

TIE-29 折射率和色散

前言

光学玻璃最重要的特性之一是折射率和色散特性。本技术信息概括介绍了以下几个主题：

- 色散
 - 主要色散
 - 二级光谱
 - Sellmeier 色散等式
- 折射率的温度依赖性
- 精密退火过程对折射率和阿贝数的影响
- 公差
- 折射率测量

1. 折射率.....	1
2. 折射率的波长依赖性: 色散.....	2
3. 折射率的温度依赖性.....	6
4. 精密退火过程对折射率和阿贝数的影响.....	7
5. 公差.....	9
6. 折射率测量.....	11
7. 文献.....	12

1. 折射率

当光线进入非吸收性均匀材料时, 边界表面就会发生反射和折射。折射率 n 是光线在真空中的光速 c 与在该介质中的光速 v 之比。

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

数据表中给出的折射率数据是相对于在空气中测量的折射率测量得到的。空气的折射率非常接近1。

实际上, 折射率反应的是光束在边界表面发生折射后的偏转强度。描述这一偏转量的等式称为斯涅尔定律:

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2)$$

折射率是波长的函数。用于表征光学玻璃最常见的特征量是可见光谱中间范围的折射率 n_d 。主要折射率通常称为 n_d ——587.56纳米波长下的折射率, 或者, 在许多情况下为546.07纳米波长下的 n_e 。



TIE-29 折射率和色散

2. 折射率的波长依赖性:色散

色散用于衡量折射率随波长的变化。将电磁理论应用于物质的分子结构可以解释色散。当电磁波撞击原子或分子时,束缚电荷就会以入射波的频率振动。

束缚电荷在一定波长下具有共振频率。图1表示了折射率随熔融石英波长变化的曲线图。可以看到,在主要光谱透射区域中,折射率在短波长方向上增加。此外,虚线表示了吸收常数是波长的函数。

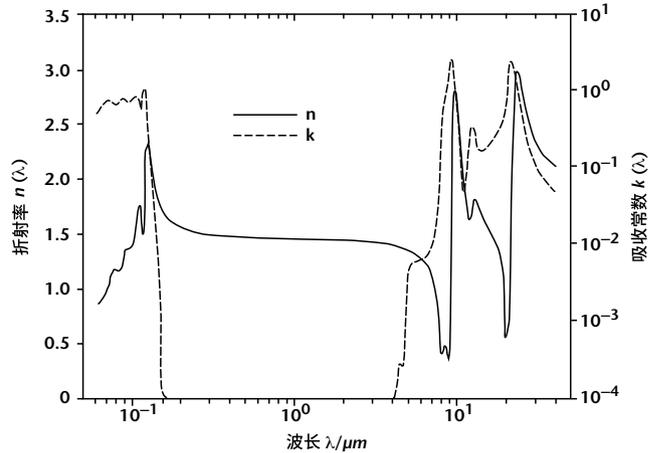


图1: 测量的熔融石英(SiO₂ 玻璃)光学常数 [1]。

2.1 主要色散

$(n_F - n_C)$ 的差值称为主要色散。

n_F 和 n_C 是486.13纳米和656.27纳米波长下的折射率。光学玻璃色散的最常见表征量是阿贝数。阿贝数定义为

$$v_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C) \quad (3)$$

有时会根据 e 线定义阿贝数:

$$v_e = (n_e - 1)/(n_F - n_C) \quad (4)$$

传统上, $v_d > 50$ 范围内的光学玻璃被称为冕玻璃,其他的被称为火石玻璃。

一般来说,低折射率的玻璃也具有低色散,例如高阿贝数。高折射率的玻璃具有高色散和低阿贝数。

TIE-29 折射率和色散

2.2 二级光谱

对于高质量光学系统来说,仅通过折射率和阿贝数表征光学玻璃是不够的。通过相对部分色散可以更准确地描述玻璃特性。

波长 x 和 y 下的相对部分色散 $P_{x,y}$ 通过以下等式定义:

$$P_{x,y} = (n_x - n_y)/(n_F - n_C) \quad (5)$$

阿贝证明了,大多数玻璃,也就是“普通玻璃”,都近似适用以下线性关系

$$P_{x,y} \approx a_{xy} + b_{xy} \cdot v_d \quad (6)$$

a_{xy} 和 b_{xy} 为给定的相对部分色散的特定常数。

要校正二级光谱(即两个波长以上的颜色校正),需要使用不符合这个规则的玻璃。因此,部分色散与阿贝的经验法则不同的玻璃类型特别有用。

为了衡量部分色散与阿贝规则的偏差大小,引入了纵坐标差 ΔP 。不使用关系(6),而使用以下普遍适用的等式:

$$P_{x,y} = a_{xy} + b_{xy} \cdot v_d + \Delta P_{x,y} \quad (7)$$

因此, $\Delta P_{x,y}$ 项定量描述了与“普通玻璃”不同的色散特性。

数据表中列出了每种玻璃类型的以下五个相对部分色散与“普通线”的偏差 $\Delta P_{x,y}$ 。

$$\begin{aligned} P_{C,t} &= (n_C - n_t)/(n_F - n_C) \\ P_{C,s} &= (n_C - n_s)/(n_F - n_C) \\ P_{F,e} &= (n_F - n_e)/(n_F - n_C) \\ P_{g,F} &= (n_g - n_F)/(n_F - n_C) \\ P_{i,g} &= (n_i - n_g)/(n_F - n_C) \end{aligned} \quad (8)$$

普通线的位置可通过玻璃类型 K7 和 F2 的值来确定。

上述五个相对部分色散的偏差 $\Delta P_{x,y}$ 的公式为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{C,t} &= (n_C - n_t)/(n_F - n_C) - (0.5450 + 0.004743 \cdot v_d) \\ \Delta P_{C,s} &= (n_C - n_s)/(n_F - n_C) - (0.4029 + 0.002331 \cdot v_d) \\ \Delta P_{F,e} &= (n_F - n_e)/(n_F - n_C) - (0.4884 - 0.000526 \cdot v_d) \\ \Delta P_{g,F} &= (n_g - n_F)/(n_F - n_C) - (0.6438 - 0.001682 \cdot v_d) \\ \Delta P_{i,g} &= (n_i - n_g)/(n_F - n_C) - (1.7241 - 0.008382 \cdot v_d) \end{aligned} \quad (9)$$

