

高等学校教材

光学零件制造工艺学

(修订本)

浙江大学 曹天宇 主编
上海机械学院 周鹏飞 主审

GAO DENG XUE
XIANG JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校教材

光学零件制造工艺学

(修订本)

浙江大学 曹天宁 主编
上海机械学院 周鹏飞



机械工业出版社

本书是根据1985年4月全国光学仪器专业教材会议所制订的“光学零件制造工艺学”课程教学大纲进行重新修订的。

该书比较系统地介绍了光学材料、光学零件的技术条件、光学零件的基本工艺(粗磨、精磨、抛光、磨边与胶合)、特殊光学零件(非球面、晶体零件、塑料零件)工艺、光学零件的特种工艺(镀膜、刻划)以及典型零件的光学工艺规程设计,同时也反映了光学工艺领域的国内外最近发展的新工艺、新材料、新技术的应用与推广。

本书可作为高等院校光学仪器类专业的教材,也可供从事光学工艺工作的科学技术人员和光学工人参考。

光学零件制造工艺学

(修订本)

浙江大学 曹天宁 主编
上海机械学院 周鹏飞

•
责任编辑:林静贤

•
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 新华书店经售

•
开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 390 千字

1989年12月北京第一版

1987年6月北京第二版·1987年6月北京第五次印刷

印数 14,901—16,700·定价:2.70 元

•
统一书号: 15033·5015

前 言

本书是在1981年出版的《光学零件制造工艺学》教材的基础上,根据1985年4月全国光学仪器专业教材会议所制订的《光学零件制造工艺学》课程教学大纲修订的。

全书仍保持原来的编排体系,有些章节作了一些调整:精密及薄型光学零件制造工艺并入基本工艺部分来叙述;光学塑料与典型光学零件基本工艺规程设计分别开辟一章,以加强这些内容。同时淘汰原书中老的工艺方法,补充新的工艺技术;贯彻新的技术标准。

全书分成四个部分,第一部分是光学材料,主要介绍光学玻璃的结构、成分、光学性能、热性能及机械性能及光学玻璃的分类、牌号与质量指标。还介绍了光学晶体与光学塑料的结构、种类及特性。第二部分是光学零件的基本工艺,包括光学零件的技术条件与设计的工艺性,毛坯成型、铣磨、精磨、抛光、定中心磨边及胶合的原理、设备、工夹具、辅料与主要工艺因素的影响。第三部分是特殊光学零件工艺,介绍非球面、光学晶体零件、光学塑料零件与光学复制零件的加工原理及方法。第四部分是光学零件的特种工艺,介绍光学零件的表面镀膜、分划的原理、设备及工艺方法。为了加强教学过程的实践性教学环节,我们还编写出版了《光学零件制造工艺学的习题与实验》与本教材配套使用。

本书可作为高等院校光学仪器类专业的教材,也可供从事光学工艺工作的科学技术人员参考。

本书由浙江大学曹天宁、上海机械学院周鹏飞主编,由北京工业学院查立豫担任主审。参加编写的有浙江大学曹天宁(绪言、第一章~第四章、第八章~第十三章、附录)、北京工业学院查立豫(第六章)和胡立山(第五章)、天津大学程荫梧(第七章)、上海机械学院周鹏飞(第十四章)与史大道(第十五章)。

本书在编写过程中得到有关兄弟院校、光学仪器厂和研究所的热忱支持并提供了宝贵资料,在此一并致谢。由于编者水平所限,书中缺点与错误在所难免,敬希广大读者提出批评与指正。

编者 1986. 5. 于浙江大学

目 录

前言	
绪言	1
第一篇 光学材料	
第一章 光学玻璃	3
§ 1-1 玻璃的特性及玻璃结构	3
§ 1-2 无色光学玻璃的化学成分及分类	5
§ 1-3 无色光学玻璃的质量指标及其检测方法	6
§ 1-4 无色光学玻璃的其他性质	12
§ 1-5 有色光学玻璃	15
§ 1-6 特殊玻璃	17
第二章 光学晶体	21
§ 2-1 光学晶体的基本特性	21
§ 2-2 光学晶体的分类及用途	22
§ 2-3 光学晶体的工艺性能	23
第三章 光学塑料	27
§ 3-1 塑料的结构及分类	27
§ 3-2 光学塑料的基本性质	28
第二篇 光学零件的基本工艺	
第四章 光学零件的技术条件及光学零件图	33
§ 4-1 光学零件图	33
§ 4-2 对光学零件的要求	37
§ 4-3 光学零件的设计工艺性	40
第五章 光学零件毛坯及粗磨成型	42
§ 5-1 光学零件的毛坯	42
§ 5-2 散粒磨料粗磨工艺	45
§ 5-3 固着磨料铣磨工艺	46
§ 5-4 铣磨夹具设计的一般原则	57
第六章 光学零件的精磨工艺	61
§ 6-1 光学零件的上盘与工夹具设计	61
§ 6-2 光学加工中的表面成型原理	75
§ 6-3 散粒磨料精磨工艺	84
§ 6-4 高速精磨工艺	87
§ 6-5 超精磨工艺	99
第七章 光学零件的抛光	103
§ 7-1 抛光机理	103
§ 7-2 工艺因素对抛光的影响	105
§ 7-3 光圈的识别与修正	107
§ 7-4 古典法抛光	114
§ 7-5 散粒磨料高速抛光	120
§ 7-6 固着磨料高速抛光	123
§ 7-7 光学样板的制造	127
§ 7-8 球面度、平面度及角度的检测	132
第八章 光学零件的定中心磨边	139
§ 8-1 透镜中心误差的定义	139
§ 8-2 光学法定中心磨边	140
§ 8-3 机械法定中心磨边	144
§ 8-4 全自动定中心磨边	147
§ 8-5 磨边的质量分析	147
第九章 光学零件的胶合	149
§ 9-1 概述	149
§ 9-2 胶合材料	150
§ 9-3 胶合工艺	152
§ 9-4 胶合定中心	154
§ 9-5 胶合质量分析	156
第十章 典型光学零件基本工艺规程设计	158
§ 10-1 设计工艺规程的原则及步骤	158
§ 10-2 加工余量	159
§ 10-3 典型光学零件基本工艺规程设计	162
第三篇 特殊光学零件工艺	
第十一章 非球面制造工艺	173
§ 11-1 非球面制造概述	173
§ 11-2 非球面制造方法	175
§ 11-3 计算技术在非球面制造中的应用	181
第十二章 光学晶体零件制造工艺	184

