_2 = l_f + X_2$
双凸透镜		$X_1 = \frac{R_2(R_1 - d)}{nR_2 + (n-1)(R_1 - d)}$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f + X_1$ $L_2 = l_f - X_2$
双凹透镜		$X_1 = \frac{R_1(R_2 + d)}{nR_2 + (n-1)(R_1 + d)}$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f - X_1$ $L_2 = l_f + R_2$
正月透镜		$X_1 = \frac{R_2(R_1 + d)}{-nR_2 + (n-1)(R_1 + d)}$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f + X_1$ $L_2 = l_f - X_2$

(续)

零件类别	校正点位置示意图	球心象位置 X	定心仪位置 L
负月透镜		$X_1 = \frac{R_2(R_1 - d)}{nR_2 - (n-1)(R_1 - d)}$ $X_2 = R_2$	$L_1 = l_f + X_1$ $L_2 = l_f + X_2$

注: R_1 ——透镜第一面(粘结面)的曲率半径; R_2 ——透镜第二面的曲率半径;
 n ——透镜材料折射率; d ——透镜中心厚度; L ——可调物镜到被定心透镜顶点的距离; L_1 ——定心仪校准透镜第一面球心象时的 L 值; L_2 ——定心仪校准透镜第二面球心象时的 L 值; l_f ——物方顶焦点(自可换物镜第一面到物方焦点的距离, 已刻在物镜框上)。

注意: 用上述公式计算时, 式中的 R_1 、 R_2 、 d 均代入绝对值, 并选择 l_f , 使 L 值成为正数且大于 10 mm。

(3) 透射定心

透射定心就是将透镜粘在接头上转动时, 通过工件透射过来的十字分划象的跳动来定心(见图 5-102)。透镜中心差 c 由下式求出:

$$c = bn/2\beta \quad (5-21)$$

式中 β ——物镜放大率;
 b ——分划板实际格值;
 n ——跳动格数。

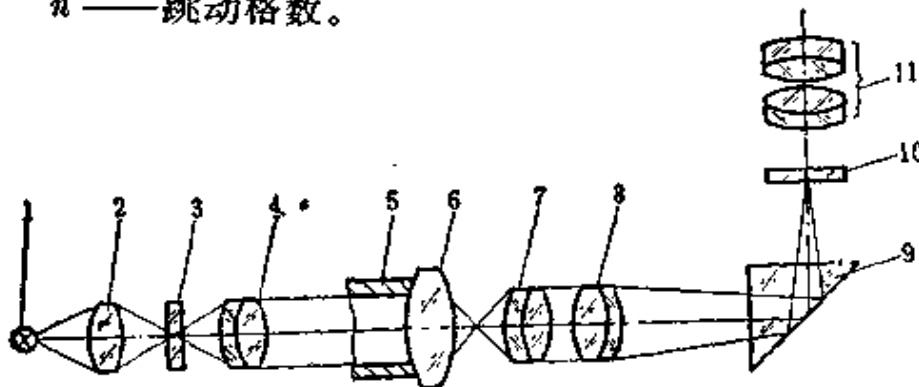


图 5-102 透射定心仪

1—光源 2—聚光镜 3—十字分划板 4—准直物镜 5—接头 6—工件 7—可调物镜 8—固定物镜 9—直角棱镜 10—分划板 11—目镜

(4) 机械定心

机械定中心是利用两个接头夹紧力的径向分力（定心力）使透镜向未与接头接触的一边移动，直至整个表面与接头端面接触为止。这时透镜的两个表面的球心位于接头的轴线上，达到定心的目的（见图 5-103）。

透镜定心力 F_2 与透镜表面曲率半径有关。在通过接头轴线的平面内，透镜表面两个夹持点的切线之间的夹角 α 称为夹紧角。夹紧角 α 越大，定心力越大，定心精度就越高。

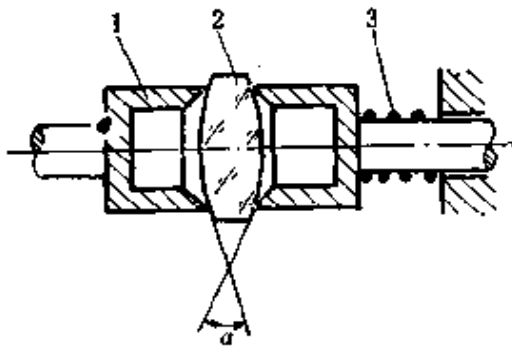


图 5-103 机械定心原理
1—接头 2—工件 3—弹簧

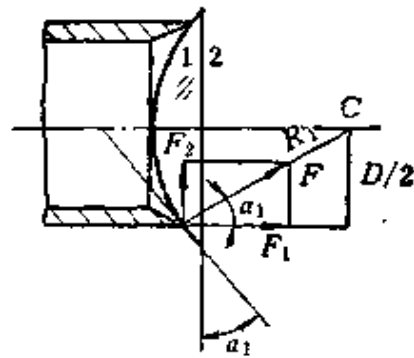


图 5-104 夹紧角

计算夹紧角时，需各面分别计算（见图 5-104）。

单面夹紧角由下式求出：

$$\sin \alpha_1 = D/2 R_1 \quad (5-22)$$

式中 α_1 ——透镜第一面夹紧角；

D ——接头直径；

R_1 ——透镜第一面曲率半径。

将相应 R_2 值代入式(5-22)求得 α_2 。

总夹紧角 α 为：

$$\alpha = |\alpha_1 \pm \alpha_2| \quad (5-23)$$

式中，双凸、双凹透镜取“+”，弯月透镜取“-”。

透镜两表面的定心力随着透镜曲率半径的增大而降低。当定心力与接头端面对玻璃表面间的摩擦力相等时，就无法定心，也即

$$F \sin \alpha = \mu F \cos \alpha$$

$$\text{即} \quad \operatorname{tg} \alpha = \mu \quad (5-24)$$

式中 μ ——接头与抛光玻璃之间的摩擦系数。

如果取 $\mu = 0.15$ ，则单面夹紧角 $\alpha = 8^\circ 30'$ ，极限夹紧角为 17° 。在实际工作中，一般取 $\alpha \geq 12^\circ$ 较合适。

判断定心精度还可运用以下经验公式：

$$Z = \left| \frac{D}{4R_1} \pm \frac{D}{4R_2} \right| \quad (5-25)$$

式中，双凸、双凹透镜取“+”，弯月透镜取“-”。

当 $Z > 0.15$ 时，定心情况良好（相当于 $\alpha > 17^\circ 30'$ ）； $Z = 0.1 \sim 0.15$ 时，定心精度较差； $Z < 0.10$ 时，不能定心（相当于 $\alpha < 12^\circ$ ）。

影响机械定心精度的因素如下：

1) 夹持透镜的两个主轴的同轴度，一般要求 $0.005 \sim 0.01$ mm。

2) 定心接头的径向跳动量、轴向跳动量、端面粗糙度及刚性，一般要求跳动量为 $0.002 \sim 0.003$ mm，端面粗糙度为 Ra 0.16 以上。

3) 夹紧力不合适（偏小）。

(5) 各种定心法的精度

各种定心方法的精度比较见表 5-54。

表 5-54

定 心 方 法	精 度 (mm)
表面反射象定心	0.03~0.10
自准直球心象定心	0.005~0.04
[透射定心	0.01~0.10
机械定心	0.01~0.10

2. 磨边接头

(1) 材料 光学法定心接头用黄铜 HPb 59-1 或 H 62；机械定心接头可用黄铜或 45 钢。

(2) 形状 图 5-105 是修整后的接头端面；图 5-106 是光学定心磨边机接头；图 5-107 是机械定心磨边机接头。其定位锥面一定要很好地与主轴吻合，以保证接头在第一次修整好后，第二次使用时一般情况下不必再修。

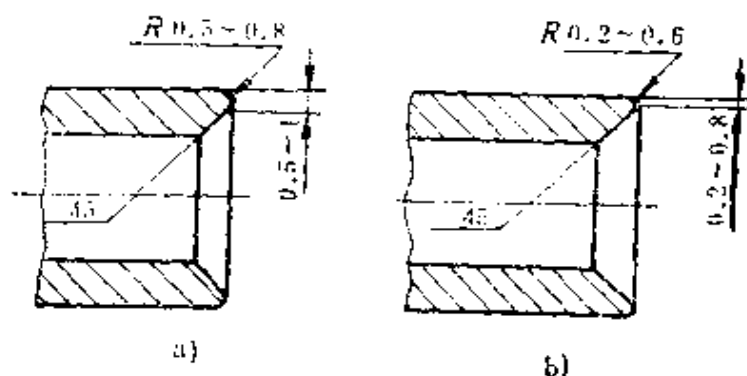


图 5-105 修整后的接头端面
a) 光学定心接头 b) 机械定心接头

修整后的接头端面的同轴度和跳动，一般为 $0.005 \sim 0.002$ mm。

接头外径比透镜完工直径小 $0.2 \sim 0.4$ mm。例如机械定心磨边自动倒角时，若砂轮倒角高为 0.5 mm，则接头外径比透镜完工尺寸小 1.5 mm。

接头粘结面用车刀修整后，尚需用 W 7 金相砂纸或呢布加氧化铬 (Cr_2O_3) 抛亮。

修整接头时，机床主轴应在最快档。

3. 砂轮

(1) 砂轮类型

1) 金刚石砂轮 常用粒度为 240#、280#，浓度为 100%。加工一般光学玻璃常用青铜结合剂，加工软质玻璃或晶体可用树

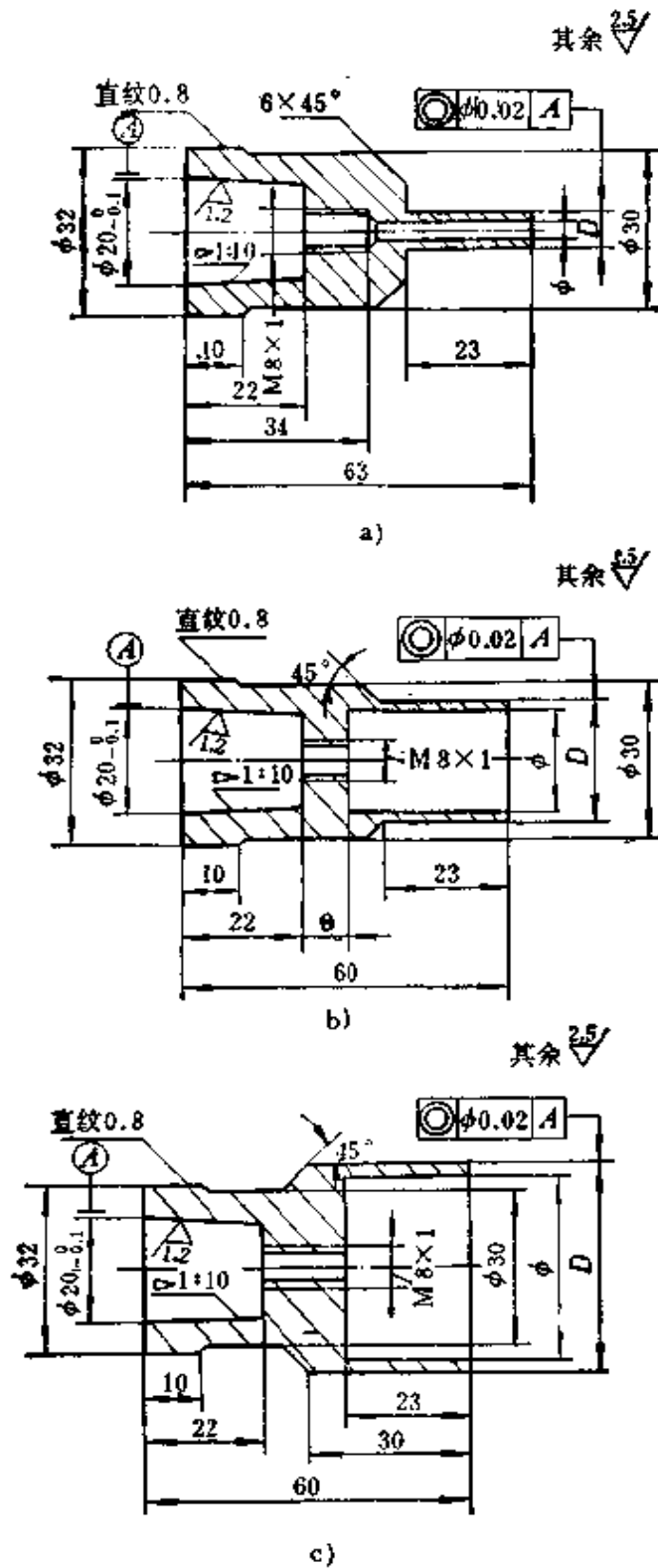


图 5-106 光学定心磨边接头

- a) 用于 $D \leq 9$, 取 $D - \phi = 2 \sim 2.5$
 b) 用于 $D > 9 \sim 30$, 取 $D - \phi = 2.5 \sim 3$
 c) 用于 $D > 30 \sim 80$, 取 $D - \phi = 3 \sim 4$

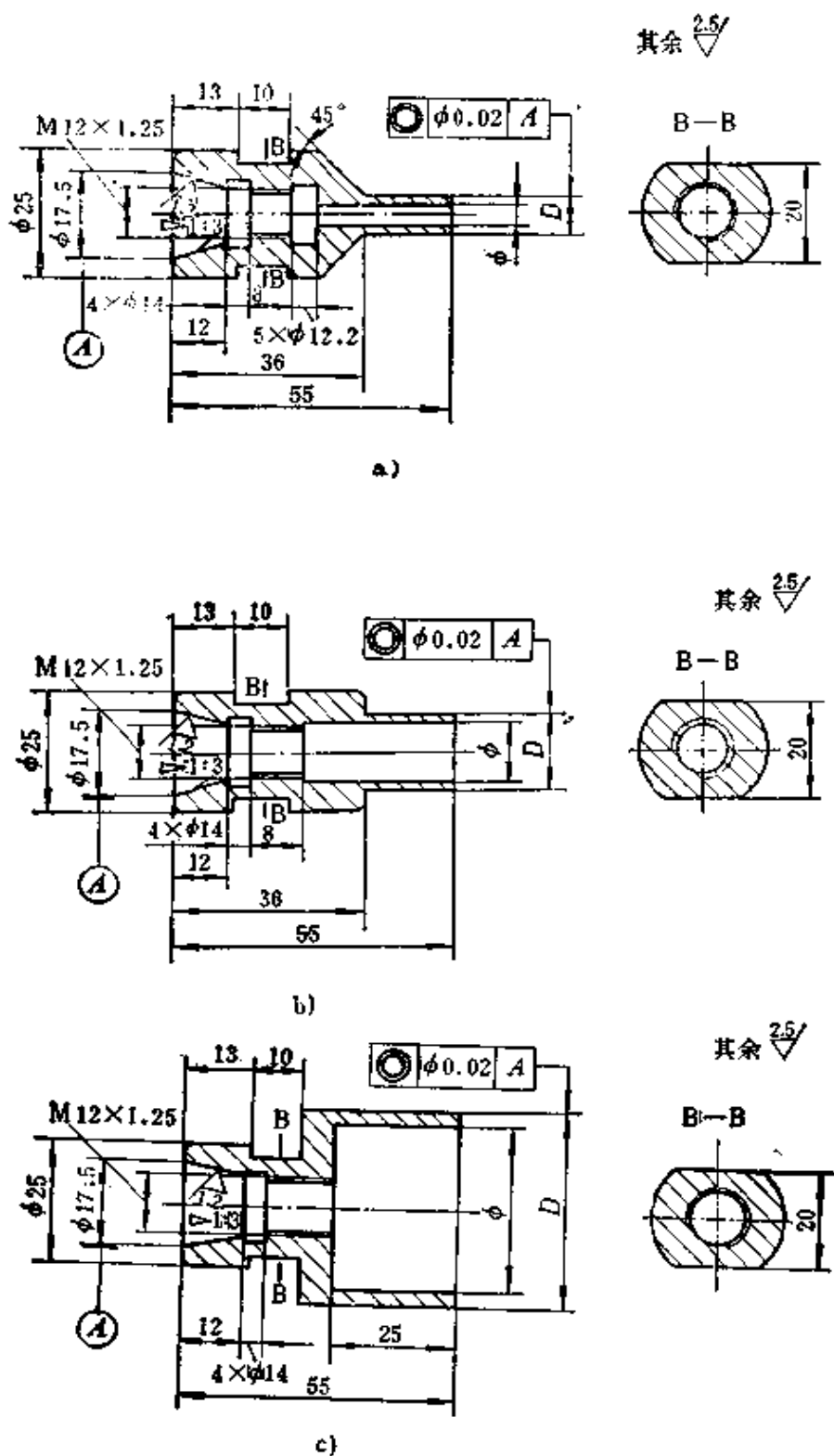


图 5-107 机械定心磨边接头

- a) 用于 $D > 5 \sim 13$, 取 $D - \phi = 3$
 b) 用于 $D > 13 \sim 25$, 取 $D - \phi = 3 \sim 4$
 c) 用于 $D > 25 \sim 80$, 取 $D - \phi = 4 \sim 6$

脂结合剂。

2) 碳化硅砂轮 常用粒度为 240[#]、280[#]，硬度为 ZR₁ 或 ZR₂。

(2) 砂轮修整

新砂轮安装时，首先应用平衡架校正动平衡。修整金刚石砂轮时，用 280[#] 旧碳化硅砂轮块粘在主轴接头上，以磨削透镜的运动方式修整砂轮。碳化硅砂轮的修整用金刚石笔。经过修整的砂轮其外圆母线应与主轴轴线平行。

(3) 进刀量

粒度为 240[#] 的金刚石砂轮的进刀量见表 5-55。

表 5-55

磨边方法	光学定心磨边	机械定心磨边
工件转速(r/min)	200~500	3~10
进刀量(mm)	0.02~0.10	0.5~1

4. 冷却液

磨边用冷却液见表 5-56。

表 5-56 磨边用冷却液

冷却液名称	成分	特性
自来水		成本低，但对金刚石砂轮自锐性差，磨削效率低；易使机床生锈
三乙醇胺水溶液	三乙醇胺 0.5kg 甘 油 1 kg 水 100kg	冷却性能好，洗涤性能一般 磨削效率不如油性冷却液
亚硝酸钠水溶液	亚硝酸钠 0.3kg 乙二醇 0.45kg 三乙醇胺 0.1kg 水 100kg	同 上

(续)

冷却液名称	成 分	特 性
401切削液	401切削油 5% 软水 95%	同 上
变压器油		清洗性能好, 磨削效率高, 适用于机械定心磨边
5号机油		同 上

5. 粘结胶

磨边粘结胶目前用得较多的有两种: 一种是松香蜂蜡胶; 另

一种是松香漆片胶。前者的特点是胶层较薄, 熔点较低, 但脆性较大, 适用于中等直径的透镜。后者的特点是粘结力较大, 脆性较小, 适用于各种直径的透镜。具体配方可参看表 3-45。

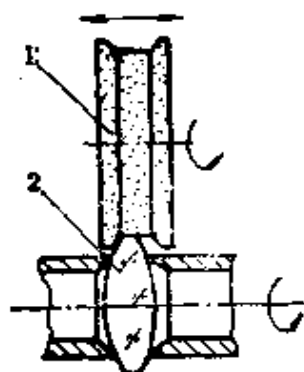


图 5-108 机械定心磨边自动倒角

1—金刚石砂轮 2—工件

倒角时, 根据倒角大小及透镜边缘厚度, 需仔细调整凸轮行程。

(2) 光学定心磨边后的倒角有两种: 一是工件磨边后用倒角模加散粒磨料(粒度W 20)在主轴接头上倒角(见图 5-109), 另一种是从磨边机上取下后再在研磨机上用倒角模加散粒磨料倒角或在金刚石成型模上倒角(见图 5-110)。

倒角模曲率半径计算参见公式 4-43。

在金刚石成型模上倒角时, 工件用真空吸管吸住。成型模的内锥角为 60° 、 90° 、 120° 三种。金刚石粒度选 W 40 或 W 28, 浓度为 100% 的青铜结合剂。成型模的转速为 $500 \sim 3000 \text{ r/min}$ 。

6. 倒角

(1) 机械定心磨边后的自动倒角如图 5-108 所示。

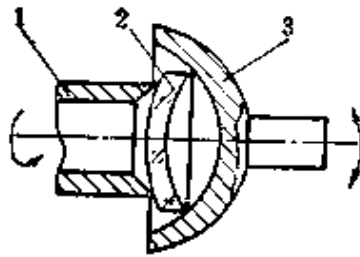


图 5-109 用球模倒角
1—接头 2—工件 3—球模

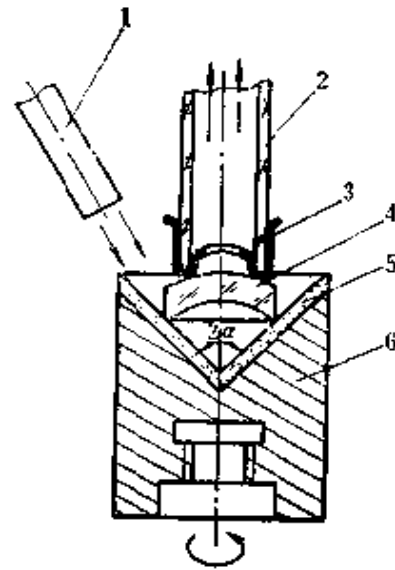


图 5-110 成型模倒角
1—冷却水管 2—有机玻璃吸管 3—橡皮指套 4—工件 5—金刚石层 6—基体

(3) 设计时所要求的留作装配定位面的倒角如图 5-111 所示。

7. 磨边机

见表 5-57。

8. 定心磨边余量

(1) 经验数据

一般焦距的透镜($\frac{f'}{\phi} <$

4)按表 5-58 给定。

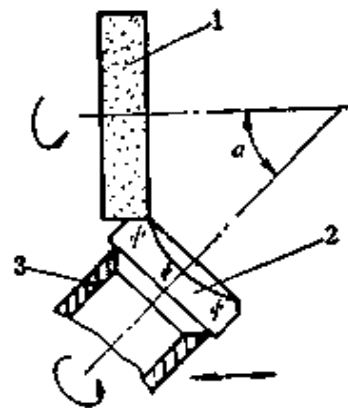


图 5-111 倒宽边斜角
1—砂轮 2—工件 3—接头

表 5-57 三种磨边机主要技术参数

设备名称	光学定心磨边机		机械定心磨边机
型 号	MB13(Q853)	MB110	MB010(QA8510)
加工范围(mm)	$\phi 4 \sim \phi 80$	$\phi 30 \sim \phi 100$	$\phi 5 \sim \phi 100$
工件转速 (r/min)	200, 315, 500	300, 470	2~15
砂轮转速 (r/min)	3 000	2 800	3 500

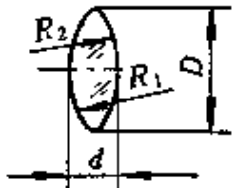

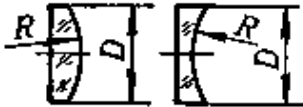
(续)

设备名称	光学定心磨边机		机械定心磨边机
砂轮直径(mm)	φ150	φ175	φ160
备注	砂轮轴可倾斜 30°	工件轴转角为 0°~60°,可加工 设计性倒角	磨边倒角可一次完成。用 靠模装置,能加工非圆形的 边

表 5-58 定心磨边余量 (mm)

透镜完工直径	3~10	10~20	20~35	35~55	55~80	80~110	大于110
磨边余量	0.8	1.4	1.8	2.2	2.6	3	3.5

表 5-59 透镜定心磨边余量计算

透镜类型	图 示	余 量 计 算 公 式
双 凸		$\Delta t = \frac{\Delta\phi(\phi + \Delta\phi)(R_1 + R_2 - d)}{2R_1R_2}$
双 凹		$\Delta t = \frac{\Delta\phi(\phi + \Delta\phi)(R_1 + R_2 + d)}{2R_1R_2}$
平 凸 平 凹		$\Delta t = \frac{\Delta\phi(\phi + \Delta\phi)}{2R}$

(续)

透镜类型	图 示	余 量 计 算 公 式
正月形		$\Delta t = \frac{\Delta \phi (\phi + \Delta \phi) (R_2 - R_1 + d)}{2R_2 (R_1 - h_1)}$
负月形		$\Delta t = \frac{\Delta \phi (\phi + \Delta \phi) (R_1 - R_2 - d)}{2R_2 (R_1 - h_1)}$

注：1. Δt ——透镜边缘厚度差；2. ϕ ——透镜直径；3. $\Delta \phi$ ——直径磨边余量；
4. 式中 R 按绝对值计算；5. 近似计算时，式中 $\Delta \phi$ 的平方项可以略去（即略去 $\Delta \phi(\phi + \Delta \phi)$ 乘积中的 $\Delta \phi^2$ ）。

(2) 计算给定(表 5-59)

在一般情况下， Δt 值可参考表 5-60 给定。

表 5-60 一般情况下的 Δt 值

(mm)

ϕ	3~10	10~20	20~35	35~55	55~80	80~110	>110
Δt	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1

当计算得到的 $\Delta \phi$ 大于 6 mm 时，则应缩小 Δt ，也就是说应通过控制透镜边缘厚度差 Δt 来保证 $\Delta \phi$ ；当凸透镜的完工直径加上磨边余量后边缘厚度小于 0.5 mm 时，则应缩小 $\Delta \phi$ ，也即应控制 Δt 以保证边缘厚度不小于 0.5 mm。

9. 磨边常见疵病及产生原因(表 5-61)

表 5-61 定心磨边常见疵病及原因

疵 病	产 生 原 因
崩 边	1. 砂轮粒度粗; 2. 进刀量太大或进给太快; 3. 砂轮本身不平衡 4. 砂轮钝化或工作表面不平; 5. 砂轮轴跳动大
工件脱落	1. 进刀量过大; 2. 粘结胶太脆; 3. 零件与砂轮接触过猛; 4. 砂轮径向跳动大
椭 圆	1. 接头端面与其旋转轴线不垂直; 2. 机械定心磨边机的进刀凸轮不佳, 弹簧压力不当; 3. 工件轴磨损或松动
划 伤	1. 接头端面粗糙度差; 2. 粘结胶不干净; 3. 倒角模半径取得不合适; 4. 机械定心磨边压力不当, 冷却液中玻璃末过多
尺寸不准	1. 尺寸定位精度不佳; 2. 砂轮轴的精度低; 3. 工作轴的固有误差; 4. 机械定心压力小或磨削压力不当
锥 度	1. 砂轮柱面母线与主轴不平行; 2. 主轴导轨间隙过大; 3. 主轴往复运动不在同一直线; 4. 工件前后动程不合适

十六、样 板 制 造

1. 球面样板

球面样板有标准样板(又称对板, 因是成对制造而得名)和工作样板两种。后者根据前者复制, 用于加工过程中的检验。标准样板作为曲率半径基准保存起来。当用球径仪测量矢高的办法制造标准样板时, 标准样板的口径与曲率半径的关系可参看第一章光学样板一节。

(1) $R < 35$ mm 的标准样板

$R < 35$ mm 的标准样板, 凸的有整球和超半球两种形式。它们的曲率半径精度都比弧形样板高。整球样板还有制作工艺易于掌握的特点。

整球样板与超半球样板比较, 前者比后者易于制造, 但面形精度不如后者高。

有条件时整球样板的毛坯可以热压成球形, 圆球直径最小处比完工尺寸大 0.7~1 mm。如果是正方形毛坯, 则其边长应大于

毛坯尺寸 $0.7 \sim 1 \text{ mm}$ ，先磨成八角，然后滚圆。

滚圆用圆筒形工具如图 5-112 所示。筒的外径约为圆球直径的 0.8 ，壁厚为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ ，圆球由双手拨动，交错地向二个方向转动(参看图 5-113)，其加工余量参看表 5-62。

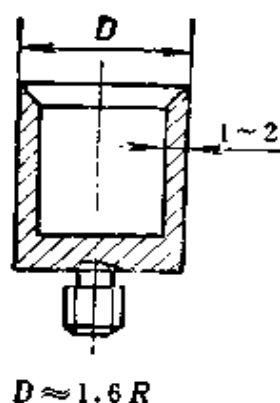


图 5-112 滚圆球工具

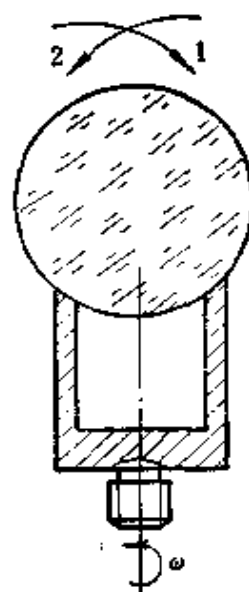


图 5-113 滚圆球
1—右手拨动方向 2—左手拨动方向

表 5-62 圆球加工余量 (mm)

磨料	余量	磨料	余量	磨料	余量	磨料	余量
180°	$0.4 \sim 0.7$	280°	$0.2 \sim 0.3$	W40或 W28	$0.04 \sim 0.06$	W20或 W14	$0.006 \sim 0.008$

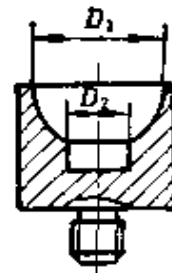
圆球磨完最后一道磨料后，仍可利用磨砂圆筒进行抛光，这时只需在圆筒顶端磨砂的表面涂一层抛光胶即可。球的运动方向同细磨。

整球样板在抛光过程中只测量直径和椭圆度，不修改光圈。当其直径抛光到规定尺寸后，再根据圆球制造凹凸样板。因此圆球只起到控制 R 的作用，而面形的规则性通过凹凸样板对看光圈控制。

超半球样板毛坯直径比完工直径大 1~2 mm，厚度大 0.5~2 mm。在抛光好平面后，粘于图 5-114 所示的手柄上。研磨模形状如图 5-115 所示，中间挖空的目的是避免样板中心多磨，以致因修改顶部的凹陷而影响直径。



图 5-114 胶上手把的超半球样板



$$D_1 < 2R, D_2 < 1.2R$$

图 5-115 超半球研磨模

表 5-63 超半球精磨后的抛光余量

(mm)

R	0.5~10	> 10~20	> 20~35
余量	0.007~0.01	0.007~0.008	0.005~0.007

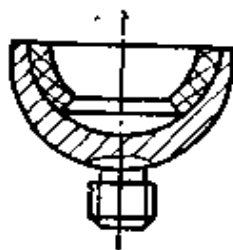


图 5-116 超半球抛光模

径误差和光圈高低的修改方法。

无论是整球或超半球，当和凹样板合起来检查光圈时，由于凹样板较深，中间空气往往不易排净，为此，应稍许用力加压和相互轻轻滑动，以便排出中间的空气。

超半球抛光的余量如表 5-63 所示。

超半球样板抛光模如图 5-116 所示。抛光过程中通过测量直径控制 R ，利用和凹样板相互检查光圈的方法控制面形。表 5-64 列出了直

表 5-64

直 径	光 圈	修 改 方 法
大	低	修超半球
大	高	修凹样板
合 格	低	修凹样板
合 格	高	修凹样板

(2) $R > 35$ mm 的标准样板

这一类标准样板，目前普遍的做法是先做成弧形，然后用环式球径仪测量矢高 h 后求 R (参看第六章第二节)，或者用自准直球径仪直接测量 R (参看第六章第二节)。前者在测量 $R < 1000$ mm 时较精确，后者较前者精度还要高些，但测量范围有限。样板毛坯在粗磨成形后，先将平面抛光，然后在凸样板的平面上粘上一个小平模(如图 5-117 a)。凹样板的平面上常粘如图 5-118 所示圆环，以便于看光圈。如果凹样板需在凸样板上方对磨，则再将图 5-118 所示盖板拧到圆环上。如果需将凹样板装到主轴上，则可再拧上图 5-119 所示的过渡接头。