图2表示了 $P_{g,F}$ 与阿贝数 v_d 的对比图。

目录中列出的相对部分色散根据折射率计算至小数点后6位。

色散公式(10)可通过内插计算其他未列出的折射率和相对部分色散(见2.3节)。

TIE-29 折射率和色散

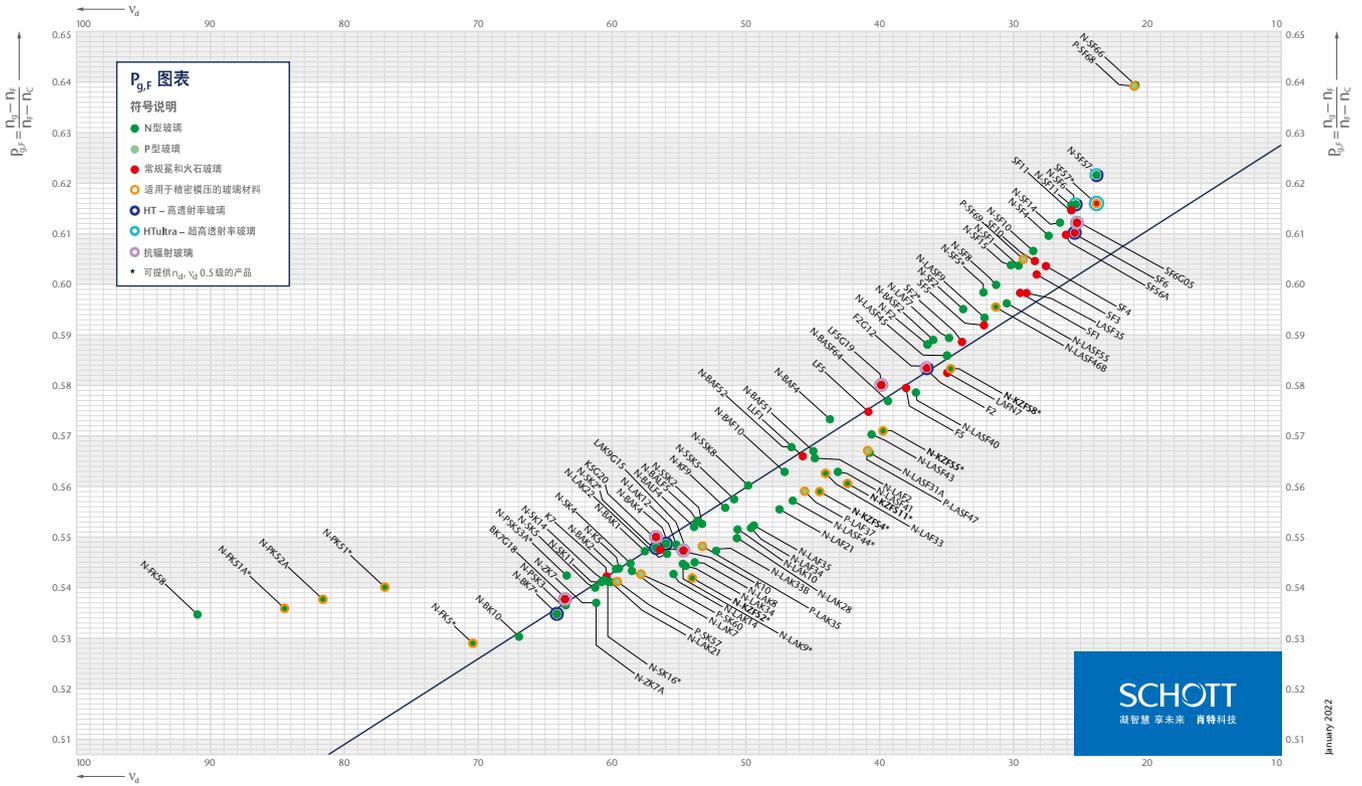


图2: 对于肖特光学玻璃产品系列, P_{g,F} 是阿贝数的函数。此外, 还给出了普通线。

→ ← | 返回索引

TIE-29 折射率和色散

2.3 Sellmeier 色散等式

Sellmeier 等式特别适用于从紫外到可见光到红外区域 (至 2.3 μm) 的波长范围内的折射率变化。它源自经典色散理论,使用该等式可用一组数据描述整个透射区域中的折射率变化,并能计算准确中间值。

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_1)} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_2)} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_3)} \quad (10)$$

在精密测量的基础上,可通过将色散等式与测量值拟合,为所有玻璃类型确定这些系数。数据表中列出了系数。

色散等式仅在每种玻璃数据表中列出折射率的光谱区域内有效。在这些极限值范围内可进行内插。等式中使用的波长必须以微米 (μm) 为单位,且小数点后位数必须与表1所列位数相同。在实际应用中,等式 (10) 适用于室温下的空气折射率。在可见光谱范围内,这个计算可达到的精确度通常优于 $1 \cdot 10^{-5}$ 。可应要求在报告中添加各玻璃件的色散等式的系数。这需要在整个光谱区域进行精密测量,前提是玻璃具有足够的透射率。

波长 [nm]	代号	使用的谱线	元素
2325.42		红外汞谱线	Hg
1970.09		红外汞谱线	Hg
1529.582		红外汞谱线	Hg
1060.0		钕玻璃激光谱线	Nd
1013.98	t	红外汞谱线	Hg
852.11	s	红外铯谱线	Cs
706.5188	r	红氦谱线	He
656.2725	C	红氢谱线	H
643.8469	C'	红镉谱线	Cd
632.8		氦氖激光谱线	He-Ne
589.2938	D	双钠中心谱线	Na
587.5618	d	黄氦谱线	He
546.074	e	绿汞谱线	Hg
486.1327	F	蓝氢谱线	H
479.9914	F'	蓝镉谱线	Cd
435.8343	g	蓝汞谱线	Hg
404.6561	h	紫汞谱线	Hg
365.0146	i	紫外汞谱线	Hg
334.1478		紫外汞谱线	Hg
312.5663		紫外汞谱线	Hg
296.7278		紫外汞谱线	Hg
280.4		紫外汞谱线	Hg
248.3		紫外汞谱线	Hg

表1: 一些常用光谱线的波长。

TIE-29 折射率和色散

3. 折射率的温度依赖性

玻璃的折射率不仅取决于波长，还取决于温度。折射率变化与温度变化的关系称为折射率温度系数。这可能是一个正值或负值。数据表中包含了多个温度范围和波长下的折射率温度系数的信息。相对折射率的温度系数 $\Delta n_{rel}/\Delta T$ 适用于 $0.10133 \cdot 10^6$ Pa 气压。绝对折射率的系数 dn_{abs}/dT 适用于真空。

通过等式 (11) 可计算其他温度和波长下的绝对折射率温度系数。

$$\frac{dn_{abs}(\lambda, T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda, T_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda, T_0)} \cdot \left(D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta T + 3 \cdot D_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_K^2} \right) \quad (11)$$

定义：

T_0 参考温度 (20 °C)

T 温度 (°C)

ΔT 与 T_0 温度差

λ 真空中电磁波的波长 (μm)

D_0, D_1, D_2, E_0, E_1 and λ_{TK} : 常数, 取决于玻璃类型

一般来说, 玻璃数据表中给出的该公式的常数适用于 -100°C 至 $+140^\circ\text{C}$ 的温度范围和 $0.3650 \mu\text{m}$ 至 $1.014 \mu\text{m}$ 的波长范围。数据表中的温度系数为指导值。

