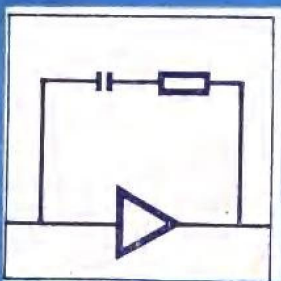
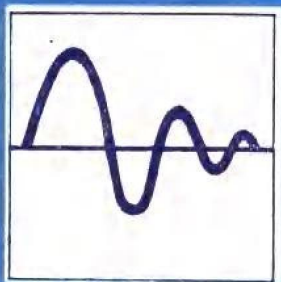
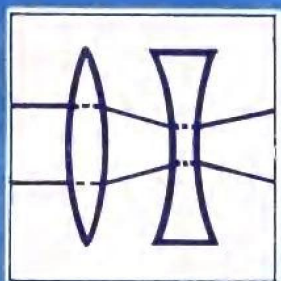
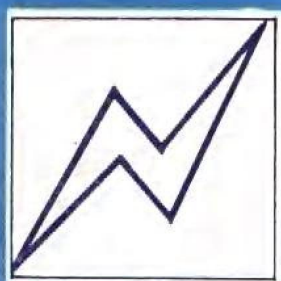
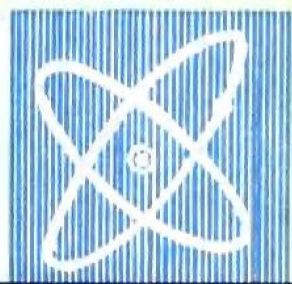


高等学校试用教材



# 光学零件 制造工艺学

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

特别要指出的是,由于光学零件工艺学还是一门很年青的学科,随着光学工业的发展,新材料、新工艺、新技术不断涌现,很多理论还有待于总结、完善和提高。

### 三、我国光学零件工艺的发展概况

我们伟大的祖国在光学材料和光学加工方面也有着悠久的历史。早在春秋战国时期就已经有铜锡合金磨制镜及燧(一种在日光下取火的镜子)的记载。一种类似玻璃的璧琉璃也在同一时期出现。东汉时能制造玻璃,王充“论衡”中说:方士熔炼五色石块,铸成阳燧,可在日光下取火。可见,东汉时在我国已经出现原始的玻璃透镜了。但由于封建社会制度对科学的歧视,阻碍了光学材料和光学加工的进一步发展。

解放前,由于帝国主义、封建主义和官僚资本主义的反动统治,我国的光学工业几乎等于空白,仅有一些光学仪器的修理工场。

新中国的成立,为我国光学事业开辟了无限广阔的前景,在党的关怀下,在五十年代就建立了许多新的光学工厂,成立了光学精密机械研究所,在一些高校里设置了光学仪器专业,我国的光学事业从无到有、从小到大,得到了蓬勃的发展。

目前,光学玻璃正朝着提高质量、扩大品种,实行新型熔炼工艺发展;光学零件加工正朝着毛坯型料化、粗磨机械化、精磨和抛光高速化、定中磨边自动化的方向发展;光学特种工艺也出现许多新技术,例如真空镀膜中已能镀制各种用途的多层干涉薄膜元件,采用电子束蒸发技术和反应蒸发技术,研制精确控制的膜厚控制装置;精密刻划中采用光电跟踪、激光定位等新技术等;光学工艺的基础理论研究也正逐步深入,取得可喜的成绩。

## 前 言

这本教材是根据 1978 年高等学校一机部对口专业座谈会确定的教材编审计划和光学仪器专业教材会议拟订的“光学零件制造工艺学”的教学大纲而编写的。在编写过程中参考了 1976 年由“光学零件制造工艺学”联合编写组编写的“光学零件制造工艺学”一书。

教材中较为系统地介绍了光学材料、光学零件的基本工艺(包括精密及特殊光学零件)及光学零件的特种工艺。内容上侧重于光学仪器类专业所必需的基本工艺知识及基本工艺理论,同时也注意到新工艺的应用与发展。本书可作为高等学校光学仪器类专业的专业基础课教材,也可供从事光学工艺的技术人员和工人参考。

本书由浙江大学曹天宁同志和上海机械学院周鹏飞同志主编。由北京工业学院辛企明同志担任主审。参加编写的有浙江大学曹天宁同志(第一、二、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四章);上海机械学院周鹏飞同志(绪言、第三、十五章、附录);北京工业学院查立豫同志(第五章)和胡立山同志(第四章);天津大学程荫悟同志(第六章);上海机械学院史大道和陈林同志(第十六章)。

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宝贵的资料,在此一并致谢!由于编者水平所限,编写时间匆促,书中缺点和错误在所难免,希望广大读者提出批评指正。