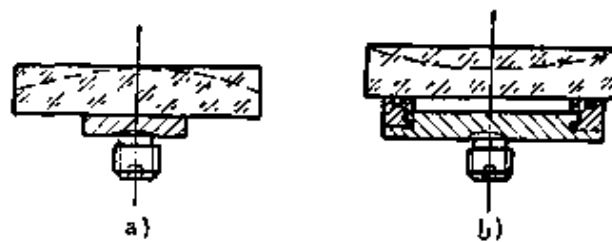


图 5-117 弧形样板毛坯及接头

样板粗磨成形时，曲率半径只要大致接近就可。然后，再在细磨过程中利用凸凹对磨的办法精确修正。半径偏大时，凹样板在上，凸样板在下；半径偏小时，反之。

弧形样板对磨完工后，经常出现凹凸样板半径不一致的情况，导致开始抛光时出现高光圈的现象。解决这一问题的措施是：

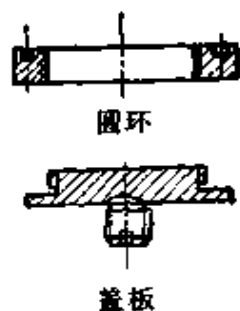


图 5-118 凹样板接头形状

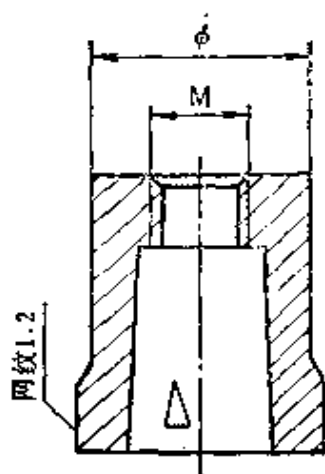


图 5-119 过渡接头

- 1) 每次添砂不宜太多、太稠；
- 2) 每次添砂最好把上面一块取下后再添；
- 3) 结束细磨前，不再添砂，而陆续添少量清水，同时主轴速度不宜过快；
- 4) 对上面一块样块的中心部分施力大于边缘部分，并让它沿着球面子午线作前后运动。

细磨结束后，用哈气的方法初步检查凹凸样板的吻合情况。

样板半径的测量，在粗磨成形时可用金属弧形样板；细磨时可用简易球径计(如图 5-52 所示)，先测出一个初步值，再和球径仪测得的精确值相比较，根据两者的差值，再边磨边用球径计测。这样做的好处是不必每次都用球径仪，从而减少球径仪的磨损。对于用机械法测矢高的球径仪，还可减少每次测量前的粗抛光工时(为了保护测环)，提高效率。

弧形样板在改光圈时，要结合矢高情况一起考虑。

当光圈高时，如果 h 值大于标准值，先修凸的一块；光圈低， h 值大，先修凹的一块。

无论是矢高测量还是光圈检验，都应有一定的定温时间(参看表 1-33)。

2. 平面样板

平面样板(又称平晶)的加工,目前都是先粗抛光去掉砂眼并使表面平度在3个光圈左右,然后放入分离器内精修光圈。分离器的形状如图5-120,它的直径与厚度之比约为8:1~10:1。孔的总面积约为分离器总面积的 $\frac{1}{4}$,并且对于分离器中心略不对称地分布。孔的边缘距分离器边缘不少于20mm。孔径比样板直径约大5~10mm。

利用分离器精修光圈的原理是基于光圈的变化与直径平方成正比,即

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (5-26)$$

式中 N_1 ——直径为 D_1 的工件表面光圈数;

N_2 ——直径为 D_2 的分离器表面光圈数。

利用分离器不仅可以加工平面样板,还可修改棱镜或光楔的角度。修改时只需将棱镜或光楔需要多抛的地方适当加重,就能达到修改角度的目的。如果棱镜在分离器内运动不稳,可以贴一块补偿棱镜使之平衡(如图5-121)。棱镜在分离器内抛光时,为了避免抛光过程中碰坏棱镜棱角,分离器孔壁应贴有橡皮之类的软物,以起缓冲作用。

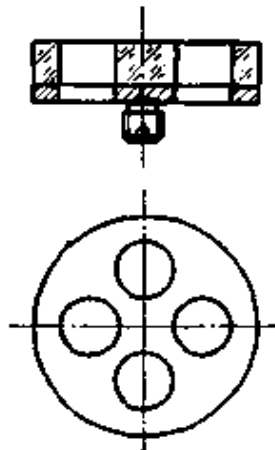


图 5-120 分离器



图 5-121

分离器抛光时,主轴转速较低,一般为1.5r/min~20r/min,

视分离器直径而定。直径大，转速宜低。

在制造标准平面样板时，如果没有原始标准样板，可以利用 A、B、C 三块互检的方法，解三元一次联立方程组求得 A、B、C 三块的误差值，

$$\begin{cases} A + B = a \\ B + C = b \\ C + A = c \end{cases} \quad (5-27)$$

式中 a 、 b 、 c 为光圈数，规定高光圈以正号，低光圈以负号表示。

十七、非球面加工

1. 二次曲面

将二次曲线(如图 5-122)绕 OX 轴旋转，就得到相应的球面、椭球面、抛物面、双曲面等二次曲面。 OX 轴就是光轴。

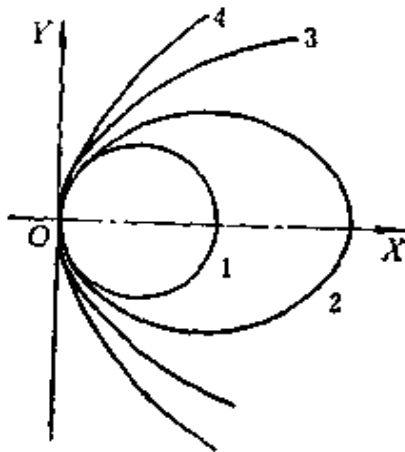


图 5-122 二次曲线
1—圆 2—椭圆 3—抛物线 4—双曲线

上述二次曲线的公共方程式是：

$$y^2 = 2R_0x - (1 - e^2)x^2 \quad (5-28)$$

式中 R_0 ——曲线在坐标原点(即曲线顶点)的曲率半径；

e ——偏心率。

这些曲面都有二个共轭的无象差点。球面的两个无象差点重合在一起，即球心；椭球面的两个无象差点是它的两个焦点 F_1 和 F_2 (图 5-123)；抛物面的两点一个在 $\frac{R_0}{2}$ 处，另一个在无穷远 (图 5-124)；双曲面的两点分别在曲面的两侧(图 5-125)。

上述曲线又叫圆锥曲线，它们可以用一个平面截割正圆锥得到(如图 5-126)。

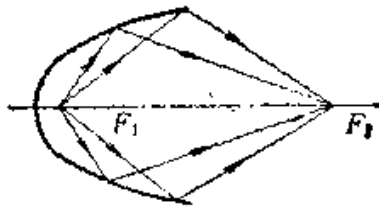


图 5-123 椭球面

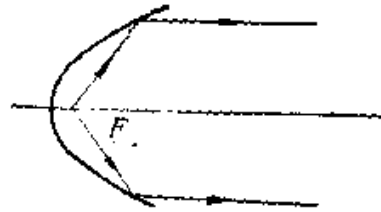


图 5-124 抛物面

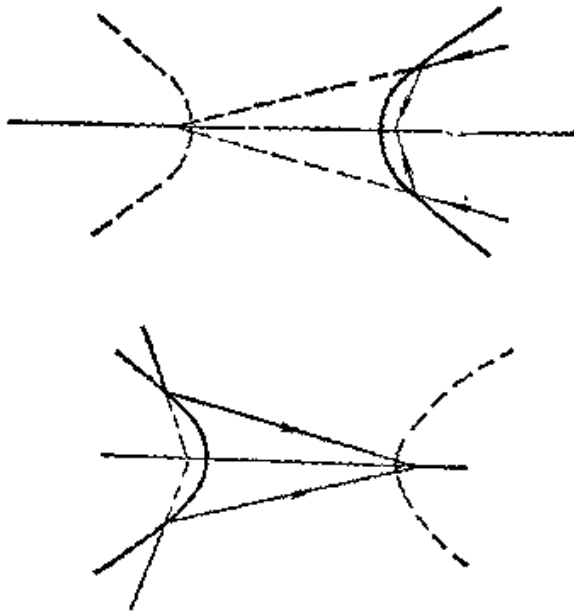


图 5-125 双曲面

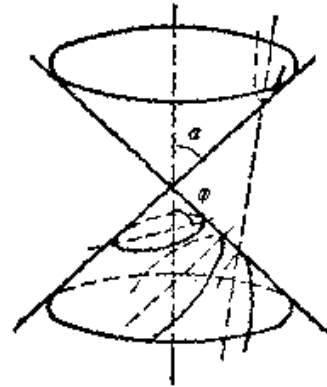


图 5-126 平面截割正圆锥

当平面与圆锥的轴构成的角 $\varphi=90^\circ$ 时, 得到的截线是圆; 当 $\alpha < \varphi < 90^\circ$ 时 (α 为圆锥的轴与其母线组成的夹角), 截线是椭圆; 当 $\varphi = \alpha$ 时, 截线是抛物线; 如果 $\varphi < \alpha$, 则得到双曲线。

为了求得圆锥曲线与截割平面的关系, 可使圆锥顶点位于 X 、 Y 、 Z 坐标系的原点 (图 5-127), 这时平面与 Y 轴的夹角 γ 、截距 ρ 与圆锥曲线的 R_0 、 e 及被截割的圆锥顶角之半 α 有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \rho \operatorname{tg} \alpha \sin \gamma \\ e^2 &= \frac{\sin^2 \gamma}{\cos^2 \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (5-29)$$

圆锥顶角 2α 可在 90° 以内任意选定。将已知二次曲线方程式中的 R_0 和 e^2 代入式(5-29), 就可以求得 ρ 和 γ 。

2. 曲线样板

制造曲线样板, 除了可以利用数控机床加工外, 还可利用上述平面截割圆锥(或圆柱)的原理获得二次曲线样板。图 5-128 就是利用平面截割内圆锥获得一个凸非球面用的样板。加工时主要保证圆锥顶角 2α 的精度、圆锥面与外圆柱同心及母线平直。根据实际加工出来的圆锥内径 d 、圆柱体外径 D 、圆锥顶角 2α 、控制高度 a 和夹角 $90^\circ - \gamma$, 在先铣去图中网线部分时, 留适当研磨余量, 以便用研磨方法精确控制 $90^\circ - \gamma$ 和高度 a 。 a 又由下式求得(参看图 5-128):

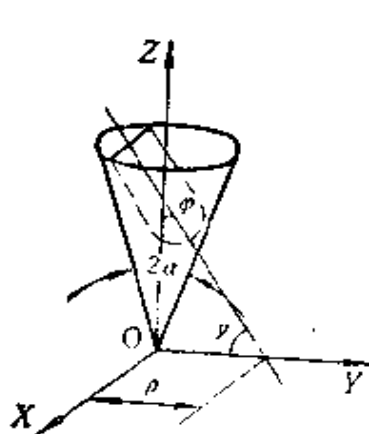


图 5-127

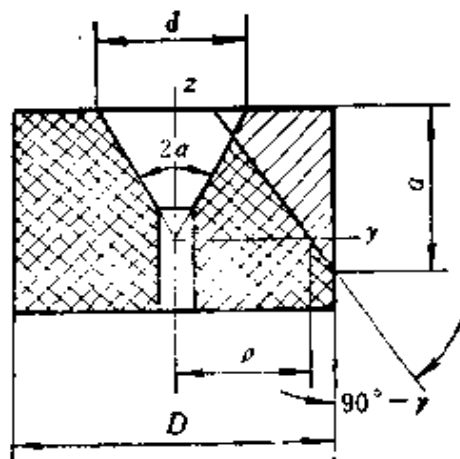


图 5-128 平面截割内圆锥

$$a = \frac{D - 2\rho}{2 \operatorname{ctg} \gamma} + \frac{d}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (5-30)$$

椭圆曲线样板可用平面截割圆柱体得到(参看图 5-129)。圆柱直径就是椭圆短轴, 长轴随 φ 的变化而变化, 其关系为:

$$\cos \varphi = \frac{b}{a} \quad (5-31)$$

a 和 b 由下式确定

$$a = \frac{R_0}{1 - e^2} \quad (5-32)$$

(5-33)

$$b = a\sqrt{1-e^2}$$

式中 R_0 和 e 由椭圆方程式求得。

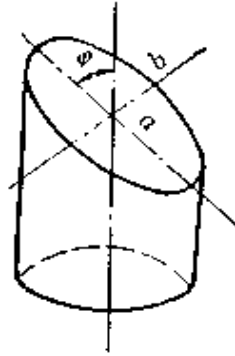


图 5-129 平面截割圆柱体

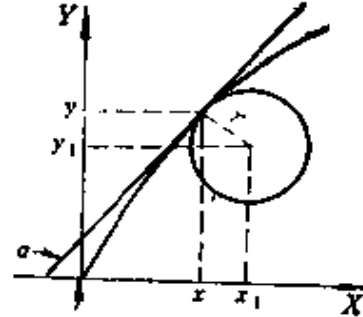


图 5-130

当用坐标铣床加工非球面曲线样板时，非球面曲线的坐标和铣刀杆中心的坐标的关系如下式(参看图 5-130)：

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y - r \cos \alpha \\ x_1 &= x + r \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (5-34)$$

式中 y_1 和 x_1 ——铣刀杆中心坐标；
 y 和 x ——非球面曲线坐标；
 r ——铣刀半径。

上式中的角 α 可通过 y 微分求得，即

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} \quad (5-35)$$

非球面曲线样板可在万能工具显微镜上检验，并对个别误差较大的点用手工修正。

3. 最接近比较球面和最大非球面度

与非球面最接近的球面称为最接近比较球面。它是通过非球面的子午面内最边缘两点及顶点的球面，因此，把相应的非球面坐标代入球面方程，就可以求得最接近比较球面的半径。

例如，非球面方程为：

$$y^2 = 94x + 0.710864x^2$$

与式(5-28)比较

得 $R_0 = 47$, $e = 1.308$ 。当非球面镜的口径为 106mm 时(即 $y = 53$), 求得相应的非球面边缘点的 x 值为 25.114, 将此值代入球面方程:

$$R = \frac{x^2 + y^2}{2x}$$

得到

$$R = 68.483 \text{mm}$$

对于二次曲面, 也可以用下式求得最接近比较球面的半径 R_0 :

$$R = R_0 + \frac{e^2 x}{2}$$

只要将以上的 R_0 、 e 、 x 值代入即可。

最接近比较球面与非球面间的最大偏离量叫做最大非球面度(参看图 5-131)。最大非球面度愈大, 加工愈困难。

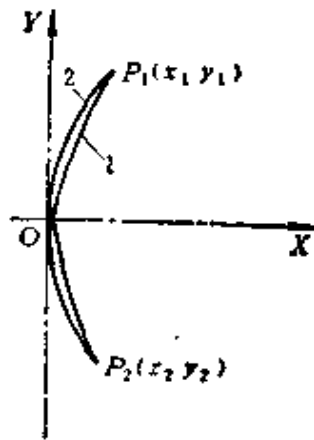


图 5-131 最大非球面度
1—非球面曲线 2—最接近比较球面曲线

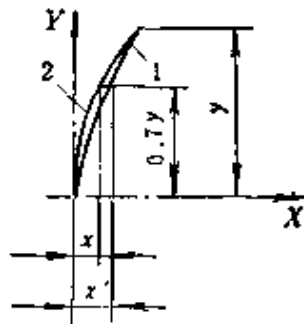


图 5-132 二次曲线最大非球面度
 x —球面曲线坐标 x' —非球面曲线坐标
1—二次曲线 2—最接近比较球面曲线

对于二次曲面, 最大非球面度 δ_{\max} 可按下式计算:

$$\delta_{\max} \approx \frac{D^4 e^2}{512 R_0^3} \quad (5-36)$$

式中 D ——非球面口径;

e ——偏心率, 可从给定方程中得到;

R_0 ——非球面顶点的曲率半径, 可从给定方程式中得到,

二次曲线的最大非球面度是在 0.7 带处(参看图 5-132)。因此,对于凸非球面,在最接近比较球面的 0.7 带处磨得最多,中间和边缘磨得最少;对于凹非球面,正好相反。

非二次曲线旋成面的最大非球面度,可以通过在曲线上选定三个以上的点,计算出矢高 x_r ,再求出比较球面的矢高 x_s ,以两者的差 $\delta = x_r - x_s$ 为纵坐标,以非球面口径值为横坐标,画出曲线,求其 δ_{max} 值。

知道了最大非球面度,不仅可以做到研磨时心中有数,对于非球面度较小的工件,还可以利用球面样板检查非球面,只要把相应带区的非球面度换算成用球面样板检查时的光圈数就可以了。

4. 非球面加工

用冷加工法制造非球面时,可以用模具法、仿形法、轨迹法、变形法、修带法、数控法等等。

(1) 模具法

模具法类似于球面加工,但由于非球面每一带区的曲率都不同,因而工件和模具都只能转动而不能摆动,这样就容易造成带区误差。补救办法之一是将非球面模具表面部分做成活动的,如图 5-133 所示,其中 a 是在球形表面安上厚度不等的钢带。当钢带经过一段时间研磨变得不规则时,就换新的。钢带的厚度差正好等于非球面度。 b 是在一个已是非球面的底模上,安上二条厚

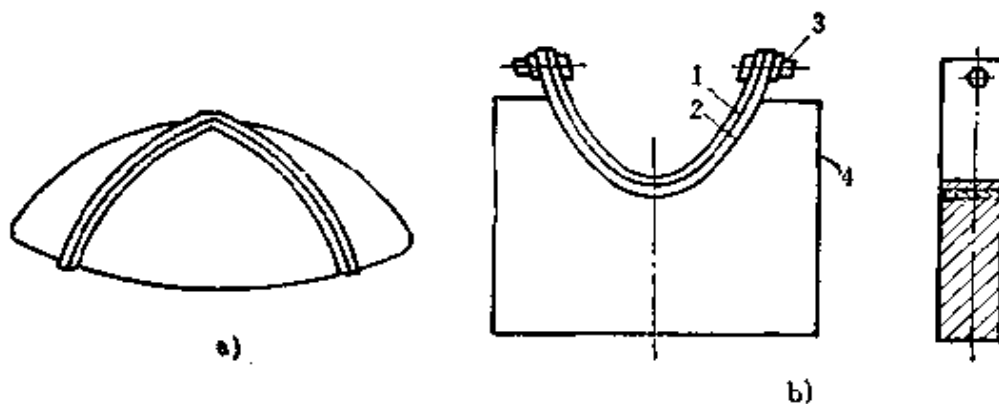


图 5-133 非球面模具

1—活动钢带 2—固定钢带 3—钢带连接螺钉 4—底模

度均匀的钢带后，正好得到所要求的非球面曲线。钢带磨损后再换成新的。

(2) 仿形法

用仿形法加工时，工件的面形主要决定于靠模。图 5-134 为加工示意图，工件绕自身轴线转动并与靠模同步移动，从而被磨轮磨成非球面。

图 5-135 为仿形加工的另一结构。它的特点是曲线靠模 1 的 δ_{max} 被放大了 100 倍，滚轮 2 的位移被传到磨轮 3 上时，已通过杠杆机构缩小为原来的 1/100，因而曲线靠模的误差被传到磨轮上也缩小为原来的 1/100。磨轮是一个内径为 6 mm，外径为 10 mm 的金刚石砂轮。工件转速约 20 r/min，磨轮转速约 6 000 r/min。

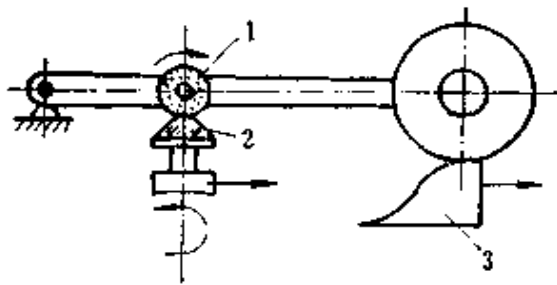


图 5-134 仿形加工之一
1—砂轮 2—工件 3—靠模

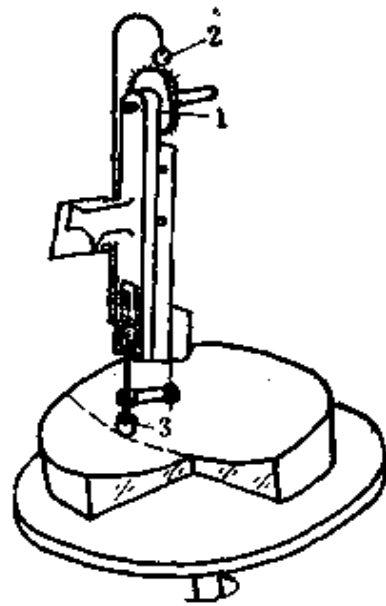


图 5-135 仿形加工之二
1—靠模 2—滚轮 3—磨轮

(3) 轨迹法

轨迹法多数用于圆锥曲线旋成面。图 5-136 是加工抛物面反光镜的原理图。 X 为光轴， PP' 是抛物线， F 是焦点， d 是准线。根据抛物线的性质，使 $PD = PF$ ，将 F 点固定， D 沿准线

d 移动, PD 始终保持垂直准线 d 。缩放机构 $GHIJ$ 保持 $PD = PF$, 因此 P 点运动的轨迹就是抛物线。使 F 点处于 X 轴上不同位置时, 就能获得不同焦距的抛物线。使抛物线 PP' 沿 X 轴旋转并在 P 点放上高速旋转的磨轮就得到所要求的抛物面。

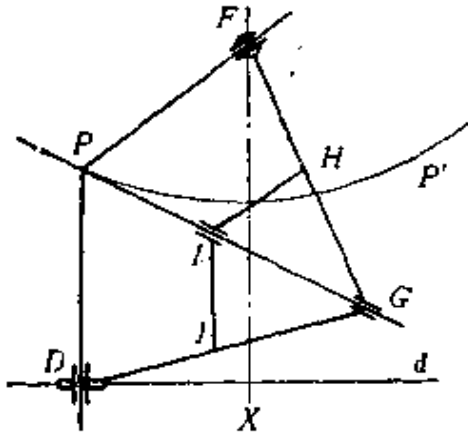


图 5-136 抛物面加工原理

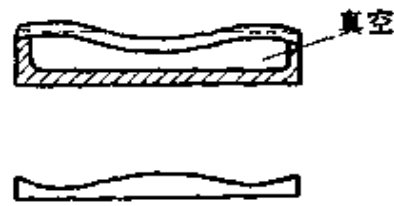


图 5-137 利用玻璃的弹性变形加工非球面之一

(4) 变形法

利用玻璃的弹性变形制造非球面, 适用于厚度不大的工件 (如施密特校正板)。被加工玻璃片放在圆筒上 (如图 5-137), 圆筒中间抽成真空。由于大气压力, 玻璃被压弯而变形, 再将上表面研磨并抛光到所需曲率。当玻璃从圆筒上取下后, 原来规则的球面就变为非球面了。

亦可将圆筒改为有一定曲线形状的基座 (如图 5-138), 胶

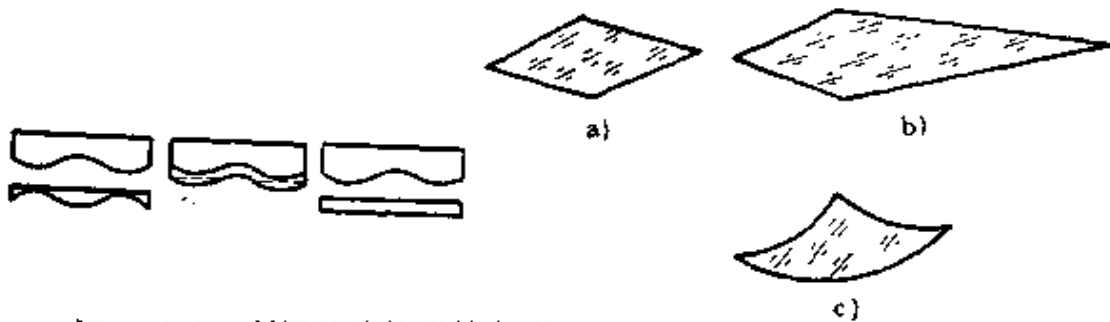


图 5-138 利用玻璃的弹性变形加工非球面之二

图 5-139 单块修带工具

上玻璃板后, 细磨抛光到所需曲率后取下即可。

(5) 修带法

利用修带法加工非球面主要是确定不同带区的不同修磨量，然后用手工或机器进行修磨。根据不同带区修磨量的大小，将修带工具做成不同形状。图 5-139 所示的工具是用于修改一块抛物面镜的不同带区误差。a 是修改 0.7 带区以外时用；b 是修改 0.7 带区以内时用，锐角指向工件中心；c 是修改焦距和局部小带区用。修带工具的工作原理是基于工具表面相对于非球面不同带区有不同的接触面积，从而使非球面不同带区于相同时间内与修带工具接触的时间不同，也即磨损不同，达到修带的目的。根据以上原理制成的整盘修带工具如图 5-140 所示。

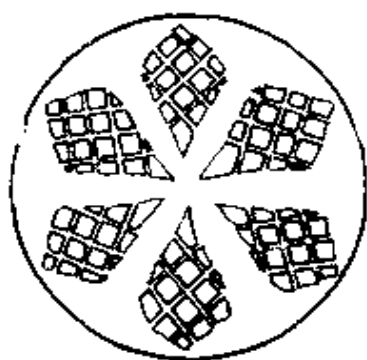


图 5-140 整盘修带工具

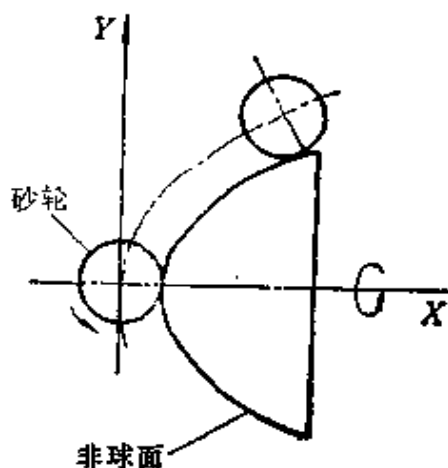


图 5-141

(6) 数控法

在前面曲线样板一节曾介绍过用铣床加工非球面曲线样板。如果把图 5-130 的铣刀换成金刚石砂轮，把金属板换成玻璃毛坯（如图 5-141），再由计算机按照事先输入的一系列指令控制砂轮的 X 方向运动和玻璃毛坯的 Y 方向运动，就可得到所要求的非球面面形。

5. 抛光模

非球面的抛光模，目前普遍采用在金属基座上加一层如海绵、泡沫塑料等弹性物，再在弹性物上敷一层毛毡或抛光胶等做成，

如图 5-142 所示。也可将弹性物改为压缩空气。

为了防止透镜塌边，可将透镜装在专用夹具内，夹具的曲率和透镜边缘的曲率近似。

6. 检验

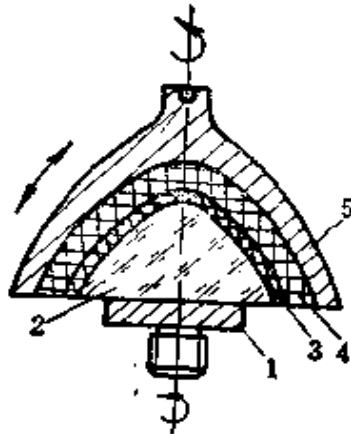


图 5-142 非球面抛光模
1—接头 2—非球面镜 3—呢布（毛毡）
或抛光胶 4—弹性体 5—抛光模基体

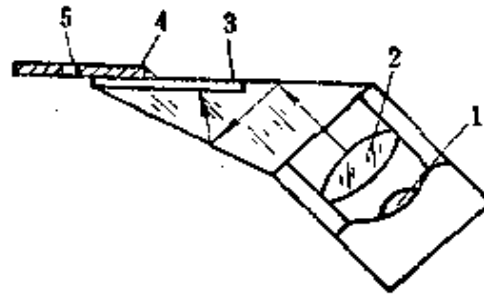


图 5-143 漫射光阴影仪
1—光源 2—聚光镜 3—毛玻璃
4—刀口 5—小孔

非球面加工过程中的检验，在粗磨时可以用金属曲线样板。细磨过程中，当金属曲线样板的精度满足不了要求时，可用图 5-52 所示简易球径计测量带区的坐标值。更换不同口径的测环就能测得不同带区的坐标值，然后与理论值相比较。细磨过程中的检验还可以用图 5-143 所示漫射光阴影仪。它较一般阴影仪不同之处是在细磨阶段面形误差较大的情况下，能够方便地观察表面缺陷，检验时需将毛面略微抛光或涂一薄层油。

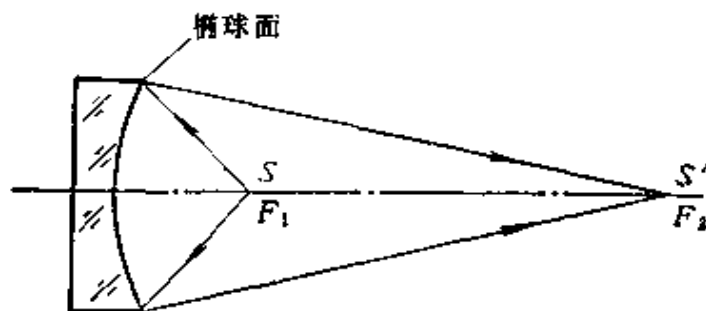


图 5-144 检验凹椭球面
S—光源 S'—刀口 F₁—第一焦点 F₂—第二焦点

非球面抛光过程中的检验，用得较多的是阴影法。对于圆锥曲线旋成面，凹面可利用它的一对无象差共轭点用反射法检验。图 5-144 是检验凹椭球面；图 5-145 是检验抛物面；图 5-146 是检验凸双曲面。

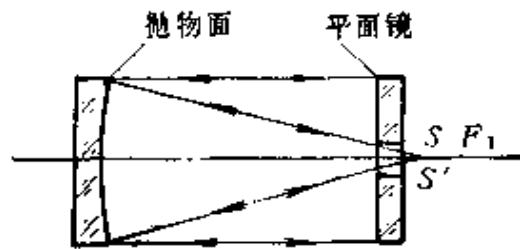


图 5-145 检验抛物面

S —光源 S' —刀口 $F_1 = \frac{R_0}{2}$

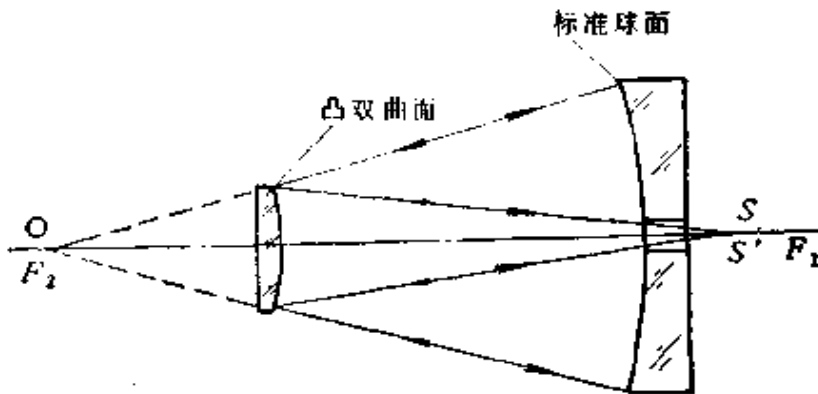


图 5-146 检验凸双曲面

S —光源 S' —刀口 F_1 —双曲线中一支（图中未画出）的焦点
 F_2 —双曲线中另一支的焦点 O —球面镜球心

若不是圆锥曲线旋成面，如能找到轴上消球差的共轭点，同样可用阴影法检验，如图 5-147 所示非球面透镜（其中有一面是球面），它的一个共轭点在轴上 M 处，另一个在无穷远。如果在 M 处放一个单色点光源，再借助一个平行光管，就可以在平行光管焦点处用刀口切割光束观察阴影图了。需要注意的是用透射光观察到的阴影图所代表的镜面高低情况和用反射光观察到的阴影图所代表的高低情况正好相反。

