

(增订本)



# 光学零件制造

冷加工部分

吕茂钰 编著

机械工业出版社

# 光 学 零 件 制 造

冷 加 工 部 分

(增 订 本)

吕 茂 钰 编 著

机 械 工 业 出 版 社

本书以介绍光学零件的冷加工工艺，即开料、粗磨、上盘、抛光、定心磨边、金刚石微粉细磨等的实际操作方法及机床的结构、使用和保养为主，同时介绍了各种辅助材料、模具、常用仪器、样板制造以及非球面等的加工方法。

本书可供从事光学零件加工的工人阅读，有关技术人员亦可参考。

## 光 学 零 件 制 造

### 冷 加 工 部 分

(增订本)

吕 茂 钰 编 著

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 11 插页 1·字数 238 千字

1974 年 12 月第一版

1977 年 5 月北京第二版·1979 年 5 月北京第三次印刷

印数 29,001—43,000 定价 0.77 元

\*

统一书号：15033·4233

## 前 言

为适应实现四个现代化的需要，配合青年工人的技术学习，特编写了本书。书中较详细地介绍了工作中常用的材料和辅料知识；模具的设计；常用仪器的构造原理和使用方法，并重点地介绍了各道工序的具体操作技术、影响加工的工艺因素及各种有代表性的加工机床的构造原理和使用方法。书末还附有工作中常用的部分数据和资料。

本书在内容的安排上，各章均从生产实践出发，力求理论联系实际，更好地为生产实践服务。

在本书的编写过程中，曾得到了有关单位的大力协助，对此致以深切的谢意！

由于本人水平有限，书中难免有缺点和错误之处，热诚欢迎读者批评指正。

编 者

## 增 订 说 明

金刚石微粉细磨（又称高速精磨）是近年来在光学冷加工方面出现的一种新工艺，它比散粒磨料细磨有较高的效率和质量，并显著地缩短抛光时间，因此，受到大家的重视，正在逐步应用于生产。为了满足读者了解这一新工艺的要求，增加了金刚石微粉细磨这一章，从磨削机理、磨具、机床、工艺因素的讨论等几方面作一介绍。

另外，对于原有的柱面镜一节，作了较多的补充，系统地介绍了柱面镜的加工方法。

在编写过程中，得到了甘肃光学仪器厂等有关单位的大力协助，特此致以深切的谢意。

由于水平所限，加之金刚石微粉细磨又是一个新工艺，对它的认识还很肤浅，因此，文中一定存在各种缺点和错误，热忱地欢迎批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

第一章 材料和辅料 .....	1
一、光学玻璃 .....	1
二、光学晶体 .....	5
三、磨料 .....	9
1 磨料的一般特性(9)——2 磨料的分级(10)——3 磨料粒度的 检验(12)——4 磨料的回收(12)	
四、抛光粉 .....	12
五、粘结胶和抛光胶 .....	15
1 原料(15)——2 粘结胶(17)——3 抛光胶(17)	
六、擦拭材料 .....	18
1 擦布(18)——2 棉花(18)——3 有机溶剂(19)	
第二章 模具 .....	20
一、平模 .....	20
二、球模 .....	28
1 粘结模(28)——2 研磨模(42)——3 抛光模(51)——4 球 模结构(53)	
三、夹模 .....	54
第三章 常用仪器 .....	55
一、比较测角仪 .....	55
二、球径仪 .....	64
三、刀口仪 .....	70
四、干涉仪 .....	79
1 干涉条纹的产生和识别(79)——2 平面等厚干涉仪(88)—— 3 棱镜、透镜干涉仪(91)	
第四章 光学零件冷加工工艺 .....	101

