

光学玻璃

中册

(第二版)

于福熹等著



科学出版社

统一书号: 15031 · 4

定 价: 1.60

本社书号: 2795 · 15

科技新书目: 35-35

光 学 玻 璃

中 册

(第 二 版)

于福熹 等 著

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

全书共有三编,分为上中下三册。上册(即第一编)讨论光学玻璃的物理化学基础,包括玻璃结构、玻璃生成、玻璃性质以及计算方法等。中册(即第二编)介绍光学玻璃品种的发展和不同光学玻璃系统的特点。下册(即第三编)就光学玻璃生产过程的不同阶段分别叙述其基本原理。

书中有关材料,除部分取自国外已发表的文献资料外,主要是我国自1953年以来光学玻璃研究工作和产品试制等经验和成果的积累。

本书可供从事光学玻璃或一般玻璃的科学技术工作者参考,也可作为高等学校玻璃和光学玻璃专业的教学辅助材料。

光 学 玻 璃

中 册

(第 二 版)

干福熹 等 著

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1964 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1982 年 12 月第 二 版 印张: 8 3/8

1982 年 12 月第一次印刷 插页: 精 2

精: 1—1,650 字数: 222,000

印数: 平: 1—1,750

统一书号: 15031·445

本社书号: 2795·15—4

定 价: 布脊精装 2.20 元
平 装 1.60 元

目 录

第二编 光学玻璃系统和品种

第一章 光学仪器对光学玻璃的要求.....	蒋亚丝、干福熹	302
§ 2.1-1 光学玻璃的质量和性能要求		302
§ 2.1-2 光学仪器对扩大光学玻璃光学常数的要求		307
§ 2.1-3 光学玻璃的质量指标及选择		313
§ 2.1-4 光学玻璃品种的发展		315
参考文献		318
第二章 光学玻璃的命名及化学成分概述	蒋亚丝	319
§ 2.2-1 光学玻璃的命名		319
§ 2.2-2 光学玻璃化学成分概述		324
第三章 硅酸盐玻璃系统	干福熹	326
§ 2.3-1 硼硅酸盐玻璃系统 ($R_2O-B_2O_3-SiO_2$)		326
§ 2.3-2 铝硼硅酸盐玻璃系统 ($R_2O-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$)		339
§ 2.3-3 无碱硼硅酸盐玻璃系统 ($RO-B_2O_3-SiO_2$)		348
§ 2.3-4 铅硅酸盐玻璃系统 ($R_2O-PbO-SiO_2$)		354
§ 2.3-5 钽硅酸盐玻璃系统 ($R_2O-TiO_2-SiO_2$, $RO-TiO_2-SiO_2$)		361
参考文献		364
第四章 硼酸盐玻璃系统.....	钟奖生、干福熹	365
§ 2.4-1 概述.....		365
§ 2.4-2 二元硼酸盐玻璃系统 $R_mO_n-B_2O_3$ 的性质变化及其原因.....		366
§ 2.4-3 各种氧化物对不同成分硼酸盐玻璃性质影响规律.....		376
§ 2.4-4 几个实用的硼酸盐玻璃系统.....		383
参考文献		403
第五章 磷酸盐玻璃系统	干福熹	405
§ 2.5-1 磷酸盐二元系统玻璃的物理化学性质.....		405
§ 2.5-2 磷酸盐三元系统玻璃的物理化学性质.....		413