如果非球面装到有共轭的无象差点的光学系统中，则在一个点上放光源，另一点上放刀口，利用此系统检验非球面。

如果非球面找不到轴上无象差点或不能用光学系统进行检验

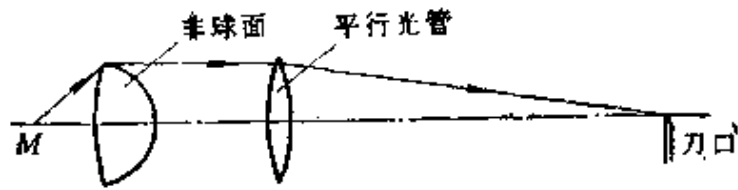


图 5-147 利用共轭无象差点检验非球面

时，还可以用补偿法得到无象差点后再用阴影法检验。

补偿法有所谓光学补偿法、非球面法线象差补偿法两种。光学补偿法常用于一面为非球面而另一面为球面的透镜，它是通过计算，选择适当的球面半径，使折射后的光束仍为原来的共心

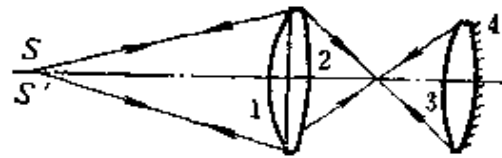


图 5-148 补偿法检验非球面图

1—非球面 2、3、4—球面

光束（如图 5-148）。这种方法也称工艺球面法，即透镜的球面是为了工艺上的需要，来作为检验用的补偿元件。

法线象差补偿法是借助补偿光学元件把平面或球面波前转换成非球面波前，使之与被检非球面的理论形状吻合（参看图 5-149），再经非球面反射后光线循原路返回，经补偿元件出射后仍

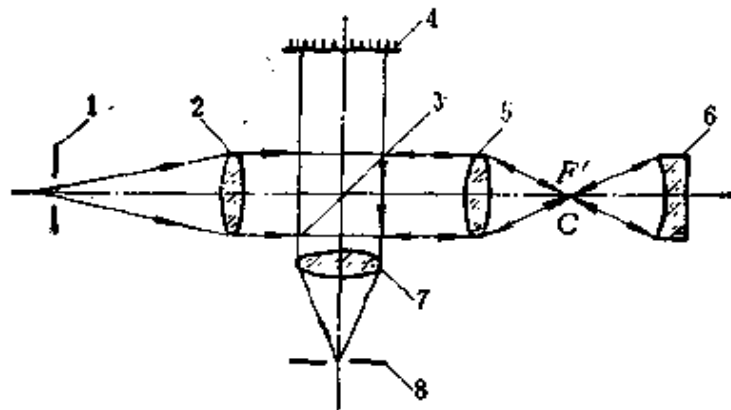


图 5-149 用补偿法在干涉仪上检验非球面

1—光栏 2—准直透镜 3—分光镜 4—参考反射镜 5—补偿透镜 6—非球面工件 7—观察透镜 8—光栏

为平面光束或共心球面光束，会聚后再用阴影法或干涉法检验。如果非球面不与理论形状吻合，反射光束经补偿元件出射后不再是平面光束或共心球面光束，这时就可从阴影图或干涉图上找到缺陷所在。图 5-149 就是用于干涉仪检验非球面的光路图。

近年来，全息技术逐渐应用于非球面的检验，全息样板法就是其中之一例。它是在图 5-149 所示仪器的基础上略加变动而成的一台全息干涉仪，如图 5-150 所示。首先用一块标准非球面制取标准全息图，然后取掉标准非球面，放上被检非球面，由被检非球面产生的全息图，与标准非球面的全息图相干涉所形成的条纹形状，来判断被检非球面的误差。

在没有标准非球面的情况下，标准全息图还可以用计算机产生的合成全息图代替。它是根据被检非球面的理想形状，由计算机绘出标准全息图 (CGH)，然后将此标准全息图代替上述标准非球面全息图进行干涉测量。

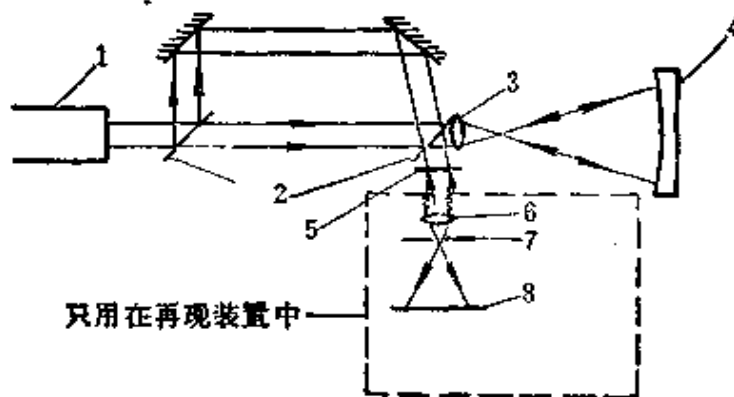


图 5-150 全息样板法检验非球面

1—激光器 2—分光镜 3—扩束透镜 4—非球面镜 5—全息图
6—成象透镜 7—空间滤波器 8—干涉平面

7. 柱面镜制造

(1) 粗磨

小半径柱面镜的粗磨，常常是胶成圆柱体后加工外圆获得柱面。图 5-151 所示是将方形毛坯胶到胎具上以备加工柱面。为了保证母线的偏差量不致太大，柱面镜毛坯与定位槽间的间隙不能

太大。

厚度等于或大于柱面曲率半径 R 的镜片,常是先粗磨成整体圆柱,待细磨、抛光完工后再磨去多余部分。圆柱的粗磨可用一较小般外圆加工机床。

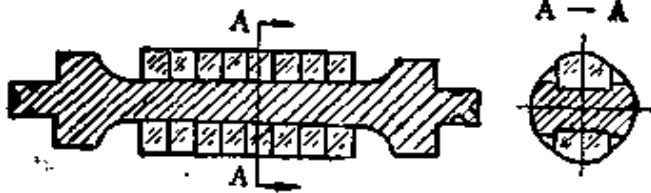


图 5-151 镜柱

直径的圆柱可用无心磨床,但导轮须用橡胶轮。当圆柱数量不多时,在无专用外圆加工设备的情况下,也可先用手工在粗磨机上磨去方形毛坯的四角,然后将圆柱安装在仪表车床的主轴上,再在车床刀架上安装与水平面倾斜成一定角度的平铁板来加工外圆(如图5-152)。平板宽度约为柱体长度的 $\frac{1}{5} \sim \frac{2}{5}$,并应通过手动或附加的连杆机构作左右运动。

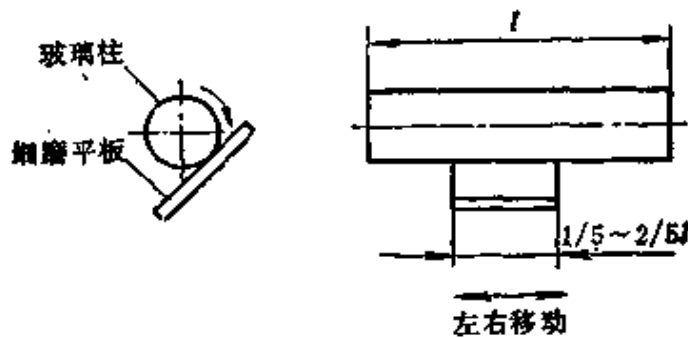


图 5-152 小半径柱面加工

中等以上曲率半径的柱面镜的粗磨可利用铣磨机成形。将镜片装于图5-153所示夹具内,这时工件作直线运动(不转动),而砂轮倾角可根据柱面镜的曲率半径按式(5-4)求得。试磨第一片后对倾角作适当调整。用铣磨法获得的并不是真正柱面,而是带有椭圆度的柱面,它与实际柱面的偏离量约百分之几毫米。为了减小这一误差,在选择磨轮时,其口径不应小于二倍工件直径。对于双凸、双凹或凹凸柱面镜,当铣第二面时,需在一般透镜的夹具中增加一个定位部件(如图5-153),以保证两个表面的母线

间没有扭转并且中心厚度一致。同时，铣磨第一面后，应用柱面模具修磨面形，使成规则柱面，以便在夹具内可靠定位，从而进一步减小两表面间母线的扭转。图 5-154 为修磨用工具。

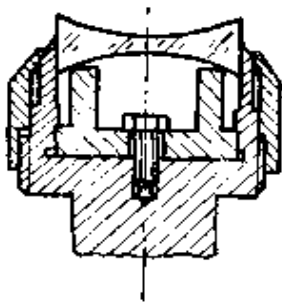


图 5-153 铣磨夹具

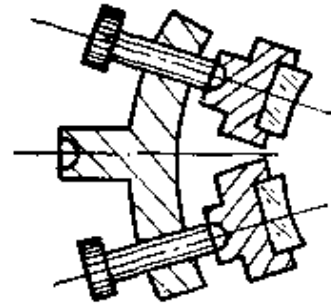


图 5-154 修磨工具

(2) 细磨

小半径柱面镜的细磨，当数量不多时，仍可用图 5-152 所示方法，仅换用细磨料而已。当数量较多时，可用图 5-155 所示装置在两轴机上细磨，其中上平模约比下平模小 20~40%。夹板形状如图 5-156 所示。其厚度比圆柱直径小 1 mm 左右。细磨过程中应定时将圆柱调头，以避免锥度。

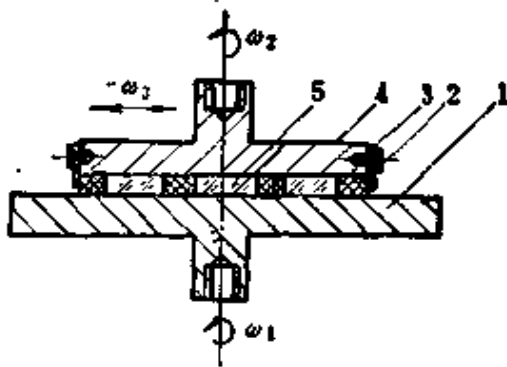


图 5-155 细磨小圆柱装置

1—下平模 2—夹板 3—挡圈 4—上平模
5—圆柱体

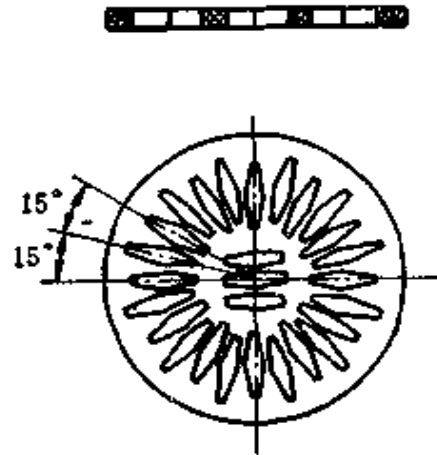


图 5-156 夹板

对于中等半径的柱面镜，铣磨成形后常胶到胎具上组成镜柱（参看图 5-157）来细磨。镜片在胶到胎具上时，应用百分表沿胎具轴线方向和圆周方向检查镜片相互之间母线的平行度，并校正

到许可的范围，然后安装镜柱于车床主轴上，再将图 5-158 所示模具安装在车床刀架上后加散料磨料细磨。模具长度为柱体长度的 $\frac{1}{5} \sim \frac{2}{5}$ 。当批量较大时，也可考虑采用金刚石模具，但机床主轴应有相应的转速。

对于凹柱面镜和不适于胶成柱体的大半径柱面，常常是先胶成镜盘(参看图 5-159 a、b)，然后在专用机床上用相应的柱面模具(如图 5-159 c、d)细磨。



图 5-157 镜柱



图 5-158 柱面模具

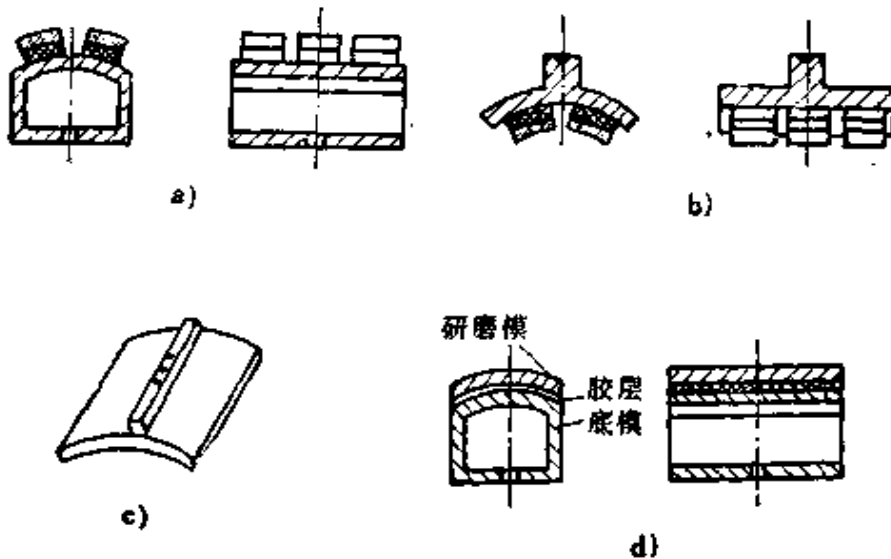


图 5-159 柱面镜盘和模具

a) 凸镜盘 b) 凹镜盘 c) 凹模具 d) 凸模具

胶成盘的柱面镜在细磨前，如两表面间的母线偏转较大，还需先进行母线修正。这可先利用图 5-160 所示装置测量母线偏差位置，然后单件修改。图中，平行块 3 与被测柱面镜 2 接触的两条棱彼此平行，并且与侧面亦平行(平行差不大于 0.002 mm)。

测量时，百分表 1 不动，平行块连同柱面镜沿靠板移动。对于平凸或平凹柱面镜，可以不用平行块 3，而是直接把平面放在平台 5 上，然后沿固定靠板 4 移动，测量母线两端的偏差。修改方法和改一般工件的平行差相同。对于双凸、双凹和凸凹柱面镜，由一个柱面相对另一个柱面的母线扭转引起的厚度偏差及修改方法如表 5-65 所示。若单纯母线扭转，则表中 1、3 或 2、4 应相等。如果出现 1、3 或 2、4 不等，则说明除了有母线扭转外，还有大小头，此时应两者结合起来修改。如果测量结果与表中所示

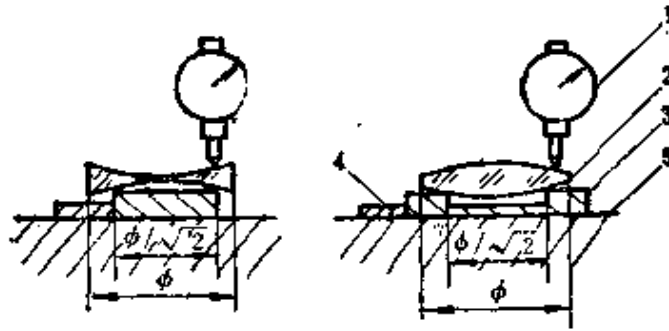


图 5-160 母线偏差测量

1—百分表 2—被测柱面镜 3—平行块 4—固定靠板 5—平台

表 5-65

柱面镜形状	测量部位	测量结果	相对偏差情况	改正区域		说明		
				上表面	下表面			
双凸		2、4厚 1、3薄				(1) 相对偏差情况一栏，倾斜的直线代表上表面母线，竖直的直线代表下表面母线 (2) 上下表面任意改一面即可 (3) 画阴影线的改正区域，表示需多磨		
双凹								
凸凹 (凸面在上)								
凸凹 (凹面在上)								

列相反，即 1、3 厚，2、4 薄，则修改位置也与表中所列相反。

柱面模具与镜盘两者之间的尺寸关系，可参照表 4-12 的原则确定。模具和镜盘的相对位置一般是凸面在下，凹面在上。下盘沿母线方向左右运动，上盘前后摆动。

(3) 抛光

抛光的运动方式类似于细磨。图 5-152 所示的抛光可先在细磨平板上粘一层厚约 5 mm 的毛毡，毛毡事先用高速抛光胶浸透。图 5-157 的抛光模长度约为柱体长度的 1/3。图 5-155 的抛光模是在平模上粘一层呢子做成的。新呢子往往弹性较大，抛光面有“桔皮”现象，故可先用废的平面镜盘加抛光粉将其抛平后再用。

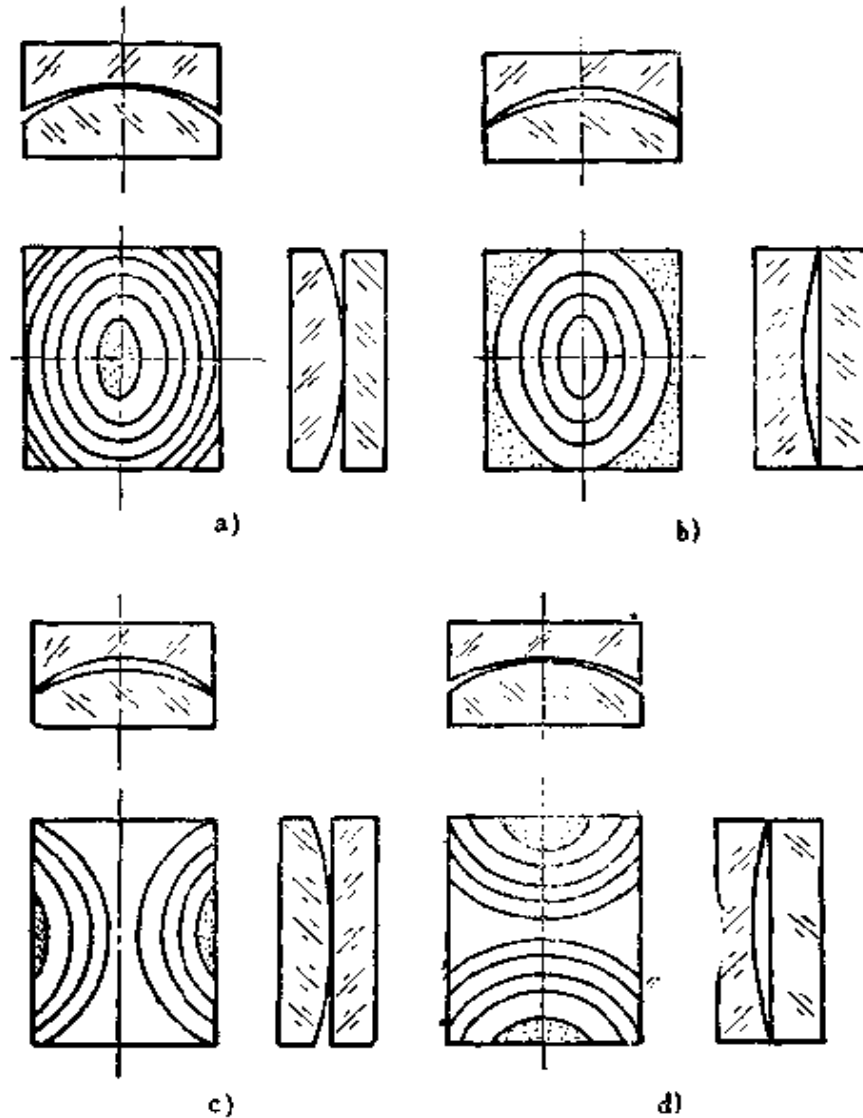


图 5-161 柱面光圈

表 5-60 柱面镜改光圈

曲率半径光圈	低	高	低	高	低	高	低	高	较好	好
母线光圈	低	高	低	低	较好	较好	高	低	较好	高
示意图										
镜盘在下	上摆幅	增大	减小	增大	增大	减小	增大	减小	减小	适中
	下摆幅	增大	减小	减小	增大	增大	适中	增大	适中	减小
镜盘在上	上摆幅	减小	增大	减小	增大	减小	增大	增大	适中	适中
	下摆幅	减小	增大	增大	减小	减小	适中	增大	减小	增大
抛光模刮削部位										

注: 1. 当光圈误差较大时, 抛光模被刮削面积约占抛光模表面的1/3; 误差较小时, 刮削面积约占1/6~1/4;

2. 表中摆幅调整是指下盘左右运动(摆动), 上盘前后运动(摆动);

3. 箭头表示低头时条纹变化方向。

柱面镜面形的检查，小半径的整体圆柱可通过测量圆柱尺寸来实现。大半径的柱面可用相应的样板看光圈。图 5-161 a 所示为母线方向和曲率半径方向光圈均高，低头时，条纹向外扩展；b 与 a 相反，两个方向光圈均低，低头时，条纹向内收缩；c 为母线光圈高，凸柱面曲率半径偏大（或凹柱面曲率半径偏小），即光圈低；d 为母线光圈低，曲率半径方向光圈高。修改光圈的方法和一般改光圈的方法相同，即刮削抛光盘表面和调整摆幅大小等。表 5-66 所示为各种不同的光圈误差及其相应的修改方法。

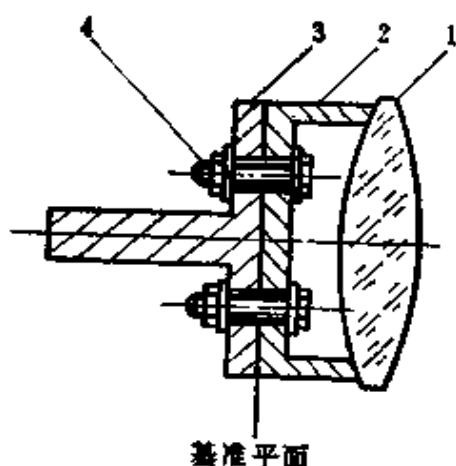


图 5-162 柱面镜接头
1—柱面镜 2—柱面接头 3—平面接头
4—调整螺钉(4个)

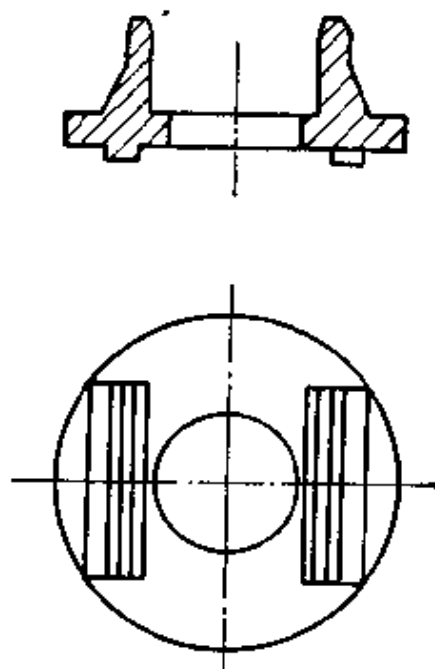


图 5-163 柱面测量装置

(4) 定心磨边

柱面镜的定心磨边可以在一般透镜定心磨边机上进行。对于平凸或平凹柱面镜，可以利用球面透镜接头，将柱面镜平面粘在接头上，然后用百分表测量平凸柱面镜两个对应的最低点或平凹柱面镜两个对应的最高点，移动柱面镜直至对应的二点读数相同为止。对于双凸、双凹或凹凸柱面镜，接头粘结端面可作成和

被粘结面有相同曲率而符号相反的柱面（如图5-162）。为了使接头端面与柱面镜能很好地吻合，可以将接头端面在柱面细磨模上用细砂研磨并用毛毡沾氧化铬抛光，以改善端面的粗糙度。磨研好的接头面对应的最高两点或最低两点间的差值应不大于0.01 mm。在将柱面接头装到主轴上的平面接头上时，应用百分表测量其跳动量，并用四个调整螺钉进行调整（参看图5-162）。

柱面镜的定心除了上述测量两个最高或最低点的方法外，还可以用自准定心仪进行。用这种方法观察到的是被柱面反射回去的直线象，根据其跳动情况移动柱面镜使象在规定公差范围内。

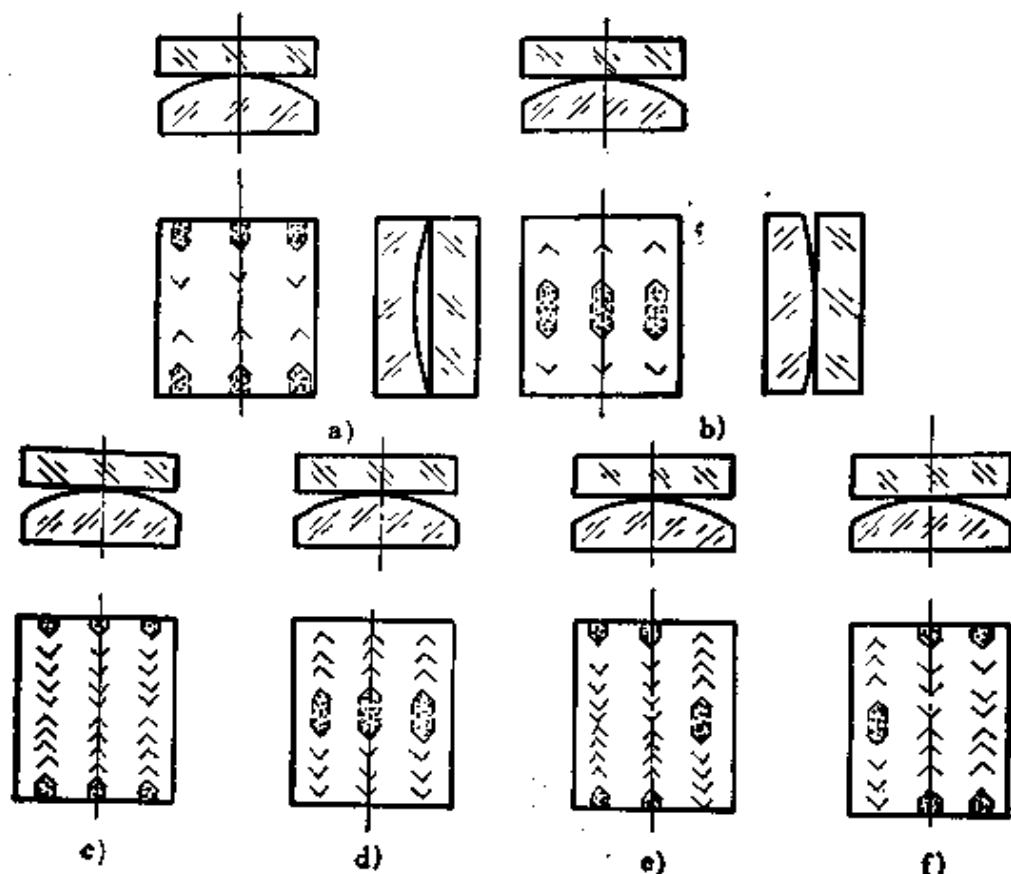


图 5-164 母线光圈

a) 低二圈 b) 高二圈 c) 全部偏低 d) 全部偏高 e) 左、中偏低、右偏高 f) 右、中偏低，左偏高

(5) 样板

柱面样板经过粗磨成形后, 和球面样板一样, 当曲率半径不符合要求时, 可以用凸凹对磨的方法进行修改。样板曲率半径的测量可以用一般球径仪, 只需将球面测量环换成图 5-163 所示柱面测量装置即可。当曲率半径符合要求后, 常常是先抛光凸样板, 用平面样板看光圈的方法检查母线的直线性。图 5-164 a 为母线低二圈; b 为高二圈(图中黑点部分代表光圈 0 级位置)

c、d 为高低误差较大时的情况; e、f 为不规则。修改光圈的方法可参照表 5-66。对于 e、f 那样不规则的情况, 还可以在抛光模表面作相应的刮削, 如图 5-165 所示。

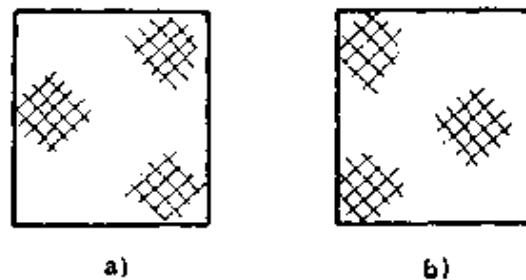
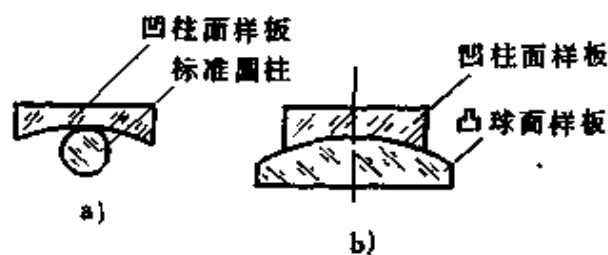


图 5-165 抛光模开槽

其中 a 用于改图 5-164 c 的光圈, b 用于改图 5-164 f 所示的光圈。

当凸样板母线光圈改好后, 将凹样板略加抛光, 用凸样板检查凹样板的母线光圈, 同时, 用凹样板检查凸样板曲率。根据不同的光圈形状, 确定面形误差和修改方法(参见表 5-66)。但要记住, 母线是以凸样板为准, 曲率半径是以凹样板为准。

在少量试制时, 如果有曲率半径合适的球面样板, 也可以不必制作图 5-163 所示专用测量装置, 而是用凸球面样板来测量凹柱面样板的半径, 用圆度很好的柱体来检验凹柱面样板母线的直线性(如图 5-166)。

图 5-166 测量母线和曲率
a) 测量母线 b) 测量曲率

按图 5-164 的原则来识别光圈和确定面形, 基本上可以得到一个合用的凹柱面样板, 如果需要凸样板, 亦可根据此套出。

十八、晶体加工

1. 定向

(1) 自然晶面定向法

当晶体具有规则的自然晶面，且尺寸又较大时，可用游标角尺定向。

(2) 解理面定向法

有些晶体(如 GaAs、CaCO₃、LiF、NaCl 等)在外力的作用下(如敲击)，将沿解理面裂开，得到一个光滑的平面。因此，可以此为基准进行定向。

(3) 蚀象法定向

蚀象法定向是利用晶体的不同晶面腐蚀图象不同进行定向。例如 Si 单晶的(111)晶面蚀象为正三角形，(100)晶面为正方形；LiNbO₃ 单晶的(001)晶面的正端不出现蚀象，负端出现三角形蚀象，三角形的顶角指向为 Y 轴的正端。蚀象借助金相显微镜观察较为清楚。蚀象法精度较低。

(4) 光象法定向

将一束平行光垂直照射到有蚀象的晶面上，则在光源的同侧

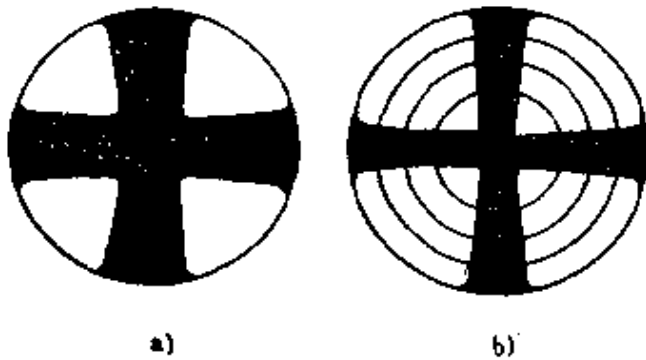


图 5-167 晶体锥光图

屏上可观察到蚀象的反射象——光象。光象是蚀象的放大，放大率与晶体离屏的距离有关。距离大，放大率高，但清晰度变低。

光象法定向精度较低，常用于精度要求为

1°左右的晶体零件的定向。

(5) 正交偏光法定向

当晶体没有完整的外形或定向精度要求较高时，可在正交偏光显微镜下观察锥光图形来定向。图 5-167 为晶体的这种锥

光图。

定向时将晶体表面涂上折光液后放在正交偏光显微镜下，看其锥光图是否处在显微镜视场中心的十字架上，通过切割或研磨最后使锥光图正好处在视场中心的十字架上，则可定出与光轴垂直的 Z 晶面。这种定向方法简单、直观，精度较高，但不适合于非透明晶体和透明晶体非 Z 晶面的定向。此外，当晶体内应力较大时，会使锥光图发生畸变而影响定向精度。