# 绪 言

## 一、光学零件工艺学的任务

无论是现代工业、农业、国防和科学文化事业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和生产有着直接的影响，有时甚至起着关键的作用。因此，研究如何运用工艺方法来多、快、好、省地制造光学零件是光学零件工艺学这门课程所担负的基本任务。

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。学习本课程应达到以下几方面的目的：

(1) 掌握光学零件加工工艺的基础知识和基本理论，在从事光学仪器设计的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。

## 二、光学零件工艺学的内容和学习方法

光学零件的加工方法和装夹方法与金属零件的加工相比较，有很大的区别，这是因为：

(1) 光学零件加工的对象大都是一些脆性材料，如玻璃、晶体等；而金属是塑性材料。

(2) 光学零件的面形精度和表面质量比金属加工时要高得多。

光学零件中最大量的是透镜、棱镜及平面零件，它们的工艺流程一般为

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

本课程的主要内容为：

### (1) 光学材料

主要介绍光学玻璃的光学性能、化学性能、机械性能及热性能；光学玻璃的分类及其质量指标；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

介绍光学零件的一般加工过程，包括光学零件的技术条件、毛坯成型、精磨、抛光及定心磨边的原理、设备、工夹具、辅料以及工艺因素的影响。

### (3) 精密及特殊光学零件的加工工艺

介绍光学样板、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

介绍光学零件的表面镀膜、刻划及胶合的原理、作用、设备及工艺方法。

光学零件工艺学是一门专业基础课，它要求有宽广的基础知识及一定的专业知识。它又是一门实践性很强的学科，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知识，学习中要紧密联系生产实际，注意把学到的书本知识运用到生产实践中去。

# 目 录

前言	1
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	8
§ 1-4 无色光学玻璃的其他性质	14
§ 1-5 有色光学玻璃	16
§ 1-6 特殊玻璃	19
第二章 光学晶体与光学塑料	22
§ 2-1 光学晶体	22
§ 2-2 光学塑料	26

## 第二篇 光学零件的基本工艺

第三章 光学零件的技术条件与技术准备	29
§ 3-1 光学零件图	29
§ 3-2 对光学零件的要求	33
§ 3-3 加工余量	35
§ 3-4 光学设计的工艺性	38
第四章 光学零件毛坯及粗磨成型	41
§ 4-1 光学零件的毛坯	41
§ 4-2 散粒磨料粗磨工艺	46
§ 4-3 铣磨工艺	48
§ 4-4 铣磨夹具设计的一般原则	63
第五章 光学零件的精磨	66
§ 5-1 光学零件的上盘与工夹具设计	66
§ 5-2 光学表面成型的运动学	77
§ 5-3 高速精磨工艺	84
第六章 光学零件的抛光	100
§ 6-1 抛光机理	100
§ 6-2 各工艺因素对抛光的影响	103
§ 6-3 光圈的认识	104
§ 6-4 古典法抛光	110
§ 6-5 高速抛光	115
§ 6-6 离子抛光	121
第七章 光学零件的定心磨边	124
§ 7-1 光学法定心磨边	124
§ 7-2 机械法定心磨边	128
§ 7-3 全自动定心磨边	131
§ 7-4 磨边中常见的缺陷	131
第八章 光学零件的胶合	133
§ 8-1 概述	133
§ 8-2 胶合材料	134
§ 8-3 胶合工艺	136
§ 8-4 胶合定中心	138
§ 8-5 胶合中产生的缺陷	140
第九章 光学零件的清洗与防护	141
§ 9-1 光学零件的清洗	141
§ 9-2 光学零件的防护	143

## 第三篇 精密及特殊光学零件工艺

第十章 球面样板制造工艺 .....	146
§ 10-1 球面样板的设计及精度等级 .....	146
§ 10-2 球面样板的制造工艺 .....	148
§ 10-3 球面样板的检验 .....	149
第十一章 薄形零件的制造 .....	155
§ 11-1 薄形零件的光圈变形及其克服方法 .....	155
§ 11-2 薄形零件的上盘及应用实例 .....	156
第十二章 高精度平面与高精度棱镜的制造工艺 .....	159
§ 12-1 高精度平面的制造 .....	159
§ 12-2 高精度棱镜的制造 .....	161
§ 12-3 角度与平面度的测量 .....	165
第十三章 非球面制造工艺 .....	173
§ 13-1 非球面制造概述 .....	173
§ 13-2 非球面制造方法 .....	174
第十四章 晶体零件制造工艺和塑料零件的成型方法 .....	180
§ 14-1 晶体零件制造特点 .....	180
§ 14-2 硬质晶体零件的制造 .....	180
§ 14-3 软质晶体零件的制造 .....	183
§ 14-4 水溶性晶体零件的制造 .....	184
§ 14-5 光学塑料零件的成型方法 .....	186

