

# 光学零件制造 工艺学

任志君 汤一新 编著  
钱义先 秦 华



上海科学技术出版社

# 光学零件制造工艺学

任志君 汤一新 编著  
钱义先 秦 华

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了光学材料、光学零件(包括精密及特殊光学零件)加工的基础理论、基本工艺及检测方法,全面反映了当前国内外光学加工技术的水平和最新研究成果。内容上侧重于光学仪器类专业所必需的基本工艺知识及理论。

本书可作为光电系光学制造专业的本科专业基础教材,也可作为光学工艺技术人员与工人的培训教材,亦可供相关专业师生、科技人员和工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

光学零件制造工艺学 / 任志君等编著. —上海:  
上海科学技术出版社, 2019.3  
ISBN 978 - 7 - 5478 - 4344 - 4

I. ①光… II. ①任… III. ①光学零件—制造—高等学校—教材 IV. ①TH740.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 022558 号

---

### 光学零件制造工艺学

任志君 汤一新 钱义先 秦 华 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海展强印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 27.75

字数 627 千字

2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷

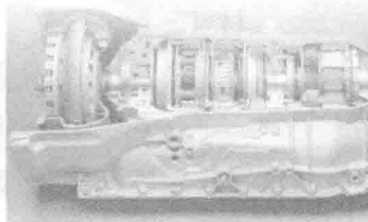
ISBN 978 - 7 - 5478 - 4344 - 4/O · 70

定价:98.00 元

---

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

# 前言



光学工业在现代工业、农业、航天、航空、国防以及人民生活中起着非常重要的作用。随着现代科学技术的发展和人民生活水平的不断提高,在各领域中都要用到各种各样的光学仪器。光学零件是组成光学仪器的基本元件,它的加工质量和生产效率对光学仪器的性能、使用寿命有直接的影响,有时甚至起着关键的作用。因此,研究如何运用工艺方法又快又好地制造光学零件是“光学零件制造工艺学”这门课程的主要任务。

“光学零件制造工艺学”是一门研究光学零件制造过程与工艺原理的应用课程,具有很强的实践性和应用性。光学零件工艺学主要包括利用传统方法制造折射、反射光学零件的研磨工艺,制造消色差透镜,能改变光程和有保护作用的胶合工艺,通过光辐射能产生各种物理光电效应的镀膜工艺,制造各种分划元件的刻划、照相复制工艺以及在光学加工过程中所采用的各种辅助工艺和光学辅料的制备工艺等。随着现代科学技术的发展,还包括相继出现的与传统工艺概念完全不同的新工艺,例如毛坯加工的一步成型、光学零件的切削加工、塑料光学零件的注射压铸、光学零件的复制、变折射率光学零件的制造、聚合物光学零件的制造、衍射光学元件、纤维光学元件以及集成光路等。因此,光学零件工艺学既是一门古老的学科,又是一门涉及现代材料学、控制学和测量学等方面,引人注目的较新颖的学科。光学零件工艺学是从生产实践中总结出来的,并经过生产实践反复验证和不断充实的学科。

学习本课程有以下几个方面的要求:

(1) 掌握光学零件加工工艺的基础知识和基本理论,在光学仪器设计的过程中能够合理地选择光学材料、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) 具有分析问题和解决问题的能力,经过一定时间的实践后,能够从事光学工艺相关的技术工作。

(3) 了解光学加工的操作方法,初步具备工艺实验的能力。

与金属零件的加工相比,光学零件的加工方法和装夹方法有很大不同,这是因为:

(1) 光学零件加工的对象大多是一些脆性材料(如玻璃、晶体等),而金属则是塑性材料。

(2) 相对于金属加工,光学零件的面型精度和表面质量的加工要求要高得多。

光学零件中大量的透镜、棱镜及平面零件,它们的加工工艺流程一般为:

毛坯(块料或型料)→粗加工→精磨→抛光→定心磨边(对透镜)→表面镀膜、刻划或胶合。

因此,本课程的主要内容为:

(1) 光学材料与辅料的性能。光学玻璃的光学性能、化学性能、机械性能及热性能,光学玻璃的分类及质量指标,光学晶体和光学塑料的性能及其在光学仪器中的应用。

(2) 光学零件的基本工艺。光学零件的一般加工过程,主要包括光学零件的技术条件、毛坯的成型、精磨和抛光及定心磨边的原理、设备、工夹具、辅料及工艺因素的影响等。

(3) 精密及特殊光学零件的加工工艺。光学样板、薄形零件、非球面及晶体的加工原理和方法。

(4) 光学零件的特种工艺。光学零件的表面镀膜、刻划及胶合的原理、作用、设备及工艺。

“光学零件制造工艺学”是光电信息类专业、仪器仪表类专业的一门专业基础课,学习它要求具有工程光学、光学设计及其他相关的基础知识。由于其固有的实践性强的特点,在学习本课程之前,应对光学零件的加工过程有比较完整的感性认识和了解,在学习中紧密联系实际,才能把学到的书本知识更好地运用到生产实践中去。

该书稿是在任志君教授和汤一新副教授为浙江师范大学光电信息科学与工程专业本科生讲授光学冷加工技术所编写的讲义基础上形成的,钱义先博士和山东理工大学秦华博士补充了他们最新的研究成果和教学心得。在书稿试用过程中,虽经多次修改完善,但限于水平,错误仍在所难免,恳请读者不吝赐教,并多提宝贵意见。

作者 于浙江师范大学

2019年3月



# 目录

前言 .....	1
----------	---

## 第 1 篇 光学零件的材料与辅料

第 1 章 光学材料 .....	3
1.1 光学玻璃 .....	3
1.2 光学晶体 .....	23
1.3 光学塑料 .....	32
第 2 章 光学加工的辅助材料 .....	42
2.1 磨料与磨具 .....	42
2.2 抛光材料 .....	52
2.3 黏结材料 .....	58
2.4 光学擦拭材料 .....	59
2.5 保护材料 .....	62
第 3 章 光学零件技术条件与技术准备 .....	65
3.1 光学制图 .....	65
3.2 光学零件技术条件综述 .....	75
3.3 光学零件设计的工艺性 .....	89

## 第 2 篇 光学零件制造基本工艺

第 4 章 光学零件的毛坯成型 .....	95
4.1 块料毛坯的加工成型 .....	95

4.2	二次加热成型 .....	98
4.3	槽沉成型 .....	103
4.4	连续压制成型 .....	104
<b>第 5 章</b>	<b>光学零件的研磨成型 .....</b>	<b>105</b>
5.1	散粒磨料粗磨 .....	105
5.2	金刚石磨具铣磨 .....	111
5.3	铣磨面型与铣磨机调整 .....	120
<b>第 6 章</b>	<b>光学零件的精磨 .....</b>	<b>128</b>
6.1	光学表面成型运动学 .....	128
6.2	散粒磨料精磨 .....	134
6.3	平面精磨 .....	139
6.4	球面精磨 .....	139
6.5	金刚石磨具高速精磨 .....	141
<b>第 7 章</b>	<b>光学零件的抛光 .....</b>	<b>164</b>
7.1	抛光机理 .....	164
7.2	工艺因素对抛光的影响 .....	167
7.3	古典法抛光 .....	170
7.4	高速抛光 .....	179
7.5	抛光完工后光学零件的检验 .....	192
<b>第 8 章</b>	<b>光学零件的定心磨边 .....</b>	<b>203</b>
8.1	定义与术语 .....	203
8.2	光学定心法 .....	206
8.3	机械定心原理及方法 .....	211
8.4	定心磨边工艺 .....	214
8.5	定心磨边常见的缺陷 .....	218
<b>第 9 章</b>	<b>光学零件的胶合 .....</b>	<b>220</b>
9.1	概述 .....	220
9.2	胶合材料 .....	221
9.3	胶合工艺 .....	227
9.4	光胶法胶合 .....	232
9.5	透镜胶合定中心 .....	235
9.6	胶合件拆胶及检验 .....	237

## 第3篇 光学制造的辅助工序

第10章	光学制造工夹具设计 .....	243
10.1	平模 .....	243
10.2	球模 .....	246
10.3	夹具设计 .....	262
第11章	光学零件的上盘与下盘 .....	266
11.1	光学零件上盘 .....	266
11.2	光学零件下盘 .....	271
11.3	其他辅助加工 .....	272