(6) X射线衍射法定向

1) 工作原理

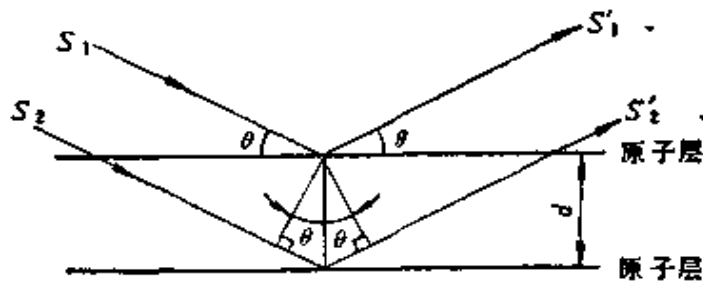


图 5-168 X射线散射

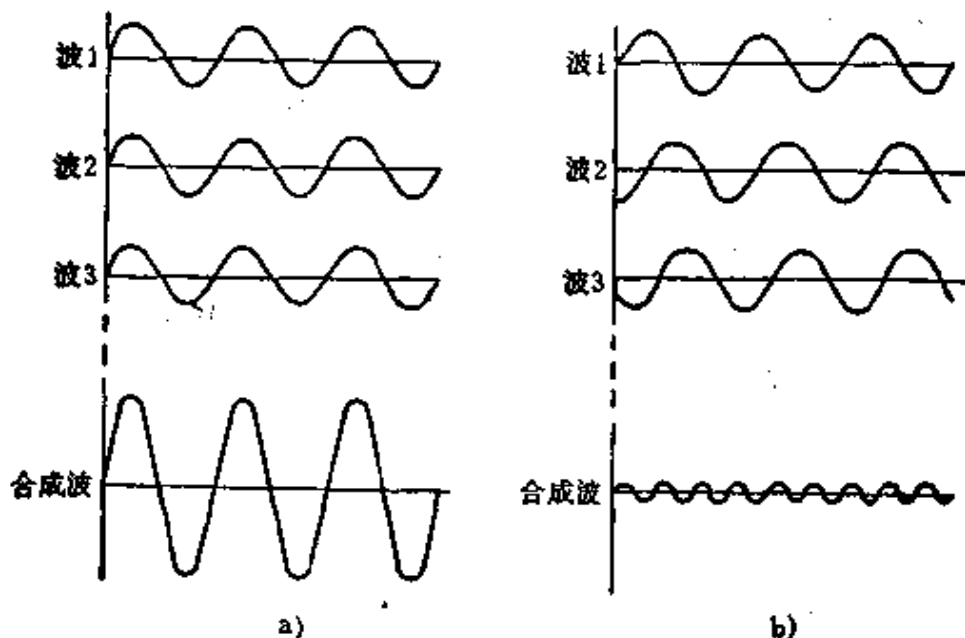


图 5-169 散射波的合成

当一束与晶面的掠射角为 θ 的X射线射到晶面上时，其中

一部分(S_1)被晶面散射为 S'_1 ,另一部分透入晶体到另一晶面后,又被散射为 S'_2 (参看图5-168),当 S'_1 与 S'_2 的程差为X射线波长的整数倍时, s'_1 和 s'_2 便发生干涉,散射(衍射)强度达到最大,如图5-169 a所示。要达到散射强度最大的条件是

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (5-37)$$

式中 d ——两晶面间的距离;

n ——不等于0的正整数, $n=1,2,3\cdots$ 。

式(5-37)称为布喇格公式。凡不满足布喇格公式的散射光,由于很多不同方向的射线相互叠加的结果,其散射的强度非常小(参看图5-169 b)。

由于不同晶面有不同的 d ,因此,对于确定波长的X射线,其 θ 值就不一样。X射线定向仪就是基于这一原理。图5-170为其工作原理图。

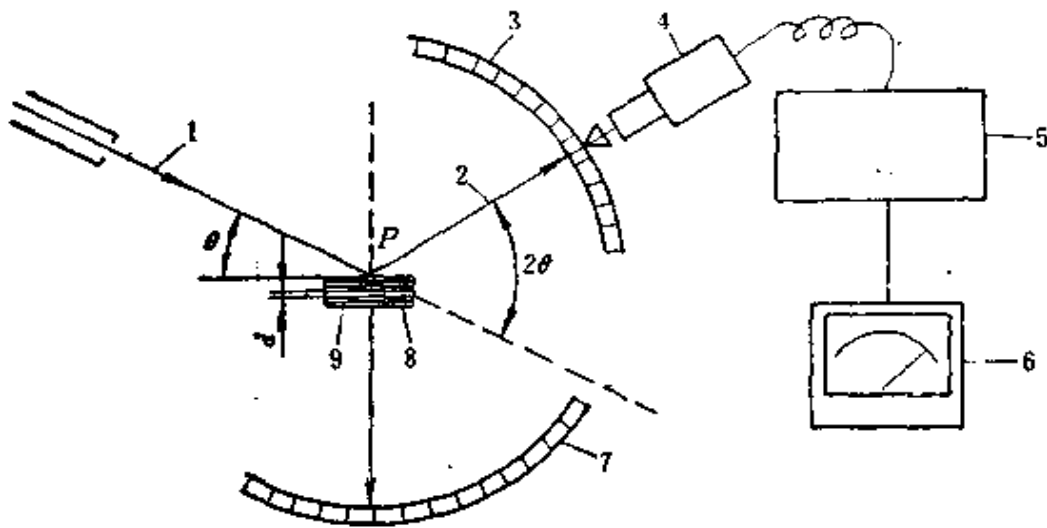


图 5-170 单色 X 射线衍射法定向原理

1—入射 X 射线 2—衍射 X 射线 3—计数管标尺 4—GM 计数管
5—放大器 6— μA 表 7—样品台角度标尺 8—晶体 9—点阵平面

由 X 光管发出的射线通过准直狭缝到达被测晶体。此晶体可在 P 点绕垂直于纸面(水平面)的轴转动,此转动轴是仪器转角装置的中心轴,晶体的定向断面需在此轴线上。被晶体衍射的 X 射

线用一检测器(盖革计数管或其它适当的检测仪)来检测。当晶体转动到衍射线满足布喇格公式时,也即入射 X 射线和晶体某点阵平面的夹角为 θ 时,置于 2θ 位置的检测器将指示出极大值。此时晶体的放置即为所需点阵面的取向位置。晶体所处的位置可从样品台的角标尺上读出。检测器也可在 P 点绕垂直于纸面的轴转动,它的放置位置也可从它的相应角标尺上读出。

2) X 射线定向仪

图 5-171 是 YX-1 型 X 射线定向仪,它主要由以下几个部分组成:

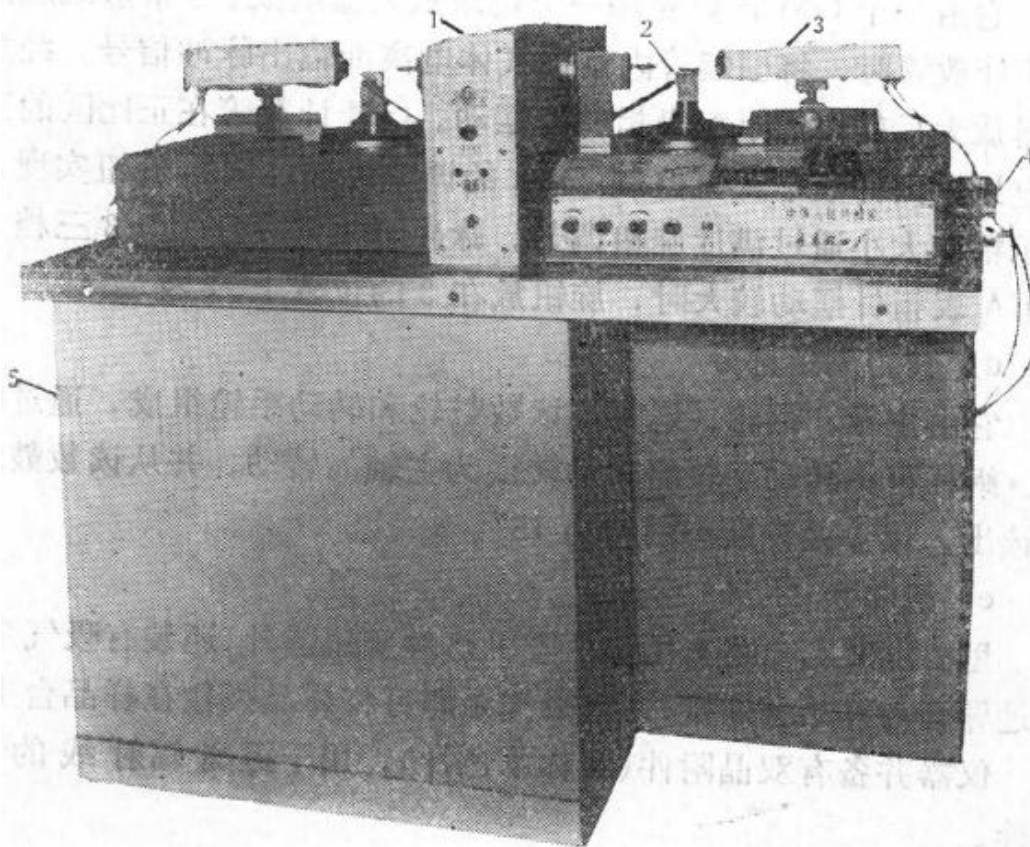


图 5-171 YX-1 型 X 射线定向仪

1—X 射线发生器 2—样品台 3—X 射线检测部分 4—转角测量部分
5—机身

a) X 射线发生器部分

它由高压变压器、灯丝变压器(两者均在机身内)和一个封闭

式 X 光管组成。X 光管阳极为铜靶, X 光管管流通过毫安 (mA) 表旋钮控制, 从 0~5 mA 连续可调。X 光管狭缝有 4', 5', 6' 三种, 4' 的灵敏度较高, 但需在晶面衍射能力强的情况下使用; 5' 的灵敏度稍次, 但晶面衍射能力要求较 4' 低, 6' 的灵敏度更低些, 仅在晶面衍射能力较弱时使用。

b) 样品台

位于 X 射线定向仪的主轴上, 与机身内的转动电机和气泵相连接, 用以放置检测样品。

c) X 射线检测部分

它由一个 GM 计数管和一个记录放大器组成。当衍射线进入 GM 计数管时, 将引起管内惰性气体电离而输出脉冲信号, 经放大器放大后转换成 μA 表指针的摆动。GM 计数管在正比区的工作电压, 由计数率旋钮控制。 μA 的调零可通过调零旋钮实现, 指示幅度大小通过满度旋钮调节。脉冲时间常数分 1、2、3 三档, 当 μA 表指针摆动较大时, 旋钮放在 3 的位置上。

d) 转角测量部分

它由主轴、蜗轮、蜗杆、读数鼓轮和转动手轮组成, 通过蜗轮、蜗杆可将转动手轮的转动转换为主轴的转动, 并从读数鼓轮上读出。读数鼓轮最小刻度为 $15''$ 。

e) 机身

里面除装有上述高压变压器、灯丝变压器外, 还装有吸气泵, 通过导管与样品台连接, 开动吸气泵即可将样品吸住在样品台上。

仪器并备有双晶附件(又称单色计), 用于提高辐射线的单色性。

3) 定向步骤

a) 选定晶面

X 射线衍射法定向的特点是定向精度高, 但只适用于实际晶面与所需晶面相差不很大的情况下(一般不超过 10°)。因此, 应首先用些简便方法(如利用规则晶体的外形或利用解理法、蚀象法、光象法和正交偏光法等)初步确定晶面的大体方向后再

定向。

b) 计算晶面间距 d

根据下列公式计算 d 。

立方晶系(等轴晶系)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_0^2} \quad (5-38)$$

四方晶系(正方晶系)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a_0^2} + \frac{l^2}{c_0^2} \quad (5-39)$$

三方晶系(菱面晶系)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)\sin^2\alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2\alpha - \cos\alpha)}{a_0^2(1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha)} \quad (5-40)$$

六方晶系(六角晶系)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{h^2 + hk + k^2}{a_0^2} + \frac{l^2}{c_0^2} \quad (5-41)$$

正交晶系(斜方晶系)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{h^2}{a_0^2} + \frac{k^2}{b_0^2} + \frac{l^2}{c_0^2} \quad (5-42)$$

单斜晶系

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{h^2}{a_0^2 \sin^2\beta} + \frac{k^2}{b_0^2} + \frac{l^2}{c_0^2 \sin^2\beta} - \frac{2hl \cos\beta}{a_0 c_0 \sin^2\beta} \quad (5-43)$$

三斜晶系

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \frac{s_{11}h^2 + s_{22}k^2 + s_{33}l^2 + 2s_{12}hk + 2s_{23}kl + 2s_{13}hl}{a_0^2 b_0^2 c_0^2 (1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma)} \quad (5-44)$$

式中 $s_{11} = b_0^2 c_0^2 \sin^2\alpha$

$s_{22} = a_0^2 c_0^2 \sin^2\beta$

$s_{33} = a_0^2 b_0^2 \sin^2\gamma$

$s_{12} = a_0 b_0 c_0^2 (\cos\alpha\cos\beta - \cos\gamma)$

$s_{23} = a_0^2 b_0 c_0 (\cos\beta\cos\gamma - \cos\alpha)$

$$s_{13} = a_0 b_0^2 c_0 (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$$

其余符号意义参看第三章晶体一节。

c) 计算衍射角 θ

根据布喇格公式计算 θ ，在布喇格公式中 λ 是入射的 X 射线波长，随 X 光管靶面材料不同而不同。YX-1 型 X 射线定向仪采用的是铜靶，因为铜导热性好，不需水冷，而材料又容易获得。

表 5-67 是几种不同靶发射的 X 射线波长(K_α 线)。

表 5-67 各种靶的发射波长

靶面材料	银	钼	铜	镍	钴	铁	铬
发射波长 (nm)	0.05609	0.07107	0.15418	0.16591	0.17902	0.19373	0.22909

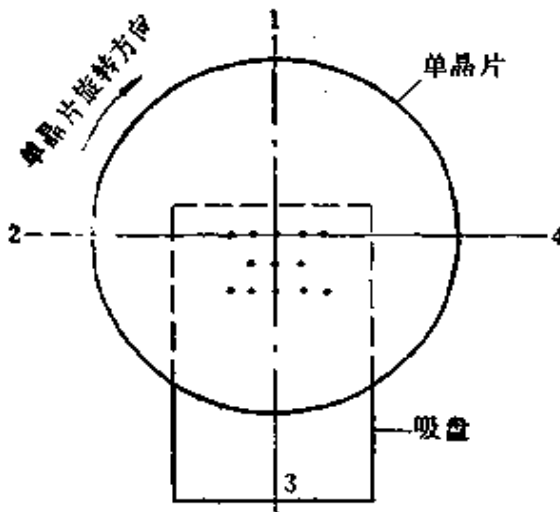


图 5-172 定向晶片安放位置图

将计数管置于 2θ 处，需要测量的晶面紧贴于样品台上(图5-172)，转动样品台(计数管随之一起转动)使 μA 表指针到最大，记录此时鼓轮读数，再将晶体转动 90° ，读取另一个方向最大衍射角。一般是测量晶面在水平和垂直两个方向的衍射偏离角，取其平均值。当水平偏离角为 δ_1 ，垂直偏离角为 δ_2 时，则被测晶面与主晶面间的偏离角 φ 可按下式算出：

$$\cos \varphi = \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2$$

当 $\varphi < 5^\circ$ 时， $\varphi^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2$

4) 注意事项

a) 对既没有可标识的外形而晶面取向又一无所知的非透明

d) 测定最大衍射角

将计数管置于 2θ 处，需要测量的晶面紧贴于样品台上(图5-172)，转动样品台(计数管随之一起转动)使 μA 表指针到最大，记录此时鼓轮读数，再将晶体转动 90° ，读取另一个方向最大衍射角。一般是测量晶面在水平和垂直两个方向的衍射偏离角，取其平均值。当水平

晶体，必须先用 X 射线劳厄法初步定向(图 5-173 和图 5-174)，然后用格林仓格网将劳厄照片上的斑点换成极射赤面投影，定出

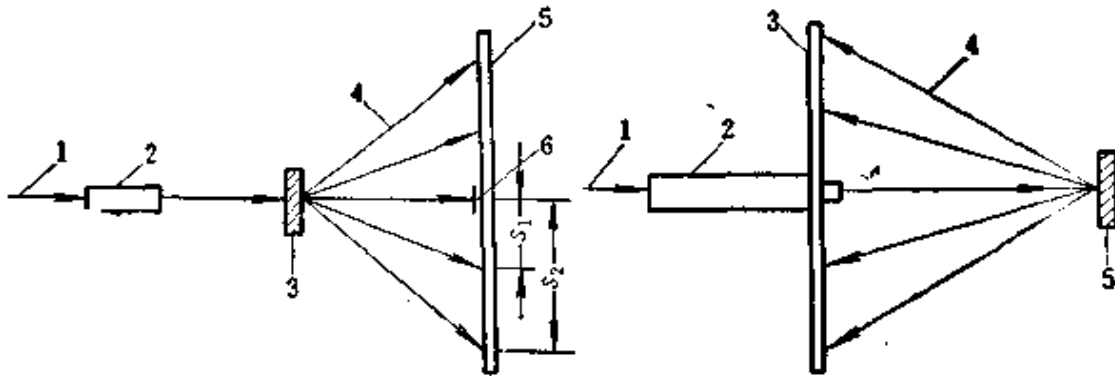


图 5-173 透射劳厄法照相示意图 图 5-174 背射劳厄法照相示意图
1—入射线 2—光阑 3—晶体 4—衍射线 5—照相底片 6—铅片
1—入射线 2—光阑 3—照相底片 4—衍射线 5—晶体

晶面大致取向。这个方法相当麻烦，只在万不得已时用。

b) 定向晶面不能太粗糙，因为粗糙的晶面会引起衍射线变宽而影响定向精度。

c) 对温度变化敏感的晶面，应先给样品台适当预热后再放上。

d) 仪器通电 10 min 后方可加高压。

e) mA 数在满足衍射强度要求的前提下，应尽量小些，以延长 X 光管寿命并减少散射的 X 射线对人体的危害，一般可选 2 mA 左右。

f) 仪器经过长时间使用后，如发现灵敏度降低，应检查 X 光管的焦点是否变化，如焦点变化大，需要更换 X 光管。

g) 当室内相对湿度超过 70% 时，须采取去湿措施，以保证仪器正常工作。

5) 常用晶体典型晶面衍射角

表 5-68 列出利用布喇格公式计算的常用晶体的 X, Y, Z 三个典型晶面的 θ 值，这些数据基本上能够满足大部分常规晶体零件加工的需要。

表 5-68 常用晶体典型晶面衍射角

晶体名称	化学符号	衍 射 角		
		X 晶面	Y 晶面	Z 晶面
氟化钡	BaF ₂	$\theta_{(210)} = 14^{\circ}26'$	同 X 晶面	同 X 晶面
氟化钙	CaF ₂	$\theta_{(400)} = 34^{\circ}20'$	同 X 晶面	同 X 晶面
氟化锂	LiF	$\theta_{(200)} = 22^{\circ}30'$	同 X 晶面	同 X 晶面
锑酸铋	Bi ₁₂ GeO ₂₂	$\theta_{(002)} = 27^{\circ}6'$	同 X 晶面	同 X 晶面
方解石	CaCO ₃	$\theta_{(110)} = 17^{\circ}59'$		$\theta_{(004)} = 15^{\circ}43'$
砷化镓	CaAs	$\theta_{(400)} = 33^{\circ}7'$	同 X 晶面	同 X 晶面
磷酸二氢钾	KH ₂ PO ₄	$\theta_{(200)} = 11^{\circ}56'$	同 X 晶面	衍射线太弱
磷酸二氢铵	NH ₄ H ₂ PO ₄	$\theta_{(200)} = 11^{\circ}51'$	同 X 晶面	$\theta_{(002)} = 11^{\circ}46'$
铌酸锂	LiNbO ₃	$\theta_{(110)} = 17^{\circ}24'$	$\theta_{(020)} = 31^{\circ}12'$	$\theta_{(010)} = 19^{\circ}28'$
钽酸锂	LiTaO ₃	$\theta_{(110)} = 17^{\circ}22'$	$\theta_{(020)} = 31^{\circ}9'$	$\theta_{(010)} = 19^{\circ}36'$
碘酸锂	LiIO ₃	$\theta_{(110)} = 16^{\circ}20'$	$\theta_{(010)} = 9^{\circ}20'$	$\theta_{(002)} = 17^{\circ}20'$
钼酸铅	PbMoO ₄	$\theta_{(200)} = 16^{\circ}28'$	同 X 晶面	$\theta_{(004)} = 14^{\circ}44'$
二氧化碲	TeO ₂	$\theta_{(400)} = 18^{\circ}41'$	同 X 晶面	$\theta_{(004)} = 23^{\circ}53'$
石英	SiO ₂	$\theta_{(110)} = 18^{\circ}19'$	$\theta_{(010)} = 10^{\circ}27'$	$\theta_{(002)} = 25^{\circ}22'$
钛酸锶	SrTiO ₃	$\theta_{(200)} = 23^{\circ}14'$	同 X 晶面	同 X 晶面
金红石	TiO ₂	$\theta_{(300)} = 19^{\circ}36'$	同 X 晶面	$\theta_{(002)} = 31^{\circ}22'$

2. 切割

(1) 外圆切割

考虑到晶体材料的昂贵和硬度上的差异，外圆切割通常只适用于机械性能较好的中、高硬度晶体，但它与光学玻璃外圆切割又不完全相同。对于晶体来说，必须选用薄形金刚石外圆锯片，以减少材料的损耗。

另外，必须采用低速的切割规范（表 5-69），以确保被切晶体不产生严重的机械损伤。

用散粒磨料的低速手工外圆切割（转速 200 r/min 左右），尚在某些特定场合下使用。

(2) 内圆切割

内圆切割的优点是切缝小，材料损耗少。缺点是不能切割大直径晶体，装夹方法较麻烦。表 5-70 为部分国产内圆切割机的

表 5-69 低速外圆切割参考数据

切削材料	锯片规格 (mm)	金刚石粒度	切割速度 (r/min)
磷酸二氢铁	125×0.4	160	~200
磷酸二氢钾	100×0.3	280	200
钛酸钡	100×0.3	280	100
氟化钙	100×0.3	280	100
钼酸钙	100×0.3	280	200
砷化镓	100×0.3	280	175
磷化镓	100×0.3	280	200
锗	100×0.3	280	300
铈化钨	100×0.3	280	250
铈化铅	100×0.3	280	100
铈酸铯	100×0.3	280	200
氧化镁	100×0.3	280	250
淡红银矿	100×0.3	280	150
石英	100×0.3	170	200
红宝石/蓝宝石	100×0.4	160	300
金红石	100×0.3	280	250
硅	100×0.3	280	400
尖晶石	100×0.3	280	250
钛酸锶	100×0.3	170	250
钇铝石榴石	100×0.3	280	300
氟化钇镧	100×0.3	280	200
硒化锌	100×0.3	280	200
硫化锌	100×0.3	280	200
钨酸钙	100×0.3	170	100
铈酸铯	75×0.25	220	75

加工范围。

表 5-70 部分国产内圆切割机加工范围

产品名称	型号	加工范围 (mm)
内刃切片机	J5050/ZF	$\phi 50 \times 100$
内刃切片机	J5040-1	$\phi 70 \times 80$
内刃切片机	J5070-1/ZF	$\phi 70 \times 90$
内刃切片机	J5075/ZF	$\phi 75 \times 100$
内刃切片机	J50100/ZF	$\phi 100 \times 500$
立式内圆切片机	J5075IIB/YN	$\phi 75 \times 200$
立式内圆切片机	J50422B/YN	$\phi 100 \times 200$
立式内圆切片机	QP-2	$\phi 75 \times 200$
自动内圆切片机	QP-3	$\phi 100 \times 400$
硅内圆切片机	J5060	$\phi 60 \times 70$

表 5-71 是 JB 2699-80 规定的金刚石内圆锯片 (代号 NG) 尺寸系列。

表 5-71 金刚石内圆锯片尺寸系列

外径 D (mm)	金刚石刃口	内径 d (mm)	基体厚度 H ₁ (mm)	基体绷紧加固	
	厚度 H (mm)			定位孔数	
206	0.22	83	0.1	18	
246	0.22	83	0.1	18	22
271	0.22	90	0.1	18	
360	0.22	120	0.1	26	
	0.32		0.2		
390	0.22	130	0.1	18	34
	0.32		0.2		

注：一般常用粒度为 280[#]。

为了减小切割应力，晶体的内圆切割仍应采用低速规范 (表 5-72)。

表 5-72 低速内圆切割参考数据

切割材料	切割速度 (r/min)	切缝损耗 (μm)
磷酸二氢钾	150	150
磷酸二氢铵	150	150
铈酸铈钡	250	175
碲 碲 汞	125	150
砷 化 镓	180	175
钆 镓 石榴石	200	150
磷 化 镓	180	150
碲	250	175
砷 化 镓	150	150
铈 化 镓	150	150
磷 化 镓	150	150
碲 化 铅	150	150
氟 化 镓	125	150
铈 酸 镓	200	175
淡红银矿	150	175
石 英	200	175
金 红 石	200	175
硅	200	150
尖 晶 石	200	175
硫酸三甘肽	150	150
钇 铝 石 榴 石	200	150
钇 铁 石 榴 石	200	150
碲 化 镓	150	150

无论外圆或内圆切割，对于那些硬度特别低而又极易开裂的晶体均不适用。另外，晶体切割前的装夹也要避免过大的压紧力或过高的粘结温度，应尽可能采用冷粘结法。

(3) 水线切割

水线切割适用于水溶性晶体，它主要利用水对晶体的溶解作用而把晶体切开。常用的切割线有棉线、尼龙和亚麻等。图 5-175 是无接头水线切割机示意图。

图中 A, B, C 为小滑轮，用以牵引无接头的环形线。待切

晶体E由臂D托起并通过砝码W压向环形线的下侧，而臂D可绕P点的轴转动。滑轮C浸在水中起湿线的作用，依靠运动着的湿线将晶体溶解而切开。

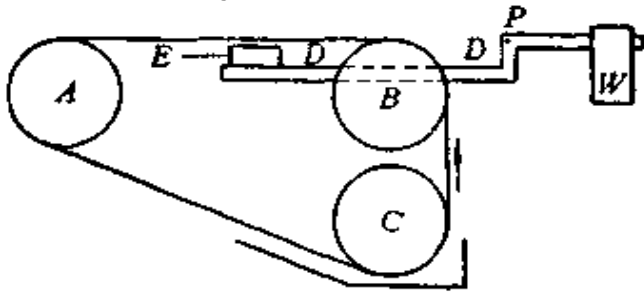


图 5-175 无接头水线切割机示意图

当小珠子随着线的运动到达切割晶体前，首先碰到开有只允许线通过的小孔的升降器，此时小珠子被阻。等到小珠子绕过弧形升降器后，湿线重新降至晶体锯口，继续锯切晶体。

注意事项：

1) 水线湿度不要太大，以免锯口过宽浪费材料。为此，可在滑轮B和C之间的线上加一块吸水海绵。

2) 线速度控制在0.25~0.5 m/s为宜，

速度太快有可能会由于摩擦而造成晶体开裂。

3) 对极少数对热特别敏感的水溶性晶体，如NaI、NaNO₃等，为减少开裂的可能性，应将水温保持在50~60℃左右。

(4) 劈裂法切割

劈裂法切割是利用晶体具有解理的特性，以高强度的锋利刀片平行于晶体解理面将其劈开的一种特殊方法，主要适用于像云母、方解石、氯化钠和氟化锂等具有良好解理特性晶体的特殊方向的切割。这种方法虽然操作简单，但最大缺陷是劈裂处应力较

图 5-176 是有接头的水线切割机示意图。其基本原理和无接头的水线切割机相同，差别在于多了一个弧形升降器，用以避开线的接头。图中环形线的接头结在一个有孔的小珠子上，

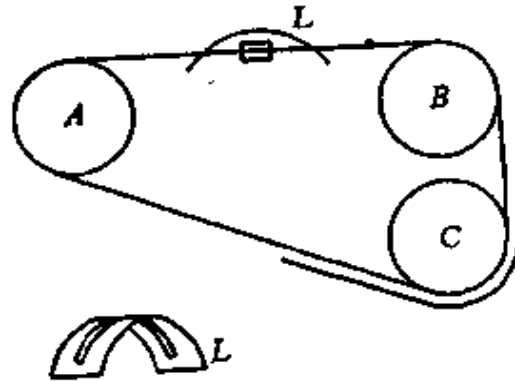


图 5-176 有接头水线切割机示意图

大，需多留加工余量而浪费材料。有时掌握不好还会震裂大块晶体。

(5) 化学腐蚀切割

化学腐蚀切割主要用于厚度较小的特殊用途的晶体薄片的切割，和水线切割相似。它是在一根垂直绷紧的金属丝上流动着能腐蚀被切晶体的溶剂，将晶体靠近金属丝，依靠溶剂的腐蚀作用而把晶体切开。

(6) 超声套料

超声套料的优点是可获得复杂形状的毛坯，采用组合工具后还可同时套出多件毛坯，能够大大提高生产效率。尤其是在激光棒加工中，采用超声波旋转加工机套料，对于提高出棒率 and 外圆精度具有重要意义。

水溶性晶体进行超声套料时，应在晶体上下表面粘贴保护玻璃，四周涂以低温石蜡，以保护晶体不被潮解。

部分国产超声波加工机型号和规格见表5-73。

表 5-73 部分国产超声波加工机型号规格

产 品 名 称	型 号	加 工 范 围 (mm)	输 出 功 率 (W)
超声波加工机	CSF-7	$\phi 5 \sim 38$	100
超声波加工机	J93025	$\phi 0.5 \sim 55$	250
超声波万能钻孔机	J2005	$\phi 1 \sim 60$	500
立式超声波加工机	T3060-1	$\phi 0.8 \sim 60$	1000
卧式超声波加工机	T3060-2	$\phi 0.8 \sim 60$	1000

3. 研磨

(1) 磨料

硬质晶体的磨料采用一般研磨玻璃的磨料，有条件时也可采用高硬度磨料如碳化硼、立方氮化硼等，以提高研磨效率，但是成本高。软质晶体的磨料目前以乐山钻石牌金刚砂（天然磨料）

为宜。

(2) 模具材料

硬质晶体研磨用的模具材料除了用一般玻璃研磨用的铸铁外，尚可用硬质工具钢、中碳钢等。

中等硬度晶体粗磨的模具材料常用铸铁。精磨可用铸铁、黄铜、硬质玻璃等。

软质晶体可用黄铜、硬质玻璃等作模具。

水溶性晶体除用玻璃模具加煤油或该晶体的饱和溶液研磨外，还可用金相砂纸干磨。

表 5-74 和表 5-75 分别为几种模具材料的相对磨削效率和耐磨指数。

表 5-74 几种模具材料的相对磨削效率

硬质工具钢	2.0
玻 璃	1.6
铸 铁	1.0
铝	0.8
铜	0.7
黄 铜	0.6

表 5-75 几种模具材料的耐磨指数

硬质工具钢	1.5
铸 铁	1.0
黄 铜	0.34
铝	0.28
石 英	0.13
玻 璃	0.066

(3) 注意事项

1) 不少晶体受到骤冷骤热后容易开裂，因此，在未充分了

解晶体的理化性能之前不要轻易动手。加工中宜用温水清洗。当用金属量具测量时，在不影响精度的前提下，可在测量面垫一层均匀的电容器纸。

2) 切割和研磨等机械作用都会给晶体加工面带来机械损伤，形成结构上的缺陷，改变表面层的晶体特性。为了使这种影响尽可能小，应采用低速加工规范。特别是软质晶体，更应低速低压，并避免采用粗粒度磨料。