## 第四篇 光学零件的特种工艺

第十五章 光学零件的表面镀膜 .....	187
§ 15-1 膜层的种类和应用 .....	187
§ 15-2 真空镀膜设备 .....	201
§ 15-3 真空镀膜工艺 .....	207
§ 15-4 化学镀膜 .....	212
第十六章 光学零件的刻划和照相工艺 .....	215
§ 16-1 概述 .....	215
§ 16-2 机械法制造分划 .....	216
§ 16-3 照相法制造分划 .....	226
§ 16-4 机械-照相法制造分划 .....	235
§ 16-5 光栅制造技术 .....	236
附录 .....	243
§ 1. 光学零件工艺规程的编制 .....	243
§ 2. 光学零件表面疵病国家标准 (GB1185-74) .....	244
§ 3. 光学零件薄膜的分类、符号及标注 (GB1315-77) .....	258

# 绪 言

## 一、光学零件工艺学的任务

无论是现代工业、农业、国防和科学文化事业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和生产有着直接的影响，有时甚至起着关键的作用。因此，研究如何运用工艺方法来多、快、好、省地制造光学零件是光学零件工艺学这门课程所担负的基本任务。

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。学习本课程应达到以下几方面的目的：

(1) 掌握光学零件加工工艺的基础知识和基本理论，在从事光学仪器设计的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。

## 二、光学零件工艺学的内容和学习方法

光学零件的加工方法和装夹方法与金属零件的加工相比较，有很大的区别，这是因为：

(1) 光学零件加工的对象大都是一些脆性材料，如玻璃、晶体等；而金属是塑性材料。

(2) 光学零件的面形精度和表面质量比金属加工时要高得多。

光学零件中最大量的是透镜、棱镜及平面零件，它们的工艺流程一般为

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

本课程的主要内容为：

### (1) 光学材料

主要介绍光学玻璃的光学性能、化学性能、机械性能及热性能；光学玻璃的分类及其质量指标；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

介绍光学零件的一般加工过程，包括光学零件的技术条件、毛坯成型、精磨、抛光及定心磨边的原理、设备、工夹具、辅料以及工艺因素的影响。

### (3) 精密及特殊光学零件的加工工艺

介绍光学样板、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

介绍光学零件的表面镀膜、刻划及胶合的原理、作用、设备及工艺方法。

光学零件工艺学是一门专业基础课，它要求有宽广的基础知识及一定的专业知识。它又是一门实践性很强的学科，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知识，学习中要紧密切联系生产实际，注意把学到的书本知识运用到生产实践中去。

特别要指出的是,由于光学零件工艺学还是一门很年青的学科,随着光学工业的发展,新材料、新工艺、新技术不断涌现,很多理论还有待于总结、完善和提高。

### 三、我国光学零件工艺的发展概况

我们伟大的祖国在光学材料和光学加工方面也有着悠久的历史。早在春秋战国时期就已经有铜锡合金磨制镜及燧(一种在日光下取火的镜子)的记载。一种类似玻璃的璧琉璃也在同一时期出现。东汉时能制造玻璃,王充“论衡”中说:方士熔炼五色石块,铸成阳燧,可在日光下取火。可见,东汉时在我国已经出现原始的玻璃透镜了。但由于封建社会制度对科学的歧视,阻碍了光学材料和光学加工的进一步发展。

解放前,由于帝国主义、封建主义和官僚资本主义的反动统治,我国的光学工业几乎等于空白,仅有一些光学仪器的修理工场。

新中国的成立,为我国光学事业开辟了无限广阔的前景,在党的关怀下,在五十年代就建立了许多新的光学工厂,成立了光学精密机械研究所,在一些高校里设置了光学仪器专业,我国的光学事业从无到有、从小到大,得到了蓬勃的发展。

目前,光学玻璃正朝着提高质量、扩大品种,实行新型熔炼工艺发展;光学零件加工正朝着毛坯型料化、粗磨机械化、精磨和抛光高速化、定中磨边自动化的方向发展;光学特种工艺也出现许多新技术,例如真空镀膜中已能镀制各种用途的多层干涉薄膜元件,采用电子束蒸发技术和反应蒸发技术,研制精确控制的膜厚控制装置;精密刻划中采用光电跟踪、激光定位等新技术等;光学工艺的基础理论研究也正逐步深入,取得可喜的成绩。



# 第一篇 光学材料

制造光学零件的原材料包括光学玻璃、光学晶体、光学塑料及偏振材料等。最常用的是可见光范围内采用的光学玻璃；其次是红外、紫外波段与激光技术上所采用的光学晶体。光学塑料的应用也已越来越广泛。

## 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、铝等多种氧化物在高温时形成盐熔液体，经过过冷而得到的各向同性的无定形物体。大多数的光学玻璃以  $\text{SiO}_2$  为主组成的，属硅酸盐玻璃。其次，还有以  $\text{B}_2\text{O}_3$  为主的，属硼酸盐玻璃，以  $\text{P}_2\text{O}_5$  为主的，属磷酸盐玻璃。