§ 12-1 晶体零件制造特点	184	§ 14-3 化学镀膜	221
§ 12-2 硬质晶体零件的制造	185	第十五章 光学零件的刻划和	
§ 12-3 软质晶体零件的制造	187	照相工艺	225
§ 12-4 水溶性晶体零件的制造	188	§ 15-1 概述	225
第十三章 光学塑料零件制造工艺	192	§ 15-2 机械法制造分划	226
§ 13-1 概述	192	§ 15-3 照相法制造分划	232
§ 13-2 光学塑料零件的制造方法	192	§ 15-4 机械—照相法制造分划	234
§ 13-3 塑料零件的注射成型	194	§ 15-5 光栅制造技术及光栅质量检验	234
§ 13-4 光学塑料零件的表面涂层	195	附录	243
§ 13-5 光学零件的复制工艺	197	附录一、光学零件表面疵病国家标准	
		(GB1185—74)	243
		附录二、光学零件薄膜的分类、符号	
		及标注(GB1315—77)	246
		附录三、光学零件的表面粗糙度等级	
		与标注	248
第四篇 光学零件的特种工艺			
第十四章 光学零件的镀膜工艺	199		
§ 14-1 膜层的种类和应用	199		
§ 14-2 真空镀膜	212		

绪 言

无论是现代工业、农业、国防还是科学文化事业都要用到各种各样的光学仪器。光学零件是光学仪器和光学装置的基本组成元件，因此，光学零件工艺技术的进步对现代光学工业与光学科学技术的发展是密切相关的，它的加工质量和生产效率对光学仪器的性能和生产有着直接的影响，有时甚至起着关键的作用。

我们伟大的祖国在光学材料的熔炼与光学加工方面有着悠久的历史。早在春秋战国时期就有青铜镜(后称秦镜)与火燧的记载。东汉时能制造玻璃,王充在“论衡”中云“方士熔炼五色石块,铸成阳燧”。远在一千多年前,我们的祖先就用上了眼镜,而西欧到十八世纪才有磨制眼镜的作坊。唐代将制造玻璃技术传到日本,元代有了天文观察仪器。但是在漫长的封建社会中,科学技术一直受到歧视,以致阻碍了光学工艺技术的发展。解放以后,我国光学技术和科学得到了蓬勃的发展,缩短了我国与国际水平的差距,有的方面已接近国际先进水平。标志我国光学材料与光学工艺水平的有如下几方面:光学材料中,一般的光学玻璃能自给,光学玻璃的连续熔炼技术已开始用于生产。在光学冷加工方面,大批量中等精度的透镜高效生产线已经在试生产中获得成功。该生产线中采用了高速精磨、超精磨、固着磨料抛光及水溶性冷却液等先进工艺技术,从而在一定的条件下,连续加工90个镜盘达到90%的合格率。从球面铣磨到抛光结束只需十几分钟的加工时间。在大型镜面加工方面,1.56m和2.16m的天文镜面(非球面)已经磨制成功。特种工艺方面。圆刻度盘的精度达到 $\pm 0.1''$ (全中误差);普遍采用计算机自动设计膜系及控制多层膜的镀制。在光学测试技术方面,激光数字波面干涉仪已经研制成功并投入生产,直径80mm的光学表面面形局部误差的测量可以达到 $\lambda/50$ 的精度。此外,微机技术在光学工艺中也开始应用,例如:用微机控制车床、自动车削光学磨具,既省时又提高了精度。

国外在光学零件的高效率加工方面,不仅能定时、定光圈,而且已建成自动生产线;在光学零件的高精度加工方面,采用计算机控制抛光,对曲率半径为1.8m的球面镜,精度可达 0.04λ ;采用环形抛光机,对于直径为200mm的氯化钠晶体,面形精度可达 $\lambda/8$;精密光学塑料零件的成型工艺、光学零件的复制技术已能普遍地用于生产。在真空镀膜方面,利用计算机控制镀膜沉积速率与膜层厚度,可达到很高的精度。为此,要赶上国际先进光学工艺水平,需要我们继续努力。