## 第4篇 精密及特殊光学零件加工工艺

第12章	高精光学零件的制造技术 .....	277
12.1	精密光学零件加工 .....	277
12.2	高精平面的制造工艺 .....	279
12.3	高精度棱镜制造工艺 .....	289
12.4	光学样板的制造 .....	293
第13章	非球面光学零件工艺 .....	306
13.1	概述 .....	306
13.2	二次非球面理论 .....	309
13.3	非球面光学零件制造工艺编制 .....	314
13.4	非球面加工工艺 .....	320
13.5	非球面光学零件的检验 .....	335
第14章	光学塑料零件制造工艺 .....	352
14.1	概述 .....	352
14.2	光学塑料与光学塑料零件成型方法概述 .....	352
14.3	光学塑料零件设计 .....	355
14.4	光学塑料零件的注射成型技术 .....	360
14.5	光学塑料注射成型机床 .....	366
14.6	塑料光学零件注射成型工艺参数选择 .....	374
14.7	塑料光学零件的工艺检测 .....	381



第 15 章 光学晶体零件制造 .....	387
15.1 光学晶体零件制造特点 .....	387
15.2 晶体的定向 .....	389
15.3 晶体零件加工的基本工艺 .....	392
15.4 几种典型晶体的加工 .....	395
附录 .....	400
附录 1 V 形棱镜法测量材料折射率 .....	400
附录 2 光学材料均匀性的测量 .....	402
附录 3 材料应力双折射测量 .....	406
附录 4 光学零件表面疵病的国家标准(GB/T1185—1989) .....	408
附录 5 光学零件的表面粗糙度 .....	412
附录 6 球面样板的检测 .....	414
附录 7 光学零件工艺规程的编制 .....	420
附录 8 常用刻划保护层 .....	428
附录 9 刻蚀腐蚀液的配制 .....	430
参考文献 .....	434

# 第 1 篇

## 光学零件的材料与辅料

制造光学零件的材料主要分为光介质材料、光功能材料。

光介质材料是以折射、反射或透射的方式,改变光线的方向、强度和相位,使光线按照预定的要求在材料中传输,也可以吸收或透过一定波长范围的光线而改变光线的光谱成分。简而言之,光介质材料就是传输光线的材料,它属于传统的光学材料。

近代光学的发展,特别是激光的出现,使另一类光学材料——光功能材料得到了发展。这种材料在外场(力、声、热、电、磁和光)的作用下,其光学性质会发生变化,因此可作为探测和能量转换的材料。近年来蓬勃发展的压光、声光、磁光、电光、弹光和激光材料都属于光功能材料,光功能材料已成为光学材料中一个新的大家族。

光学零件制造工艺所用的光学材料指光学零件加工的对象,主要是光学玻璃、光学晶体和光学塑料。光学加工辅助材料指实现光学零件加工所必需的各种材料,如基本加工的磨料、抛光粉、抛光模层材料、保护材料、特种加工的镀膜材料、分划用材料等;还包括加工过程通用的辅助材料,如清洗剂、擦拭材料、保护材料、冷却液等。

随着光学零件加工工艺的发展,光学零件工艺的材料和辅助材料也在不断地发展和更新。传统的“一把砂一把水”的研磨工艺,效率太低,金刚石工具的出现和应用使得生产效率大大提高。金刚石工具在光学加工中的使用和完善,给光学零件加工技术带来了一场革命。古典的泥锯下料变为金刚石锯片切割,金刚砂散粒磨料细磨变为金刚石丸片高速研磨。高速抛光工艺的发展,使传统抛光用的红粉逐渐被氧化铈所取代。高速精磨和高速抛光工艺也促使光学机床的运动形式发生了重大改变,由平面摆动发展为准球心弧线摆动。因此,系统地研究和了解光学零件加工技术的材料和辅料,熟悉其理化性能,掌握它的工艺特性,对掌握和应用光学零件加工技术、提高光学零件的加工精度和加工效率、发展光学零件加工工艺具有重要意义。