熔炼光学玻璃关键在于纯净的原料、耐蚀的坩埚（耐火材料或铂制成）及严格控制的熔炼过程。熔炼过程包括：

炉料→硅酸盐的形成（ $800\sim 900^\circ\text{C}$ ）→玻璃的形成（ $1000\sim 1250^\circ\text{C}$ ）→澄清（ $1400\sim 1500^\circ\text{C}$  消除气泡）→均匀化（ $1400\sim 1500^\circ\text{C}$  由搅拌消除条纹）→冷却（ $200\sim 300^\circ\text{C}$ ）→成型→退火（消除内应力）→型料。

### § 1-1 玻璃的特性及玻璃结构

#### 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物体，由于粘度逐渐增加而具有固体的机械性质的，均称之为玻璃。在玻璃熔炼过程中，熔融物在液态的冷却过程中粘度急速增大，分子间不间歇和无规则的运动受到了阻碍而减慢，最后形成了不规则的分子排列结构。玻璃除了具有较高的硬度，较大的脆性和一定的透明度外，还具有以下物理特性：

1. 各向同性 由于玻璃的均一化结构使玻璃内部沿任何方向度量的物理性能（如折射率、热膨胀系数、导电系数）是同值的。

2. 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 例如玻璃的比热与温度的关系曲线如图 1-1 所示。温度低于  $t_g$  时，其粘度大于  $10^{12}\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，

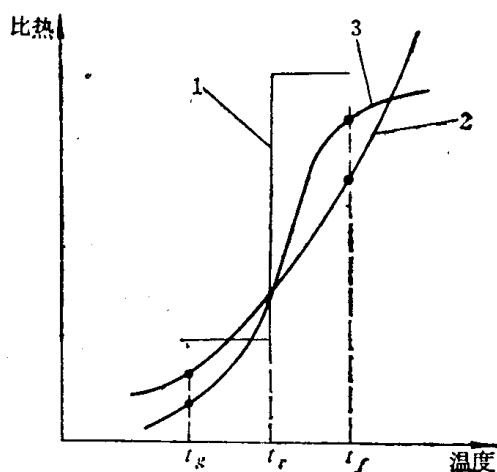


图 1-1 玻璃的比热与温度的关系曲线

1—晶体 2—玻璃比容 3—玻璃比热

玻璃呈脆性;当温度高于 $t_f$ 时,其粘度小于 $10^8 \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ,玻璃出现液体的典型性质。 $t_g \sim t_f$ 为玻璃固化的温度范围,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. 玻璃比晶体含有较高的内能 因为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,实际上不可能使常温下的玻璃转变为晶体。

玻璃的性质不仅与玻璃的组分有关,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,仅改变玻璃结构而引起折射率的改变。玻璃不是一个单纯的无定形体,其质点并不是没有丝毫规律性的。例如,采用不同的热处理方法,致使玻璃结构发生变化,以控制折射率的变化。

## 二、玻璃结构

玻璃结构的学说并未完全成熟,仅处于定性阶段。比较完满的是两种学说:微晶说与网架说,它们认为玻璃内部结构存在着有规则与无规则两种排列。有规则排列的原子、分子或离子与晶体比起来是极少的。

微晶学说的基本原理是苏联学者 A. A 列别捷夫(Левбедев)于1921年首先提出。该学说认为玻璃由不同硅酸盐和二氧化硅生成的微晶体所构成。它们的化学性质由玻璃成分决定。这些微晶体可能是固定的化合物,也可能是固态溶液。它们的性质应与形成玻璃的相图有关。这些微晶不是单纯的具体正常晶格的结晶,实际上应把它看作是极度变形的但在一定程度上又反映出相应晶格特征的结构组织。微晶体的中央部分才有规律性,和晶体晶格一样,随着向外围过渡,晶格变形大为增加,呈现出玻璃的无规则结构。粗略地估计,有规则的结构约占10~15%。

微晶学说的实验基础是:用约含有70%  $\text{SiO}_2$  的硅酸盐作试验,加热与冷却试样在 $520^\circ\text{C}$ 范围内,如图1-2  $ab$  段所示,折射率的增长纯粹是温度的可逆效应;若将试样加热到  $bc$  段(图