一、开料 .....	101
二、粗磨 .....	102
1 影响粗磨的因素(103)——2 磨外圆(111)——3 钻孔(114)	
——4 磨球面(116)——5 铣磨机(119)——6 磨平面(146)	
三、上盘 .....	148
1 球面弹性胶法(148)——2 球面刚性胶法(150)——3 平行平面的上盘(151)——4 棱镜的上盘(153)——5 光胶法上盘(156)	
四、细磨 .....	158
1 影响细磨的因素(159)——2 细磨抛光机(165)——3 球面细磨(171)——4 平面细磨(173)——5 棱镜手修(174)	
五、抛光 .....	176
1 影响抛光效率的因素(176)——2 抛光胶的选择(179)——3 抛光模的制作(179)——4 光圈的修改(181)——5 影响表面光洁度的因素(186)——6 下盘(187)——7 清洗(188)——8 光洁度的检验(189)——9 手抛光(191)	
六、高速抛光 .....	192
1 高速抛光机(192)——2 高速抛光胶(198)——3 影响抛光质量和效率的某些因素(200)	
七、定心和磨边 .....	201
1 透镜定心的方法(202)——2 机械定心磨边机(205)——3 Q853型透镜定心磨边机(217)	
八、透镜制造过程图示 .....	221
九、棱镜制造过程图示 .....	229
第五章 玻璃样板制造 .....	244
一、球面样板 .....	244
二、平面样板 .....	251
第六章 非球面和晶体加工 .....	253
一、非球面加工 .....	253
1 二次曲线(253)——2 曲线样板(255)——3 最接近比较球面、最大非球面度的确定(257)——4 非球面的加工方法(259)——5 抛光模(262)——6 检验(263)——7 柱面镜(266)	

二、晶体加工 .....	279
1 晶体的定向(279)——2 晶体的加工(283)	
第七章 金刚石微粉细磨 .....	288
一、磨削机理 .....	288
二、磨具 .....	290
1 细磨片(290)——2 基体(291)——3 细磨片的覆盖比(291)——4 细磨片的排列(292)——5 细磨片的粘结(292)——6 磨具曲率修正 (293)	
三、机床 .....	293
四、几个工艺因素的讨论 .....	295
1 冷却液(295)——2 速度和压力对磨削量的影响 (296)——3 金刚石粒度对磨削量和光洁度的影响(297)——4 玻璃材料的影响(297)	
附录 .....	298
一、磨料代号、粒度组成及测定方法 .....	298
二、磨料粒度与磨料层厚度 .....	303
三、W40以下磨料新旧标号对照 .....	304
四、擦布脱脂 .....	304
五、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 .....	305
六、根据表面微观几何形状决定的表面光洁度 .....	306
七、光学零件表面疵病 .....	307
八、光学零件的倒角 .....	314
九、光学样板 .....	316
十、反射棱镜的光学平行差 .....	322
十一、光学制图 .....	327
十二、自准显微镜轴向位置计算 .....	333
十三、统一公制计量单位中文名称 .....	336
十四、三角函数表 .....	338



# 第一章 材料和辅料

## 一、光学玻璃

光学玻璃是光学零件冷加工的主要对象，它与一般玻璃一样，在固体中属于非晶体一类，是各向同性的，即在不同的方向其性质（如折射率、硬度、导热性等等）是相同的。光学玻璃内部的结晶现象是玻璃的严重缺陷，它会破坏玻璃的各向同性。用这样的玻璃制造的镜头会使成象质量严重下降，甚至无法使用。

玻璃经受急剧的温度变化而不破裂的性能称玻璃的热稳定性。它与玻璃的热膨胀系数、弹性、抗张强度、导热性、热容量等有关，其中热膨胀系数对玻璃的热稳定性影响最大。如热膨胀系数较小的石英玻璃（ $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}$ ）的热稳定性很好，甚至把它加热到赤热状态后立即投入冷水中也不致破裂。但是大多数光学玻璃对经受骤冷骤热的性能都比较差，特别是局部的骤冷骤热最易使玻璃破裂。局部的骤冷比局部的骤热破裂的可能性又要大些。这是由于当玻璃在破裂时，其外层应力起决定性作用。玻璃受热时，其表面产生压应力；冷却时，表面产生张应力，而玻璃的耐压强度比其抗张强度要大10多倍。这就是玻璃骤冷比骤热更易破裂的原因。