# 第 1 章 光学材料

光学材料是光学仪器的核心,它的主要功能是光能传输和成像。近年来随着激光和光功能材料的出现和发展,光学材料的范围和作用已大大加宽。这里仍讨论以成像和光传输为主要目的的一般光学材料,这也是目前使用得最普遍和最主要的光学材料,通常分为 3 类,即光学玻璃、晶体材料和光学塑料。其中,光学玻璃制作光学零件的历史最久、工艺最成熟、精度最高、应用最广。

## 1.1 光学玻璃

光学玻璃包括无色光学玻璃、有色光学玻璃和特种光学玻璃。光学玻璃是光学零件加工中最常用的光学材料,尤其是无色光学玻璃。绝大多数的光学透镜、棱镜等光学零件都是由无色光学玻璃制成的。

光学玻璃的理化性能包括其光学特性和工艺特性,是受光学玻璃的内部结构制约的。因此,对于光学零件制造者来说,应该深入了解光学玻璃的质量要求及工艺特性,即玻璃的物理、化学性能。

### 1.1.1 玻璃的一般特性

玻璃是由多种氧化物混合熔融而成的,因而不能以一定的化学分子式来表示。由于熔融氧化物冷却速度非常快,熔融体在迅速冷却时,其黏度急速增加,内部分子来不及规则排列就凝固成固体,因此,玻璃保留了液态分子无规则的排列结构。这种低温固态保留高温熔融态的无定形结构称为玻璃态,玻璃就是玻璃态的特殊物质。

玻璃主要是由硅、磷、硼、铅、钾、钠、砷、铝等多种氧化物组成,大多数光学玻璃以  $\text{SiO}_2$  为主要成分,属硅酸盐玻璃,其次还有以  $\text{B}_2\text{O}_3$  为主要成分的硼酸盐玻璃和以  $\text{P}_2\text{O}_5$  为主要成分的磷酸盐玻璃。

根据结构理论,组成玻璃的氧化物(见表 1-1)可以分成 3 类。一类能独立形成足够长的链状硅氧四面体玻璃网络,称这类氧化物为玻璃生成体氧化物,如  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  等分别属于  $\text{A}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AO}_2$  和  $\text{A}_2\text{O}_5$  型氧化物;另一类是碱金属离子氧化物,如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 它们不能生成玻璃的网络,但在一定的条件下能进入玻璃的网间空隙,称为中间体氧化物;还有一类只能破裂网络使硅氧四面体的网络被破坏、断裂,改变玻璃的性质,如  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{BaO}$  等,分别属于  $\text{A}_2\text{O}$  和  $\text{AO}$  型氧化物,称为网络外体氧化物。玻璃的性质主要取决于硅

氧骨架(网络)的连接程度和阳离子的配位数,玻璃中的中间体氧化物和网络外体氧化物都不能形成玻璃态,但是它们能改变玻璃的性质,一般称为网络改良氧化物。

表 1-1 几种玻璃牌号的化学成分

玻璃牌号	化学成分	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	ZnO	BaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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		58.10	3.67	0.23	0.13	10.89	4.26	11.69				11.13
重火石 ZF2		39.10			0.25	55.40			4.49			

玻璃中氧化物的组成不同,玻璃的结构和性质亦不同。因此,可以根据光学玻璃中每一类氧化物的百分比,初步判断光学玻璃的性能。例如,组成玻璃网络的玻璃生成体氧化物含量高,玻璃的化学稳定性就好;相反,网络体外氧化物的含量高,化学稳定性降低,玻璃折射率增大,玻璃工艺性改变。各种氧化物对玻璃特性的影响如表 1-2 所示。

表 1-2 各种氧化物对玻璃特性的影响

名称	减小	增大
SiO <sub>2</sub>	相对密度、膨胀系数	化学稳定性、耐温性、机械强度、黏度
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	析晶能力(当加入 2%~5%时)	机械强度、化学稳定性、黏度
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	析晶能力、黏度、膨胀系数	化学稳定性、温度急变抵抗性、折射率
Na <sub>2</sub> O 和 K <sub>2</sub> O	化学稳定性、耐温性、机械强度、结晶能力、硬度	膨胀系数
MgO	析晶能力、黏度(当加入量达 25%时)	耐温性、化学稳定性、机械强度
BaO	化学稳定性	相对密度、折射率、析晶能力
ZnO	膨胀系数	耐温性、化学稳定性、机械强度
CaO	耐温性	膨胀系数、硬度、化学稳定性、机械强度、析晶能力
PbO	化学稳定性、硬度、色散系数	折射率