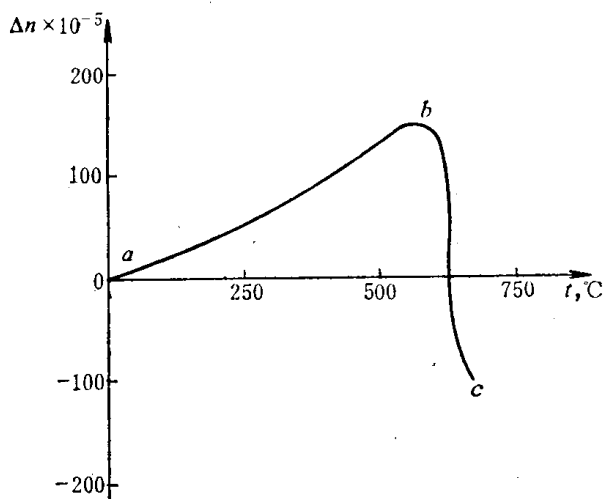


图 1-2 玻璃折射率与温度的关系

1-2)并在此温度持续,曲线急剧下降,并且不再是温度的可逆效应了。将此情况与石英结晶的晶型转变联系起来,发现 $520 \sim 595^\circ\text{C}$ 正是 $\alpha\text{-SiO}_2$ 转变成 $\beta\text{-SiO}_2$ 的温度段,折射率(膨胀系数也是如此)的温度效应的不可逆转变是由于玻璃内部的石英晶型转变引起的,证明了玻璃内部有石英微晶存在。

网架学说由荷兰学者柴哈里阿生(Zachariasen)于1932年提出。他认为玻璃的原子、离子或原子团间的结合与晶体类似,是一个连续的网状体;与晶体的区别是结构网呈现出很大的不规则性。例如,石英玻璃象结晶石英一样,是由 $\text{SiO}_4$ 四面体构成。石英晶体的结构中(图1-3a),每一四面体相对于其他四面体都是有规律地排列着;石英玻璃(图1-3b)的结构中,邻近的四面体在彼此方向上已有较小的不规则性。距离远的四面体则是任意排列着;在玻璃结构(图1-3c)中,因 $\text{G}_2\text{O}$ 和 $\text{GO}$ 型的氧化物不能形成玻璃态,这些金属离子(如 $\text{Na}^+$ )一般位于网间空隙中,某些 $\text{O}^{2-}$ 离子间的键断裂,有的 $\text{O}^{2-}$ 离子与二个 $\text{Si}^{4+}$ 离子结合,有的 $\text{O}^{2-}$ 离子只与一个 $\text{Si}^{4+}$ 离子结合。为使网状结构具有一定的稳定性,金属离子必须半径大而电荷小,适合这一要求的金属离子有 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、

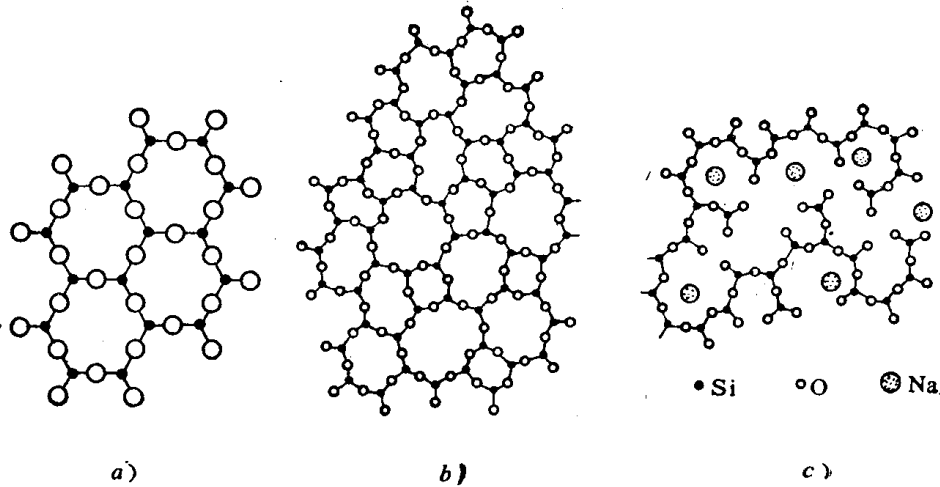


图 1-3 晶体结构与玻璃结构

a) 石英晶体 b) 石英玻璃 c) 钠玻璃

$\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$  等。应用玻璃的网架结构理论可以解释玻璃的一些理化特性:

1. 原子排列在各个方向上统计地一致因此玻璃具有各向同性的特性。
2. 原子间的结构具有不规则性, 分离每个原子所需要的能量也不相同, 故出现了软化范围, 不象具有固有晶格的晶体那样具有一定的熔点。
3. 玻璃结构的不规则性, 以致不能以一定的化学式来表示。
4. 构成玻璃的结构网的氧化物  $\text{G}_2\text{O}_3$ 、 $\text{GO}_2$  及  $\text{G}_2\text{O}_5$  型符合玻璃形成体的要求, 如  $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  等。