§ 2.5-3 磷酸盐玻璃结构变化及其对性质影响·····	427
参考文献·····	431
第六章 氟化物玻璃系统····· 干福熹	432
§ 2.6-1 全氟化物玻璃系统·····	432
§ 2.6-2 氟磷酸盐玻璃系统·····	441
§ 2.6-3 氟化物玻璃结构变化及其对性质的影响·····	455
参考文献·····	457
第七章 硫系化合物玻璃系统····· 干福熹、毛锡煮	458
§ 2.7-1 玻璃生成范围·····	458
§ 2.7-2 玻璃的物理性质及其变化规律·····	466
§ 2.7-3 玻璃成分和性质间以及各性质间若干相互关系·····	484
参考文献·····	491
第八章 常用光学玻璃····· 蒋亚丝	493
§ 2.8-1 冕类光学玻璃·····	495
§ 2.8-2 火石类光学玻璃·····	502
参考文献·····	505
第九章 新品种光学玻璃····· 干福熹、蒋亚丝	506
§ 2.9-1 特高折射率光学玻璃·····	506
§ 2.9-2 高折射率低色散光学玻璃·····	513
§ 2.9-3 低折射率高色散光学玻璃·····	527
§ 2.9-4 低色散光学玻璃·····	533
§ 2.9-5 特低折射率光学玻璃·····	544
§ 2.9-6 特殊色散光学玻璃·····	546
§ 2.9-7 热光稳定光学玻璃·····	554
参考文献·····	563

第二编 光学玻璃系统和品种

光学玻璃是光学仪器中使用得最多的一种光学材料。绝大部分光学零件如透镜、稜镜、反射镜等都由光学玻璃制成。光学玻璃的主要特征是高度的透明性、物理及化学上的高度均匀性以及具有特定和精确的光学常数。随着光学仪器的日益发展,对光学玻璃质量的提高及光学常数范围的扩大提出更高的要求。目前,光学玻璃的牌号已超过数百种。

长时期内,各国对于本国所生产的各种牌号光学玻璃的成分是严格保守秘密的。如果某一国家一旦由其它国家得到光学玻璃成分而试制成功光学玻璃后,他们往往仍然沿用这些“经典”的配方而很少改进,或是仅仅依靠经验作局部的调整。因此不能认为现有的光学玻璃成分都是充分合理的。随着有关玻璃态物质物理和化学的发展,使我们有可能从各种典型的玻璃系统研究出发,寻找各种性质随成分变化的规律性,然后利用这些规律去改进现有各种光学玻璃的性能或试制新品种光学玻璃,从而把光学玻璃新品种的发展建立在科学的基础上。

本编中首先叙述了光学仪器设计对光学玻璃质量及品种的基本要求,指出合理选用玻璃和发展新品种光学玻璃的途径;然后较详细地介绍常用光学玻璃和新品种光学玻璃的几个基本系统即硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐、氟化物和硫系化合物玻璃的各种性质的变化规律,其中引用了许多我们试验中所积累的实际数据。最后在广泛总结文献数据和我们试验资料基础上分类讨论了各新品种光学玻璃的国际现状和发展方向,可供新品种光学玻璃研究和试制工作的参考。

第一章 光学仪器对光学玻璃的要求

§ 2.1-1 光学玻璃的质量和性能要求

光学玻璃和其它玻璃的不同点在于它作为光学系统的一个组成部分,必须满足光学成象的要求。因此,光学玻璃质量的判定也包括某些特殊的和较严格的指标。对光学玻璃有以下主要要求。

一、特定的光学常数以及同一批玻璃光学常数的一致性

每一光学玻璃牌号对不同波长光线都有规定的标准折射率数值,作为光学设计者设计光学系统的依据。所以工厂生产的光学玻璃的光学常数必须在这数值一定的容许偏差范围以内,否则将使实际的成象质量与设计时预期的结果不符而影响光学仪器的质量。同时由于同批仪器往往采用同批光学玻璃制造,为了便于仪器的统一校正,同批玻璃的折射率容许偏差要较它们与标准数值的偏差更加严格。

二、高度的透明性

光学系统成象的亮度和玻璃透明度成比例关系。光学玻璃对某一波长光线的透明度以光吸收系数 K_d 表示。光线通过一系列稜镜和透镜后,其能量部分损耗于光学零件的界面反射而另一部分为介质(玻璃)本身所吸收。前者随玻璃折射率的增加而增加,对高折射率玻璃此值甚大,如重火石玻璃一个表面光反射损耗约6%左右。因此对于包含多片薄透镜的光学系统,提高透过率的主要途径在于减少透镜表面的反射损耗,如涂敷表面增透膜层等。而对于大尺寸的光学零件如天文望远镜的物镜等,由于其厚度较