1) 各向同性

由于玻璃(包括光学玻璃)具有玻璃态,它保留了液态分子无规律排列结构,从统计观点看其排列具有均一性,即玻璃内部沿任何方向的物理性质(如折射率、热膨胀系数、导电系数、硬度、摩擦系数等)都是相等的。因此,玻璃在光学性质上是各向同性的。

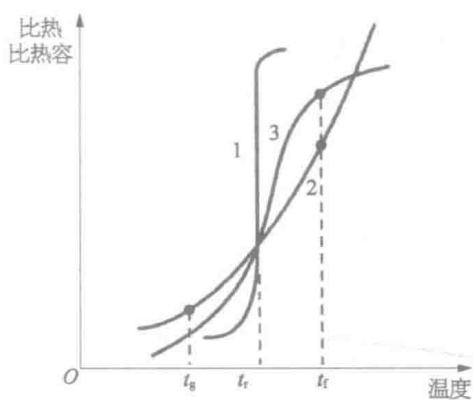
2) 介稳性

因为玻璃是经过冷却而制成的无定形体,它在冷却过程中黏度急剧增大,质点来不及形

成晶体的有规则排列,系统内能不是处于最低值。在一定条件下,玻璃态具有放出这部分内能向结晶态转变的可能。但是玻璃经长期放置也无明显的结晶析出,这是由于玻璃在常温下黏度极大,阻止它向晶体转化,因此,在常温下玻璃不可能自发转变为晶体(动力学因素)。只有在一定的外界条件下,克服物质由玻璃态转化为晶态的势垒,才能使玻璃析晶。从热力学的观点看,玻璃态是不稳定的;从动力学的观点看,它又是稳定的。虽然它具有从自发放热转化为内能较低的倾向,但在常温下转化为晶态的概率很小,所以说玻璃处于介稳状态。

### 3) 无固定熔点

玻璃的比热、比热容与温度的关系,如图 1-1 所示,当温度低于转变温度  $t_g$  时,其黏度大于  $10^{12} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,玻璃呈脆性;当温度高于软化温度  $t_f$  时,其黏度小于  $10^8 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,玻璃出现液体的典型性质, $t_g \sim t_f$  为玻璃软化的温度范围。可以看出,玻璃态物质由固体转变为液体是在一定温度范围(转化温度范围)内进行的,没有一个固定的温度(即没有熔点)。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。因此,严格地说玻璃不是固体,它只是具有固体的性质。



1-晶体;2-玻璃比热;3-玻璃比热容

图 1-1 玻璃比热、比热容与温度的关系曲线

光学玻璃具有普通玻璃的共性,但又有别于普通玻璃,它应能满足光学仪器性能的要求。其主要特点有 2 个:一是光学玻璃原料纯度要求高,有害杂质含量控制在 100 ppm ( $1 \text{ ppm} = 1 \times 10^{-6}$ ) 以下,光吸收系数控制在  $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ cm}$  范围内,从而保证了光通过玻璃之后的吸收损耗极小;二是光学玻璃在物理与化学性质上的高度均匀,以保证在光学系统中满足光学成像的要求。此外,光学玻璃在可见光波段没有吸收带或吸收线,具有均匀的折射率,具有较好的表面耐蚀性。

### 4) 性质变化的连续性

玻璃态物质从熔融状态到固体状态的性质变化过程是连续的、可逆的。所谓连续变化是由于除能够形成连续固熔体外,二元以上晶体化合物有固定的原子和分子比。因此,它们的性质变化是不连续的。但是,玻璃则不同,在玻璃形成范围内,由于化学成分可以连续变化,因此玻璃的一些物理性质必然随其所含各氧化物组成的变化而连续变化。

### 5) 性质变化的可逆性

性质变化的可逆性,是指玻璃由固体向熔融态或相反过程可以多次进行,而不会伴随新相生成。

## 1.1.2 无色光学玻璃的分类

光学玻璃的品种繁多,其中绝大多数是无色光学玻璃,它是制造光学透镜、棱镜等光学元件的主要材料。光学玻璃按光学常数与化学成分不同分成不同的牌号和类别。不同牌号的玻璃由于化学成分不同,不仅光学常数不同,而且对其工艺性能和其他理化特性也产生影响。