可应要求在 -100°C 至 $+140^\circ\text{C}$ 的温度范围内和 $0.365 \mu\text{m}$ 至 $1.014 \mu\text{m}$ 波长范围内以 $\pm 5 \cdot 10^{-7}/\text{K}$ 以上的精度对单个熔体进行测量。色散公式的常数可由这些测量数据计算得出, 并列在检验证书中。

相对折射率的温度系数 $\Delta n_{rel}/\Delta T$ 和 Δn_{abs} 的值可通过技术信息 TIE 19 中列出的等式计算得到。

图3表示了不同玻璃、温度和波长下的折射率绝对温度系数。

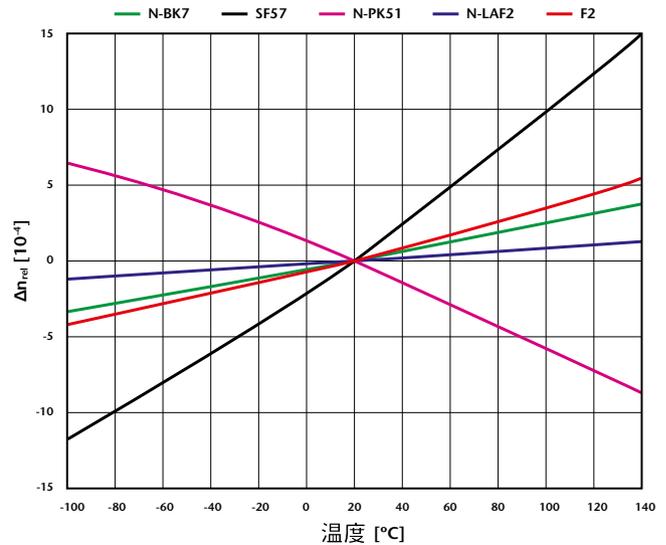


图3: TIE-19 中所述的一些不同玻璃类型的相对折射率 (20 °C 时的目录值) 随温度的变化。

TIE-29 折射率和色散

4. 精密退火过程对折射率和阿贝数的影响

决定玻璃类型的光学数据主要由熔体化学成分和热处理来组成。玻璃转变范围内的退火速率可用于在一定限度内影响折射率（取决于玻璃类型和允许的应力双折射）。总的来说，较慢的退火速率能够产生更高的折射率。实践证明了以下公式的正确性。

$$n_d(h_x) = n_d(h_0) + m_{nd} \cdot \log(h_x/h_0) \quad (12)$$

h_0 原始退火速率
 h_x 新退火速率
 m_{nd} 折射率的退火系数取决于玻璃类型

类似的公式适用于阿贝数。

$$v_d(h_x) = v_d(h_0) + m_{vd} \cdot \log(h_x/h_0) \quad (13)$$

m_{vd} 阿贝数的退火系数
 取决于玻璃类型

退火系数 m_{vd} 可以通过以下等式计算：

$$m_{vd} = (m_{nd} - v_d[h_0] \cdot m_{nf-nc}) / ((n_f - n_c) + 2 \cdot m_{nf-nc} \cdot \log(h_x/h_0)) \quad (14)$$