对能形成玻璃态网架结构的氧化物称之为网架形成氧化物, 如  $\text{SiO}_2$  形成硅酸盐玻璃等。 $\text{G}_2\text{O}$  和  $\text{GO}$  型氧化物, 如  $\text{BaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  等, 不能形成玻璃态网架结构, 称为网架改良氧化物, 也有称之为玻璃的中间体, 玻璃的很多重要工艺性质来源于这些中间体。这些中间体的正离子比较容易移动, 例如, 光学玻璃中的  $\text{BaO}$ 、 $\text{PbO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  等的碱土金属离子和碱金属离子  $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等很易和玻璃表面的  $\text{H}^+$  离子进行交换, 产生腐蚀现象, 以后在光学零件防腐防霉中还要讨论。

## § 1-2 无色光学玻璃的化学成分及分类

光学玻璃按光学常数与化学成分的不同而分成各种不同的牌号和类别。不同牌号的玻璃由于化学成分不同, 不仅使光学常数不同还对其工艺性能和其他理化特性产生影响。

无色光学玻璃分为两大类: 冕牌玻璃及火石玻璃。其性能、特征比较如表 1-1。

光学玻璃的分类牌号按我国国家标准(GB903-65)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

表 1-1 冕牌玻璃与火石玻璃比较

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

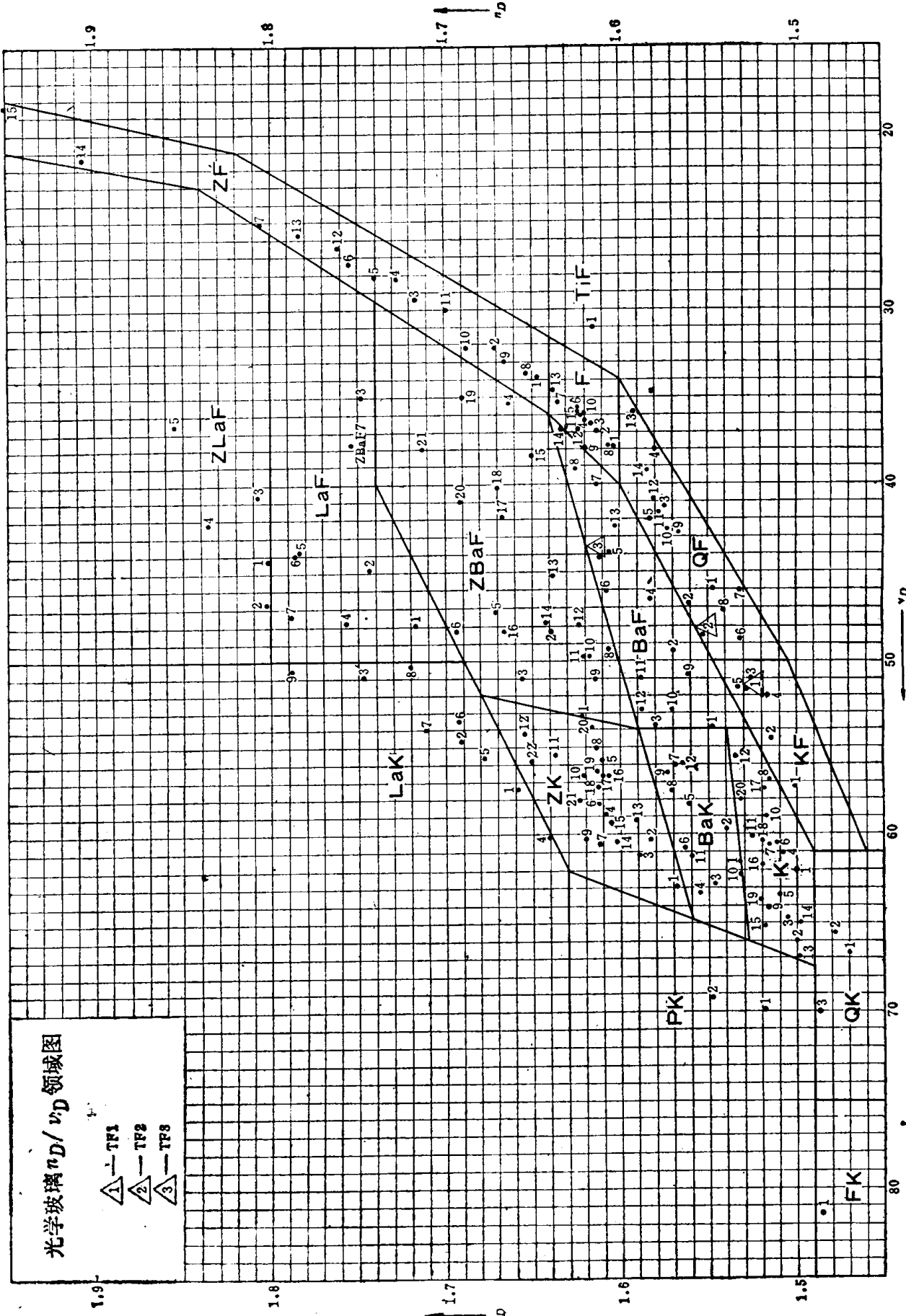


图 1-4 光学玻璃  $n_D/v_D$  领域图

表 1-2 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			4.94			

表 1-3 各种氧化物的光学常数及修正系数

各种氧化物	$n_D$	$(n_F - n_C) \cdot 10^{-5}$	$S$	$S$ 表示各原子团的分子量
SiO <sub>2</sub>	1.475	595	60	SiO <sub>2</sub>
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(BO <sub>4</sub> )、(BO <sub>3</sub> )	1.61	750	43	(BO <sub>2</sub> )
	1.464	670	70	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.49	850	102	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.02	4000	170	(SbO <sub>3</sub> )
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.57	1600	198	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
PbO-PbOI	2.46	7700	343	PbO·SiO <sub>2</sub>
PbOII	2.46	7700	223	PbO
PbOIII	2.50	11600	223	PbO
BaO	2.01	2260	213	BaO·SiO <sub>2</sub>
ZnO	1.96	2850	223	2ZnO·SiO <sub>2</sub>
CaO	1.83	1750	86	
MgO	1.63	1300	100	MgO·SiO <sub>2</sub>
K <sub>2</sub> O	1.58	1200	94	K <sub>2</sub> O
Na <sub>2</sub> O	1.59	1400	62	Na <sub>2</sub> O

表 1-4 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, $\nu_D$ 值	折射率
氧化铋	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