水、二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）、酸、碱等化学物质与玻璃均能起作用，使已抛光好的表面逐渐变质，如生雾生霉等现象，特别是那些化学稳定性较差的磷冕（PK）、重冕（ZK）、重火石

(ZF)、重钡火石(ZBaF)等更为显著。另外，不洁净的抛光面要比洁净的抛光面容易变质得多，因此，加工好一个抛光面后继续加工下一个面时，要对已加工好的抛光面涂中性保护漆，涂漆前抛光面要擦净和干燥。加工完毕的光学零件切忌用油污的手指触及抛光面。

各种不同牌号光学玻璃的硬度是与K9玻璃的硬度（K9的莫氏硬度约为6）相比较而定的，即所谓相对研磨硬度。相对研磨硬度是根据比较玻璃与K9玻璃在相同研磨条件下磨去的不同玻璃量而定的。一般说来，火石玻璃的硬度要比冕玻璃小些。

对于可见光来说，光学玻璃具有较好的透过率，吸收系数约为0.4~1.5%。

光线在玻璃中的速度要比在空气中慢约三分之一。如光在空气中的速度为每秒三十万公里，在玻璃中的速度约为每秒二十万公里，二者的速度之比值称折射率。折射率是光学玻璃的一个十分重要的光学常数，它要求很高的准确度，一般都测定到小数以后第四位至第五位。不同颜色（即不同波长）的光的折射率是不同的。通常讲的折射率是指黄光（波长 =  $5893 \text{ \AA}$  ●）的折射率，用符号  $n_D$  表示（ $n$  代表折射率， $D$  表示黄色）。

玻璃对于不同颜色的光的折射能力，即色散能力，是用另外一些光学常数如中部色散、色散系数、部分色散和相对色散来表示的。

光学仪器还要求光学玻璃具有高度的均匀性，即玻璃的折射率不仅与规定的数值只能有极微小的差别，而且在整块玻璃中应该是均匀的。

●  $1 \text{ \AA}$  (读作埃) =  $10^{-1}$  毫微米 =  $10^{-4}$  微米 =  $10^{-7}$  毫米 =  $10^{-8}$  厘米。

在玻璃内还不应该有内应力。因为内应力的存在会破坏玻璃的各向同性，产生双折射。玻璃在加工过程中由于急剧的温度变化会产生内应力。因此，在加工过程中应该避免升温过高和温度剧变。

玻璃中的条纹、气泡、结石等都会给仪器的成象质量带来影响，因此都不许超过一定的大小和数量。

除少数玻璃（如由透明无色的水晶熔化制得的透明石英玻璃）以外，大多数玻璃都是由多种氧化物组成。光学玻璃的组成较普通玻璃更为复杂。表 1-1 列出了几种光学玻璃的大致成分和主要光学常数。

由表看出，冕玻璃的二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 含量比较高，钡冕玻璃的氧化钡 ( $\text{BaO}$ ) 含量较高，而重冕玻璃的氧化钡 ( $\text{BaO}$ ) 含量更高，钡火石玻璃的特点是既含有一定数量的氧化钡 ( $\text{BaO}$ ) 又含有较大量的氧化铅 ( $\text{PbO}$ )，重火石玻璃的氧化铅含量则更大。

由于氧化物含量不同，它们的光学常数也就不同。冕玻璃的折射率和中部色散较小，而色散系数 ( $\nu$ ) 较大；火石玻璃的折射率和中部色散较大而色散系数较小。光学玻璃就是根据折射率、中部色散等光学常数进行分类的。共分为冕玻璃 (K) 和火石玻璃 (F) 两大类。每类又分为轻冕 (QK, Q 代表轻的意思)、磷冕 (PK, P 代表含磷，下面 Ba、La 等意义相同)。钡冕 (BaK)、重冕 (ZK, Z 代表重)、镧冕 (LaK)、冕火石 (KF)、轻火石 (QF)、钡火石 (BaF)、重钡火石 (ZBaF)、重火石 (ZF) 和特重火石 (TZF) 等。每一种又根据光学常数的不同，分别用数字加以区别如 K9、F2 等等。