3) 水溶性晶体如用金相砂纸干磨，用力不能过大过猛，以免剧烈的摩擦热破坏晶体。

清洗水溶性晶体应用对该晶体没有腐蚀作用的有机溶剂。

4. 抛光

晶体抛光和玻璃抛光的主要差别在于抛光粉和抛光胶两个方面。

(1) 抛光粉

1) 人造金刚石微粉

目前用得较多的抛光微粉粒度为 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ ，从提高表面粗糙度的质量出发，粒度为 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 较好。

人造金刚石微粉的适用性较广，它几乎可用于抛光从最硬到最软的绝大部分晶体。

2) 人造金刚石研磨膏

主要用于抛光红宝石、铝酸钇、钇铝石榴石等硬质晶体。研磨膏分水溶和油溶两种，前者使用时用水调和，后者用甘油调和。使用和存放都应避免高温，以免膏体变质。不同粒度的研磨膏膏体颜色不一样，要注意辨认。

3) 红宝石微粉抛光液

它是将提拉法生长的红宝石晶体，经过粉碎分级，再加以填充剂、润滑剂及添加剂而得到的。它对钇铝石榴石、铝酸钇等硬质晶体的抛光效果较好，也可用于铜、镍等金属的镜面抛光。

4) 白刚玉微粉

白刚玉微粉用于晶体抛光，效率很高，目前抛光用的主要粒

度为 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ ，对于粗糙度要求高的零件，还应用更细的粒度，并要有良好的均匀性，尤其不应有粗颗粒混入，以免划伤抛光表面。

白刚玉微粉适用性也很广，尤其对用于中等硬度晶体的抛光效果更好。

5) 氧化铬抛光粉

目前用作抛光的氧化铬有两种来源：一是化学试剂，但其粒度不均匀，需重新沉降分级。另一种是将重铬酸铵加热分解制得，粒度较均匀，可直接使用。

氧化铬用于红外晶体的抛光效果较好，也适用于某些金属材料的抛光。

6) 氧化镁抛光粉

专用于抛光的氧化镁轻体粉末一般作为软质晶体的精抛光用，其抛光效率较低，在连续自动供料的抛光系统中使用较为合适。

7) 其它

除上述几种常用抛光粉外，还有氧化锡、氧化锌、氧化硅等，常用于软质晶体的抛光。

此外，低温红粉和专门焙烧的氧化铈也能用于某些晶体的抛光。

(2) 抛光胶

1) 硬质晶体抛光胶

硬质晶体手抛光时直接用中碳钢、黄铜、铸铁或锡等作成抛光模，表面不敷任何胶层，加上抛光粉即可抛光工件。但表面应开些沟槽，以利抛光粉的流布。

机器抛光时可用聚氨酯、固马龙或其它混合胶（如高速抛光胶）。

我国独创的以红宝石模抛光红宝石的新方法，对于提高表面疵病等级和面形精度，具有明显的效果。

2) 其它晶体抛光胶

中低硬度晶体的抛光可用传统的沥青、松香加微量(1%)蜂蜡的抛光胶。有条件时,可在胶中加入适量的优质塑料粉或高级木屑,以提高其稳定性。抛光胶的硬度视工艺条件和晶体硬度而定,可通过试抛随时调整配比。一般应比玻璃抛光胶稍软。

石蜡或石蜡加填充剂(优质棉花或其它纤维)也可用于特软晶体的抛光。

水溶性晶体如用无水乙醇加抛光粉抛光,则抛光胶中只允许含有少量的松香。

(3) 化学抛光

化学抛光的优点是可获得相当高的表面粗糙度,并能消除切割或研磨时留下的残余应力。其缺点是面形精度不高。

化学抛光的本质是化学腐蚀,关键是腐蚀剂的选择和抛光时间的掌握。目前化学抛光主要用在半导体晶体上。表 5-76 是几

表 5-76 几种主要半导体晶体的常用化学腐蚀剂

晶体名称	化学符号	腐蚀剂配方
硅	Si	HF: HNO ₃ = 1:3 HF: HNO ₃ : 醋酸 = 10:5:14
锗	Ge	HF: HNO ₃ : 醋酸 = 3:5:3
砷化镓	GaAs	HNO ₃ : HF: H ₂ O ₂ = 3:1:2 HNO ₃ : HCl = 1:1 HNO ₃ : HF = 2:1 含5~20% Br ₂ 的CH ₃ OH
锑化镓	GaSb	HNO ₃ : HCl = 1:1 HF: HNO ₃ = 1:9
锑化铟	InSb	HF: HNO ₃ : 醋酸 = 3:5:3 HNO ₃ : HCl = 1:1 HNO ₃ : 乳酸 = 1:1
砷化铟	InAs	HNO ₃ : HCl = 1:1

种主要半导体晶体的常用化学腐蚀剂。

(4) 化学—机械抛光

化学—机械抛光是利用传统的机械抛光方法能获得高质量面形的特点，辅以适当的化学腐蚀液以提高表面粗糙度，使两种方法相辅相成，从而得到高质量的光学表面的一种方法。

(5) 离子抛光

离子抛光是把氩(Ar)、氪(Kr)和氙(Xe)等惰性气体放在具有一定真空度的真空室内，经过高频电磁振荡或放电等方法形成离子，再用20~25kV的电压使其加速并经聚焦后，在真空度更高的真空室内撞击精磨过的晶体表面，使其表面粒子(原子、分子或离子)被溅射掉，达到抛光目的的一种方法。

(6) 金刚石车削

晶体零件的金刚石车削是光学工艺的重要突破，是一项重大的技术进步，它不但加工精度高，还由于它不会破坏晶体结构的完整性，因而能有效地提高晶体零件的使用效果。

目前已发现，适合于金刚石车削的晶体有：ZnS、ZnSe、NaCl、KCl、MgF₂、CaF₂、SrF₂、Si、Ge、KDP、LiNbO₃等。

5. 劳动保护

(1) X射线防护

- 1) 定向时不要用手触摸正被X射线照射着的样品。
- 2) 禁止面对X射线射来的方向观察测试样品。
- 3) X射线发射窗口随用随开。
- 4) 有条件时可在X射线定向仪上加装8 mm厚的有机玻璃防护罩。

(2) 化学毒物防护

化学毒物包括晶体本身、加工用辅料和加工中产生的化学物质。

硒化物、铊化物和砷化物等晶体本身就有强烈的毒性，无论是研磨过程中吸入它们的粉尘，还是通过皮肤或身体的创伤口进

入血液都会给人体造成危害。其中,砷化物易诱发皮肤癌和肺癌。铊化物能使人疲乏无力、肤体疼痛、脱发和损伤肾脏等。硒化物会引起四肢麻木、无力、关节损伤、毛发和指甲脱落、贫血和肝脏损伤等。

氧化铬或重铬酸铵中的三价或六价铬离子对人体有致癌作用,易诱发肺癌。

加工过程中的有害物质,如锗抛光时产生的具有恶臭的四氢化锗(GeH_4)气体,就是一种溶血性毒物。又如磷化铟晶体抛光过程中产生的磷化氢(PH_3)气体,当浓度达到3ppm以上时便可闻到特殊的臭味。在平均浓度 $<10\text{ppm}$ 的环境下工作,会出现腹泻、恶心、呕吐、胸部紧缩、头痛和头晕等症状。

中毒通常是一种积累过程,开始并无感觉,到一定时候才表现出来。因此,一定要做好劳动保护,并定期进行健康检查。

一般的劳动保护措施有:

(1) 加工场所应有良好的通风换气设施。剧毒晶体的加工机床应专用,并尽可能安装有机玻璃罩。

(2) 加工能从皮肤进入人体的有毒晶体时,应戴橡皮手套和口罩。手上有伤口时,禁止接触有毒晶体。

(3) 使用氧化铬抛光或重铬酸铵作添加剂时,工作完毕要及时用浓度为5~10%的硫代硫酸钠洗手,使沾上的铬离子还原为铬原子而失去其活性。

(4) 禁止在加工有毒晶体的实验室内进食吸烟。

(5) 有毒晶体的加工废液应按环境保护部门的有关规定处理,禁止乱倒。

十九、光学零件的复制

目前光学零件复制由于受复制胶层的限制,大多数还只能复制反射式零件,其面形精度最高可达0.2个光圈,角度精度可达 $1''$ 。

光学复制的优点是:① 对于非球面、内抛光面等用传统冷加

工法难以加工的零件，复制法有较理想的效率和质量；② 复制零件的基体材料不受限制，特别是对于一些用传统方法难以加工

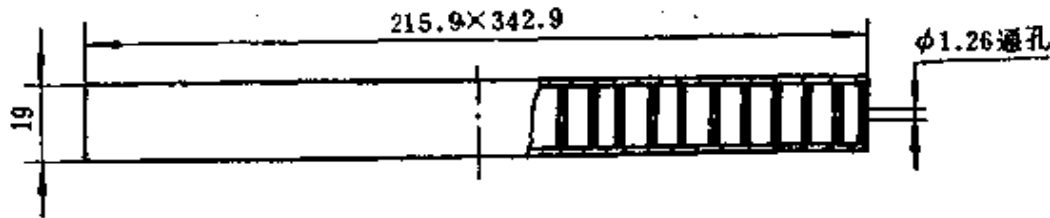


图 5-177 大平面轻型反光镜

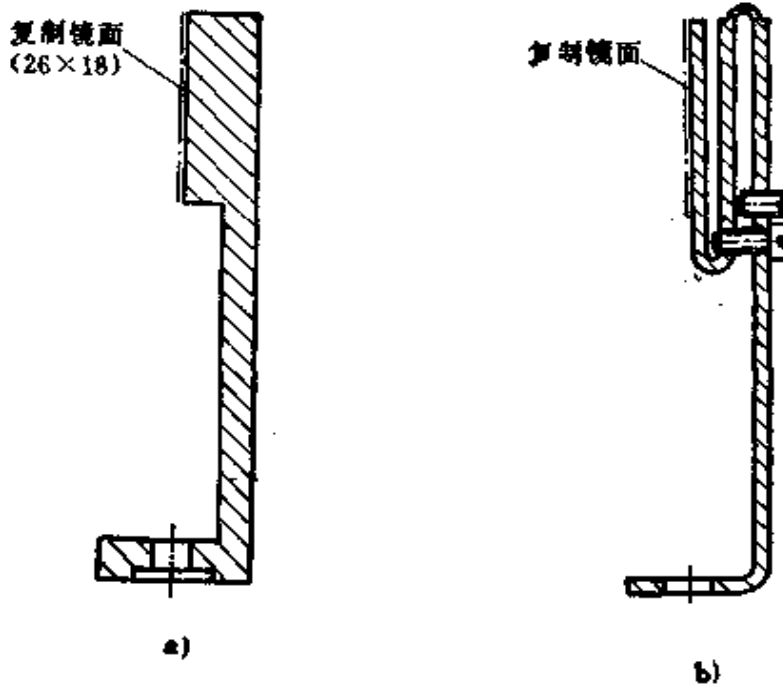


图 5-178 两种镜面的复制

a) 镜面垂直不可调 b) 镜面垂直可调

的材料，如铝、铍、镁等；③ 可复制结构特异的零件，如薄结构，蜂窝结构，多孔结构等，如图 5-177 所示结构用传统方法加工是很困难的；④ 可以简化结构，如图 5-178 可将镜面直接复制在镜架上。

复制法的缺点是：① 由于目前大多用环氧树脂作复制胶，因此限制了复制零件的使用温度，一般不超过 100°C ；② 对于薄形

零件，尚存在环氧树脂固化过程中的光圈变形问题；③ 经不起高能激光的作用。这主要是环氧树脂耐热性比玻璃低得多引起的。
④ 对于一般精度的零件，成本太高。

1. 复制工艺

图 5-179 是复制过程示意图。整个过程可分为准备、复制操作、固化、分离、修饰等几个步骤。其中准备阶段包括制造母板、镀膜、基板处理、配制环氧胶等步骤。

(1) 母板

大多数仍用传统的冷加工法制造。其材料可以用玻璃、石英玻璃、耐热玻璃、不锈钢、镀锌铝合金等。由于玻璃母板制造容易，故用得较多。

(2) 镀膜

母板按一般镀膜前的清洁方法处理后，在真空镀膜机内依次镀油膜、一氧化硅保护膜、铝膜。油膜的作用是便于母板和基板分离，应镀得薄而均匀。对所用油的要求是饱和蒸气压低，热变形小，表面张力大，纯度高，疏水性及化学稳定性好。通常采用扩散泵用的硅油。镀油时，油滴挂在钨丝上(图5-180)，待真空度达到 10^{-4} Torr (1Torr=133.322Pa)时，给电极通微小电

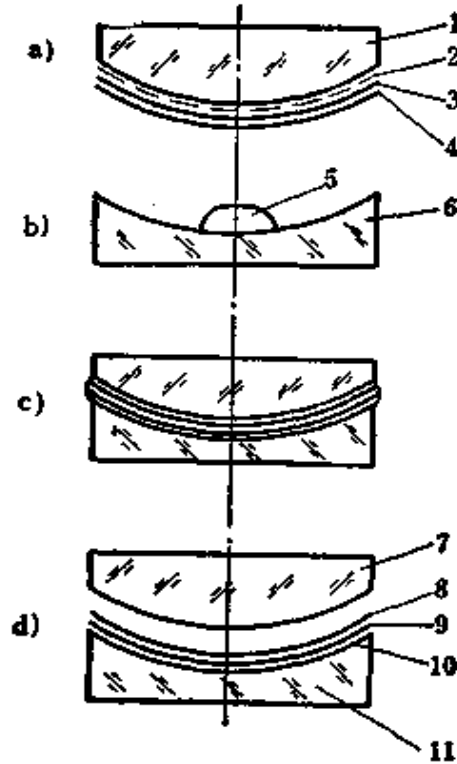


图 5-179 复制过程示意图

a) 镀膜 b) 倒胶 c) 复制固化 d) 分离
1—母板(复制模) 2—油膜 3—一氧化硅膜
4—铝膜 5—环氧树脂 6—基板 7—母板
8—一氧化硅膜 9—铝膜 10—环氧树脂
11—复制零件



图 5-180 镀油

通常采用扩散泵用的硅油。镀油时，油滴挂在钨丝上(图5-180)，待真空度达到 10^{-4} Torr (1Torr=133.322Pa)时，给电极通微小电

流,使油滴慢慢蒸发,直至全部消失为止。油膜厚度通过控制油量来实现。一般用油量在几毫克至十几毫克之间。油量太小,分离困难;太多了,则对反射系数、光圈等均有一定影响。

镀油结束后,使钟罩真空度上升到 $1\sim 5 \times 10^{-5}$ Torr,便可镀一氧化硅。达到规定厚度后,使真空度继续上升到 10^{-5} Torr 以上,接着镀铝到规定厚度,然后从真空室内取出,放到 60°C 的烘箱中保温待用。

(3) 基板处理

基板的材料不受限制。处理前,要进行倒角、去毛刺和研磨修整等准备工作。其表面粗糙度不低于 $Ra 0.2$ 。面形误差可比复制面形误差大 $50\sim 100$ 倍。然后进行清洁处理。不同材料的基板

表 5-77 基板清洁处理

基板材料	处 理 方 法
玻璃 石英 陶瓷	在铬酸洗液中浸泡30min,用清水冲净,再用碳酸钙擦拭,冲洗净碳酸钙后用乙醇乙醚混合液擦拭 铬酸洗液配方: 重铬酸钾 66g 蒸馏水 1 000mL 96%浓硫酸 666g
铝	在 $80\sim 100\text{g/L}$ 的 NaOH 溶液中浸泡约 1min 后用清水冲净,再放在铬酸洗液中浸泡 20min,再用清水冲洗,然后用蒸馏水冲洗,并用吹风机吹干。
黄铜及铜合金	在下列清洗液中浸泡 $5\sim 10\text{min}$,用清水、蒸馏水冲洗干净并用吹风机吹干 清洗液配方: 42%氯化铁 35mL 浓硝酸 30mL 水 200mL
不 锈 钢	在 60°C 的下列清洗液中浸泡 10min,用水、蒸馏水冲洗干净并用吹风机吹干 清洗液配方: 浓盐酸 50份 双氧水 2份 甲醛 10份 水 45份
铜 铁	在 60%硅酸钠溶液或 10%盐酸溶液中浸泡 10min,用水、蒸馏水冲洗干净并用吹风机吹干

的清洁处理方法不同，可参考表 5-77。

处理后的基板放入 60°C 烘箱中保温待用。

(4) 配制环氧树脂胶

表 5-78 列出了常用的环氧树脂胶的配方及固化条件、主要优缺点等。

表 5-78 环氧胶配方

序号	配 比	固化条件	主要优缺点
1	618环氧树脂 10份 2-乙基4-甲基咪唑固化剂 0.8份 KH550偶联剂 0.1份	在60°C烘箱内保温8h, 冷却至室温	优点: 固化前有足够的上胶操作时间; 理化性能好。 缺点: 需加温固化
2	6828环氧树脂 10份 105固化剂 3份 KH550偶联剂 0.1份	1. 当室温为30°C时, 固化24h; 低于30°C时, 适当延长 2. 当在60°C烘箱内烘烤时, 需烘烤6h 然后冷却至室温	优点: 可在室温下固化, 对高精度或大直径零件有利 缺点: 固化前的上胶操作时间短

注: 序号 1 中的 618 环氧树脂也可用 6828 或 6101、331 等胶代替, 配比不变。

环氧树脂胶配好后, 放在真空室内抽去其中的气泡。如果由于温度较低而使胶变粘, 则可将胶边加温边抽气。

(5) 滴胶

滴胶环境要求清洁。将母板(或基板)放在可调水平的旋转工作台上(如图 5-181), 拂去或吹去工件表面灰尘, 滴上环氧胶后放上基板(或母板), 再仔细揉胶以排去气泡, 保持胶层均匀。控制胶厚至 0.02~0.05 mm 时用夹具定位, 然后擦去边缘余胶。图 5-182 是常用的几种定位夹具, 其中 a 适用于母板和基板尺寸相同的方形或圆形零件; b 适用于母板和基板直径不同的圆形零件; c 适用于任意形状的零件, 由同样的三件(定圆形工件)或四件(定方形或长方形工件)组成, 再配上可调水平工作台, 就可对各种尺寸零件进行定位(参看图 5-181)。

(6) 固化

滴胶结束后, 如系加温固化, 则将母板、基板连同复制工作

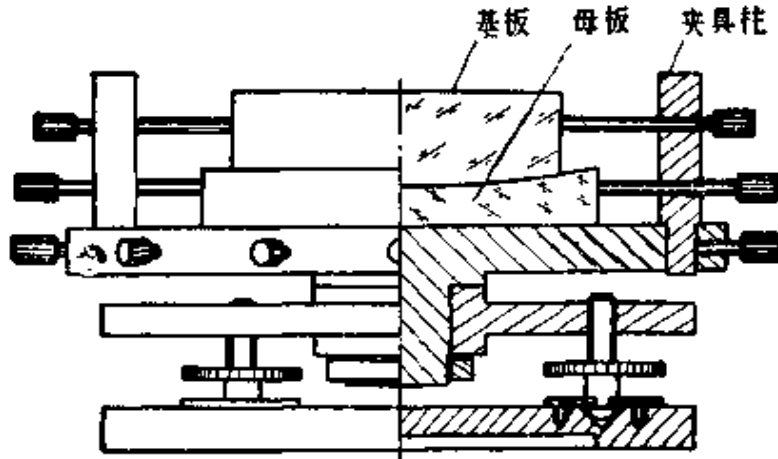


图 5-181 复制工作台

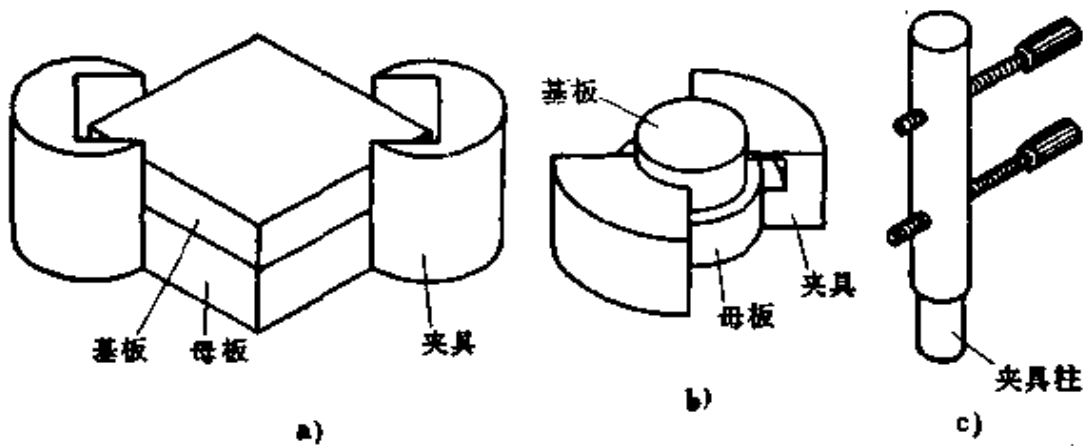


图 5-182 几种定位夹具

a) 用于方形工件 b) 用于圆形工件 c) 用于任意形状(参看图 5-181)

台一起移入烘箱，调好工作台至水平，在 60°C 时烘烤 8 h，然后自然冷却至室温。有时为了增加胶与基体的粘结牢度，也可适当加压，但应避免由此引起光圆变形和胶层变得太薄。

(7) 分离

固化后，可通过加温、冷却或机械力的作用使母板和工件分离。图 5-183 a 是一种用机械力分离方形零件的夹具。转动分离螺钉，工件与母板即分开；b 是分离圆形零件的夹具。分离前一定要注意先清除余胶，以免拉坏工件或母板。

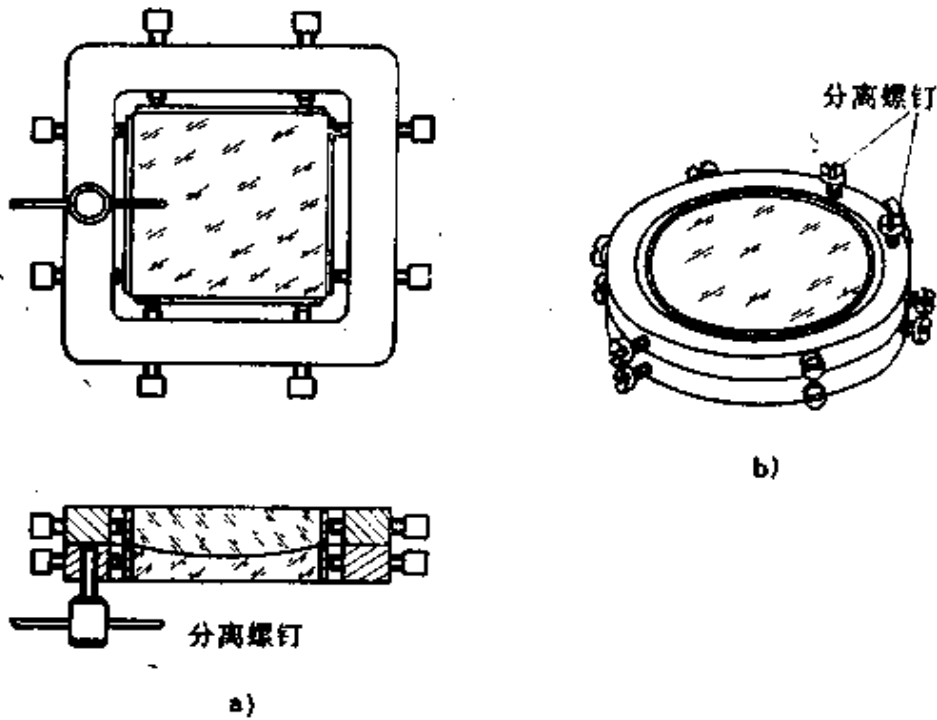


图 5-183 工件分离器
a) 分离方形工件 b) 分离圆形工件

(8) 修饰

修饰包括最后余胶的清除和对复制表面的清洁。毛面少量余胶的清除可用刮削或砂纸打磨的方法。余胶较多时可用锉削或铣削的方法。复制表面较方便的清洁方法是在表面涂一层火棉胶，待其干燥后即自行裂开而脱落，带走污物。

2. 常见疵病

(1) 气泡

数量不多而直径较大的气泡，主要是在真空室内抽气时胶太粘而使胶中空气未抽尽所致。有时，滴胶后放母板或基板时操作不当也会产生大气泡。数量较多的密集小气泡往往是胶层太薄、零件太重或胶太稀、温度太高等原因引起。

(2) 母板划伤

划伤的原因有：复制室不洁或胶内有较大颗粒的机械杂质；基板有毛刺而胶又太稀，以致揉胶时划伤母板。

(3) 光圈不好

影响光圈的主要因素有：母板或基板的面形不合格；环氧胶的固化收缩率不合格等。此外如固化温度过高、加压过大、螺钉顶力太大、基体设计不合理、基体材料有残余应力等也会影响光圈。

(4) 胶层不匀

胶层不匀往往是工作台未调好水平或在揉胶时揉偏所致。

(5) 麻点擦痕超差

产生的原因有：母板表面质量差；有灰尘、油污；膜层表面质量差；机械损伤等。

(6) 破损

当边缘余胶没有清除干净而强行分离时，常会引起零件或母板破损。在低温分离时，液氮突然滴落在玻璃母板或基板上，也会引起破裂。

(7) 环氧胶脱落

脱落的主要原因是基板的脱脂清洗不好或清洗后又被污染。另外，环氧胶配比不当也会引起脱落。

第六章 加工过程中的测量

一、面形偏差测量

1. 干涉法

(1) 平面干涉仪

双光束平面等厚干涉仪是测量平面度时用的最普遍的仪器，一般可测到 $\lambda/20$ 的精确度。

1) PG 15—J 4 平面干涉仪 图 6-1 是平面干涉仪光路图。由星点 2 发出的单色光经棱镜 3 后，投向主物镜 6，经主物镜的

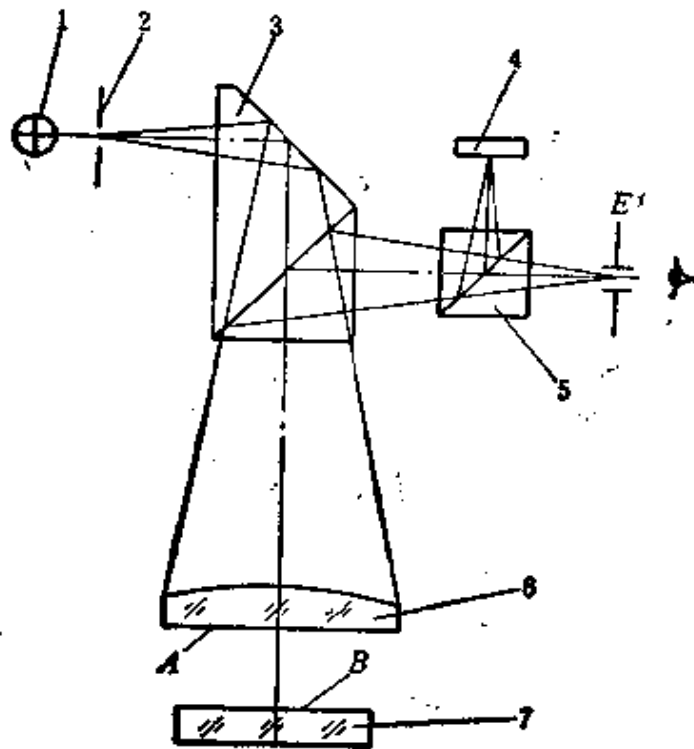


图 6-1 平面干涉仪光学系统

1—光源 2—星点 3—棱镜 4—照相装置 5—分光棱镜
6—主物镜 7—被检工件

非球面折射后成平行光投向主物镜平面 A (标准平面) 和被测面 B , 经 A 面和 B 面反射回来的光束重叠后产生干涉条纹, 又经棱镜 3 反射到分光棱镜 5, 在出瞳 E 处便可观察到干涉条纹或经分光棱镜 5 反射后进入照相装置 4 拍摄干涉条纹图。

仪器的光源有三种: 激光、钠光、汞光。

仪器的主要技术参数如下:

准直系统焦距	400 mm
第一标准平面 (主物镜平面)	工作直径 ϕ 146 mm 平面度小于 $\lambda/30$
第二标准平面	工作直径 ϕ 140 mm 平面度小于 $\lambda/20$
第三标准平面	镀分光膜 $R:T = \frac{1}{3} : \frac{2}{3}$ 工作直径 ϕ 140 mm 平面度小于 $\lambda/20$
测微目镜	焦距 16.7 mm 视场角 40°

平面度测量: 调节工作台手轮, 在目镜视场中出现 3~5 条干涉条纹, 然后用测微目镜测量条纹的弯曲程度或直接用肉眼观察, 估读条纹弯曲。

测量平行平板的平面度时, 为了排除被测件背面反射光的干扰, 可在背面涂油或洋干漆。对于不宜涂油或漆的工件, 可利用相干长度短的光源, 如钠光或汞光。这时被测面与标准面之间距离不能大于 10 mm。

2) GSY-250 A 平面干涉仪 本仪器的特点是有标准液面附件, 其测量精度不低于 $\lambda/20$, 并附有投影装置和照相装置。为了目测方便, 投影屏上制有 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 的网格。仪器备有测温精度达 0.001°C 的微温升计, 显示标准平面和被测平面温差情况。

仪器主要技术数据:

标准平面工作直径	ϕ 250 mm
----------	---------------

样板平面度	0.1~0.3N
液面最大工作直径	ϕ 420 mm
投影显示尺寸	85 mm
光源	激光、汞光

(2) 球面干涉仪

球面干涉仪主要用于测定球面的局部误差和曲率半径。

仪器由激光干涉系统和测长系统两部分组成。激光干涉系统光路如图 6-2 所示。

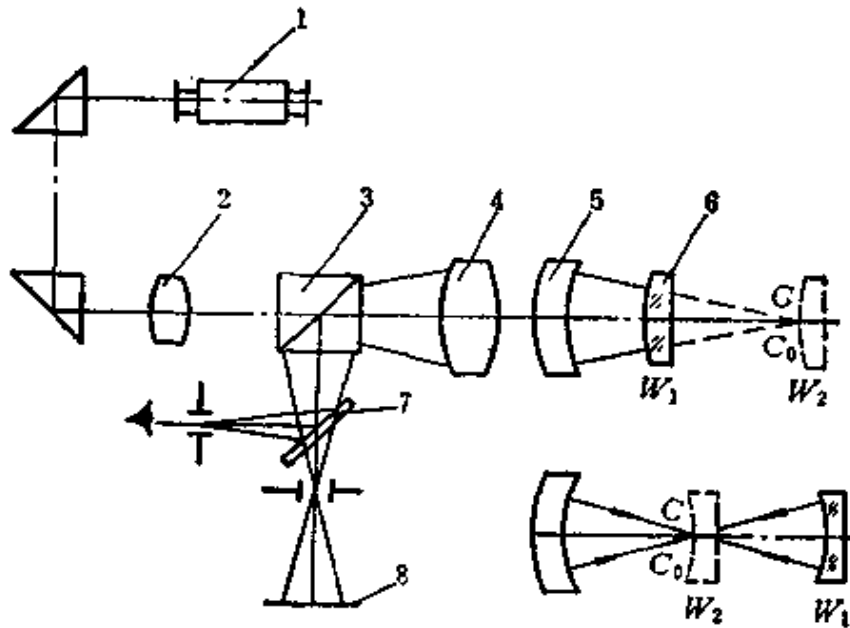


图 6-2 球面干涉系统

- 1—激光管 2—聚光镜 3—分光棱镜 4—固定物镜
5—标准物镜组 6—被测件 7—转换反射镜 8—投影屏

激光管 1 的光束，经反射棱镜，聚光镜 2、分光棱镜 3、固定物镜 4 后，成平行光束射出，经标准物镜 5 后，成为会聚（或发散）光束，该光束与标准物镜最后一面同心。如果被测球面的球心 C 与标准球面的球心 C_0 重合时，由标准面和被测面反射回来的两束光波发生干涉。当条纹是等距离平行直条纹时，则表示被测球面没有局部误差；如果出现椭圆形或局部弯曲，则按一般光圈识别方法判读。图 6-3 是标准球面球心和被测球面球心相对偏离情况与对应的干涉图。