大, 光学系统的透过率主要决定于玻璃本身的光吸收系数。通过提高玻璃原料的纯度以及在从配料到熔炼的整个过程中防止任何着色杂质混入, 一般可以使玻璃的光吸收系数小于 0.01 (即厚度为 1 厘米的玻璃对白光透过率大于 99%)。

三、化学及物理上的高度均匀性^[1]

玻璃内部的不均匀性可能是由于局部化学成分的不同, 如气泡、结石和条纹等而造成的化学不均匀性, 也可能是由于内部应力或由于热历史不同, 使玻璃内各部分折射率不同而造成的物理不均匀性。按照对光学系统成象质量的影响程度, 可分为以下几类。

第一类为玻璃中有部分折射率与周围不同的区域, 如图 2.1-1 所示。光线由一个方向通过玻璃后, 其波面保持原状 (如 I-I 及 II-II 所示); 而由另一方向通过玻璃时, 其波面产生一定程度的变形 (如 III-III 及 IV-IV), 其变形程度 h (光程差) 决定于折射率差 Δn 及玻璃厚度 l

$$h = -\Delta n \cdot l \quad (2.1-1)$$

对于高级观察系统, 程差 h 必须不大于 $\frac{1}{4} \lambda$, 所以允许的折射率差 $\Delta n = \frac{\lambda}{4l}$ 。玻璃愈厚, 对这类光学均匀性要求愈高。例如若波

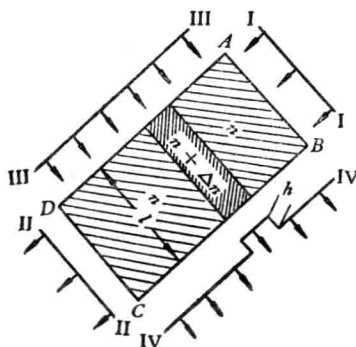


图 2.1-1 折射率不均匀区域对透过光波面的影响

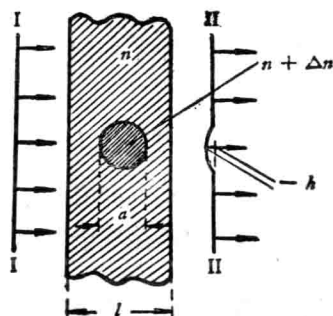


图 2.1-2 条纹对透过光波程差的影响

长 $\lambda = 0.555$ 微米, 玻璃厚度 $l = 10$ 厘米, 则对折射率差的要求为 $\Delta n < 1.4 \times 10^{-6}$ 。实际上由于不均匀无一定明显的界线, 因而波面也逐渐地变形。对大尺寸光学零件, 如果这类不均匀性存在面积较大, 将降低象的分辨率及其质量。这种光学不均匀性往往是由于退火不良所产生, 其折射率差是逐渐过渡并且有一定的规律性, 如边部折射率往往比中心低, 故可以在透镜磨制过程中加以人工修正。

第二种类型为在玻璃中存在条纹, 如图 2.1-2 所示。条纹的存在也使波面变形和产生程差, 即

$$h = -\Delta n \cdot d \quad (2.1-2)$$

这里波面变形的大小与玻璃厚度无关。条纹的折射率一般与主体玻璃相差较大 ($\Delta n \sim 0.1$), 当波面变形满足 $h \leq \frac{1}{4} \lambda$ (当 $\lambda = 0.555$ 微米) 时, 条纹的最大允许直径为 $d < 1.2$ 微米。这种微细条纹很难用肉眼加以分辨, 故一般采用投影法进行检验。因此可以说: 所有能以肉眼观察的条纹都是有害的, 特别是对小尺寸目镜其危害性更大。对大尺寸物镜由于个别粗条纹所占面积不大, 故其影响亦较小。一般来说, 大面积的密集细条纹比粗条纹更为有害。

四、消除内应力

对光学玻璃来说消除内应力不仅是为了在冷加工过程中免致破裂, 更主要的是消除由内应力所产生的双折射, 后者将导致如下式所表示的光学不均匀性:

$$h = \delta l \quad (2.1-3)$$

式中: δ ——双折射, l ——玻璃厚度(厘米)。当 $h \leq \frac{1}{4} \lambda$ 时双折射必须满足 $\delta \leq 0.00014/l$ 。此外如内应力过大, 则可能在光学零件磨制过程中产生残余变形, 影响零件质量。