在玻璃中加入某些氧化物或元素还能使玻璃具有特定的颜色。如钠-钙-硅系玻璃含有三氧化二锰 ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ) 则玻璃

表1-1. 光学玻璃的成分和常数

玻璃种类	成分										光学常数			
	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	BaO	PbO	ZnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	n <sub>D</sub>	(n <sub>F</sub> -n <sub>C</sub> ) × 10 <sup>5</sup>	v
	冕牌玻璃	72.00	8.15	0.20	—	1.55	0.45	—	—	—	7.20	10.45	1.5100	805
钡冕牌玻璃	49.55	4.80	0.20	—	—	—	21.55	2.6	12.50	1.25	7.55	1.5688	1015	56.0
重冕牌玻璃	32.70	13.20	1.60	3.15	—	—	45.90	—	3.50	—	—	1.6128	1046	58.6
钡火石玻璃	41.85	—	0.20	—	—	—	11.55	33.40	5.25	—	8.25	1.6259	1601	39.1
轻火石玻璃	61.00	—	0.20	—	—	—	—	26.30	—	4.50	8.00	1.5480	1195	45.9
火石玻璃	47.00	—	0.25	—	—	—	—	46.40	—	—	6.35	1.6169	1691	36.5
重火石玻璃	31.60	—	0.20	—	—	—	—	65.35	—	—	2.85	1.7550	2743	27.5

呈紫色、含有氧化铬 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 呈黄绿色、含有氧化铁 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 呈黄色、含有氧化亚铁 ( $\text{FeO}$ ) 呈蓝绿色、含有金(Au)或铜(Cu)则呈红宝石色。

有色光学玻璃根据透过的颜色(波长)分为透紫外(ZWB)、透红外(HWB)、紫色(ZB)、蓝色或青色(QB)、绿色(LB)黄色或金色(JB)、橙色(CB)、红色(HB)、防护(FB)、中性(AB)、透紫外白色(BB)等。

一般无色光学玻璃,当经过 $\gamma$ 射线一类放射线照射后会变色或失去透明度。耐辐射光学玻璃,就是能承受一定剂量的放射线而保持它的光学常数符合光学玻璃的要求。其代号是在原有无色光学玻璃牌号的基础上,在代号后面的数字前加上一个耐辐射能力的代号。如K9改成K509,它的光学常数仍保持原来K9的各项。

## 二、光学晶体

光学晶体主要用在光谱的不可见部分(紫外和红外)。如常见的石英晶体( $\text{SiO}_2$ )对于波长为2000~4000埃的紫外光和20000~40000埃的红外光都有较好的透过性能;萤石( $\text{CaF}_2$ )则在1300~2000埃和30000~100000埃有较好的透过性能;氟化锂( $\text{LiF}$ )在紫外部分透过的波长更短(1100~2000埃);溴化钾则对远红外(100000~250000埃)有良好的透过特性。单晶硅、锗等能透过的波更长。有些晶体还可作反射滤光片,它对光线具有选择性的反射。红宝石则是固体激光的常用材料。

晶体最普遍而直观的特征是具有规则的多面体外形。组成晶体多面体的面称晶面,两晶面的交线称晶棱,三个以上晶面的交点称结点。在自然界中,由于生长过程中外界条件

的影响，晶体往往不能生长成很规则的特有的多面体形状。图1-1 a 是典型石英晶体形状，b 是天然石英晶体形状。

晶体生长过程中规则的多面体外形与它的内部结构有关系。例如在石英晶体内，硅 (Si) 和氧 (O) 的排列很有规律 (如图1-2 a)，但在石英玻璃内，它们排列的规律性就较差 (如图1-2 b)。