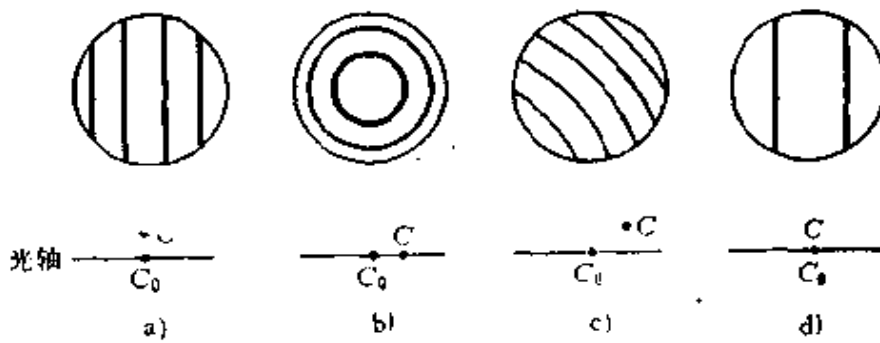


图 6-3

- a) 球心横向偏离 b) 球心纵向偏离 c) 球心斜向偏离
d) 球心重合

测量曲率半径时，首先将被测面的球心 C 和标准面球心 C_0 重合位置（见图 6-2 中 W_1 ）读第一个数；再将被测球面移到与标准球面的球心 C_0 重合位置（见图 6-2 中 W_2 ）读第二个数。两次读数之差即为被测表面的曲率半径。

当标准面的曲率半径较大或标准面为凸面时，其球心超出测长机构的量程。这时，以被测表面与标准面顶点相接触的位置（见图 6-4 中 W_2 ）读第二个数。由此可得被测球面曲率半径为：

$$\text{凸面} \quad R = R_0 - L$$

$$\text{凹面} \quad R = R_0 + L$$

式中 R_0 ——标准面曲率半径；

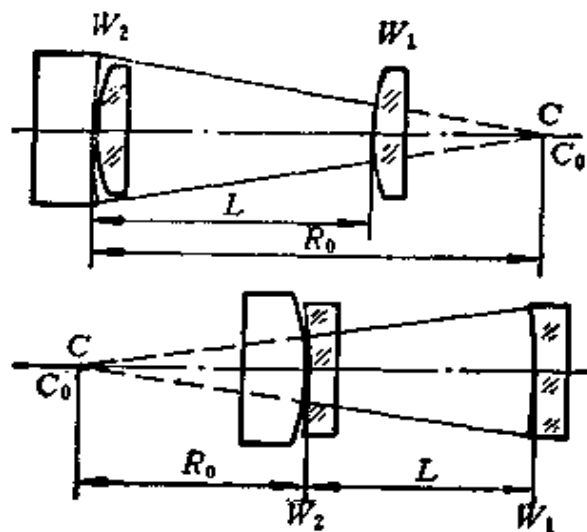


图 6-4 大曲率半径测量

L —— W_1 、 W_2 两处读数之差。

2. 阴影法

(1) 工作原理

阴影法是检验会聚球面波缺陷的，因此要设法使光束经过被检镜面后变为会聚球面波，用刀口切割波面的球心，得到阴影图形，判断被检镜面的面形偏差。

如图 6-5 所示，在标准凹球面镜 MN 的球心 C 处放置一点光源，光源发出的光线经凹球面反射后必交在球心 C 处。这时，用刀口在位置 1（即球心里边）从右向左切割光束，就会看到阴影从右边出现往左移动，即阴影的移动方向与刀口移动方向相同；刀口在位置 3（即球心外边）切割光束时，阴影从左边出现往右移动，即阴影的移动方向与刀口移动方向相反；刀口在位置 2（即球心）切割时，整个镜面均匀变暗。

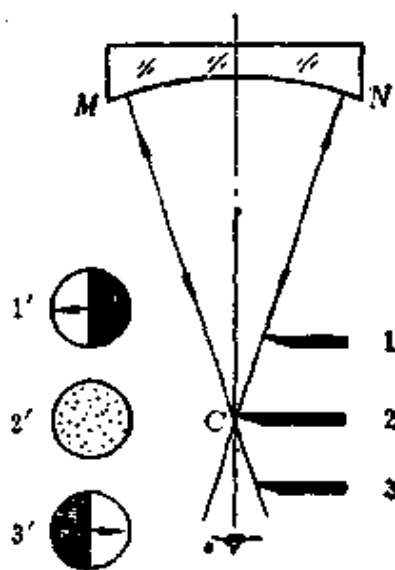


图 6-5 镜面阴影

如果球面反射镜面 MN 有缺陷，如图 6-6 A 所示。取比较球面 I-I 及 II-II，均以 C 为同心，并且镜面最低点 a 、 o 、 e 及最高点 b 、 d 分别在 I-I 及 II-II 上。如果用刀口由右向左在 C 点切割光线，因 a 、 b 、 o 、 d 点反射光线会聚于 C 点，故被刀口切割住。 ab 、 od 段上的反射光线未切割而进入眼中； bo 、 de 段反射光线

被刀口挡住，不能进入眼中。所观察到的阴影如图 6-6 B 所示。

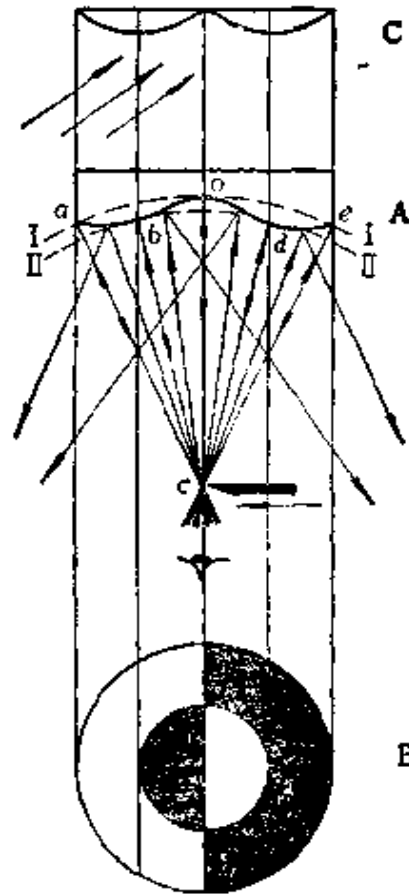


图 6-6 阴影对应的面形

由阴影图形判断镜面缺陷时，可以假想与刀口切割方向相反的一束斜射的阳光照在起伏的环形山脉上，阴影图形中的亮带区即是迎着阳光的阳面，暗带区即是背面，如图 6-6 C 所示。

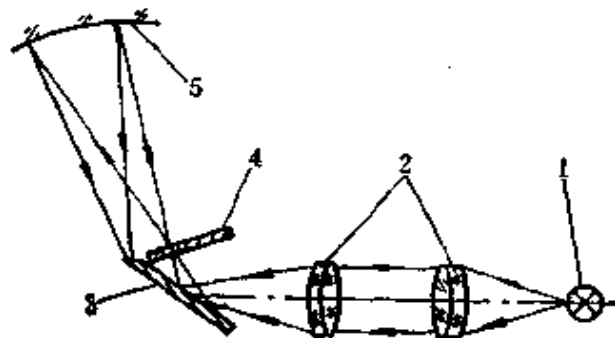


图 6-7 刀口仪光学系统

1—灯泡 2—聚光镜 3—刀片 4—星孔板 5—凹球面

(2) 刀口仪

刀口仪(WS-4型)的光学系统如图6-7所示。由灯泡1发出的光束经过聚光镜2会聚后又经刀片3反射,最后会聚在星孔板4的小孔上。由小孔射出的光线经被检镜面反射回来,又会聚于小孔附近。用刀片3的刀口在会聚点切割光束,在刀口后面就能看到阴影图。

刀口仪主要技术参数:

星点孔直径	0.03; 0.06; 0.08; 0.2; 0.50; 1.00 mm
狭缝宽度	0.05; 0.15 mm
刀口和小孔距离	3 mm
刀口和狭缝距离	2 mm
粗调升降	70 mm
微调升降	15 mm
纵向、横向移动量	15 mm
读数手轮格值	0.01 mm

(3) 测量方法

首先把出射光束调节均匀。使用星点孔时,调节灯泡和聚光镜的位置,使星点孔射出的光束照在纸屏上成为亮度均匀的圆形亮斑为止。当用狭缝时,先调焦使灯丝象成在光阑片外的一张白纸上;转动灯泡,使灯丝象平行于狭缝;然后再调焦,使灯丝象成在狭缝上。其次,调节刀口的纵向移动方向,使之与被检系统的光轴方向一致。刀口应与光轴垂直。

检验凹球面时,刀口放在球心处。寻找球心的方法是观测者沿光轴远离镜面时,脸象逐渐变大,到瞳孔充满整个镜面,这位置就在球心附近了。也可用一支手电筒在镜面前照亮,从镜面附近向后移,眼睛注视着镜面中手电筒灯泡的反射象,直至灯丝充满整个镜面时,此处就是球心附近。刀口切割光束时,移动要慢,否则一扫而过,不易发现缺陷。刀口未切到光束时,镜面上的亮度要均匀,亮度要适当,太亮刺眼,太暗分辨困难。

二、曲率半径测量

1. 机械法

(1) 测量原理

通过测量球缺的矢高 h 和底面半径 r ，并代入下式求得曲率半径 R (见图 6-8)：

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \quad (6-1)$$

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (6-2)$$

式中 r ——球缺底面半径 (在实际测量中为测量环的内径或外径之一半)。

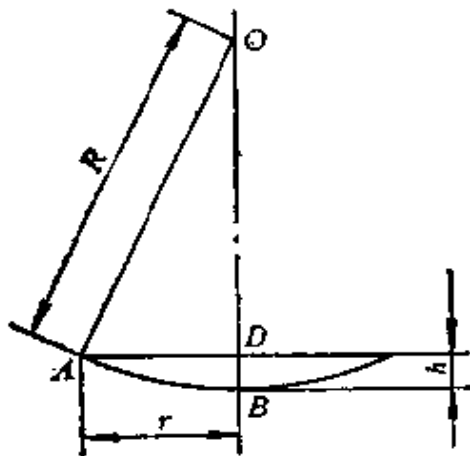


图 6-8 球面半径测量原理

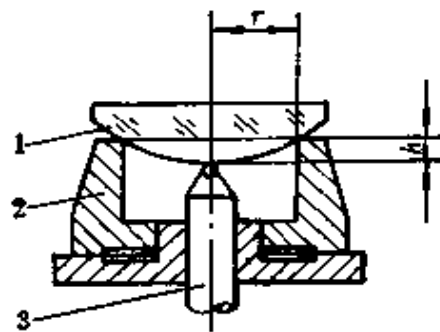


图 6-9 刀口测量环

1—被测球面 2—测量环 3—测量杆

如果测量环是钢球式测环 (见图 6-10)，则

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm \rho \quad (6-3)$$

式中 r ——通过钢球中心的圆周半径；

ρ ——钢球半径 (测凹面取“+”，测凸面取“-”)；

h ——钢球顶点所决定的平面到球面顶点的距离。

h 计算公式为

$$h = (R \pm \rho) - \sqrt{(R \pm \rho)^2 - r^2} \quad (6-4)$$

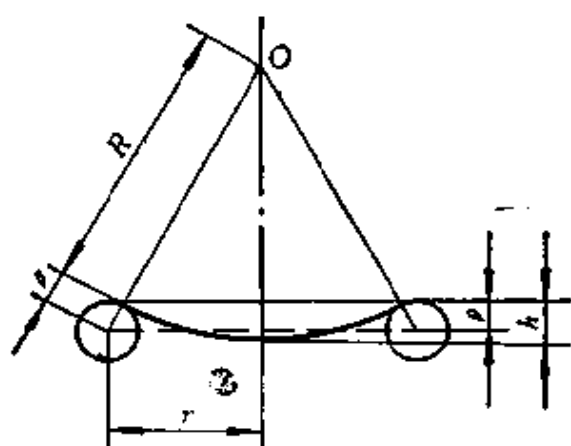


图 6-10 钢球测量环原理图

式中 ρ 的正负号，测凸面取“+”，测凹面取“-”。

(2) 球径仪

球径仪主要由测量杆、测量环、读数显微镜组成。JQJ₁型球径仪的光学原理如图 6-11 所示。测量杆上的毫米标尺可上下移动，通过读数显微镜读出标尺升降的数值。测微目镜用螺旋分划

板测微读数，其最小格值为 0.001 mm。

JQJ₁型球径仪主要技术数据：

测量范围

凸面

5~1 000 mm

凹面

8~1 000 mm

测量精度($\Delta R/R$)

$20 \leq R \leq 550$ mm

$\pm 0.03\%$

$R < 20$ 和 $R > 550$ mm

$\pm 0.06\%$

玻璃标尺刻度范围

0~30 mm

标尺格值

1 mm

目镜测微器最小格值

0.001 mm

读数显微镜视放大率

$58\times$

测量环(共 9 个)

№ 1~№ 7 钢球型

№ 8~№ 9 刀口型

(3) 测量方法

1) 单矢高法 首先将一块基准平面放在测量环上，得出标尺第一次位置读数，然后放上被测球面，得出第二次位置读数。这两次读数之差即为矢高 h 。将 h 值代入式(6-1)或式(6-3)即可求得半径 R 。

如已知曲率半径 R 和允差值 ΔR 时，首先按名义半径 R 值计

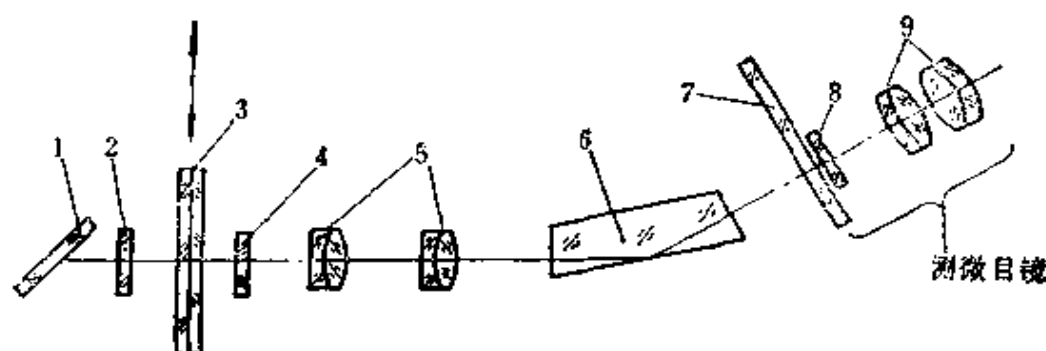


图 6-11 球径仪光学系统

1—反光镜 2—滤光片 3—毫米标尺 4—玻璃平板 5—显微物镜
6—透镜 7—螺旋分划板 8—分划板 9—目镜

算矢高 h 。由 ΔR 引起的矢高误差 Δh 按如下计算，将式(6-2)微分，得

$$dh = \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 - r^2}} \right) dR$$

由此得

$$\Delta h = \left| \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 - r^2}} \right) \right| \Delta R \quad (6-5)$$

$$= \left| \frac{h}{h - R} \right| \Delta R \quad (6-6)$$

将式(6-4)微分得

$$\Delta h = \left| \left(1 - \frac{R \pm \rho}{\sqrt{(R \pm \rho)^2 - r^2}} \right) \right| \Delta R \quad (6-7)$$

$$= \left| \frac{h}{h - (R \pm \rho)} \right| \Delta R \quad (6-8)$$

式中 ΔR ——曲率半径公差值；

ρ ——钢球半径，测凸面取“+”，测凹面取“-”。

实测值在 $h \pm \Delta h$ 范围内即可。

2) 双矢高法 在测量标准样板(对板)时，不用标准平面来确定基数，而是直接测量双矢高 $H = h_1 + h_2$ (见图 6-12)。然后代入下列近似公式计算：

当测量环为刀口式时

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2H} + \frac{H}{4} \quad (6-9)$$

或

$$R = \frac{(r_1 + r_2)^2}{4H} + \frac{H}{4} \quad (6-10)$$

式中 r_1 ——测量环内径之一半；
 r_2 ——测量环外径之一半；
 H ——总矢高(凸凹面矢高之和)。

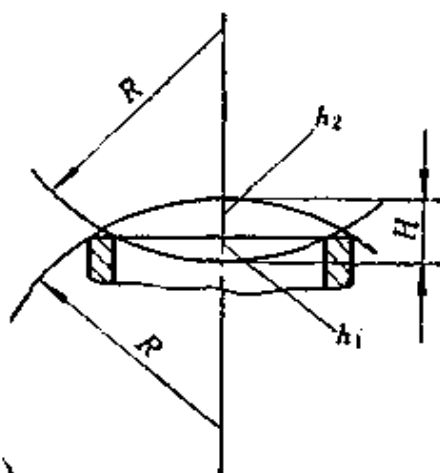


图 6-12 测量凸凹总矢高

当测量环为钢球式时

$$R = \frac{r_0^2}{H} + \frac{H}{4} \quad (6-11)$$

式中

$$r_0 = r + \frac{\rho^2 r}{2(R^2 - r^2)} \quad (6-12)$$

式(6-12)中的 R 用近似值即可。

2. 自准直法

(1) 前置镜法

前置镜法主要用于测量几米到几十米的球面半径。

测量前，先在物镜前放一平面镜，轴向移动前置镜的目镜，找一自准象清晰无视差的位置 F'_1 (见图 6-13)。然后将被测球面代替平面镜，再次轴向移动目镜，当从被测球面反射回来的象清晰无色差时 (F'_2)，量出目镜从 F'_1 到 F'_2 的距离 x' 和从物镜前主面到被测球面顶点的距离 d ，就可求得曲率半径 R ，

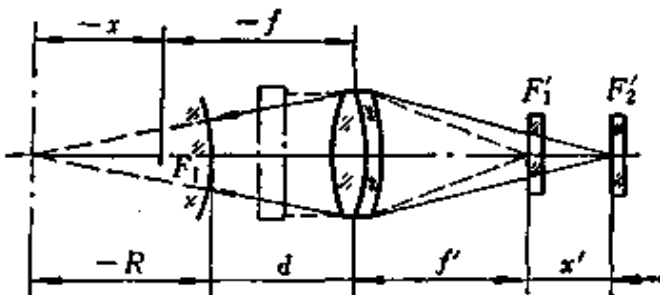


图 6-13 前置镜法

$$R = d - \frac{f'(f' \pm x')}{\pm x'} \quad (6-13)$$

式中 f' ——自准直前置镜物镜焦距；

d ——被测球面顶点到物镜前主面的距离；

x' ——自准直目镜的移动距离(测凸面取“+”，测凹面取“-”)。

用上式计算出的 R 为负数，表示凸球面； R 为正数，则表示凹球面。

(2) 显微镜法

自准显微镜分别调焦于被测球面的球心 C 和顶点 A 时，观察到清晰无视差的自准象。这两次调焦之间，显微镜的移动距离就等于被测球面的曲率半径(见图 6-14)。

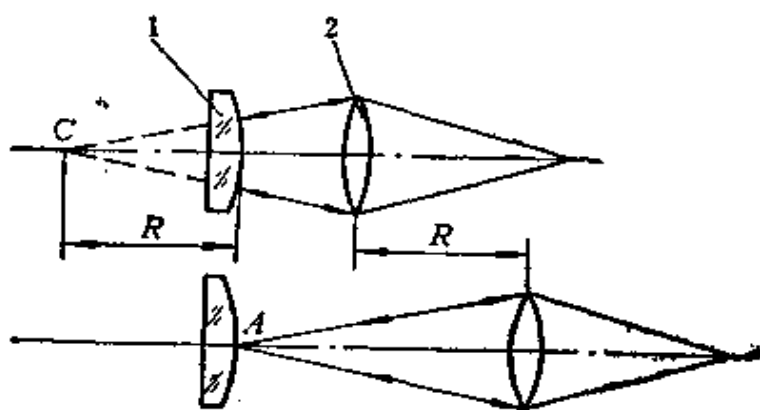


图 6-14 显微镜法
1—被测球面 2—显微物镜

图 6-15 为国产 3C 型自准球径仪自准显微镜光学系统。

仪器的主要技术数据；

曲率半径测量范围

凸面 $R \leq 30 \text{ mm}$

凹面 $R \geq 25 \sim 1\,200 \text{ mm}$

被测件直径 $\phi 5 \sim \phi 130 \text{ mm}$

目镜放大率 $10 \times$

物镜放大率 $4 \times ; 10 \times ; 40 \times$

投影读数鼓轮示值 0.001 mm

测量精度 $\leq 0.01\% R (R \geq 50 \text{ mm 时})$

测量时，工作台的定位是根据被测曲率半径大小确定的；当

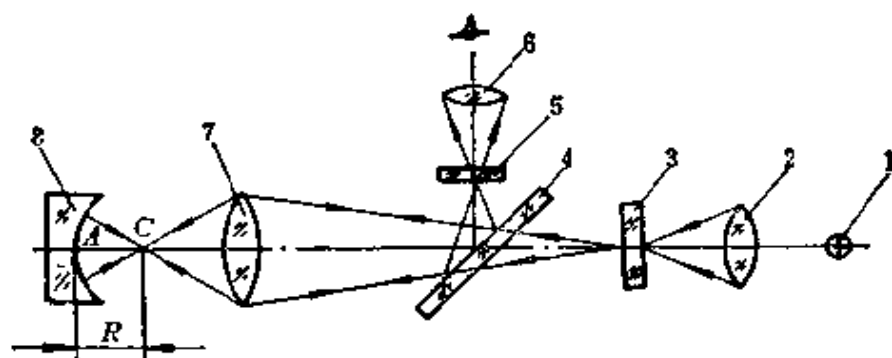


图 6-15 自准显微镜光学系统

1—光源 2—聚光镜 3—分划板 4—半反射镜 5—目镜分划板
6—目镜 7—物镜 8—被测件

$R \leq 200$ mm 时，定位在“0”刻线标志上；当 $200 \text{ mm} \leq R \leq 400$ mm 时，定位在“200”标志上；当 $400 \text{ mm} \leq R \leq 600$ mm 时，定位在“400”标志上。其余依此类推。调整工作台和测量座，使球心象和球面象到最清晰位置时，在投影读数器上读取 x_1 和 x_2 。曲率半径按下式计算：

$$\text{凹面 } R = x_1 - x_2$$

$$\text{或 } R = x_1 - x_2 + n \quad (R > 200 \text{ mm 时})$$

式中 n ——工作台定位刻线即 200、400、600……。

$$\text{凸面 } R = x_2 - x_1$$

3. 干涉法

它是利用光学干涉现象测量球面的矢高来求得半径 R 的。干涉法常用于测量较大的球面半径，故式(6-1)的 $h/2$ 项很小，可忽略不计，用近似公式表示：

$$R = \frac{r^2}{2h}$$

上式中代入 $h = N\lambda/2$ 及 $r = D/2$ ，

得到

$$R = \frac{D^2}{4N\lambda} \quad (6-14)$$

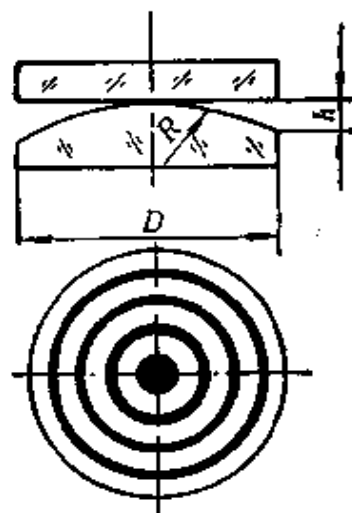


图 6-16 球面等厚干涉条纹

式中 D ——被测球面直径；
 N —— D 范围内的光圈数；
 λ ——所用光源波长。

当 $N < 1$ 时，

$$R = \frac{D^2 s}{4 h \lambda} \quad (6-15)$$

式中 s ——条纹间距；
 h ——条纹矢高。

为了提高 R 的测量精度，测出第 n_1 条纹的直径 D_1 及第 n_2 条纹的直径 D_2 ，则

$$R = \frac{D_2^2 - D_1^2}{4(n_2 - n_1)\lambda} \quad (6-16)$$

由曲率半径偏差 ΔR 引起的光圈数 N 用下式表示，

$$N = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D}{2R}\right)^2}} - 1 \right) \Delta R \quad (6-17)$$

由 N 引起的 ΔR 值可按下式求出：

$$\Delta R = \frac{N\lambda}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D}{2R}\right)^2} - 1} \right) \quad (6-18)$$

上式近似值可用下式表示：

$$\Delta R = \frac{4 R^2 N \lambda}{D^2} \quad (6-19)$$

4. 阴影法

由阴影法的原理可知，刀口仪的刀口是置于凹球面的球心位置上切割光束的，利用这一特点可测量球面的曲率半径。由于刀口仪光阑孔与刀口 S' 有一段距离 δ (见图 6-17)，因此，球面的曲率半径 R 由下式求出：

$$R \approx L + \frac{D\delta}{4L} \quad (6-20)$$

式中 D ——工件直径；

L ——刀口到镜面端点的距离，
 δ ——刀口和星点孔距离，一般为
 $2\sim 3\text{ mm}$ 。

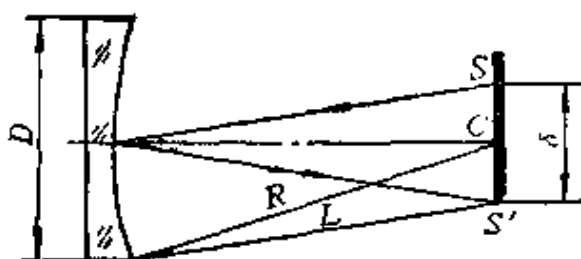


图 6-17 刀口仪测定曲率半径

设 $D/R=1/10$ ，则 $D\delta/4L = D\delta/4R = 0.075\text{ mm}$ ，故对精度不高的测量，可把 L 看作 R 。

三、平行度测量

1. 玻璃平板平行度测量

(1) 机械法

用千分尺、测长仪等量具或仪器，测出工件的边缘最大厚度差 Δd ，并将其换算成平行度(如图 6-18 所示)。

$$\Delta d = D \tan \theta$$

因 θ 角很小，故 $\tan \theta \approx \theta$ ，代入上式得

$$\Delta d = D\theta \quad (6-21)$$

式中 D ——工件直径或长度；

θ ——楔角(rad)。

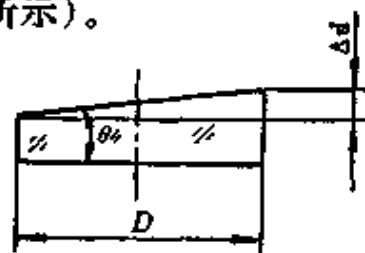


图 6-18

例如：角度 $1'$ 的弧度为 $0.00029 \approx 0.0003$ ；角度 $1''$ 的弧度为 $0.00000485 \approx 0.000005$ 。对于 $\phi 50\text{ mm}$ 工件，当要求 $\theta = 5'$ ，则 $\Delta d = 50 \times 5 \times 0.0003 = 0.075\text{ mm}$ ；当 $\theta = 30''$ ，则 $\Delta d = 50 \times 30 \times 0.000005 = 0.0075\text{ mm}$ 。

(2) 自准直法

1) 测量原理 图 6-19 为 JJY 型自准直仪(比较测角仪)光路图。由光源 1 发出的光线经棱镜 2 照亮分划板 3 上的透明刻线，此分划板位于物镜 4 的焦平面上，故分划板 3 发出的光线，经过物镜 4 后成平行光射出，到达平面镜 5 后反射回来，再成象于分划板 3 上，并和黑的固定刻线正交。当平面镜 5 相对光轴倾斜 θ 角时，则反射光线改变 2θ ，在分划板上引起的位移 Y 由下

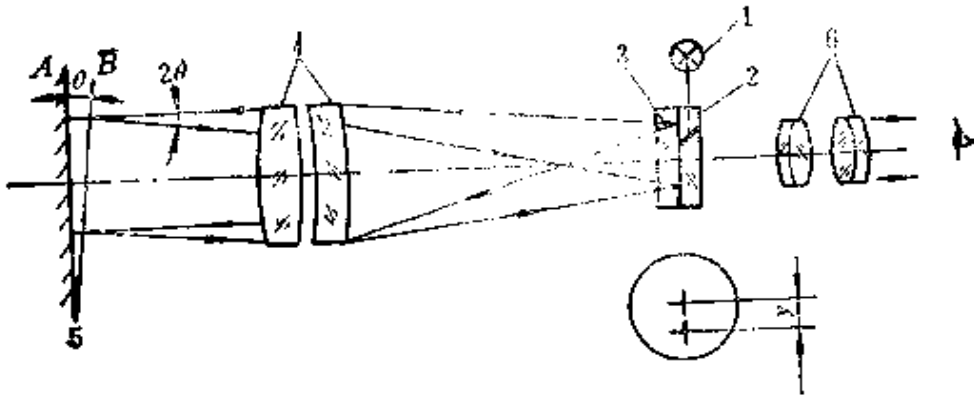


图 6-19 比较测角仪光学系统

1—光源 2—反射棱镜 3—分划板 4—物镜 5—反射平面镜
6—目镜

式表示:

$$Y = 2 f' \theta \quad (6-22)$$

式中 f' ——物镜焦距;

θ ——反射镜倾斜角度。

为了读数方便起见,大多数自准直仪的分划板刻度是按 $2 f' \theta$ 刻划的(分划板的格值缩小了一半),故分划板上的读数值即为实际角度 θ 值。

2) 测量方法

a) 比较法 比较法测量平行度常用于只有一面抛光的平行平面或不透光工件。首先将一块平晶的非工作面磨成砂面并置于平台上,调整光管,使平晶反射象与分划板中心重合。此后,被测件放在平晶上,并转动工件,直到被测件上表面反射象离固定分划板中心最远时读数 θ' 即为工件平行差。工件反射象所在的那一边为工件薄边(见图 6-20)。

b) 直测法 对于透明平板玻璃,可根据上下表面的反射象分开情况,直接测出其平行度(见图 6-21)。

为了避免仪器平台表面反射象的干扰及保护工件的粗糙度,应在平台上垫软纸后再放工件。转动工件至两个表面反射象分开距离最大时(此时两个反射象相对应)读出两个象分开的角距离