光学零件工艺学是从生产实践中总结出来,并经过生产实践反复验证和不断充实的学科。因此,本课程是一门叙述精密光学加工的特殊工艺的课程,要求有宽广的基础知识和专业知识;同时,它又是一门实践性很强的课程,学习时要紧密联系实际,注意观察实际工艺过程,要善于搜集随着光学工业的发展中不断涌现的新材料、新工艺、新技术,进一步的分析与总结,以丰富本学科的内容。

学习本课程应达到以下几方面的要求:

(1) 掌握光学零件加工工艺的基础知识和基本理论。在从事光学仪器的设计过程中能够合理的选择光学材料、零件的外形尺寸和公差,制订恰当的技术指标,使得所设计的光学零

件既满足设计要求，又符合经济合理的工艺原则；

(2) 具有分析和解决工艺问题的能力，经过一定时间的实践后，能够从事光学工艺的技术工作；

(3) 了解光学加工的操作方法和初步具有工艺实验的能力。

第一篇 光学材料

制造光学零件的原材料，称光学材料。它包括光学玻璃、光学晶体与光学塑料等。

第一章 光学玻璃

光学玻璃是一种特种玻璃。为满足光学设计的多种光学常数、高度均匀性、高度透明性及好的化学稳定性的要求，光学玻璃有复杂的组成和严格的熔炼过程。它是由硅、磷、硼、铅、钾、钠、钡、砷、铝等多种氧化物按一定配方在高温时形成盐熔液体，经过过冷而得到的无定形物体。大多数的光学玻璃以 SiO_2 为主组成，属硅酸盐玻璃。其次还有以 B_2O_3 为主的硼酸盐玻璃、以 P_2O_5 为主的磷酸盐玻璃。

§1-1 玻璃的特性及玻璃结构⁽¹⁾⁽⁶⁾

一、玻璃特性

不论化学成分和固化温度范围如何，一切由熔融物过冷却所得到的无定形体，由于粘度逐渐增加而具有固体的机械性质，均称之为玻璃。从外部特征上看是硬而脆的透明体，而其内部尚有下列物理特性：

1) 各向同性 由于玻璃的均匀化结构使玻璃沿任何方向度量，其物理性能(如折射率、热膨胀系数、导电系数)都是相等的。

2) 没有熔点，仅有一个软化的温度范围 玻璃从熔融状态到固体状态的性质变化过程是连续的和可逆的。例如玻璃的比热、比容与温度的关系，如图1-1所示。温度低于转变温

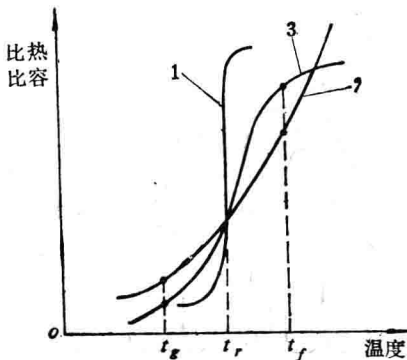


图1-1 玻璃比热、比容与温度的关系曲线
1—晶体 2—玻璃比容 3—玻璃比热

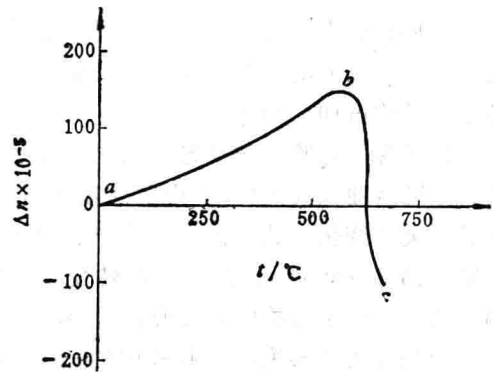


图1-2 玻璃折射率的温度变化曲线

度 t_0 时, 其粘度大于 $10^{12} \text{Pa} \cdot \text{s}$ (10^{13} 泊), 玻璃呈脆性; 当温度高于软化温度 t_f 时, 其粘度小于 $10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$ (10^9 泊), 玻璃出现液体的典型性质。 $t_0 \sim t_f$ 为玻璃软化的温度范围, 而晶体则有一个严格的熔点 t_r , 其物化特性也随之发生突变。

3) 具有较高内能 过冷却玻璃不象结晶物质那样放出结晶热, 所以玻璃态有向晶体转变的可能, 由于玻璃的粘度极大, 实际上不可能在常温下使玻璃转变为晶体。

玻璃的性质不仅与玻璃的化学成分有关, 而且还与玻璃的结构有关。玻璃折射率的温度效应说明有可能在一定程度内, 不改变玻璃的成分, 仅改变玻璃的结构而导致折射率的变化。说明玻璃不是一个单纯的无定形体, 而是具有一定的结构特性。