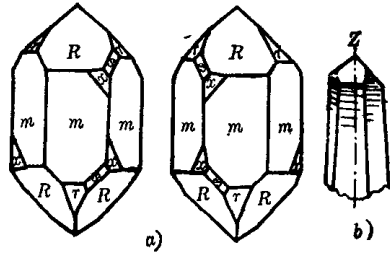


图1-1 石英晶体

晶体质点 (原子、离子、分子等) 排列得都很有规律的整块晶体称单晶体，是制造光学零件的主要晶体。单晶体是各向异性的，即在不同的方向其性质 (如折射率、硬度、导热性、电阻率等等) 是各不相同的。例如当光线沿着过冰洲石晶体的三面钝角 (近似 $102^\circ$ ) 会合的顶点并和三个面成等角的直线方向传播时，它象在玻璃里传播一样。而当沿其他方向传播时，能把光线分成两条，且两条光线具有不同的传播速度 (如图1-3)，这种现象称双折射。那个不产生双折射的方向称冰洲石的光轴。晶体的光轴是指一个方向，如图1-4中，凡是与 AB 平行的方向均是光轴。它不同于几何光学中光轴的概念，例如透镜的一条光轴是通过两个

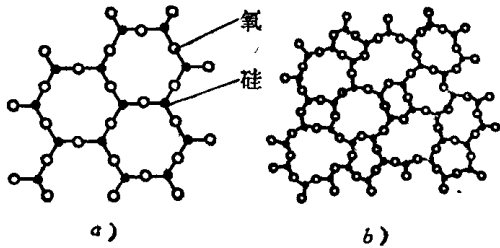


图1-2 晶体和玻璃的内部结构  
a—石英晶体； b—石英玻璃

面成等角的直线方向传播时，它象在玻璃里传播一样。而当沿其他方向传播时，能把光线分成两条，且两条光线具有不同的传播速度 (如图1-3)，这种现象称双折射。那个不产生双折射的方向称冰洲石的光轴。晶体的光轴是指一个方向，如图1-4中，凡是与 AB 平行的方向均是光轴。它不同于几何光学中光轴的概念，例如透镜的一条光轴是通过两个

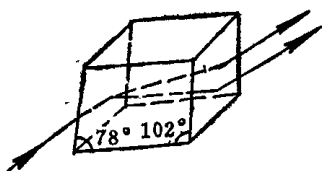


图1-3 冰洲石晶体的双折射

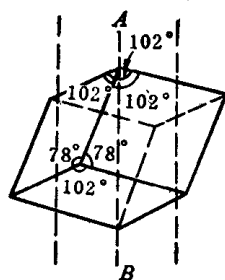


图1-4 冰洲石的光轴

球面的球心的连线，而平行于这连线的其他线条均不是光轴。

表 1-2 是石英晶体在平行于光轴（Z 轴）和垂直于光轴的两个方向的不同特性。

表1-2 石英晶体的特性

方 向	热膨胀系数	电阻率(欧姆·厘米)	折射率 $\lambda = 5890(\text{埃})$
平行于光轴	$7.97 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{14}$	1.553
垂直于光轴	$13.37 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{16}$	1.554

晶体的各向异性还表现在它的解理性方面。晶体在外力的作用下，沿一定方向破裂成光滑平面的能力称解理。裂开的平面就是解理面。根据晶体解理能力的不同，分为极完全解理、完全解理、中等解理、不完全解理、极不完全解理等。例如云母能分裂成极薄的薄片，解理面平滑，属于极完全解理；冰洲石在破裂时主要按解理方向发生，解理面平滑，属于完全解理；石英晶体属于极不完全解理（实际上没有解理）。