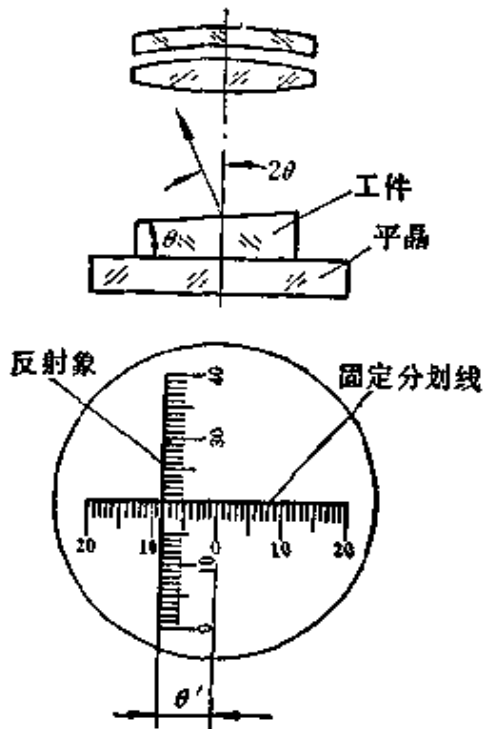


图 6-20 比较法测量平行度

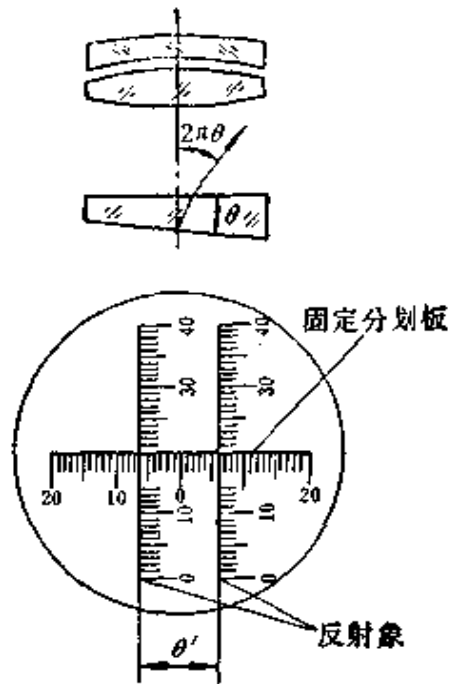


图 6-21 直测法测量平行度

θ' ，再除以工件折射率 n 即得实际平行差 θ ，

$$\theta = \theta' / n \quad (6-23)$$

判断工件厚薄时，可向工件下表面哈口气，这时从目镜中看到有一个反射象模糊或消失，这个模糊的象所在的那一边即为工件的厚端。

c) 测角法 将精密测角仪的自准直望远镜分别在 I、II 两个位置对准 A 面和 B 面的反射象，並使其与分划板的十字线中心重合 (见图 6-22)，从度盘上分别读得对应的读数。两次读数之差 φ 除以工件折射率 n 即得平行差 θ 。

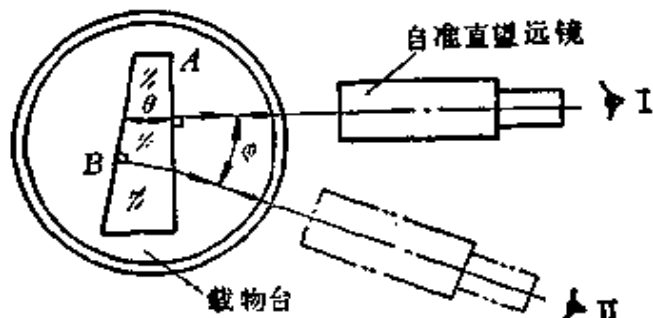


图 6-22 测角法测量平行度

$$\theta = \varphi / n \quad (6-24)$$

3) 测量用仪器——自准直仪

图 6-23、图 6-24、图 6-25 分别为 JJC 15 型光学比较测角仪光学系统、C 10 型自准直仪光学系统、702 型光电自准直仪结构系统图。

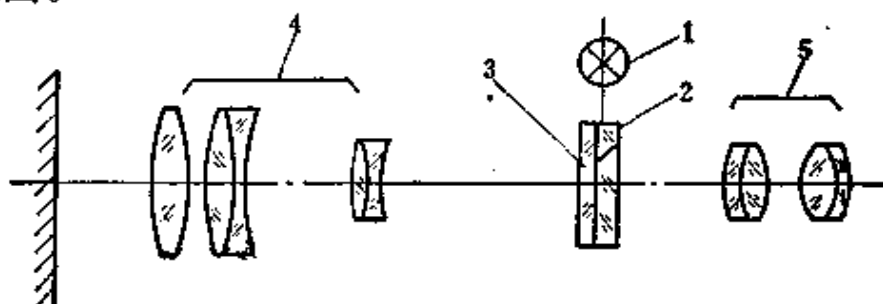


图 6-23 JJC 15 比较仪光学系统

1—光源 2—反射棱镜 3—分划板 4—物镜 5—目镜

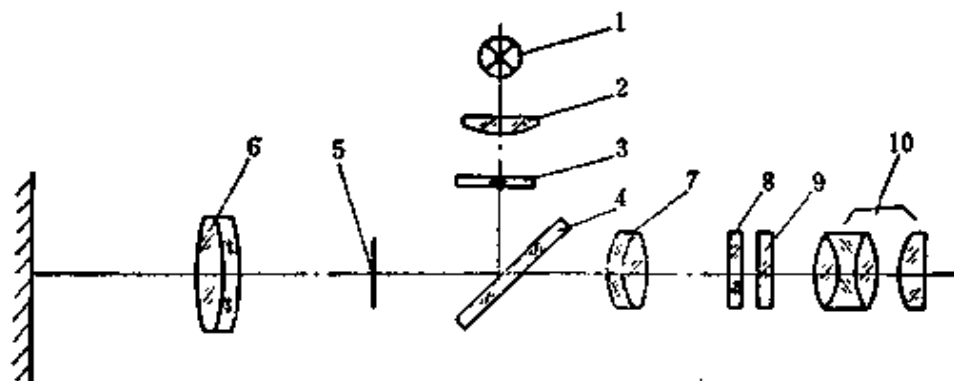


图 6-24 C 10 自准直仪光学系统

1—光源 2—聚光镜 3—滤色片 4—分光镜 5—十字线 6—物镜 7—显微物镜 8—瞄准分划板 9—固定分划板 10—目镜

自准直仪的技术参数见表 6-1。

表 6-1 自准直仪技术参数

仪器型号	JJY	JJC15	C 10	702
物镜焦距 (mm)	290	500	238	860
物镜通光孔径 (mm)	30	50	40	42
目镜放大率 (×)	10	12.5	15	15
分划板格值	1′	15″	30″	
分划板读数范围	60′	30′	10′	10′
放大率 (×)	11.3	25	60	50
筒长 (mm)	130	350		430
测量精度	±6″	±3″	10′ 范围内为 2″, 任意 1′ 范围内为 0.5″	0~10′ 为 2″ 0~1′ 为 0.5″

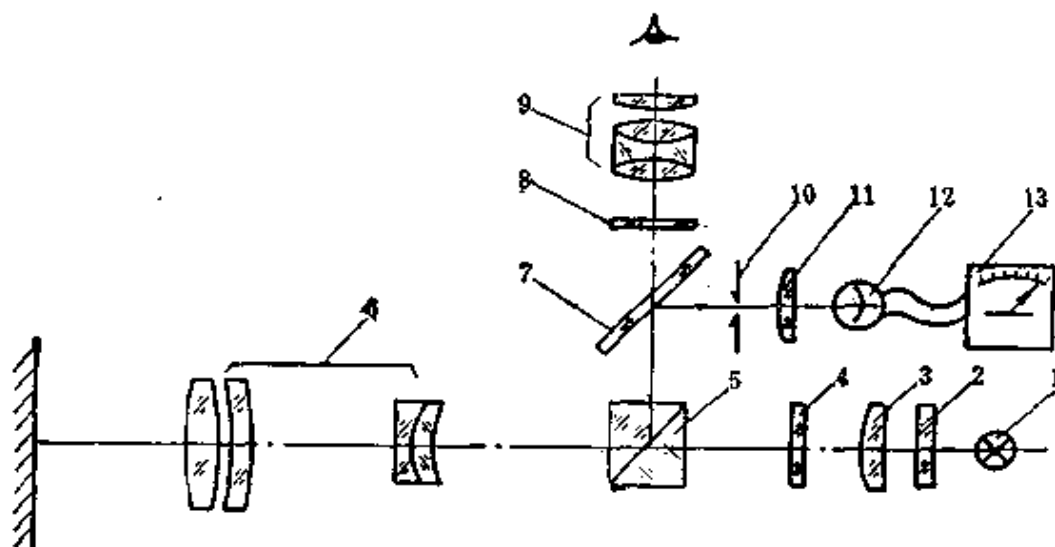


图 6-25 702 型光电自准直仪结构

- 1—光源 2—毛玻璃 3—聚光镜 4—十字分划板 5—分光棱镜
6—物镜组 7—分光镜 8—双线分划板 9—目镜 10—狭缝
11—聚光镜 12—光敏电阻 13—检波器

(3) 透射法

当平行光透过平板时，光线向平板的最厚方向偏折 φ 角，如图 6-26 所示。平板的平行度以下式表示：

$$\theta = \varphi / n - 1 \quad (6-25)$$

式中 n ——工件折射率，如取 $n=1.5$ ，则 $\theta=2\varphi$ 。

测量时，先将平行光管的十字线象中心与自准直望远镜的分划板中心重合，然后放入工件并转动，当十字线象中心与望远镜分划板的横(或竖)线重合时，读出偏离中心的角度值 φ 。

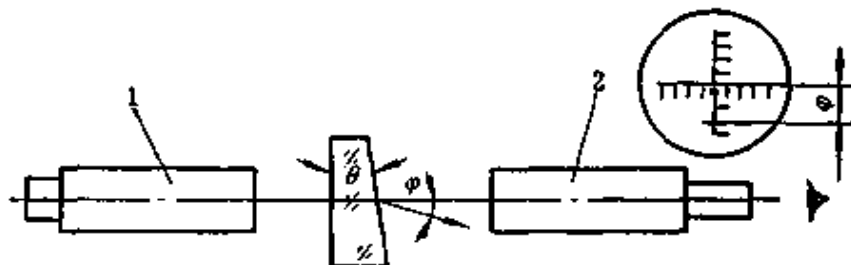


图 6-26 透射法测量平行度

- 1—平行光管 2—自准直望远镜

(4) 干涉法

根据等厚干涉原理，对应两条纹的厚度差为 $\lambda/2n$ 。设长度

D 范围内共有 m 个干涉条纹(见图 6-27), 则平行度 θ 按下式计算:

$$\theta = \frac{m\lambda}{2nD} \times 206\,265'' \quad (6-26)$$

式中 m ——干涉条纹数;
 λ ——使用光源波长;
 n ——被测件折射率;
 D ——被测件干涉场长度。

令条纹宽度 $d = D/m$ 代入上式得

$$\theta = \lambda/2nd \quad (6-27) \quad \text{图 6-27 平板自身干涉条纹}$$

当 $\lambda = 632.8\text{nm}$ (激光波长), $n = 1.5$ 时, 则

$$\theta = 43.5/d \quad (6-28)$$

式中 d ——条纹间距(mm)。

式(6-28)中的 θ 与 d 的对应值见表 6-2。

表 6-2 θ 对应的 d 值

θ (")	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10
d (mm)	87	43.5	29	21.8	17.4	14.5	10.9	8.7	7.3	6.2	5.4	4.8	4.4

平板厚薄端的判断, 可采用局部加热的办法: 在与干涉条纹相垂直的方向上, 把手指或温热的金属棒接触玻璃时, 干涉条纹的凸向为薄端, 如图 6-28 所示。

2. 棱镜光学平行差测量

(1) 自准直法测量

表 6-3 列出了用自准直望远镜检查几种常见的反射棱镜的平行差方法。

使用表 6-3 时应注意:

1) 自准望远镜的分划板是按 $2\theta f'$ 刻制的;

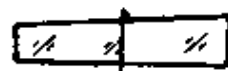
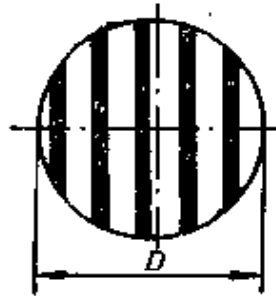
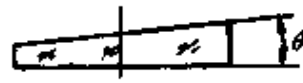
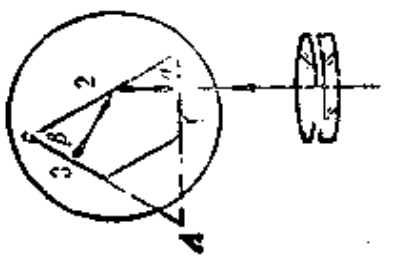
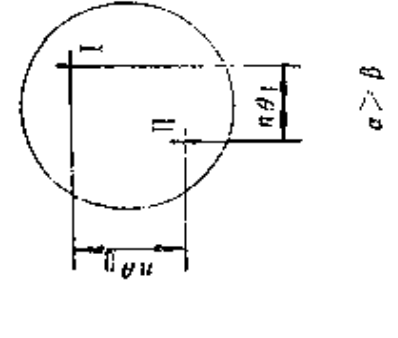
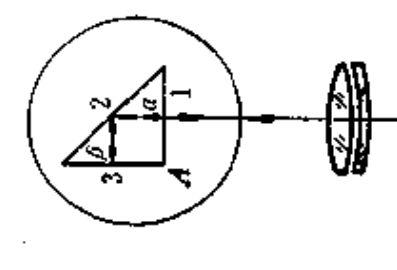
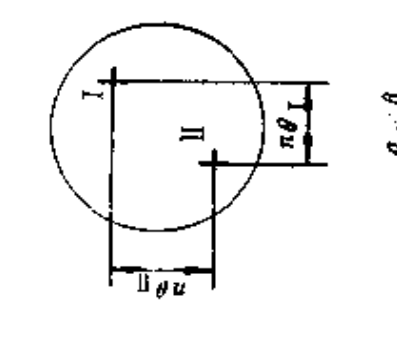
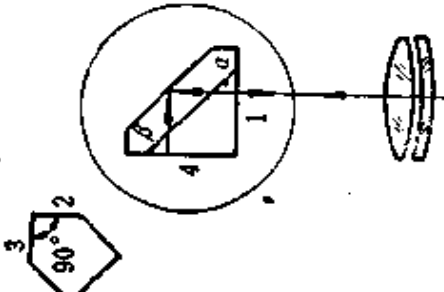
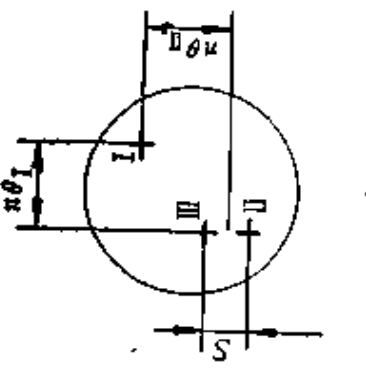
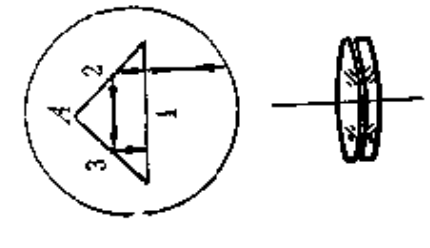
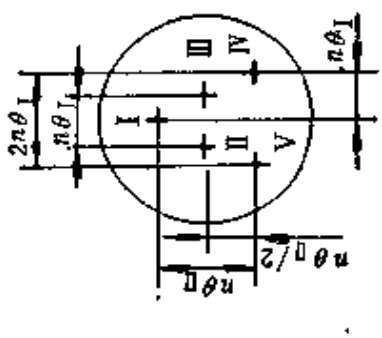


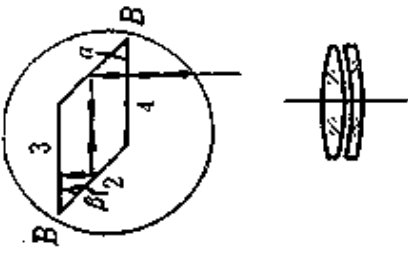
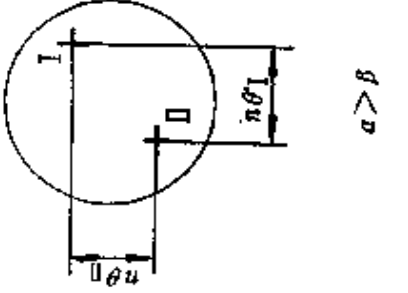
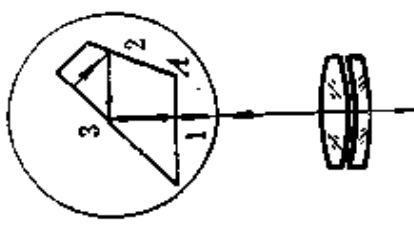
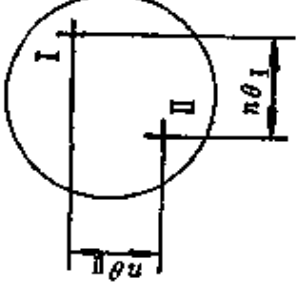
图 6-28 判断厚薄位置

表 6-3

名称及代号	测量位置图	视场示意图	角度关系	自准象的判别
等腰棱镜 DI-60。			$\theta_1 = \delta 60^\circ$ $\theta_{II} = \gamma_1$ $\delta 60^\circ$ 为两个 60° 角 (α, β) 实际角值之差	自准象 I: 1F 自准象 II: 1Z 2F 3F- 2F 1Z 在面 2 或 3 上哈口气, 消失者为自准象 II
直角棱镜 DI-90°			$\theta_1 = \delta 45^\circ$ $\theta_{II} = 1.4\gamma_1$	同上

(续)

名称及代号	测量位置图	视场示意图	角度关系	自准象的判别
直角屋脊棱镜 DII-90°			$\theta_1 = \delta 45^\circ$ $\theta_{II} = 1.4\gamma$ $S = 2.8m\delta$ δ 为屋脊角 90° 误差 S —双象	I: 1F II: 1Z2F3F4F3F 2F1Z III: 1Z3F2F4F2F 3F1Z 在面4上哈口气不消失者为象I 在棱镜与自准望远镜之间用纸片由上往下遮光时,双象中上面象先消失, $\delta > 0$; 下面象先消失, $\delta < 0$
直角棱镜 DII-180°			$\theta_1 = 2\Delta 90^\circ$ $\theta_{II} = 2\gamma_A$ $\Delta 90^\circ$ 为 90° 角度误差	I: 1F II: 1Z2F3F1Z III: 1Z3F2F1Z IV: 1Z2F3F1F3F 2F1Z V: 1Z3F2F1F2F3F 1Z 最亮且转动棱镜时,不运动的象为II和III; 随棱镜转动的是象I和IV、V 眼睛自右向左越过自准直望远镜出瞳时,II比III先消失 II在III的左边, 则 $\alpha > 90^\circ$; II在III的右边, 则 $\alpha < 90^\circ$

名称及代号	测量位置图	视场示意图	角度关系	自准象的判别
斜方棱镜 XII-0°			$\theta_{1,2} = \theta_{1,2} + \delta 45^\circ$ $\theta_{11} = 0.9\gamma_s$ $\theta_{1,2}$ 为1,2两面的平行度	I: 4F II: 4Z 1F 2F 3F 2F 1F 4Z 在面1,2,3中任一面上哈口气, 消失者为自准象 II
半五角棱镜 BII-45°			$\theta_1 = 2\Delta 22^\circ 30'$ $-\Delta 45^\circ$ $\theta_{11} = 2.4\gamma_s$	I: 1F II: 1Z 3F 2F 3F 2F 3F 1Z 在面2,3中任一面上哈口气, 消失者为自准象 II

(续)

名称及代号	测量位置图	视场示意图	角度关系	自准象的判别
五角棱镜 WII, -90°			$\theta_I = 2\Delta 45^\circ$ $-\Delta 90^\circ$ $\theta_{II} = 1.4 \gamma_a$	I: 1F II: 1Z 2F 3F 4F 3F 2F 1Z 在面 4 上哈口气, 消失者 为自准象 II
等腰屋脊棱镜 DIII, -45°			$\theta_I = \delta_{\sigma, \tau, \omega}$ $\theta_{II} = 0.76 \gamma_c$ $S = 3.7 \pi \delta$	I: 1F II: 1Z 4F 2F 3F 1F 4F 1F 3F 2F 4F 1Z III: 1Z 4F 3F 2F 1F 3F 1F 2F 3F 4F 1Z 在面 4 上哈口气, 消失者 为 II 和 III 用纸片由上往下遮光 时, 双象中的上面象先消 失, $\delta > 0$; 下面象先消失, $\delta < 0$

- 2) 自准望远镜是直筒式的；
- 3) 上、下、左、右相对于观察者所在位置而言；
- 4) 表中的位置图为俯视图。

表中 I、II、III、IV、V 表示各个自准象，Z 代表折射，F 代表反射， n 为材料折射率。例如，1Z2F3F2F1Z 表示光线在第 1 面折射第 2 面反射第 3 面反射第 2 面反射第 1 面折射。

(2) 干涉法测量

1) 屋脊双象差的测量 用激光平面干涉仪检验屋脊棱镜双象差比自准直法精度高，更简便可靠，且能同时检验表面的平面度。

调节承物台，使标准平面的反射象与被测棱镜的第二个折射面 B 反射回来的光线重合，就可产生干涉条纹，并使其中下半干涉场的干涉条纹与屋脊棱垂直(见图 6-29)。如果屋脊角 90° 是

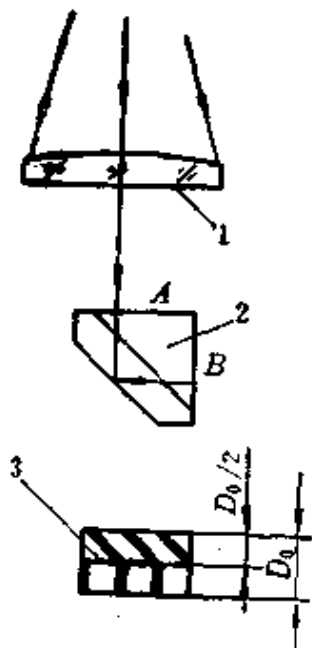


图 6-29 屋脊角干涉法测量
1—标准平面 2—屋脊棱镜
3—屋脊棱线

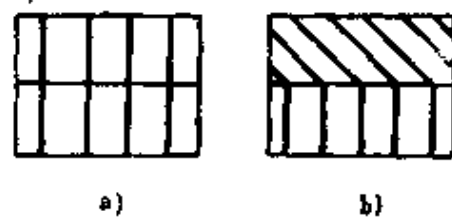


图 6-30
a) 屋脊角没有误差($m=0$)
b) 屋脊角有误差($m=2$)

准确的，则上下两半干涉场的干涉条纹在一条直线上(见图 6-30 a)；如屋脊角有误差，则上半干涉场的干涉条纹将是倾斜的(见图 6-30b)。将下半干涉场的条纹延长，数出延长线截过上半干涉场

的干涉条纹的数目 m , 则双象 S 为:

$$S = \frac{m\lambda}{D_0} \times 206\,265('') \quad (6-29)$$

已知双象差 $s = 4n\delta\cos\beta$, 故

$$\delta = \frac{m\lambda}{4nD_0\cos\beta} \times 206\,265('') \quad (6-30)$$

式中 m ——与屋脊棱垂直的条纹延长后截过斜条纹的数目;
 λ ——光源波长(激光 $\lambda = 632.8\text{nm}$);
 D_0 ——通光孔径(mm);
 β ——光轴与屋脊棱垂直面的夹角, 对于直角屋脊棱镜 $\beta = 45^\circ$, 等腰屋脊棱镜 $\beta = 22^\circ 30'$ 。

常见干涉图案的条纹数 m 的度量:

a) 当干涉条纹倾斜并对棱线对称时(见图 6-31a), 与棱线的垂线在上下两半干涉场中各截过的条纹数相加, 即

$$m = m_s + m_x$$

式中 m_s ——棱线的垂线在上半干涉场中截过条纹数;

m_x ——棱线的垂线在下半干涉场中截过的条纹数。

b) 当干涉条纹平行且对称时(见图 6-31d), 两半干涉场条纹数相加, 即 $m = m_s + m_x$ 。

c) 当干涉条纹平行但上下两半干涉场条纹数不等时(见图 6-31c), 多条纹数减去少条纹数, 即 $m = m_s - m_x$ ($m_s > m_x$)。

d) 当上半个干涉场没有条纹时(见图 6-31d), 即 $m_s = 0$, $m = m_x$ 。

e) 当干涉条纹对棱线既不对称又倾斜时(见图 6-31e), 条纹读数误差较大, 不应取。

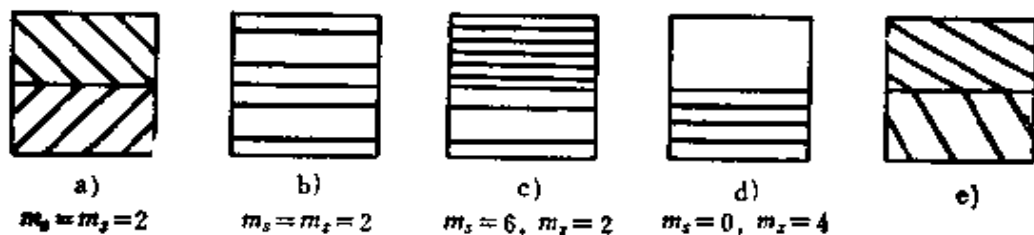


图 6-31

屋脊角误差 δ 的正负判别,

用手向下按载物台中部, 此时条纹向屋脊棱方向移动, 则 $\delta > 0$; 反之, $\delta < 0$ 。

用棱镜、透镜干涉仪测量时, 在被测棱镜后面放一测试反射镜(见图 6-32), 以使相干的两光束强度大致相等, 从而不致降低干涉图形的衬度。调节参考镜, 使两条光路的光程基本相同时就可看到清晰的干涉条纹。

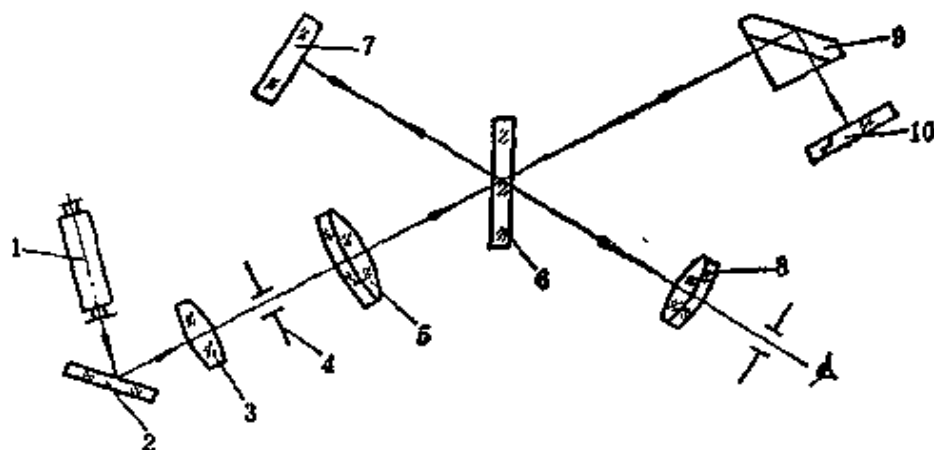


图 6-32 棱镜透镜干涉仪光学系统

1—激光光源 2—反射镜 3—聚光镜 4—光阑 5—准直物镜 6—分光镜
7—参考反射镜 8—观察物镜 9—被测棱镜 10—测试反射镜

屋脊角误差 δ 的正负可这样判别: 使参考反射镜向分光镜的方向移动时条纹向屋脊棱方向移动, 则 $\delta > 0$; 反之, 条纹背向屋脊棱移动, 则 $\delta < 0$ 。

2) 直角棱镜 90° 测量 当激光平面干涉仪的平行光束垂直于弦面入射, 经内部 AC 、 BC 面反射(另一半入射光束经 BC 、 AC 反射)回来的光束(全反射光束)与标准平面 E 的反射光束重合时便产生干涉条纹(见图 6-33)。为使测量方便、可靠, 测量时把干涉场的一半条纹调节成与棱线垂直。直角误差以下式表示:

$$\Delta 90^\circ = \frac{m\lambda}{2nL} \times 206\,265('') \quad (6-31)$$

式中 m ——与 90° 棱垂直的条纹延长后截过斜条纹的数目;

λ ——激光波长(632.8nm);

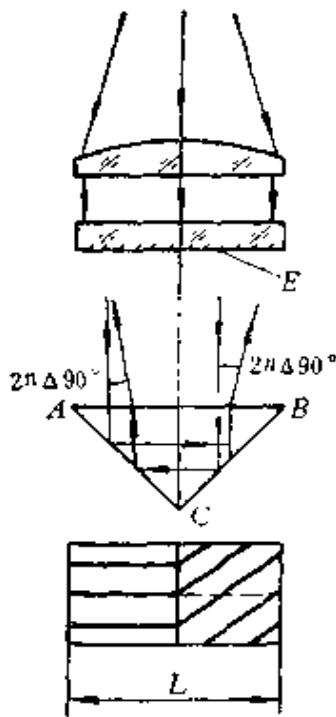


图 6-33 直角棱镜90°角测量的。这时，直角误差为

$$\Delta 90^\circ = \frac{m\lambda}{4nL} \times 206\,265('') \quad (6-33)$$

式中 m ——与棱线的垂线在两半个干涉场中截过的条纹数。

当 $n=1.5$, $\lambda=632.8\text{nm}$ 时，上式写成

$$\Delta 90^\circ = 21.8 \frac{m}{L} ('') \quad (6-34)$$

式中 L ——直角棱镜弦边长度(mm)。

以条纹宽度 d_x 表示上式，得

$$\Delta 90^\circ = 21.8/d_x \quad (6-35)$$

式中 d_x ——与棱线垂直方向上的条纹的间距(mm)。

直角棱镜的棱差 ν_A 为

$$\nu_A = \frac{m\lambda}{4nD_0} \times 206\,265('') \quad (6-36)$$

L ——直角棱镜弦边长(mm)；

n ——工件材料折射率。

当 $n=1.5$, $\lambda=0.000\,632\,8\text{mm}$ 时，上式可写成

$$\Delta 90^\circ = 43.5 \frac{m}{L} ('') \quad (6-32)$$

由于棱镜全反射光束强度很强，而标准平板的反射光束很弱，以使条纹对比度很差。因此需将标准平板的表面(E)镀分光膜 ($R:T=1:2$)。

当棱镜的弦面反射光束与棱镜内部五次反射光束重合时，由于光强相当而产生干涉条纹(称自身干涉)，如图 6-34 所示。它的干涉图案是对称

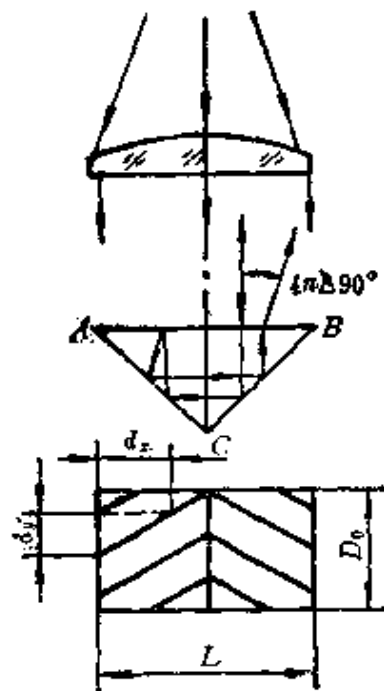


图 6-34 直角棱镜自身干涉

以条纹宽度 d_y 代入上式,得

$$\gamma_A = \frac{\lambda}{4 n d_y} \times 206\,265 (") \quad (6-37)$$

式中 m ——在平行棱线上的条纹数;