光学玻璃通常是根据其折射率  $n_d$  及阿贝数  $\nu_d$  值的不同,命名为不同类型的各种牌号的玻璃,目前已有三百多个牌号。一般可将光学玻璃分为两大类,即冕牌玻璃与火石玻璃。国外和国内部分厂是把所有  $n_d > 1.60$ ,  $\nu_d > 50$  和  $n_d < 1.60$ ,  $\nu_d > 55$  的玻璃叫冕牌玻璃;除冕牌玻璃以外的玻璃叫火石玻璃。而苏联和我国的一些工厂是将光学玻璃组成  $PbO$  含量小于 3%(重量分数)的划归冕类光学玻璃, $PbO$  含量大于和等于 3%的划归火石光学玻璃。冕类玻璃具有低折射率、低色散特性;火石玻璃具有高折射率、高色散率特性。两种玻璃的主要性能指标如表 1-3 所示。

表 1-3 冕牌玻璃与火石玻璃性能比较

冕牌玻璃 K( $PbO < 3\%$ )	火石玻璃 F( $PbO > 3\%$ )
折射率低 ( $n_d = 1.50 \sim 1.55$ ) 色散小 ( $\nu_d = 55 \sim 62$ ) 性硬、质轻、透明度好	折射率高 ( $n_d = 1.53 \sim 1.85$ ) 色散大 ( $\nu_d = 30 \sim 45$ ) 性软、质重、带黄绿色

冕类光学玻璃的基本组成为  $R_2O - B_2O_3 - SiO_2$  (R 代表碱金属元素),即属于硼硅酸盐与铝硅酸盐玻璃。据说这类玻璃问世之初,因其光泽晶莹夺目,非常珍贵,被作为皇冠上的装饰品,因此冠以“冕”玻璃。火石玻璃的基本组成为  $K_2O - PbO - SiO_2$ ,因为原料中含有氧化铅(俗称燧石、火石),所以称为火石玻璃,属于铅硅酸盐玻璃。

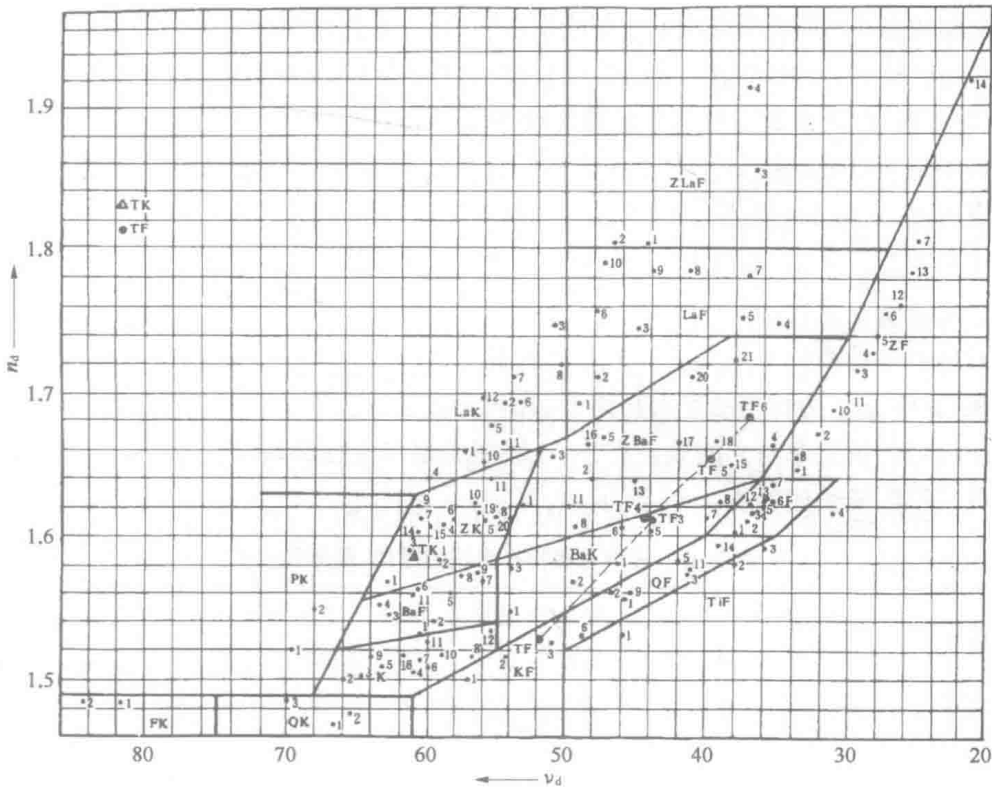
无色光学玻璃按照化学组成及光学常数接近原则分成若干个细类。我国根据“无色光学玻璃”国家标准(GB/903—1987),将现有光学玻璃分成 18 个类别,如表 1-4 所示,每一类按氦黄线 d 光的折射率 ( $n_d$ ) 和阿贝常数 ( $\nu_d$ ) 的大小分成若干细类,每一种牌号的玻璃在  $n_d - \nu_d$  领域图(见图 1-2)中占有一定的位置。