由于晶体是各向异性的，因此就需要将它的每一部分标出方向。根据晶体的构造，利用适当的空间座标，就能把晶

体各个不同部分的方向表示出来。

用来确定晶体上不同位置的座标轴称晶轴。通常晶体的晶轴平行于晶棱，且相交于一点。确定晶轴的数量与晶体所属晶系有关，如属三方晶系的低温石英( $\alpha$ 石英)、冰洲石和属六方晶系的高温石英( $\beta$ 石英)等均选四个晶轴，I轴(X轴)、II轴(Y轴)、III轴(U轴)在同一平面内，IV轴(Z轴)垂直于前三轴。其他晶系常选三个轴，I轴(X轴)、II轴(Y轴)在同一平面内，III轴(Z轴)垂直于前两轴。所有的晶轴都是一端为正向，另一端为负向。

晶面的方向利用它在晶轴上的截距的倒数比，化成整数后表示，用单位晶胞相当的边长作为量度截距的单位。例如晶胞为立方体，它的边长便作为对每个座标轴的量度单位。如图1-5所示单位立方体，结晶面CBGF用它在晶轴上的截距来表示就是(100)，结晶面DBG E就是(110)，结晶面AEG就是(111)。括号内的这些数字称晶面指数(又称密勒指数)，分别读为1、0、0；1、1、0；1、1、1，不能读作一百；一百一十；一百一十一。晶面指数是表示晶

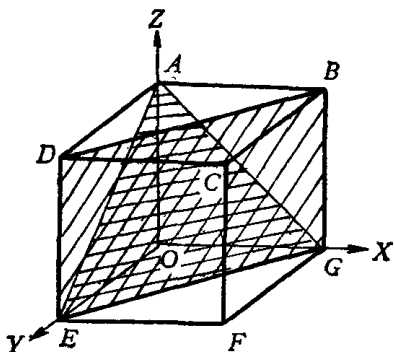


图1-5 晶面指数表示法

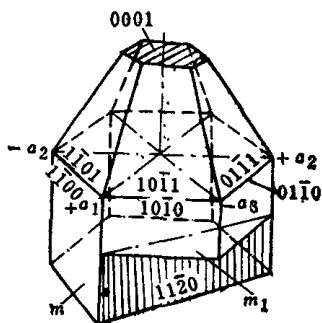


图1-6 石英晶体晶面指数表示法



面对坐标轴的方向，因此，凡是与它平行的晶面其晶面指数均属于同一系列。

石英晶体是用在同一平面上彼此成  $60^\circ$  的三根轴  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和与这三轴垂直的  $Z$  轴（ $Z$  轴）来确定它的晶面指数的， $Z$  轴平行于两个不平行的柱面  $m$  和  $m_1$  所交叉的方向。 $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  的方向是平行于不平行的柱面间所成夹角的三条二等分线，它们的正向彼此互成  $120^\circ$  角（如图1-6）。石英晶体的晶面指数表示方法如图1-6所示。

### 三、磨料

#### 1. 磨料的一般特性

磨料按其来源分为天然磨料和人造磨料。天然磨料有金刚石、刚玉、石榴石等。人造磨料有人造金刚石、人造刚玉、碳化硅、碳化硼等。

金刚石系碳（C）的结晶体，比重在  $3.4\sim 3.6$  之间，硬度为莫氏硬度10，是最硬的。纯净的金刚石无色，当混有杂质时呈黄、蓝、褐色。由于金刚石价格昂贵，因此，光学加工中大多用作磨轮、锯片的镶嵌物。粒度为微米级的金刚石粉末常配制成膏，用来研磨和抛光红宝石一类硬度较大的晶体。

刚玉系氧化铝（ $Al_2O_3$ ）的结晶体，天然刚玉比重在  $3.9\sim 4.0$  之间，人造刚玉比重在  $3.2\sim 4.0$  之间，氧化铝具有较大的韧性，硬度约为莫氏硬度9。天然刚玉中氧化铝的含量有的高达  $98\sim 99\%$ ；人造刚玉中氧化铝的含量有的高达  $98.5\%\sim 99.5\%$ 。纯净的人造刚玉是白色的，但由于杂质的存在而呈现粉红色、棕褐色、黑色等。

碳化硅（SiC）的结晶系薄板状，硬度在莫氏硬度9.15