系数 m_{nf-nc} 必须通过实验确定。

图4中的图表示了折射率和阿贝数的退火速率依赖性。

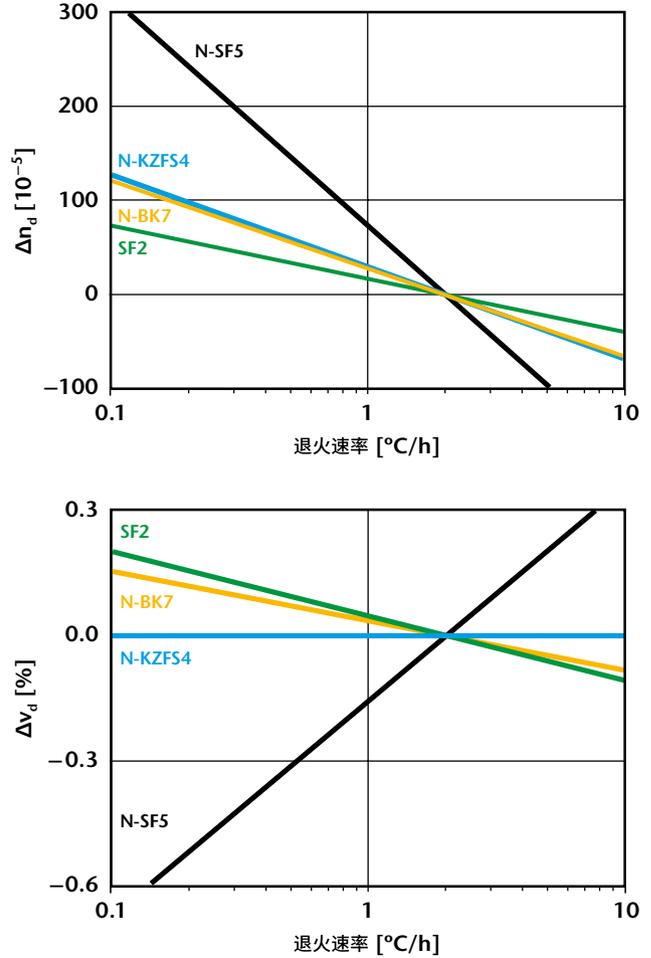


图4：几种玻璃类型的折射率 n_d (a: 上图) 和阿贝数 v_d (b: 下图) 的退火速率依赖性。参考退火速率为 2 °C/h [3]。

图4b表示了各个玻璃类型在阿贝数的退火速率依赖性上差异很大。一般来说，阿贝数随退火速率的降低而增加。N-SF5 等高折射率无铅玻璃类型表现出异常特性。异常特性意味着阿贝数随着退火速率的降低而减小。

→ ← | 返回索引

TIE-29 折射率和色散

表2中列出了一些光学玻璃的退火系数值。我们可应要求提供玻璃退火系数的值。

	m_{nd}	m_{nf-nc}	m_{vd}
肖特 N-BK7®	-0.00087	-0.000005	-0.0682
SF2	-0.00056	0.000013	-0.0523
N-SF5	-0.00242	-0.000182	0.1654

表2: 几种玻璃类型的退火系数。

退火速率可用于将折射率和阿贝数调节到所需的公差范围。

在实际中,退火速率同时影响折射率和阿贝数。图5表示了肖特 N-BK7® 的阿贝数与折射率的对比图。矩形框表示折射率和阿贝数的公差极限(等级)。例如,最大方框表示第3级折射率和第3级阿贝数的公差边界。最小方框表示第0.5级折射率和阿贝数。方框中心通过标称目录值定义。

熔炼后,光学玻璃以高退火速率冷却。为了在熔炼过程中控制折射率,每次浇铸后直接从熔体中取出样本。这些样本与相同玻璃的一个参考样本一起非常快速冷却。参考样本在 2°C/h 退火速率下的折射率已知。通过测量参考样本的折射率变化,可以 $\pm 10^{-4}$ 范围的中等精度测量样本的折射率。

每块玻璃的阿贝数和折射率的退火速率依赖性通过图中的一条线表示,这条线具有该玻璃类型的特征斜率。对于给定的熔体,以 2°C/h 冷却速率作为定点的初始折射率/阿贝数测量值以及玻璃典型斜率共同确定了图中这条线的位置。一个给定玻璃件的折射率和阿贝数可以通过沿着这条特征线的精密退火等级来调节。

用于冷加工的玻璃必须进行精密退火,以减少内应力。在这个精密退火过程中,退火速率一般低于 2°C/h。在熔炼过程中必须调整初始折射率,以确保在精密退火过程中达到所需的公差。例如,肖特 N-BK7® 的初始折射率一般都低于目标值。

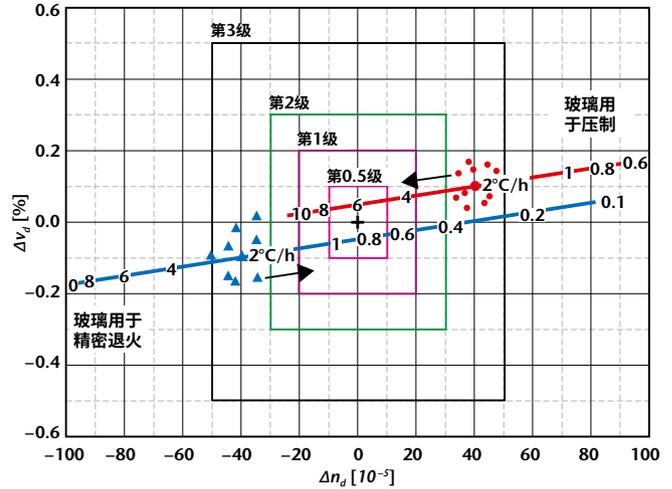


图5: 在不同的初始折射率下,退火速率对肖特 N-BK7® 的折射率和阿贝数的影响。

用于热加工(即二次加热压制成型)的玻璃要进行更快的退火。一般来说,客户的热处理过程使用的退火速率远远高于 2°C/h。因此,例如对于肖特 N-BK7® 压型件,初始折射率要高于目标值。我们为每个用于热加工的玻璃熔炼号提供一份退火制度。这份退火制度包含 2°C/h 下的初始折射率以及为了保持在公差范围内的极限退火速率。