二、玻璃结构

玻璃的结构学说没有完全成熟, 到目前为止, 较为流行的有两种学说: 晶子说与不规则网络说。

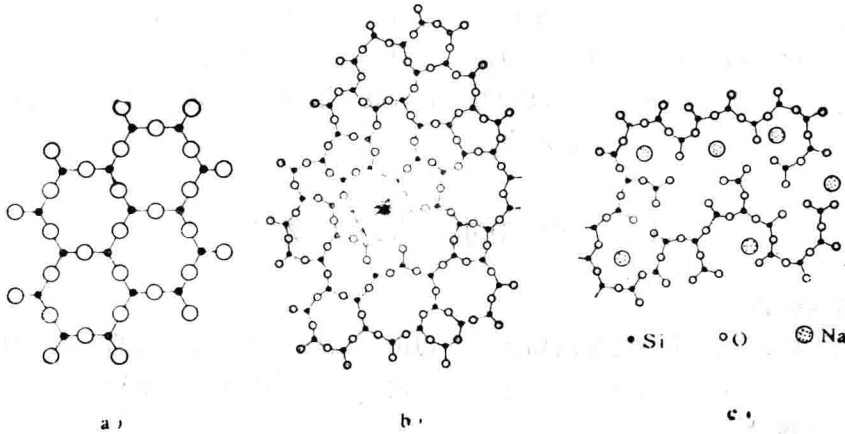


图1-3 晶体结构与玻璃结构

a) 石英晶体 b) 石英玻璃 c) 钠玻璃

晶子学说的基本原理是苏联学者 A·A·列别捷夫 (Лебедев) 于 1921 年首先提出。该学说认为玻璃是由无数“晶子”组成。“晶子”不同于一般的“微晶”(具有正规的原子排列), 而是带有点阵变形的有序排列区域, 它们分散于无定形介质中, 并且从晶子区到无定形区的过渡是逐步完成的, 两者间并无明显的界限。晶子含量约占 10~20%。

晶子说的实验基础是光学玻璃的退火。在折射率温度曲线 (图 1-2) 中发现在 520°C 附近折射率突然变化, 这是由于石英结晶的同素异性转变, $520 \sim 595^\circ\text{C}$ 正是 $\alpha\text{-SiO}_2$ 转变成 $\beta\text{-SiO}_2$ 的温度段。由于结构的转变使折射率的温度效应产生不可逆转变 (如图 1-2 中的 b、c)。从而揭示了玻璃结构的近程有序规律。

不规则网络学说由荷兰学者 查哈里阿生 (Zachariasen) 于 1932 年提出。按这个学说, 石

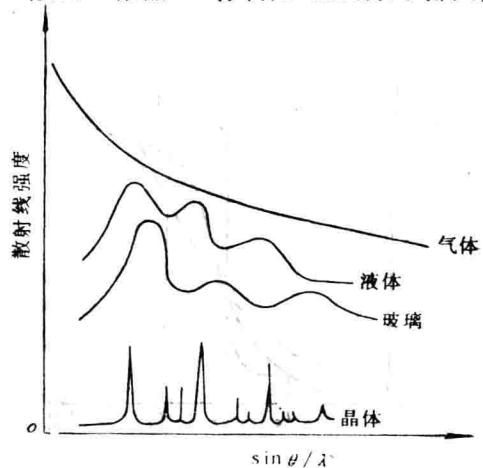


图1-4 气体、液体、玻璃、晶体的X射线的散射曲线。
 θ —散射角 λ —X射线波长

石英玻璃的结构(图1-3b)可作如下描述:每个硅原子与周围四个氧原子组成硅氧四面体(SiO_4),各四面体之间通过顶角互相连接而形成向三度空间发展的网络,但其排列是无序的,故与石英晶体(图1-3a)结构有所不同。当石英玻璃中加入碱金属时,硅氧四面体(SiO_4)组成的网络被断裂,在四面体的空隙中均匀而无序地分布着碱金属离子,从而,描述了玻璃结构的远程无序的特性。

通过X射线散射试验所获得的结果指出,玻璃结构在有序的晶体与无序的气体之间,它与液体相近(图1-4),即具有远程无序、近程有序的特征,通常称为“过冷液体”。

§1-2 无色光学玻璃的化学成分及分类^[2]

光学玻璃大多属于化合物玻璃。化合物玻璃按玻璃的结构学说,其化学成分可分成三类:(1)能形成玻璃结构网络的氧化物,称为玻璃的生成体,如 SiO_2 、 B_2O_3 和 P_2O_5 等, SiO_2 在玻璃中以硅氧四面体(SiO_4)形式存在; B_2O_3 以三角形(BO_3)和四面体(BO_4)两种状态存在;而 P_2O_5 则以磷氧四面体(PO_4)形式存在。(2)以孤立的原子(离子)处在玻璃结构网络以外的氧化物称为网络外体。如 Li_2O 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 BaO 、 ZrO_2 等。(3)根据具体的玻璃成分不同,可以进入网络,也可以处在网络以外的称中间体。如 MgO 、 ZnO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等。

光学玻璃按不同的化学成分与光学常数分成各种不同的牌号和类别。表1-1给出几种常用玻璃牌号的化学成分。各种化学成分都对光学玻璃的性质发生影响,如表1-2所示。

表1-1 几种玻璃牌号的化学成分

化学成分/% 玻璃牌号	SiO_2	B_2O_3	Sb_2O_3	As_2O_3	PbO	ZnO	BaO	K_2O	Na_2O	Al_2O_3	MgO
冕 K9	69.13	10.75		0.36			3.07	6.29	10.40		
钡冕 BaK7	49.80	4.91	0.2	0.5	2.18	12.52	21.54	7.09	1.26		
重冕 ZK10	35.85	7.86				4.38	44.07			3.73	
火石 F2	47.24			0.5	45.87			6.39			
钡火石 BaF1	53.10	3.67	0.23	0.13	10.89	4.26	11.69				11.13
重火石 ZF2	39.10			0.25	55.40			4.94			