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),即表示氧化物的含量;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,共有一百六十多种。每一种牌号在 $n_D$ - $\nu_D$ 领域图(图1-4)中占有一定的位置。从图中可以看出:随着PbO的增加, $n_D$ 与 $\nu_D$ 值均逐步增加;随着BaO的增加, $n_D$ 增大,而 $\nu_D$ 增大较少。玻璃的光学常数可以用加和公式来计算,精确度可达0.001。

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

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

式中  $n_D$ 、 $(n_F - n_C)$ ——玻璃的折射率、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;

$n_{D_i}$ 、 $(n_{F_i} - n_{C_i})$ ——玻璃中各氧化物的折射率、中部色散。

表1-2列举出几种玻璃牌号的化学成分。表1-3给出各种氧化物的折射率、中部色散及修正系数。当然,光学玻璃中的氧化物不仅起着调整光学常数的作用,而且对玻璃的其他特性也有影响,如表1-4。

### § 1-3 无色光学玻璃的质量指标及其检测方法

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;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1-5。

表1-5 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; $n_F - n_C$ 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

按国标分成四级,见表 1-6。每一类玻璃均分成四级,则共有十二个等级。同一批玻璃的实际折射率,各块之间相差较小,一般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。

玻璃的折射率是光学设计的基本参数之一,一般由九条谱线来测定,其波长值见表 1-7。

表 1-6 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	$0.5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$	C	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$
B	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$	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

表 1-7 谱线的波长值

光源元素	汞紫外 Hg	汞紫 Hg	汞蓝 Hg	氢蓝 H	汞绿 Hg	氩黄 Ne	钠黄 Na	氢红 H	钾红外 K
谱线符号	<i>i</i>	<i>h</i>	<i>g</i>	<i>F</i>	<i>e</i>	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>A</i>
波长 nm	365.01	404.66	435.84	486.13	546.07	587.65	589.29	656.27	766.50

测量折射率的方法常用 V 形棱镜法,在 V 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  $2 \times 10^{-5}$ 。其测量原理如图 1-5 所示,

由两块材料完全相同的等腰直角棱镜胶合成张角为  $90^\circ$  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;

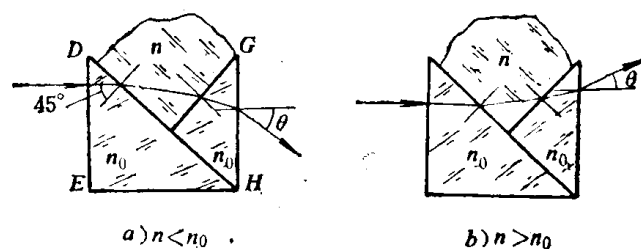


图 1-5 V 棱镜法测量折射率

如果  $n \neq n_0$ , 则从  $GH$  面出射光线将偏折一个角度  $\theta$ 。  $\theta$  角的大小、V 形棱镜折射率  $n_0$  与被测件折射率  $n$  有如下关系式:

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

$n < n_0$  时用“-”号,当  $n > n_0$  时用“+”号。两种光线进行情况如图 1-5 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  $\nu_D$  用下式计算得到:

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

如果需要其他波长的折射率时,可用下列公式计算:

$$n_{\lambda}^2 = A_0 + A_1 \lambda^2 + A_2 \lambda^{-2} + A_3 \lambda^{-4} + A_4 \lambda^{-6} + A_5 \lambda^{-8} \quad (1-5)$$

式中  $n_\lambda$ ——波长为  $\lambda$  时的折射率;

$\lambda$ ——波长, nm;

$A_0 \sim A_5$ ——常数, 查有关手册。

### 三、光学均匀性

从广义上讲, 玻璃的均匀性包括同一块玻璃中折射率变化的不均匀程度——物理不均匀性及玻璃中的气泡、条纹与结石——化学不均匀性。前者称光学均匀性, 主要是由于退火时退火炉内各处温度不均匀引起的。这种折射率变化是渐变的, 不能用折射仪测定。它影响仪器的鉴别率。测定光学均匀性类别时将被测体两端面细磨抛光后, 置于平行光管与望远镜之间测其最小鉴别角  $\varphi$ , 再将  $\varphi$  与平行光管理论鉴别角  $\varphi_0$  相比。依据  $\varphi/\varphi_0$  的比值 (最大值) 分为五类, 见表 1-8。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 1-6。

表 1-8 玻璃均匀性类别

类 别	1, 2	3	4	5
$\varphi/\varphi_0$	1.0	1.1	1.2	1.5

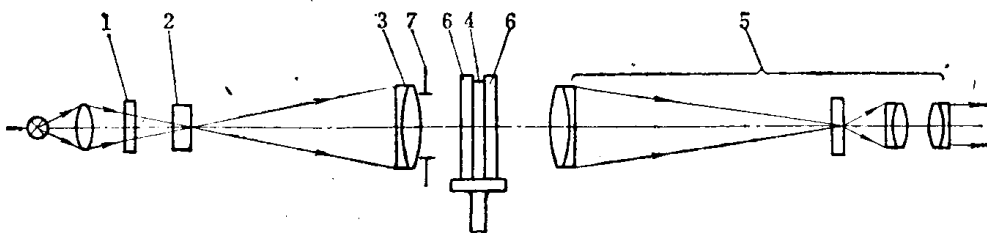


图 1-6 光学均匀性的测量

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 1-9。吸收系数的测量装置如图 1-7 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  $I_\tau$ , 则透过系数  $\tau$  为

$$\tau = \frac{I_\tau}{I_0} = (1 - \rho)^2 e^{-El} \quad (1-6)$$

式中  $\rho$ ——反射系数;

$E$ ——吸收系数;

$e$ ——自然对数的底;

$l$ ——玻璃厚度 (cm)。

表 1-9 光吸收系数类别

类 别	光 吸 收 系 数 (%) 不大于	类 别	光 吸 收 系 数 (%) 不大于
1	0.4	4	1.0
2	0.6	5	1.5
3	0.8		



显然,

$$E = \frac{1}{l} [2 \ln(1-\rho) - \ln \tau] \quad (1-7)$$

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

$$\rho = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1-8)$$

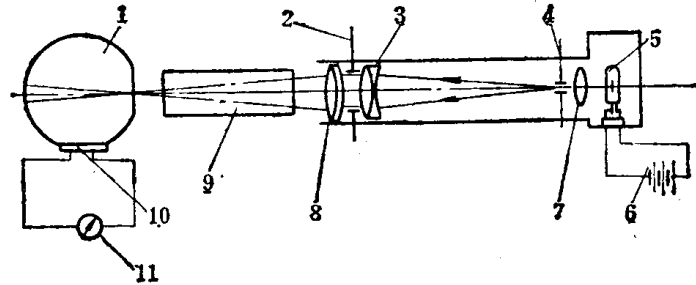


图 1-7 吸收系数测量仪

- 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

实际上,光的反射损失还与表面光洁度有关,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,玻璃内可产生内应力,破坏了各向同性,光学上的作用是引起双折射。当一束光线通过有内应力的玻璃时,将产生二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的光程差大小分为五类,见表 1-10。

表 1-10 应力类别

类 别	最大光程差 (nm/cm)
1	2
2	6
3	10
4	20
5	50

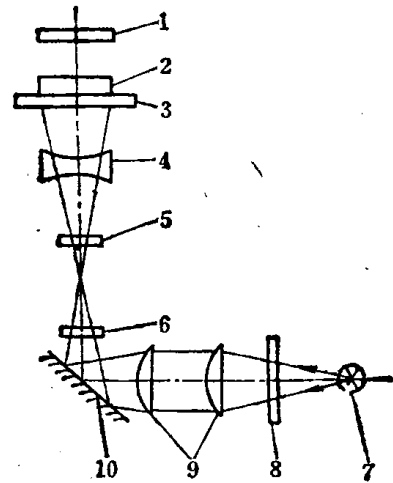


图 1-8 应力仪

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