TIE-29 折射率和色散

5. 公差

数据表中列出的5位小数折射率表示相关玻璃类型的标称 $n_d - \nu_d$ 位置熔体的数值。折射率数据精确至小数点后五位 (对于 $\lambda > 2 \mu\text{m}$: $\pm 2 \cdot 10^{-5}$)。在透射受限的波长区域内,数据的精确性较低。所有数据适用于室温和普通气压 ($0.10133 \cdot 10^6 \text{ Pa}$)。

义玻璃的折射率公差时,客户必须区分折射率公差、一个批次内的折射率偏差公差和折射率均匀性(图6)。

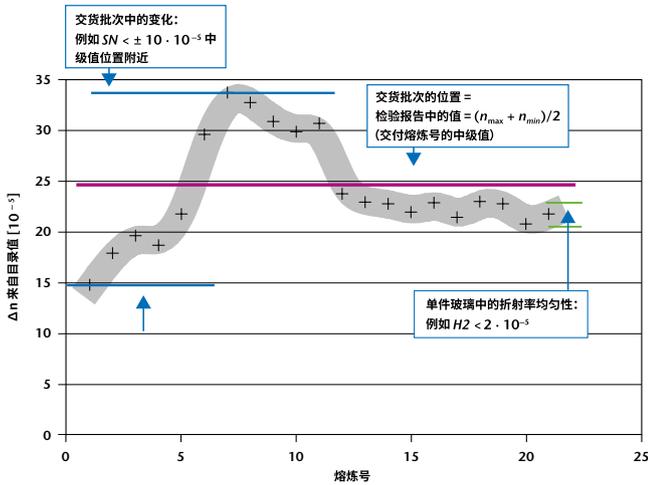


图6: 一个生产顺序中的折射率偏差。

所有交付的精密退火块料和制造玻璃都是以若干批单个熔炼号生产的。一个熔炼号可以是一个块料或几个条料。

折射率和阿贝数公差是交货批次中单个玻璃件与目录数据表中列出的标称值之间的最大允许偏差。标准检验证书中列出的交货批次的折射率由以下公式给出：

$$n_{\text{lot}} = (n_{\text{max}} + n_{\text{min}})/2 \quad (15)$$

n_{max} 和 n_{min} 分别为该批次中的最大和最小折射率。

一个批次中不同玻璃件之间的折射率偏差始终小于 $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ 。一般来说,单件玻璃的折射率均匀性优于 $4 \cdot 10^{-5}$ ISO 12123 (相当于 ISO 10110 的 $\pm 2 \cdot 10^{-5}$)。

[4; TIE-26]

表3概括列出了折射率公差、偏差和均匀性等级。更多信息请参阅光学玻璃目录 [5]。

公差	等级	折射率 [$\cdot 10^{-5}$]	阿贝数
绝对值	第3级	± 50	$\pm 0.5\%$
	第2级	± 30	$\pm 0.3\%$
	第1级	± 20	$\pm 0.2\%$
	第0.5*级	± 10	$\pm 0.1\%$
偏差	SN	± 10	—
	S0	± 5	—
	S1	± 2	—
均匀性 ISO 12123 (ISO 10110)	H1	4 (± 2)	—
	H2	1 (± 0.5)	—
	H3	0.4 (± 0.2)	—
	H4	0.2 (± 0.1)	—
	H5	0.1 (± 0.05)	—

表3: 折射率公差。

* 仅适用于部分玻璃类型

TIE-29 折射率和色散

5.1 公差等级 0.5 [3]

肖特是唯一一家提供新的公差等级0.5的光学玻璃制造商。0.5级是指，与数据表中所列标称值的最大允许折射率 n_d 偏差仅为 ± 0.0001 ，最大允许阿贝数 v_d 偏差为 $\pm 0.1\%$ 。这个新的公差等级只适用于某些玻璃类型。这些类型包括以下玻璃：N-FK51A, N-PK51, N-FK5, SCHOTT N-BK7[®], N-BK7HT, N-PSK53A, N-SK2, N-KZFS2, N-KZFS4, N-KZFS4HT, N-KZFS5, N-KZFS8, N-KZFS11, N-LAK9, N-LASF44, SF2, SF57HTUltra 和 N-SF5。这个清单中包含的玻璃类型对于 FK, PK 和 KZFS 等类型的最佳颜色校正尤为重要，而且经常需

要具有最严格的公差范围。肖特致力于提供公差等级达到0.5的上述玻璃类型，其他玻璃类型也可以提供最严格的公差。我们将应要求研究这是否可行。精密退火过程必须使用能够特别精确控制温度并且温度场高度均匀性的熔炉。因此，0.5级玻璃可作为精密退火切割件提供，大多数玻璃类型也可作为二次加热压型件提供。