表 1-4 无色光学玻璃的类别、代号、折射率及色散

名称	代号	玻璃系统	$n_d$ 范围	中部(平均)色散 $d_n = n_F - n_C$	$\nu_d$ 范围
氟冕	FK	氟化物和氟磷酸盐	1.486 05~1.486 56	0.005 760~0.005 941	81.81~84.47
轻冕	QK	氟硅酸盐和硼硅酸盐	1.470 47~1.487 46	0.006 960~0.007 290	65.59~70.04
冕牌	K	硼硅酸盐	1.499 67~1.533 59	0.007 580~0.009 620	55.47~66.02
磷冕	PK	磷酸盐	1.519 07~1.548 67	0.007 430~0.008 060	68.07~69.86
钡冕	BaK	钡硅酸盐	1.530 28~1.574 44	0.008 710~0.010 176	56.05~63.36
重冕	ZK	锌钡硼硅酸盐	1.568 88~1.638 54	0.009 040~0.011 507	53.91~62.93
镧冕	LaK	镧钡硼硅酸盐	1.640 50~1.746 93	0.010 658~0.014 660	50.41~60.10
特冕	TK	氟化物和氟磷酸盐	1.585 99	0.009 600	61.04
冕火石	KF	铅钡硅酸盐	1.500 58~1.526 29	0.008 750~0.010 320	51.00~57.21
轻火石	QF	铅硅酸盐	1.531 72~1.585 51	0.010 905~0.015 200	39.18~48.76
火石	F	铅硅酸盐	1.603 24~1.636 04	0.015 900~0.018 001	35.35~37.94

(续表)

名称	代号	玻璃系统	$n_d$ 范围	中部(平均)色散 $d_n = n_F - n_C$	$\nu_d$ 范围
钡火石	BaF	钡铅硼硅酸盐	1.548 09~1.626 04	0.010 160~0.016 010	39.10~53.95
重钡火石	ZBaF	钡铅硼硅酸盐	1.620 12~1.723 40	0.011 710~0.019 040	35.45~53.14
重火石	ZF	铅硅酸盐	1.647 67~1.917 61	0.019 120~0.042 658	21.51~33.87
镧火石	LaF	镧钡铅硼酸盐	1.693 62~1.788 31	0.014 100~0.021 421	34.99~49.19
重镧火石	ZLaF	镧钡钡硼酸盐	1.801 66~1.910 10	0.017 168~0.025 610	35.54~46.76
钛火石	TiF	氟钛硅酸盐	1.532 56~1.616 50	0.011 580~0.019 904	30.97~45.99
特种火石	TF	铅铋硼酸盐	1.529 49~1.680 64	0.010 220~0.018 305	37.18~51.81

图 1-2 光学玻璃  $n_d - \nu_d$  领域图

用不同符号加顺序号来表示每一种玻璃,即光学玻璃的牌号,可以从以下几点加以识别。从牌号组成的最后一个字母识别是冕牌玻璃或火石玻璃,符号 K 表示冕牌光学玻璃, F 表示火石玻璃。在冕牌与火石玻璃两大类中又细分为若干子类,用英文字母加以标明,前面的字母表示掺杂的主要元素,后面的字母表示属于那一大类别。如 LaK,表示掺镧的冕牌玻璃,称为镧冕玻璃;如 BaF,表示掺钡的火石玻璃等。用汉语拼音字母 Z(重)、Q(轻)表示玻璃折射率的高低或比重的大小,如 ZF, QF 分别称为重火石玻璃,轻火石玻璃。最后的数字表示折射率从低向高的排列次序,例如, K9 表示冕类第 9 种玻璃; QK4 表示轻冕第 4 种玻