无色光学玻璃按光学常数分成两大类:冕牌玻璃及火石玻璃。其性能、特征比较如表1-3所示。

光学玻璃的分类牌号按我国国家标准(GB-903-65)用下列符号表示:冕牌类包括氟冕(FK)、轻冕(QK)、冕牌(K)、磷冕(PK)、钡冕(BaK)、重冕(ZK)、镧冕(LaK);火石类包括冕火石(KF)、轻火石(QF)、钡火石(BaF)、火石(F)、重钡火石(ZBaF)、重火石(ZF)、镧火石(LaF)、重镧火石(ZLaF)、钛火石(TiF)、特种火石(TF)共十七类。Q、Z分别表示轻、重(按汉语拼音字母);P、Ba、La分别表示含磷、钡、镧的氧化物,光学玻璃在十七个类别中按 n_D 的大小依次在类别符号后加序号组成玻璃牌号,如K9、F2、QK2等。我国光学玻璃牌号共有一百六十多种。每一种牌号在 n_D - ν_D 领域图中占有一定的位置。从图中可以看出:随着PbO的增加, n_D 与色散值均逐步增加;随着BaO增加, n_D 增大,而色散值增大较少。已知玻璃牌

表1-2 各种氧化物对玻璃特性的影响

名称	减 小	增 大
二氧化硅	比重、膨胀系数	化学稳定性, 耐高温性, 机械强度, 粘度
氧化铝	析晶能力(当加入2~5%时)	机械强度, 化学稳定性, 粘度
氧化硼	析晶能力, 粘度, 膨胀系数	化学稳定性, 温度急变抵抗性, 折射率
氧化钠和氧化钾	化学稳定性, 耐高温性, 机械强度, 结晶能力, 硬度	膨胀系数
氧化镁	析晶能力, 粘度(加入量达25%时)	耐高温性, 化学稳定性, 机械强度
氧化钡	化学稳定性	比重、折射率, 析晶能力
氧化铅	化学稳定性, 硬度, ν_D 值	折射率
氧化锌	膨胀系数	耐高温性, 化学稳定性, 机械强度
氧化钙	耐高温性	膨胀系数, 硬度, 化学稳定性, 机械强度, 析晶能力

表1-3 冕牌玻璃与火石玻璃

冕牌玻璃K(PbO<3%)	火石玻璃F(PbO>3%)
折射率低($n_D=1.50\sim1.55$) 色散小($\nu_D=55\sim62$) 性硬、质轻、透明度高	折射率高($n_D=1.53\sim1.85$) 色散大($\nu_D=30\sim45$) 性软、质重、带黄绿色

号的化学成分及各氧化物的部分性质(氧化物在玻璃中的性质), 可以用加和公式来计算光学玻璃的折射率 n_D 与中部色散 n_F-n_C , 精确度可达0.001。捷姆金娜(Л·И·демкина)公式如下:

$$n_D = \frac{\sum \frac{P_i}{S_i} n_{Di}}{\sum \frac{P_i}{S_i}} \quad (1-1)$$

$$n_F - n_C = \frac{\sum \frac{P_i}{S_i} (n_{Fi} - n_{Ci})}{\sum \frac{P_i}{S_i}} \quad (1-2)$$

式中 $n_{Di}, (n_F - n_C)_i$ ——玻璃中各氧化物的折射率、中部色散;

P_i ——玻璃中各氧化物的百分含量;

S_i ——玻璃中各氧化物的修正系数。

§1-3 无色光学玻璃的质量指标及其检测方法^{[1][3]}

光学玻璃所要求的高度均匀性、透明性和一定的光学常数用以下几个主要质量指标来表示, 即折射率和中部色散与标准值的允许差值、同批玻璃中折射率和中部色散的一致性、光学均匀性、光吸收系数、应力双折射、气泡度和条纹度。