五、一定的化学稳定性

为了使光学玻璃在光学部件加工过程和光学仪器使用条件下

不致产生云雾和斑点而影响部件的检验及仪器的观察，必须具有一定的化学稳定性。根据上述要求，光学玻璃的化学稳定性主要是指抵抗潮湿大气及弱酸溶液侵蚀的能力而言。

六、一定的机械性质及研磨性能

用于制造一般透镜及稜镜的大部分玻璃，在机械性质方面并没有提出特殊的要求，大部分玻璃的硬度也能符合光学冷加工的需要。但在一些特殊场合，如大型天文望远镜或大口径经纬仪，往往出现因玻璃自重而引起的变形，除设计合理的支承装置以外，希望玻璃有较大的弹性模量及剪切模量。

以上对一般光学仪器使用的玻璃的要求，往往不能同时满足，有时为满足某一主要要求而不得不放弃对其它性质的要求，或采取其它补充措施。

随着近代光学技术的发展，光学仪器的应用范围日益扩大。由于使用环境的变化及使用波段的扩展，对光学玻璃提出了一系列新的要求。主要有两个方面，即外场（温度、应力、辐射）作用下的稳定性和对特定波段的透过。对玻璃的下列性能提出了一定的要求。

1. 热机械性质。温度变化使玻璃的尺寸或镜面的形状发生变化。大型天文反射镜的镜面因直径及厚度较大，受周围温度波动而出现镜面边缘的曲率变化，产生“边缘效应”，为消除或减少这一效应，要求选用 ψ 值较大的材料^[1]。

$$\psi = \frac{E q}{\alpha} \quad (2.1-4)$$

式中 E 为弹性模量， α 为热膨胀系数； $q = \lambda / cd$ ， λ 为热导系数， c 为比热， d 为密度。各种玻璃的 q 差别不大，膨胀系数 α 可相差很多。大型镜坯都力图降低膨胀系数和提高弹性模量。

2. 热光性质。温度变化引起折射率的增加或减少，对精密光学系统是忽略的。光学系统的温度变化可能是周围环境所引起的，也可能是由于光学系统本身受到强的辐射作用。由于温度

的变化,同时引起玻璃零件的折射率及尺寸变化,因而使光学系统的光程产生变化,其后果是主要参数与设计值发生偏差,或者通过光学系统的光线出现局部波形畸变,影响成象质量。光学系统在温度波动时的稳定性日益成为大家关心的问题,一般称“热光稳定性”。在应力的影响可以忽略的情况下,热光稳定性取决于热膨胀系数 α 及折射率温度系数 β ($\beta = \frac{\partial n}{\partial T}$)。

在已处于温度均匀的情况下,光学系统的温度改变只影响其焦距,可用热光系数 V 亦称温差光学系数来衡量热光稳定性。由于温度变化 Δt ,产生的焦距的变化 Δf 为:

$$\Delta f = -V \cdot f \cdot \Delta t \quad (2.1-5)$$

$$V = \left(\frac{\beta}{n-1} - \alpha \right) \quad (2.1-6)$$

热光系数 V 仅取决于玻璃本身的性质。对复杂的光学系统,焦距的变化有不同的表达形式。为使光学系统各种参数在温度变化时保持不变或变化较小,要求玻璃的 V 值尽可能小。

当光学系统处于温度不均匀,即存在温度梯度的情况下,光学系统各局部区域因温度不同而产生折射率差,光学元件的表面形状也发生变化,出现波面畸变,影响光学系统的成象质量。基本的参数是热光系数 W ,即

$$W = \beta + \alpha (n-1) \quad (2.1-7)$$

在最简单的有限平板情况下,存在温度梯度 Δt 时的波面变形 h 为:

$$h = W \cdot l \cdot \Delta t \quad (2.1-8)$$

式中 l 为厚度。对透镜、稜镜等具体元件,温度梯度影响光学系统的其它性能,如焦距、象差等,衡量热光稳定性的表达式稍有变化。

3. 光弹性性质。大尺寸光学零件或观察窗受到自重或外力作用下产生的应力以及存在温度梯度时还出现热应力,都引起折射率的变化,变化大小用应力光学系数 C_1 , C_2 或偏光的应力系数 B