璃;ZLaF2 表示重镧火石第 2 种玻璃;PK1 表示磷冕第 1 种玻璃。但也有例外的情况,如 KF1,不能称为钾火石第 1 种玻璃,而应称为冕火石第 1 种玻璃。另外将具有特殊相对部分色散的玻璃用 TF 表示。

普通系列无色光学玻璃共有 135 个牌号,耐辐射系列的玻璃有 45 个牌号,一共有 180 个牌号。

为了用玻璃的名称表明其特性,国际玻璃码用 9 位数字表示,形式为“ $\times\times\times\times\times\times.\times\times\times$ ”,这 9 位数字玻璃码由 3 部分组成。玻璃码前 3 位数字表示折射率  $n_d$ ,取折射率值小数点后 3 位数字;玻璃码后 3 位数字用阿贝数值(或 V 值)的头 3 位数字,不计小数点;玻璃码小数点后 3 位数字代表玻璃的密度,不计小数点。如 K9 玻璃的  $n_d=1.5163$ ,  $\nu_d=64.1$ ,  $\rho=2.5$ ,则可表示为“516 641.250”。这种表示法特别方便计算机程序检索。

### 1.1.3 无色光学玻璃的质量指标及检测方法

光学参数表征不同光学玻璃的主要光学性能指标,无色光学玻璃的光学参数共有 7 项,包括折射率和色散率、光学均匀性、光的吸收系数、应力双折射、条纹度、气泡度、耐辐射性等。

#### 1) 折射率、色散系数与标准数值的允许差值

折射率是光学玻璃的一个十分重要的光学参数,是光学设计的基本参数之一,它要求有很高的准确度,一般都测定到小数点以后的第 4 位至第 5 位。

对于透明介质来说,折射率(又称绝对折射率)可简单地表示成光在真空中的速度  $c$  与在介质中的速度  $v$  之比,即  $n=c/v$ 。

相对折射率是两种不同介质的绝对折射率之比:  $n_{rel}=n_{mat}/n_{air}$ 。表示材料相对于空气的折射率,其中  $n_{mat}$  为材料的绝对折射率(相对于真空的折射率),  $n_{air}$  为空气的折射率。

光学材料的折射率与光的波长有关,一般用夫琅和费特征谱线来测定,夫琅和费特征谱线的颜色、符号、波长值如表 1-5 所示。

表 1-5 夫琅和费特征谱线的颜色、符号及波长

光源符号	汞紫外 Hg	汞紫 Hg	氢蓝 H	汞青 Hg	氢青 H	汞绿 Hg	氦黄 Ne	钠黄 Na	氢红 H	氦红 He	钾红外 K
谱线符号	i	h	G	g	F	e	d	D	C	b	A
波长/nm	365.01	404.66	434.1	435.84	486.13	546.07	587.65	589.29	656.27	709.5	768.50

玻璃的折射率随波长不同而不同,并受温度影响。通常在 20℃ 时用标准谱线测量玻璃的折射率。用于目视仪器的常规光学玻璃(光介质材料)以 d 光谱线的折射率  $n_d$  或平均折射率  $n_D$ , F 线和 C 线的折射率  $n_F$  和  $n_C$  为主要指标。这是因为 F 线和 C 线位于人眼灵敏光谱区的两端,而 d 线位于其中间,比较接近人眼最灵敏的谱线 555 nm。

不同牌号的光学玻璃是由不同的氧化物所组成的,各种氧化物均有自己的折射率。光学玻璃的折射率,用含氧化物的百分比及折射率加和公式计算(精确度可达 0.001)。因此不同牌号的光学玻璃其折射率是不同的。

测量光学玻璃折射率常用最小偏向角法、V 形棱镜法、临界角法等,详见附录 1。绝大多