一、折射率和中部色散与标准值的允许差值

按国标分为三类, 见表1-4。

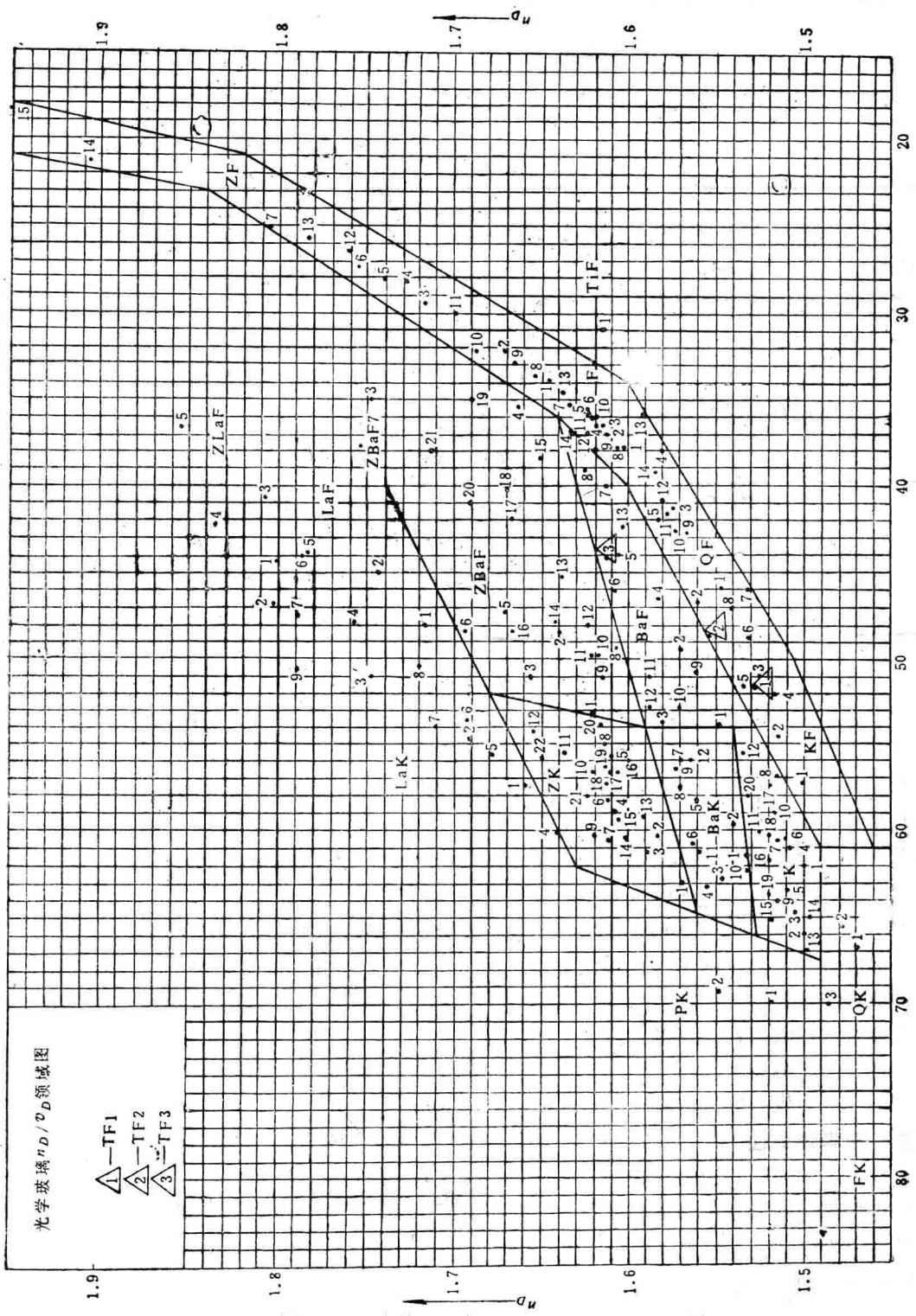


图1-5 光学玻璃 n_D/v_D 领域图

表1-4 玻璃按光学常数分类

类别	允 许 差 值	
	折 射 率	中 部 色 散
1	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$
2	$\pm 7 \times 10^{-4}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$
3	$\pm 10 \times 10^{-4}$	$\pm 10 \times 10^{-5}$

例如, K9玻璃的 n_D 标准值为1.5163, 实际折射率如在1.5158~1.5168之间则为一类; $n_r - n_c$ 的标准值为0.00806, 实际色散值在0.00801~0.00811之间则为一类等。

二、同一批玻璃中折射率和中部色散的一致性

按国际分为四级, 见表1-5。每一类玻璃均分成四级, 则共有十二个等级。同一批玻璃各块之间的实际折射率相差较小, 一般是指同一炉号和同一退火号的玻璃。制造一批产品采用同一批玻璃是有利的。

表1-5 玻璃按光学常数分级

级别	同一批毛坯中最大差值		级别	同一批毛坯中最大差值	
	折 射 率	中 部 色 散		折 射 率	中 部 色 散
A	0.5×10^{-4}	1×10^{-5}	C	2×10^{-4}	1×10^{-5}
B	1×10^{-4}	1×10^{-5}	D	在规定的类别允许差值范围内	在规定的类别允许差值范围内

测量折射率的方法常用V形棱镜法, 在V形棱镜折光仪上进行, 精度对 n_D 为 $\pm 3 \times 10^{-5}$, 对 $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ 为 2×10^{-5} 。其测量原理如图1-6所示, 由两块材料完全相同的等腰直角棱镜胶合成张角为 90° 的V形标准块。被测件磨出两个互成直角的平面, 把它放在V形槽内, 用折射油使之很好接触。如果被测件的折射率 n 与V形棱镜的折射率 n_0 相同, 则自V形棱镜DE面垂直入射的D谱线的平行单色光通过棱镜后仍不偏折地从GH面出射; 如果 $n \neq n_0$, 则从GH面出射光线将偏折一个角度 θ 。 θ 角的大小、V形棱镜 n_0 与被测件折射率 n 有如下关系式:

$$n = (n_0^2 \mp \sin^2 \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \theta})^{1/2} \quad (1-3)$$

$n < n_0$ 时用“-”号, 当 $n > n_0$ 时用“+”号。两种光线进行情况如图1-6所示。

测量折射率的方法除V形棱镜法外常用的还有全反射法(如阿贝折射仪)、最小偏向角法、自准直法等。

色散系数 ν_D 用下式计算得到:

$$\nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (1-4)$$

三、光学均匀性

光学玻璃的光学均匀性是指同一块玻璃中各个部分折射率的渐变性质差异, 主要是由于光学玻璃精密退火时退火炉内各处炉温不均匀所引起的。这种折射率不均匀不可能用一般的折射仪来测