表示。简单二维应力状态下,与光束传输方向垂直的主应力 σ_1, σ_2 使入射光分解为与主应力方向一致的线偏振光,对应的折射率为

$$\begin{aligned} n_1 &= n_0 + C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2 \\ n_2 &= n_0 + C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1 \end{aligned} \quad (2.1-9)$$

通过厚度 l 的平板时产生的位相差为

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_2)l = \frac{2\pi}{\lambda} (C_1 - C_2) (\sigma_1 - \sigma_2)l \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} B(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot l \end{aligned} \quad (2.1-10)$$

$$B = C_1 - C_2$$

在存在温度梯度及由此引起的热应力的情况下,不同几何形状的光学元件,其热应力分布情况亦不相同,但总的要求是降低玻璃的 C_1, C_2 和 B 值。

4. 辐照稳定性。用于受放射线照射或紫外线照射的光学系统,玻璃经常产生着色中心,色心降低了玻璃的透过率,因而要求发展耐辐射的光学玻璃系列。

5. 近紫外及红外的透过率。随着近紫外光学仪器及红外探测、跟踪及红外光谱仪器的发展,玻璃已不仅作为特定波段的滤光片,而且作为紫外和红外透镜、稜镜等折射材料。对于这些玻璃,在特定波长的透过率和该波长下的折射率及光学均匀性方面都提出了要求。

根据以上论述,在原有光学玻璃的基础上,相继发展了一些具有特殊要求的光学玻璃,如膨胀系数接近零的低膨胀玻璃、热光稳定或抗热光畸变光学玻璃、耐辐射光学玻璃、近紫外高透过玻璃以及红外光学玻璃等。

§ 2.1-2 光学仪器对扩大光学玻璃光学常数的要求

随着光学仪器应用范围的扩大及精度的提高,要求不断改善光学系统的视场及成象质量。这可通过改进光学系统设计、增加

透镜片数以及使用非球面透镜等来实现。但透镜片数的增加将使光所通过的反射表面增加并因此减小光学系统的透过率，反而降低了光学系统质量。而非球面透镜又由于加工困难致使到目前为止还难于大量采用。因此，采用具有特殊光学常数的新型光学玻璃是提高光学系统质量的有效途径。从光学仪器和光学玻璃的发展历史可以很清楚地看出这一点。

最简单的光学仪器如眼镜片、放大镜、简单的目镜等，一般是用单片透镜制成。制造这些透镜采用了最普通的光学玻璃，如 K_9 ($n_D = 1.5163$, $\nu = 64.1$) 和 F_3 ($n_D = 1.6164$, $\nu = 36.6$)，因而这些玻璃的用量也比较大。对于较完善的光学仪器，则必须考虑到光学系统各类误差的校正问题。由单色光所形成的误差包括：轴向球差、彗差、象散、场曲及畸变等。如使用白光则还包括对不同波长光线因折射率不同而产生的色差。因此，必须将不同品种光学玻璃制成透镜组合，依靠适当地选择折射面的曲率半径和光焦度，使这些误差减至最小。

为了便于制造，绝大部分采用球面作为折射面，但球形折射面由于边缘部分偏折较大而使同心光束折射后不能交于轴上一点，产生所谓轴向球差。此外，当入射光不是单色光时，由于不同波长光线偏折不同，不同颜色的光线聚焦于轴上不同位置而产生所谓色差，如图 2.1-3 所示。为了校正球差和色差最简单的情况是采