所有0.5级公差都使用 v 棱镜以高精度测量程序进行了验证。对于低色散（高阿贝数）的玻璃，如 N-FK51A 和 N-PK51，v 棱镜包含另一个参考样本，使用棱镜光谱仪以精度 $\pm 0.4 \cdot 10^{-5}$ 测量该样本（见表4）。

5.2 光学玻璃在近红外区域中的折射率公差

经常会提出这个问题：标准波长 d 下的折射率公差是否可以推广到光谱中较长的波长。对于可见光谱范围内的波长来说基本上是可以的，然而对于近红外范围内高达 $1.7 \mu\text{m}$ 的波长，必须要更仔细地观察不同玻璃类型的不同熔体的色散变化。[6] 中发布了首次评估，将可见光至红外范围内 v 棱镜测量的外推值与精密光谱仪测量值 (URIS) 进行了比较。被评估的玻璃类型为肖特 N-BK7[®], N-KZFS4, N-PK51, N-PK52A, N-SF6, SF57, N-LAK22, N-LASF31A, F2 和 N-SF57。

近红在近红外波长范围内，通过观察色散曲线的现象学和预测与测量折射率曲线的比较得出了以下结果：

- 在可见光范围内折射率非常接近的不同熔体在近红外波长范围内可能具有显著偏差。不同熔体的斜率和曲率可能不同，也可能与目录曲线不同。
- 使用目录中相对部分色散数据来改进在可见光范围内获得的检验证书数据的外推值，可能导致与实际测量值的偏差达到 $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ，在某些情况下甚至高于 $1.7 \mu\text{m}$ 波长。
- 使用为直接相邻的红外范围及谱线 C, t 和 s 定义的阿贝数 v_d ，外推色散曲线的偏差在 $1.7 \mu\text{m}$ 以上时大约减少一半。
- 为了更好地外推，建议以更高的精度执行 v 棱镜测量，因为其波长范围更广。

→ ← | 返回索引

TIE-29 折射率和色散

6. 折射率测量

测量折射率时使用两种不同的测量装置：V棱镜折射仪和光谱测角仪。图7表示了V棱镜测量的原理。样本形状几乎为正方形。一个样本大约为20 x 20 x 5 毫米。样本被放在V形棱镜中。这种棱镜的折射率非常精确。入射光的折射率取决于样本与V棱镜之间的折射率差。这个方法的优点是可将10个样本粘合到一个V棱镜中。因此可以在很短的时间内测量许多样本。相对测量精度非常高，因此可以非常准确地测量一个V棱镜内的折射率差异。标准测量温度为22°C。

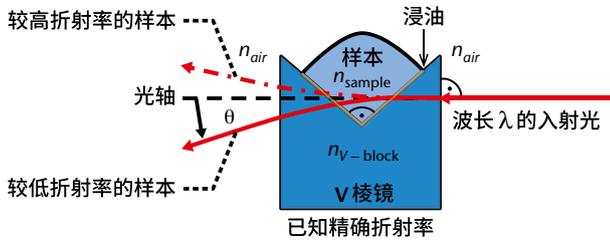


图7: V棱镜折射仪原理。

光谱测角仪方法是测量棱柱形样本中的最小折射角。这是最准确的绝对折射率测量方法。在我们的实验室中，我们使用高精度的自动光谱测角仪，能够在红外和紫外区域进行测量(图8)。

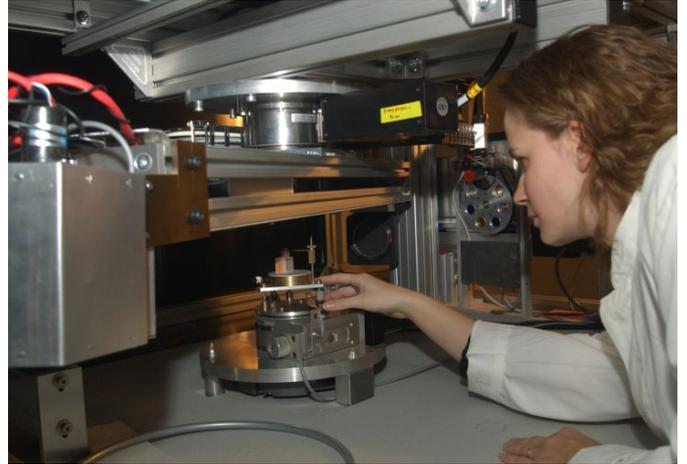


图8: 自动光谱测角仪。

使用自动光谱测角仪，即从紫外到红外的折射率测量系统 (URIS)，光学玻璃折射率测量精度可达到 $\pm 0.4 \cdot 10^{-5}$ 。色散 ($n_F - n_C$) 的测量精度可达到 $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ 。任何玻璃类型都可在185纳米至2325纳米的整个波长范围内达到上述测量精度。测量基于最小折射角原理。样本为棱柱形状，尺寸约为 $35 \times 35 \times 25 \text{ mm}^3$ 。标准测量温度为22°C。温度可应要求在18至28°C之间变化。标准测量气体为空气。也可以根据特殊要求使用氮气。