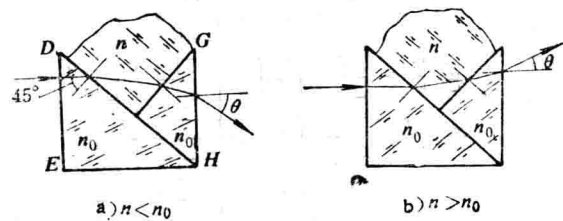


图1-6 V棱镜法测量折射率

量。必需用干涉仪或全息干涉仪来作精确测量， Δn 可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。在常规测量中规定用鉴别率法测出平行平面玻璃的鉴别角。将被测玻璃端面细磨抛光后，置于平行光管与望远镜之间测其最小鉴别角 φ ，再将 φ 与平行光管理论鉴别角 φ_0 相比。依据 φ/φ_0 的比值（最大值）分为五类，见表1-6。当光学玻璃的光学均匀性要求为一类时，除鉴别率检查外尚需进行星点观察。要求星点衍射象呈中心为明亮点的同心圆环。测量装置简图见图1-7。

表1-6 玻璃均匀性类别

类别	1、2	3	4	5
φ/φ_0	1.0	1.1	1.2	1.5

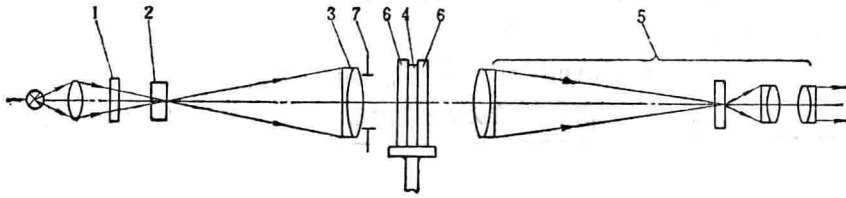


图1-7 光学均匀性的测量

1—毛玻璃 2—鉴别率板 3—准直物镜 4—被测玻璃 5—望远镜 6—保护玻璃 7—光阑

四、光吸收系数

光线通过光学零件时要产生反射和吸收，使光强降低，视场变暗，影响仪器的鉴别率。光吸收按白光在玻璃中透过1 cm厚时被吸收的光能百分比分成五类，见表1-7。吸收系数的测量装置如图1-8所示，测出未放入试样的光通量 I_0 及放入试样后的光通量 I_r ，则透过率 T 为

表1-7 光吸收系数类别

类别	光吸收系数/(%, cm ⁻¹) 不大于	类别	光吸收系数/(%, cm ⁻¹) 不大于
1	0.4	4	1.0
2	0.6	5	1.5
3	0.8		

$$T = \frac{I_r}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-E l} \quad (1-5)$$

式中 R ——反射率；
 E ——吸收系数；
 e ——自然对数的底；
 l ——玻璃厚度。

$$\text{显然, } E = \frac{1}{l} [2 \ln(1 - R) - \ln T] \quad (1-6)$$

一般说来，冕牌玻璃表面反射率较低，约为4~5%，透明度较高。火石玻璃反射率较高，约为5~7%，

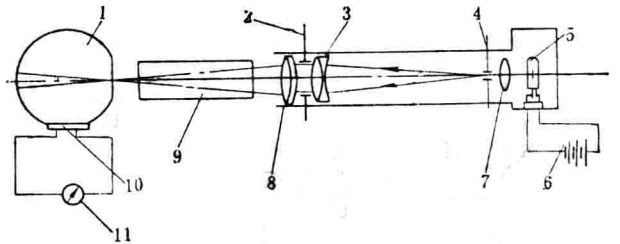


图1-8 吸收系数测量仪

1—积分球 2—可变光阑 3—物镜 4—光阑 5—灯泡 6—电源 7—聚光镜 8—辅助透镜 9—被测玻璃 10—硒光电池 11—检流计

透明度较低。当垂直入射时

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1-7)$$

实际上，光的反射损失还与表面粗糙度有关，光的吸收也与玻璃的成分、原料的纯度及熔炼过程有关。

五、应力双折射

玻璃在没有应力时是各向同性的。当受到外力（如装夹太紧）或内力（不均匀的冷却与加热）时，玻璃内产生内应力，破坏了各向同性，光学上的作用引起双折射。当一束光线通过有内应力的玻璃时，将产生两束传播速度不同的光线，其中一束光符合折射定律，称寻常光线或“o”光；另一束光线不符合折射定律，称非常光线或“e”光。

在玻璃生产中，用精密退火的办法消除其内应力。

光学玻璃按其双折射光线通过1cm厚度的光程差大小分为五类，见表1-8。

表1-8 应力双折射类别

类别	最大光程差/nm	类别	最大光程差/nm
1	2	4	20
2	6	5	50
3	10		

玻璃的应力双折射的检验一般采用应力仪。

应力仪是用偏振光的干涉原理制成的，其光学系统如图1-9所示。平面偏振光通过有应力的被测玻璃，分解为o光和e光，射出试样就产生了光程差，通过检偏器就可看到具有应力特征的干涉色图形，光程差 $\delta = (n_o - n_e)d$ ，d为玻璃厚度。当厚度小时光程差只有200~300nm，干涉色为灰白色，不易辨认，不很灵敏。故在系统中加入全波片，附加程差为560nm，当玻璃无应力时呈现一级紫红色，根据干涉色对紫红色的偏离程度来决定光程差的大小。此程差应是与波片所产生的程差的相加或相减。识别颜色困难时可用标准片比色，此法简单方便，但误差较大。要求测量精度高时用1/4波片原理制成的双折射仪测量，图1-10是双折射仪的原理图。