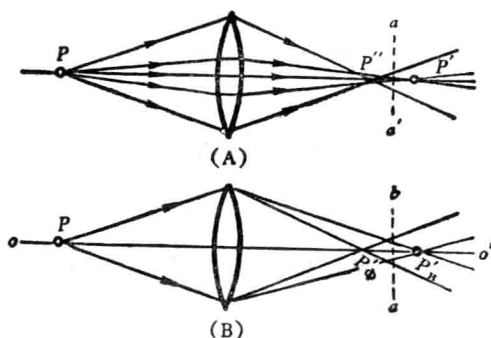


图 2.1-3 球差 (A) 与色差 (B) P' ——近轴光焦点； P'' ——远轴光焦点； P_Φ ——紫色光焦点； P_κ ——红色光焦点； P ——光源

用二种具有不同折射率及色散的光学玻璃制成一组双胶合透镜。冕牌与火石玻璃即满足以上要求。当采用 n 小而 ν 大的冕牌玻璃作为正透镜及 n 大 ν 小的火石玻璃作为负透镜组成胶合透镜时, 由远轴光线偏折大而产生的球差即为负透镜所校正。同时, 当胶合透镜满足下列方程时色差亦可得到校正:

$$\Phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.1-11)$$

$$\frac{\phi_1}{\nu_1} + \frac{\phi_2}{\nu_2} = 0 \quad (2.1-12)$$

式中 Φ 为总焦度, ϕ_1, ϕ_2 为组合的正、负透镜的光焦度, ν_1, ν_2 为两块透镜的色散系数(也称阿贝数) $\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ 。光焦度表示为

$$\phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.1-13)$$

式中 f 为透镜的焦距, r 为折射面的曲率半径。

在消除初级球差及色差后, 光学系统一般还存在着高级球差和剩余色差(二级光谱)。如图 2.1-4b 所示, 虽然边缘带与近轴带的轴向球差已完全消除, 但中间部分还有球差残余(高级球差)。消除高级球差的方法之一是增大胶合面曲率半径。为增加曲率半径必须使二玻璃 ν 值之差增加。因此, 新品种光学玻璃的一个发展方向是扩大 ν 值的范围。含大量 BaO 的重冕玻璃(ZK)以及含

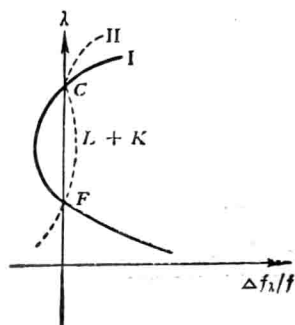


图 2.1-4a 二级光谱
I——校正前; II——校正后

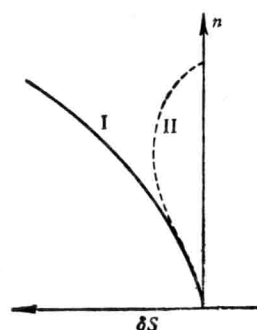


图 2.1-4b 球差
I——校正前; II——校正后

氟的钛火石玻璃 (TiF) 是这方面发展的一个例子。消除高级球差的另一途径是增加胶合面二方的折射率差, 因此, 高折射率的重火石 (ZF) 和低折射率的氟冕玻璃 (FK) 也得到了发展。总之, 为了进一步消除球差, 要求更加扩大现有光学玻璃的光学常数范围。

大孔径镜头要求光线通过透镜后具有较大的偏折角 δ , 如图 2.1-5 所示。如将透镜边缘部分作为稜镜看待, 则偏折角 $\delta \cong \alpha \cdot (n - 1)$, 偏折角的大小与透镜的曲率半径成反比, 与透镜的折射率成正比。但如过分减小透镜的曲率半径不仅造成加工困难, 同时对高级球差的消除也是不利的, 所以必须从另一道路, 即提高折射率来加大光学系统的相对孔径。为了校正色差, 在提高 n_D 的同时必须设法降低色散, 因此需要 n_D 与 ν 皆高的玻璃。近年来为了解决视场角特大的宽角航空摄影镜头的象面弯曲问题, 也迫切要求生产高 n_D 和高 ν 的玻璃。上世纪末 (1886 年) 发展的钡冕玻璃以及本世纪三十年代发展的含稀土化合物光学玻璃如镧冕 (LaK) 及镧火石 (LaF) 玻璃在一定程度上满足了上述要求。