TIE-29 折射率和色散

表4列出了肖特可提供的折射率测量方法。

测量	测量精度		波长	方法
	折射率	色散		
V 棱镜标准型	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	g, F', F, e, d, C', C	v 棱镜折射仪
V 棱镜增强型	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 1 \cdot 10^{-5}$	$i, h, g, F', F, e, d, C', C, r, t$	
精密光谱仪	$\pm 0.4 \cdot 10^{-5}$	$\pm 0.2 \cdot 10^{-7}$	185 nm – 2325 nm	URIS 自动光谱测角仪

表4: 绝对折射率测量精度

测量折射率温度系数时使用自动光谱测角仪和温度可控的气候室, 其中温度范围为 -100°C 至 $+140^{\circ}\text{C}$ 。温度系数的测量精度为 $\pm 5 \cdot 10^{-7}/\text{K}$ 。

引入0.5级公差后, 对于低色散玻璃有一个问题, 也就是使用 v 棱镜折射仪测量阿贝数的测量精度有多高。图9表示了 N-FK58 和 SF57 型玻璃的可重复性测量的结果。图中显示了通过 V 棱镜折射仪测定的 SF57 (蓝色斜十字) 和 N-FK58 (绿色十字) 的 n_d 和 ν_d 的分布。红色实心标记对应 V 棱镜折射仪测量的中心 (SF57: 圆形, N-FK58: 正方形)。几个肖特光谱测角仪 URIS 对同一块玻璃的测量值 (SF57: 黑色菱形, N-FK58: 橙色圆形) 的平均值定义了图中的原点。为了大致了解偏差大小, 图中添加了肖特提供的最佳质量等级 0.5 (红色虚线) 的公差范围。

N-FK58 (SF57) 的 V 棱镜测量的折射率标准差为 $0.2 \cdot 10^{-5}$ ($1.1 \cdot 10^{-5}$), 阿贝数标准差为 0.017% (0.008%)。对于系统偏差, 可以在 V 棱镜样本块中放一个 URIS 样本来纠正。在这个示例中, N-FK58 (SF57) 的折射率系统偏差为 $-1.8 \cdot 10^{-5}$ ($0.2 \cdot 10^{-5}$), 阿贝数的系统偏差为 -0.011% (-0.01%) [7]。

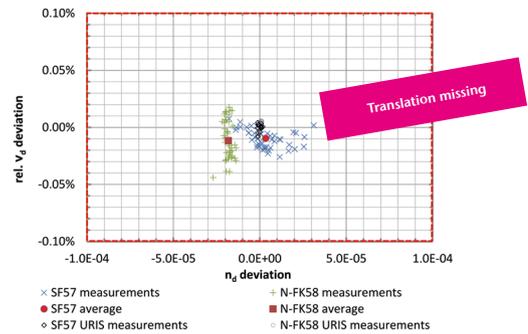


图9: V 棱镜折射仪的可再现性。红框表示公差等级。为了大致了解偏差大小, 我们在图中添加了肖特提供的最佳质量等级 0.5 (红色虚线) 的公差范围。

7. 文献

- [1] The properties of optical glass
H. Bach & N. Neuroth (Editors), Springer Verlag 1998
- [2] Temperature Coefficient of the Refractive Index
SCHOTT Technical Information TIE-19
- [3] Optical glass with tightest refractive index and dispersion tolerances for high-end optical designs,
Ralf Jedamzik, Steffen Reichel, Peter Hartmann,
SPIE Proceeding 8982-51, (2014)
- [4] Homogeneity of Optical Glass
SCHOTT Technical Information TIE-26
- [5] SCHOTT Optical Glass Pocket Catalogue
- [6] Optical glass: dispersion in the near infrared
Peter Hartmann, SPIE Proceedings Vol. 8167, (2011)
- [7] V-Block refractometer for monitoring the production of optical glasses, U. Petzold, R. Jedamzik, P. Hartmann, and S. Reichel, Proc. SPIE 9628, (2015)

更多相关信息请联系:

schott.com

肖特(上海)精密材料和设备国际贸易有限公司, 上海市虹梅路1801号凯科国际大厦301室
电话 +86 (0)21 33678000, 传真 +86 (0)21 33678080/33678886, info.china@schott.com

← | 返回索引

SCHOTT
凝智慧 享未来 肖特科技