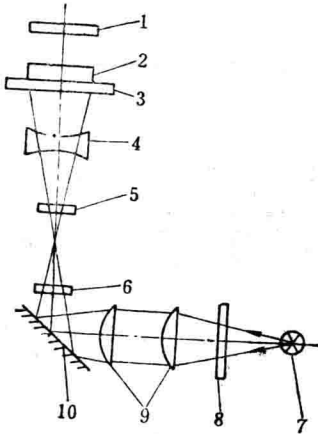


图1-9 应力仪

1—检偏器 2—被测玻璃 3—台面玻璃
4—发散透镜 5—全波片 6—起偏器 7—光源
8—隔热片 9—聚光镜 10—反光镜

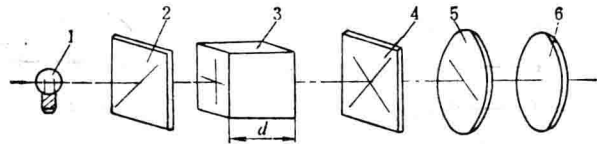


图1-10 双折射仪

1—光源 2—起偏器 3—被测玻璃
4—1/4波片 5—检偏器 6—滤光片

测量时先将检偏器与起偏器调整到消光，然后放上被测件，通过检偏器观察，一般有三种情况：

- 1) 黑暗均匀即无双折射；
- 2) 有规则的环形条纹，表示有均匀的内应力；
- 3) 图形不规则，表示内应力不规则。

转动检偏器，使暗圈向中央移动直到不动为止，读下度盘转角 $\theta(\text{rad})$ ，即可依据下式算出单位长度产生的光程差 δ

$$\delta = \left(N + \frac{\theta}{\pi} \right) \frac{l}{d} \quad (1-8)$$

式中 N ——暗圈数；

d ——被测件长度。

六、条纹度

条纹是玻璃内部丝状或层状的化学不均匀区，其折射率与主体不同，光学上的作用相当于细微的柱面透镜，造成杂光，影响鉴别率。图1-11为检验条纹图的装置，光线通过条纹就会产生偏折，因而在投影屏上出现条纹的影象。

条纹度按国家标准 GB903-65

分为两类三级见表1-9和表1-10。类别是按规定方向检查玻璃的质量指标来划分，级别则按观察玻璃的方向数来划分。容易产生条纹的玻璃是ZF、F、BaF、BaK型含PbO、BaO较高的玻璃。

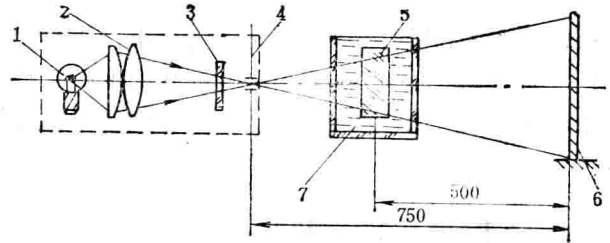


图1-11 条纹仪

1—强光源 2—聚光镜 3—毛玻璃 4—光阑 5—被测玻璃
6—投影屏 7—液槽

表1-9 条纹度分类

类别	光孔直径/ mm	毛坯与投影屏 距离/mm	光孔与投影屏 距离/mm	观察结果
1	2	500	750	屏上无条纹象
2	4	500	750	屏上发现个别条纹象但彼此相距不得小于10mm

表1-10 条纹度级别

级别	观察毛坯方向数
A	3
B	2
C	1

七、气泡度

玻璃中的气泡是在熔炼的澄清过程中气体来不及逸出所致，气泡的光学作用相当于一个细微的凹透镜 \ominus （图1-12）引起散射与折射。因而成象面上的光学零件（如分划板）需严格控制气泡。

最易产生气泡的是ZF、BaF、ZK型号的玻璃。

气泡按国家标准规定：根据玻璃毛坯中最大气泡允许直径分九类，见表1-11；根据每公斤玻璃中直径大于0.03mm的气泡平均数分为五级，见表1-12。

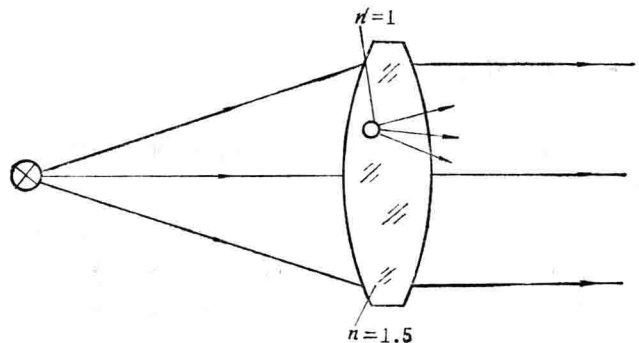


图1-12 气泡的光学作用

① 气泡中气体主要为空气，折射率接近为1，周围玻璃的折射率大于1.4，因而形成凹透镜的光学作用。