当光学设计者考虑光轴外点的象差 (彗差) 时, 为了不使结构复杂化, 在光学系统的计算过程中往往首先对五个单色象差 (球差、彗差、象散、场曲、畸变) 进行校正, 然后选择折射率 n_D 相同而色散不同的光学玻璃来消除系统的色散, 这时就要求 n_D 相同而 ν 不同的光学玻璃。光学玻璃的牌号繁多也就是为了光学设计者便于选择。但实际上只要在几个等 n_D 的平行线上有若干不同 ν 值的玻璃牌号可供选择, 即能满足光学设计者的要求。一般光学玻璃目录中在 $n_D = 1.520, 1.566, 1.613, 1.661$ 等直线上光学玻璃牌号

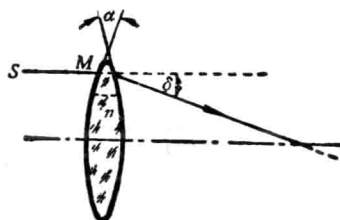


图 2 1-5

分布较密,而在折射率较高(如 1.70, 1.75)的部分,玻璃牌号较少。

两种波长(如 F , C 线)消色差的光学系统对于第三种波长(如 D 线)还存在剩余色差,或称二级光谱,即 $S'_F - S'_C = 0$ 而存在 $\delta S'_{FD} = S'_F - S'_D$ 。二级光谱的消除对高质量显微镜和天文望远镜的设计甚为重要。剩余色差的量可以表达为

$$\delta S'_{FD} = -\frac{S'^2}{f'} \cdot \frac{(P_{FD})_2 - (P_{FD})_1}{\nu_2 - \nu_1} \quad (2.1-14)$$

式中 P_{FD} 为 $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$ 。

所以,两块薄透镜系统要满足三种波长(F , C , λ)复消色差的条件,除了公式(2.1-11, 12)外,还有下式:

$$\left(\frac{\phi_1}{\nu_1}\right) P_{(\lambda, F)_1} + \left(\frac{\phi_2}{\nu_2}\right) P_{(\lambda, F)_2} = 0 \quad (2.1-15)$$

式中 $P_{\lambda F}$ 为相对部分色散 $\frac{n_F - n_\lambda}{n_F - n_C}$ 或 $\frac{n_\lambda - n_F}{n_F - n_C}$ 。

近来,由于彩色照象、彩色电视和多光谱照象等技术的发展,要求光学系统在较宽的波长范围内,如 350—1000 毫微米,剩余色差要小,并实现了四色全消色差(又称超全消色差)的设计。用三块透镜组合的光学系统要满足三种和四种波长的消色差的条件为:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \phi \quad (2.1-16)$$

$$(\phi_1/\nu_1) \cdot P_{\lambda_1,1} + (\phi_2/\nu_2) \cdot P_{\lambda_1,2} + (\phi_3/\nu_3) \cdot P_{\lambda_1,3} = 0 \quad (2.1-17)$$

$$(\phi_1/\nu_1) \cdot P_{\lambda_2,1} + (\phi_2/\nu_2) \cdot P_{\lambda_2,2} + (\phi_3/\nu_3) P_{\lambda_2,3} = 0 \quad (2.1-18)$$

式中 $P_{\lambda_1} = \frac{n_F - n_{\lambda_1}}{n_F - n_C}$, $P_{\lambda_2} = \frac{n_{\lambda_2} - n_F}{n_F - n_C}$; λ_1 和 λ_2 常采用 h 线(4047 埃)和 A' 线(7665 埃),更宽的光谱范围为采用 i 线(3650 埃)与 t 线(10140 埃)。

光学系统的消色差设计中很重要的问题为光学玻璃的品种选择。从图 2.1-6 可知,大多数光学玻璃的 P_{gF} 与 ν 值之间成直线关系。在直线上的光学玻璃品种称为正常部分色散的光学玻璃;在相同的 P_{gF} 的条件下,偏离直线的 $\Delta\nu$ 值大于 $\pm(3-5)$ 的玻璃品种称为特殊部分色散的光学玻璃(在图 2.1-6 中处于虚线以外的