D_0 ——直角棱镜两侧面距离;

d_y ——与棱平行方向上的条纹的间距。

3) 长方体和立方体直角误差测量 长方体和立方体的直角误差测量方法,与直角棱镜的直角测量方法基本相同。

用激光平面干涉仪测量时,仪器的平行光束大致对准被测角的分角线(见图 6-35 a)。调整工件座和工作台,使长方体全反射象与标准平面的反射象重合以产生干涉条纹(见图 6-35 b),再在主截面内转动长方体,使干涉面积最大,这时光线的入射角 $i = 42^\circ 39'$ 。直角误差($\Delta 90^\circ$)为

$$\Delta 90^\circ = \frac{m \lambda}{2 n L} \times 206\,265 (") \quad (6-38)$$

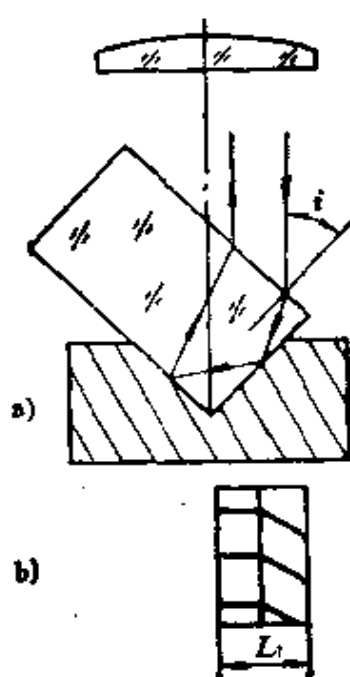


图 6-35

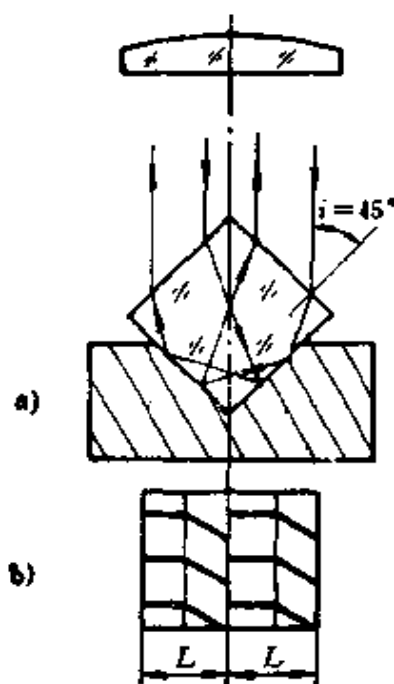


图 6-36

式中 m ——与 90° 棱垂直的条纹延长后截过斜条纹的数目;

λ ——激光波长(632.8 nm);

n —— 工件材料折射率；

L —— 干涉场宽度，取 $0.74a$ (a 为长方体窄边宽度)。

测量立方体时(见图 6-36 a)，主物镜平行光束按 $i=45^\circ$ 入射，这时可看到对称的四个干涉场(见图 6-36 b)。计算 90° 误差仍用式(6-38)，但式中的 L 取 $0.67a$ (a 为立方体边长)。

4) 三垂面棱镜的测量 三垂面棱镜(又称四面体棱镜)是由三个互成直角的反射平面和一个人射平面组成的三棱锥。它具有光线从底面入射经三个直角面反射后，出射光线沿着入射光线平行的方向出射的特点。

当光线垂直入射于底面时便产生全反射，反射面积为由 $DEFGHI$ 组成的正六边形，如图 6-37 所示。假如三垂面棱镜的三个 90° 都没有误差，则展开后相当于一个平行平板，入射光线与出射光线平行。如 90° 角有误差，则反射面展开后相当于六个光楔。

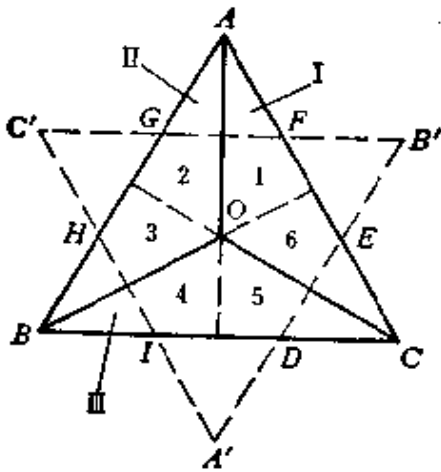


图 6-37

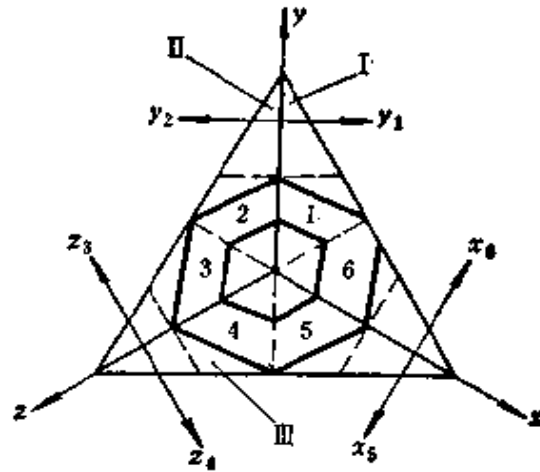


图 6-38

用激光平面干涉仪测量时，需调节工作台，使底面垂直于光轴，这时，平行光束的一部分由底面反射，另一部分射入棱镜内部并依次从三个 90° 面反射，再由底面向内反射，又经三个 90° 面仍由原入射区域出射。底表面的反射光束与内部七次反射光束相干便形成六组干涉图形(自身干涉)，如图 6-38 所示。此六区域中，1 与 4、2 与 5、3 与 6 区的干涉条纹是对称的。

三个 90° 误差计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta 90^\circ_{1,2} &= \sqrt{\frac{3}{128}} \frac{\lambda}{n} (m_{y1} + m_{y2}) \\ \Delta 90^\circ_{3,4} &= \sqrt{\frac{3}{128}} \frac{\lambda}{n} (m_{z3} + m_{z4}) \\ \Delta 90^\circ_{5,6} &= \sqrt{\frac{3}{128}} \frac{\lambda}{n} (m_{x5} + m_{x6}) \end{aligned} \right\} \quad (6-39)$$

当 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n = 1.5$ 时, 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta 90^\circ_{1,2} &= 13.32 (m_{y1} + m_{y2}) \\ \Delta 90^\circ_{3,4} &= 13.32 (m_{z3} + m_{z4}) \\ \Delta 90^\circ_{5,6} &= 13.32 (m_{x5} + m_{x6}) \end{aligned} \right\} \quad (6-40)$$

式中 m_{y1} 、 m_{y2} ——垂直于 1,2 区域公共棱线 y 轴方向 ($y_1 - y_2$) 上两区域内干涉条纹频率数, 即条纹间距的倒数 ($1/\text{mm}$)。

在计算干涉条纹频率数时, 相邻区域条纹在棱线共垂线的同侧, 则取两区域条纹频率数之和; 反之, 取频率数之差。

设入射光与经棱镜内部三次反射后出射的全反射光束 (实际使用光束) 的夹角各为 α_1 、 α_2 、 α_3 , $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 则

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2} N_1 \lambda = 65.3 N_1 (") \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2} N_2 \lambda = 65.3 N_2 (") \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2} N_3 \lambda = 65.3 N_3 (") \end{aligned} \right\} \quad (6-41)$$

式中 N_1 、 N_2 、 N_3 ——分别为 1、2、3 区域条纹频率数, 即垂直于条纹方向上条纹间距的倒数 ($1/\text{mm}$)。

令人射光与出射光的夹角 $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$, 则

$$\alpha = 2n \sqrt{\frac{8}{3}} \Delta 90^\circ \approx 5 \Delta 90^\circ \quad (6-42)$$

故 $\Delta 90^\circ \approx \alpha/5$

条纹间距 d 以下式计算:

$$d = \frac{1}{N} = \frac{65.3}{\alpha} \text{ (mm)} \quad (6-43)$$

式中 α ——入射光与出射光夹角(°)。

干涉条纹数 m 为

$$m = \frac{2L\alpha}{\lambda \times 206265} = 0.015L\alpha \text{ (条)} \quad (6-44)$$

式中 L ——干涉条纹区域长度(mm)。

四、角度测量

1. 直接测量法

直接测量法是利用精密测角仪进行的。

将被测棱镜置于载物台上, 尽量使被测角的角平分线通过转轴。调整载物台使被测角的两个表面反射回来的象处于自准直仪分划板的水平刻线上, 即开始读数。

a) 自准直望远镜固定不动, 而使度盘与载物台一起转动, 如图 6-39 所示。当自准直望远镜先后对准 AB 与 AC 面时, 从度盘上先后读得 θ_1 和 θ_2 , 即

$$\begin{aligned} \theta_2 - \theta_1 &= 180^\circ - \alpha \\ \alpha &= 180^\circ - (\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \quad (6-45)$$

b) 载物台固定不动, 而使度盘与自准直望远镜一起转动, 如图 6-40 所示。当自准直望远镜分别瞄准 AB 和 AC 面时, 读得 θ_1 和 θ_2 , 角度计算同式(6-45)。

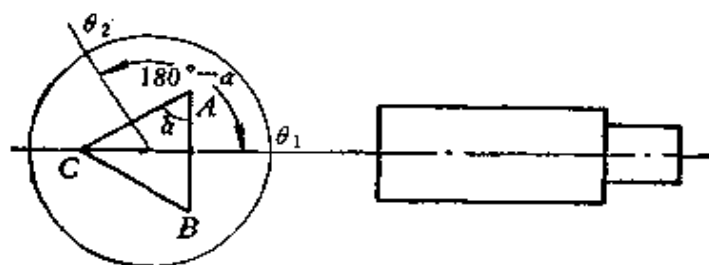


图 6-39

c) 自准直望远镜与平行光管构成一锐角, 并固定不动, 而使

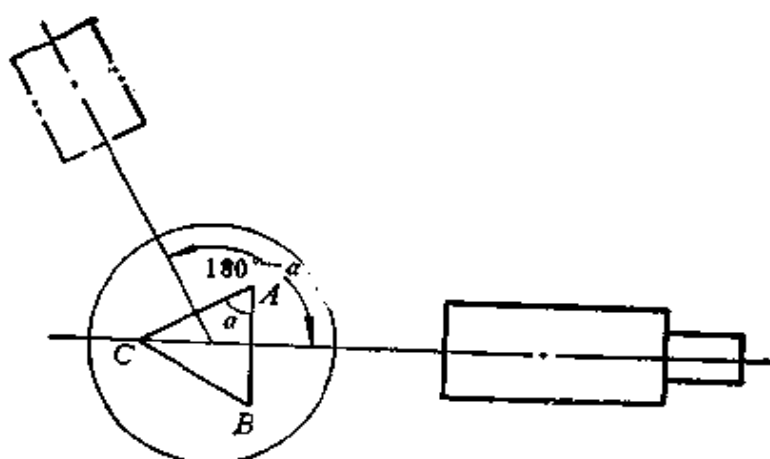


图 6-40

度盘和载物台一起转动，如图 6-41 所示。当从 AB 面和 AC 面上反射回来的平行光管十字线与望远镜分划板的十字线重合时，先后从度盘上读得 θ_1 和 θ_2 ，代入式(6-45)计算 α 角。

2. 比较测量法

比较测角的原理与本章第三节平行度测量中的比较法相同。当反射镜偏转 $\Delta\alpha$ 时，则反射光线改变 $2\Delta\alpha$ ，如图 6-42 所示。

测量时，调整自准直镜管，使从角度样板反射回来的自准象与分划板中心重合，再将被测件代替角度样板，此时反射象在分划板中心的偏心角值即为 $\Delta\alpha$ 值（因分划板格值缩小一半）。

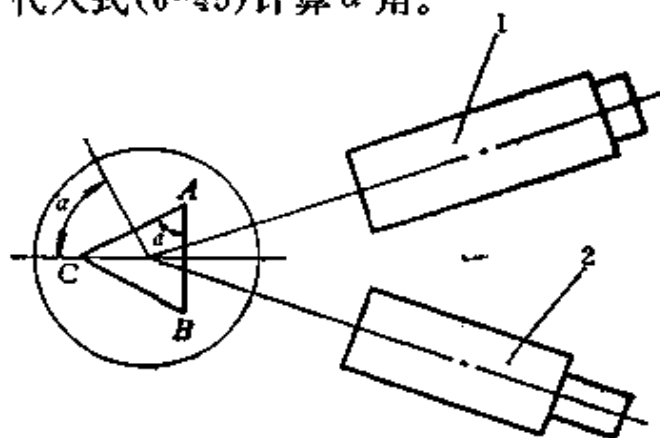


图 6-41

1—平行光管 2—自准直望远镜

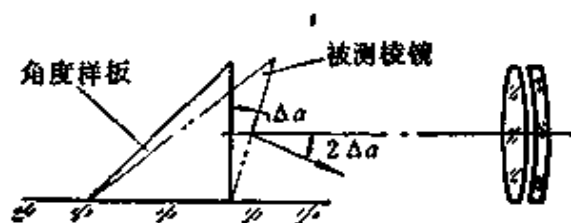


图 6-42

五、焦距测量

1. 放大率法

(1) 原理

被测透镜位于平行光管物镜前，平行光管物镜焦面上的分划板的一对刻线(间距为 y)成象在被测透镜焦面上(间距为 y')，如图 6-43 所示。令平行光管焦距为 f_0 ，则被测透镜焦距 f' 按下式计算：

$$f' = f_0 \frac{y'}{y} \quad (6-46)$$

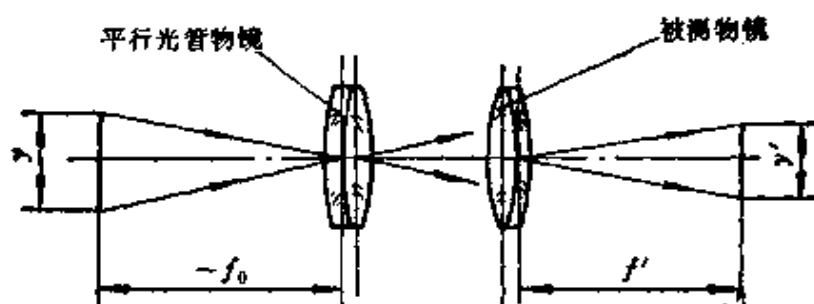


图 6-43

式中， y 和 f_0 为已知数， y' 由带测微目镜的显微镜测得。设显微镜物镜象面上的刻线象间距为 y'' ，则

$$y'' = \beta y'$$

式中 β —— 显微物镜的垂直放大率。

将 y'' 代入式(6-46)得

$$f' = f_0 \frac{y''}{\beta y} \quad (6-47)$$

上式中 f_0 、 β 、 y 等值对每台焦距仪是固定的常数，用显微镜的目镜测微器测出 y'' 即可求得 f' 。

$$f' = -f_0 \frac{y''}{y} \quad (6-48)$$

测量负透镜的焦距如图 6-44 所示。

由于负透镜成虚象，用显微镜观测这个象时，显微镜的工作

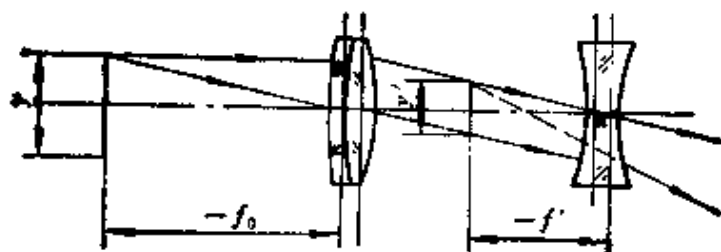


图 6-44

距离必须大于透镜的焦距。

(2) 测量方法

测量是在焦距仪上进行的。焦距仪形状如图 6-45 所示。

国产焦距仪的技术数据如下：

平行光管焦距 550 mm

平行光管分划板的三对刻线间距

$$y_1 = 13.75 \text{ mm}$$

$$y_2 = 5.5 \text{ mm}$$

$$y_3 = 2.75 \text{ mm}$$

显微物镜放大率 $5\times$ 、 $1\times$ 、 $0.5\times$

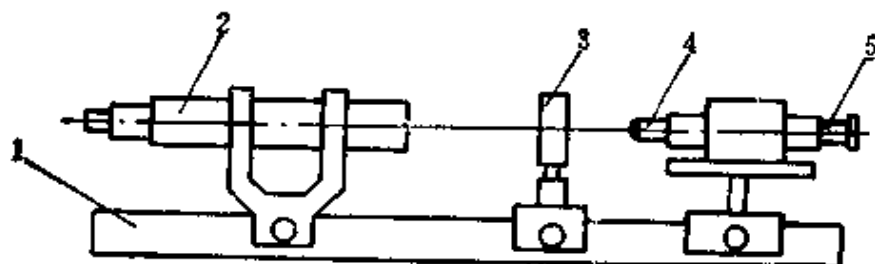


图 6-45 焦距仪

1—导轨 2—平行光管 3—透镜夹持器 4—测量显微镜 5—测微目镜

测量时,转动测微目镜的测微手轮,对准选定的一对刻线(见

图6-46)象的左边一条线读数(D_1),再对准右边一条线读数(D_2)。两次读数之差 $D = D_2 - D_1$ 表示测微手轮旋转的圈数。由于目镜测微螺杆的螺距为0.25 mm,故

$$Y'' = 0.25 D$$

$$f' = \frac{f'_0 D}{4\beta y}$$

式中 $\frac{f'_0}{4\beta y}$ 为仪器常数,以 C_0 表示,则

$$f' = C_0 D \quad (6-49)$$

国产焦距仪的 C_0 值见表6-4。

2. 附加透镜法

本方法主要用于测量负透镜的焦距。

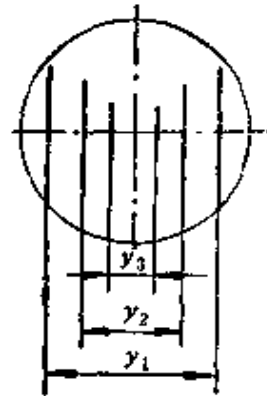


图 6-46

将被测负透镜与一个焦距较长的正透镜组成一个伽利略望远

表 6-4

显微镜放大率 β	仪器常数 C_0		
	$Y = 13.75$	$Y = 5.5$	$Y = 2.75$
0.5 ×	20	50	100
1 ×	10	25	50
5 ×	2	5	10

镜系统(见图6-47)。轴向移动负透镜,使从望远镜的分划板上呈现清晰而无视差的平行光管分划板的刻线象时,用望远镜的测微目镜测出其中一对刻线象的间距 y'_1 ; 取下正、负透镜,再测得同一对刻线象的间距 y'_2 , 则负透镜的焦距为

$$f_1' = \frac{-f_2' y_2'}{y_1'} \quad (6-50)$$

式中 f_2' ——附加正透镜的焦距($f_2' > f_1$), 可事先测定。

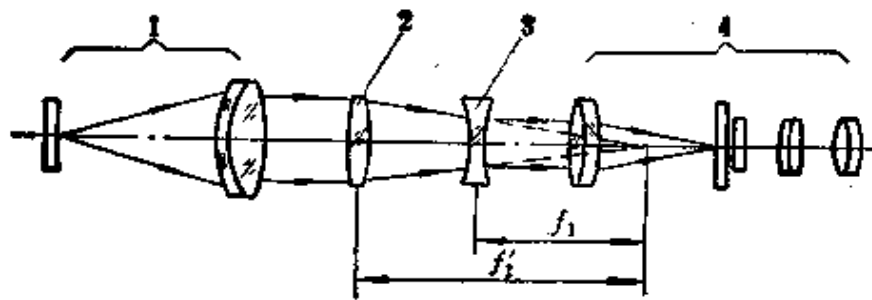


图 6-47

1—平行光管 2—正透镜 3—负透镜 4—望远镜

六、象质检验

1. 分辨率测量

光学零件的分辨率就是能分辨物体细节的本领，以物面上刚能分辨的两点对入瞳中心的张角 α 表示。

(1) 分辨率图案

在实际测量中，目前广泛采用 WT 1005—62 规定的分辨率图

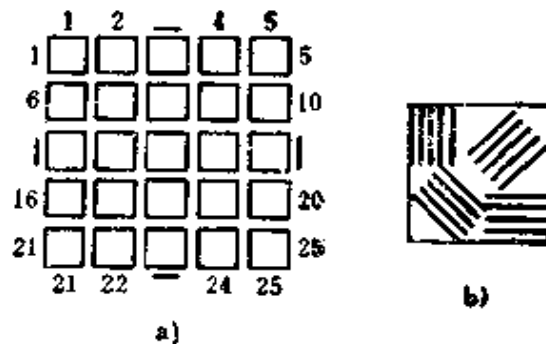


图 6-48

a) 分辨率板上的25单元 b) 每单元上的图案

表 6-5

分辨率图案参数		平行光管焦距为下列数值时的角间距($^{\circ}$)				
单元号与板号	线条宽度 $b(\mu\text{m})$	空间频率 N_0 (线对/mm)	1 000 (mm)	1 600 (mm)	2 500 (mm)	3 000 (mm)
25	2.50	200	1.03	0.64	0.41	0.34
24	2.65	189	1.09	0.67	0.43	0.36
23	2.81	178	1.16	0.72	0.46	0.38
22	2.97	168	1.23	0.77	0.50	0.41
21	3.15	159	1.30	0.80	0.51	0.43
20	3.34	150	1.38	0.85	0.54	0.45
19	3.54	141	1.46	0.90	0.58	0.48
18	3.75	133	1.55	0.95	0.61	0.51
17	3.97	126	1.64	1.03	0.66	0.55
16	4.20	119	1.73	1.08	0.69	0.58
15	4.45	112	1.84	1.16	0.74	0.62
14	4.72	106	1.95	1.21	0.78	0.65
13	5.00	100	2.06	1.29	0.82	0.69
12	5.30	94.4	2.19	1.37	0.88	0.73
11	5.61	89.1	2.32	1.44	0.92	0.77
10	5.95	84.1	2.45	1.52	0.97	0.81
9	6.30	79.4	2.60	1.62	1.04	0.87

(续)

分辨率图案参数			平行光管焦距为下列数值时的角间距($^{\circ}$)				
单元号与板号	线条宽度 $b(\mu\text{m})$	空间频率 N_0 (线对/mm)	1000 (mm)	1600 (mm)	2500 (mm)	3000 (mm)	
22	23.8	21.0	9.81	6.14	3.93	3.27	
21	25.2	19.8	10.4	6.50	4.16	3.46	
20	26.7	18.7	11.0	6.88	4.41	3.67	
19	28.3	17.7	11.7	7.30	4.67	3.90	
18	30.0	16.7	12.4	7.73	4.95	4.12	
17	31.7	15.7	13.1	8.17	5.23	4.36	
16	33.6	14.9	13.9	8.66	5.55	4.62	
15	35.6	14.0	14.7	9.18	5.88	4.90	
14	37.8	13.2	15.6	9.75	6.24	5.20	
13	40.0	12.5	16.5	10.31	6.60	5.50	
12	42.4	11.8	17.5	10.93	7.00	5.83	
11	44.9	11.1	18.5	11.58	7.41	6.17	
10	47.6	10.5	19.6	12.27	7.86	6.54	
9	50.4	9.92	20.8	12.99	8.32	6.93	
8	53.4	9.36	22.0	13.77	8.82	7.34	
7	56.6	8.84	23.3	14.59	9.34	7.78	
6	59.9	8.34	24.7	15.44	9.89	8.24	

63.5	7.87	26.2	13.37	10.48	8.73
67.3	7.43	27.8	17.35	11.11	9.25
71.3	7.02	29.4	18.38	11.77	9.80
75.5	6.62	31.1	19.47	12.47	10.38
80.0	6.25	33.0	20.63	13.21	11.00
84.8	5.90	35.0	21.86	14.00	11.66
89.8	5.57	37.0	23.15	14.83	12.35
95.1	5.26	39.2	24.54	15.72	13.09
101	4.96	41.6	25.99	16.64	13.86
107	4.68	44.1	27.54	17.63	14.69
113	4.42	46.7	29.19	18.69	15.57
120	4.17	49.4	30.89	19.78	16.47
127	3.94	52.4	32.74	20.97	17.46
135	3.72	55.5	34.70	22.22	18.51
143	3.51	58.8	36.77	23.54	19.61
151	3.31	62.3	38.93	24.93	20.76
160	3.13	66.0	41.25	26.42	22.00

5	17
4	16
3	15
2	14
1	13
N_4	
	12
	11
	10
	9
	8
	7
	6
	5
	4
	3
	2
	1
N_6	

案所成的象来判别分辨率。图案由 25 个单元组成(见图 6-48 a), 每个单元由四个方向的条纹组成(见图 6-48 b)。线条宽度由第 1 到第 25 单元按公比为 $1/\sqrt[2]{2} \approx 0.9438$ 的等比级数递减排列。分辨率板按 2 倍公比共缩放五块。各线条的有关数值见表 6-5。

分辨率图案各单元相邻线条的角距 α 按下式计算:

$$\alpha = \frac{2b}{f'} \times 206265 (") \quad (6-51)$$

式中 b ——线条宽度(mm);

f' ——平行光管焦距(mm)。

(2) 透镜分辨率测量

测量原理如图 6-49 所示。分辨率板经平行光管物镜和被测透镜成像后用显微镜观察。确定分辨率的方法是先由线条较粗的单元逐渐向线条较细的单元观察, 直到某一单元在四个方向上线条刚能分辨清时为止。根据所用分辨率板号和单元号以及平行光管物镜焦距, 在表 6-5 中查得。

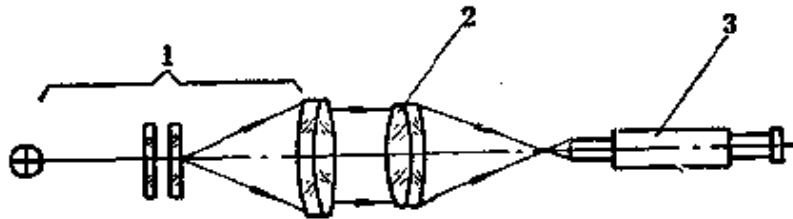


图 6-49

1—平行光管 2—被测透镜 3—显微镜

(3) 平面零件分辨率的测量

平面零件(平板玻璃、棱镜等)分辨率的测量装置由平行光管和望远镜组成。确定分辨率的方法与透镜测量相同。

(4) 用分辨率图案检验象质

根据分辨率板的成象情况，可以判断光学零件成象质量。常见的象质缺陷及原因见表6-6。

表 6-6

缺 陷	原 因
四个方向的线条不能同时分清	象 散
亮线条边缘有单向光晕	慧 差
亮线条边上带有彩色	色 差
分辨率图案象调不清晰，亮暗线条衬度不好	球 差

2. 星点检验

星点检验是根据点光源经被测件所成的星点衍射象的形状及亮度分布情况来定性评价零件的象质的。

一个点光源(星点)经过被检零件所成的象，是具有一定尺寸的衍射圆斑，在中心亮斑周围包围着亮度迅速减弱的同心环(称艾利圆斑)。但实际的光学件，由于设计，材料、加工等缺陷，星点的衍射图形与理想图形比较有些变化。根据这一变化可估计零件的缺陷。

星点检验和分辨率检验通常在同一台测试装置上进行，只要将平行光管的分辨率板换成星点板即可。

(1) 星点直径的选择

星点直径过大，不产生衍射现象；星点过小，则亮度太弱，不便于观察。一般星点直径 d 应不大于星点有效光束孔径所对应的衍射象的中央亮斑半径 R ，即

$$\begin{aligned}
 d \leq R &= \frac{0.61 \lambda}{n' \sin U'_{\max}} \\
 &= \frac{1.22 \lambda f'_0}{n'_0 D_0}
 \end{aligned} \tag{6-52}$$

式中 λ ——星点发射光波长(白光 $\lambda = 0.56 \mu\text{m}$)；

- n' ——象空间介质折射率(空气 $n' = 1$)；
 U'_{\max} ——被检零件象方半孔径角；
 f'_0 ——平行光管焦距；
 D_0 ——被检透镜通光孔径。

当 $n' = 1$ ， $\lambda = 0.00056$ mm代入上式，得

$$d \leq \frac{0.0007 f'_0}{D_0} \quad (\text{mm}) \quad (6-53)$$

(2) 显微镜物镜的选择

为保证经被检物镜折射后的光束全部进入观察显微镜，显微镜物镜的物方孔径角 $2U_{\max}$ 应等于或大于被检物镜的象方孔径角 $2U'_{\max}$ (见图6-50)。为此，根据被检物镜的相对孔径 D/f' 选取显微镜物镜的数值孔径 NA (见表6-7)。

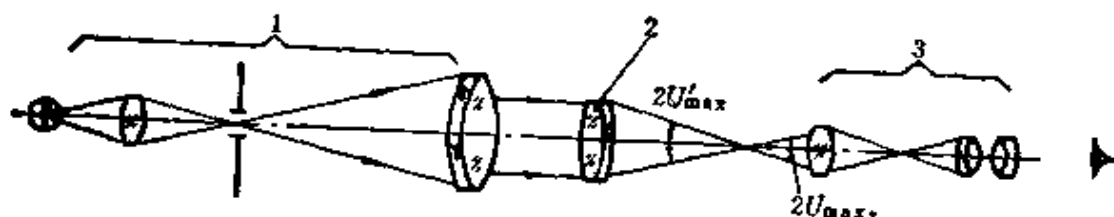


图 6-50

1—平行光管 2—被检透镜 3—显微镜

表 6-7

被检物镜的相对孔径 D/f'	显微镜物镜的数值孔径 NA
$< \frac{1}{5}$	0.1
$\frac{1}{2.5} \sim \frac{1}{5}$	0.25
$\frac{1}{1.2} \sim \frac{1}{2.5}$	0.40
$\frac{1}{0.8} \sim \frac{1}{1.2}$	0.65

(3) 显微镜总放大率的选择

显微镜总放大率的选择，应以人眼能分辨第一和第二衍射亮

环为准，经放大后两衍射亮环间距对人眼张角为 $3'$ 计算，显微镜总放大率为

$$\Gamma \geq 380 \frac{D_0}{f'} \quad (6-54)$$

式中 D_0 ——被测件透光孔径；

f' ——被测件焦距。

当被测件是玻璃平板或棱镜时，以望远镜代替显微镜进行观测。这时，望远镜的放大率为

$$\Gamma \geq 1.5 D_0 \quad (6-55)$$

(4) 星点象的判别

被测件若没有象差时，在焦点上，中心圆斑最亮，还能看到第一衍射亮环，而且在焦点前后对称截面上，衍射图形完全相同。

1) 球差星点图 衍射图形为同心圆环，但中心亮斑变暗，衍射环亮度增大，而且焦点前后对称截面上的衍射图形不相同。

2) 彗差星点图 当彗差较小时，星点象中心亮斑对衍射环产生偏心，衍射环的粗细、亮度不均匀。当彗差较大时，星点象呈现彗星状，即有一明亮的头部和一个延伸的尾巴，并在焦点前后观察，头部指向不变，且形状都相似。造成彗差的主要原因是透镜的偏心。

3) 象散星点图 焦点处星点象呈十字形，在焦点前后截面上椭圆的长轴互相垂直。造成象散的主要原因是面形变形和有较大的偏心。

4) 其他缺陷星点图 当玻璃材料中存在条纹、结石时，星点衍射象为不规则图案。

参 考 文 献

1. 光学零件工艺手册编写组编. 光学零件工艺手册. 北京: 国防工业出版社, 1977.
2. 荆工, 史尔编. 应用光学. 北京: 国防工业出版社, 1973.
3. 母国光, 李若璠编. 普通物理学(光学部分). 沈寿春校. 北京: 高等教育出版社, 1965.
4. 田志伟编著. 偏振光及其应用. 2版. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
5. WJ 277-65. 有色光学玻璃. 1965年12月.
6. H.E. 亚力山大洛夫著. 加工光学零件用的工具与夹具的计算. 林毓桃译, 胡继先校. 北京: 机械工业出版社, 1959.
7. 光学冷加工经验交流会资料汇编小组编. 光学零件加工经验汇编. 北京: 机械工业出版社, 1968.
8. 赵正旭编著. 半导体晶体的定向切割. 北京: 科学出版社, 1979.
9. 光学测量与仪器编辑组编. 光学测量与仪器. 北京: 国防工业出版社, 1978.
10. 查立豫. 平面光学零件加工中的相对线速度分布. 仪器制造, 1983(3).
11. 北京工业学院光学测量小组编. 光学测量与象质鉴定. 1980, 9.
12. 陈进榜编. 棱镜透镜干涉仪. 1982, 9.