

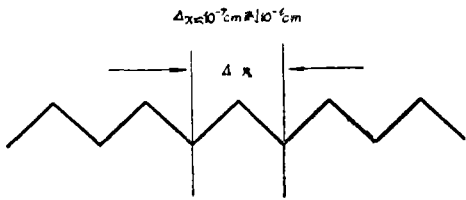
光学玻璃的均匀性

本文讨论出现在玻璃中的不同类型的均匀性。由于以下原因造成玻璃的不均匀性：(a) 熔化过程；(b) 热力学上的不平衡引起的密度变化；(c) 退火过程中温度梯度造成的持久形变。倘若要得到玻璃的最大可能的光学均匀性就必须知道 (a)、(b) 和 (c) 的影响。用消除由 (b) 和 (c) 引起的不均匀性的方法就可以测定熔化过程造成的不均匀性。为了获得一种玻璃的不均匀性的可靠实验数据，应采用两种不同的测定方法。最好的均匀性是用一个直径为 400 毫米、厚度为 47 毫米的 BK 7 圆盘获得的，折射率的最小变化 $\Delta n = \pm 3 \times 10^{-7}$ 。本文还讨论更多的例子。

玻璃的光学均匀性

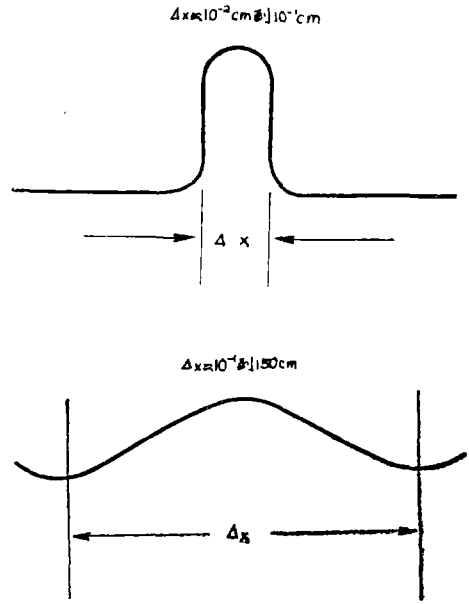
玻璃基本上反映以下各种不均匀性：

(1) 由于玻璃结构引起的微小的不均匀性。一般来说，这些微小的不均匀性不是用宏观法（如：干涉计量）就可以测定的。如果不同折射率的粒子大小具有光波波长的尺寸，那么微小的不均匀性会造成光散射。



(2) 具有较高折射率梯度（辉纹）的小宽度的不均匀性。

(3) 具有小折射率梯度的延伸的不均匀性。他们在许多情况下对光学系统的整个孔径都有影响，因此对图象质量的影响比(2)中涉及的较甚。



Schott 目录中涉及的均匀性值和熔化数据表在这篇文章中是属于所讨论的第三种类型的不均匀性。这些不均匀性取决于三项主要因素：

(a) 熔化过程：熔化玻璃要用的高温造成与坩锅材料的反应和熔化表面的选择蒸发。在玻璃注出之前，通过充分混合来取消这些化学的不均匀性，而只有在可能的最低温度下搅拌玻璃才能达到充分混合。

(b) 热力学上的不平衡引起的密度变化。

(c) 退火过程中温度梯度造成的持久形变。

倘若要得到最高的可能的光学均匀性，就必须检验玻璃的不均匀性是否由(a)、(b)或(c)引起的。如果把玻璃适当地准确退火，那么由(b)造成的不均匀性就比较小。采用特殊的热处理方法，可大大减少这种不均匀性。这种热处理方法以下面事实为根据。在一指

表 1 由于熔化和退火过程中造成的BK 7 盘子 (直径为400毫米, 厚为47毫米) 的不均匀性

准确退火后不均匀性 (K_0-K_x) 在实验室热处理 (高精度退火) 之后均匀性 K_0-K_x 的测定。
 的测定。由于熔炼过程(a)加上 只由熔化过程(a)造成的均匀性。
 退火过程(b)造成的均匀性。 第一指示器b 第二指示器b 平均值b (a+b)-(a)

取 样	第一指示器b	第二指示器b	平均值b	(a+b)-(a)
K_0	0	0	0	
K_1	$+1.7 \times 10^{-7}$	$+2.2 \times 10^{-7}$	$+2.0 \times 10^{-7}$	$+16 \times 10^{-7}$
K_2	$+2.7 \times 10^{-7}$	$+1.6 \times 10^{-7}$	$+2.3 \times 10^{-7}$	$+2.7 \times 10^{-7}$
K_3	$\pm 0 \times$	$+0.7 \times 10^{-7}$	$+1.0 \times 10^{-7}$	-1.0×10^{-7}
K_4	$+1.0 \times 10^{-7}$	$+2.0 \times 10^{-7}$	$+1.8 \times 10^{-7}$	$+8.2 \times 10^{-7}$
K_5	$+2.3 \times 10^{-7}$	$+3.6 \times 10^{-7}$	$+3.0 \times 10^{-7}$	$+20.0 \times 10^{-7}$
K_6	-2.1×10^{-7}	-1.7×10^{-7}	-2.3×10^{-7}	-18.7×10^{-7}
K_7	-1.5×10^{-7}	-1.2×10^{-7}	-1.8×10^{-7}	-13.2×10^{-7}
K_8	-3×10^{-7}	-2.2×10^{-7}	-3.2×10^{-7}	$+0.2 \times 10^{-7}$
K_9	$+1 \times 10^{-7}$	$+2.7 \times 10^{-7}$	$+1.8 \times 10^{-7}$	-0.8×10^{-7}
K_{10}	$+7 \times 10^{-7}$	± 0	-0.5×10^{-7}	$+7.5 \times 10^{-7}$
K_{11}	-6×10^{-7}	-2.7×10^{-7}	-2.3×10^{-7}	-3.7×10^{-7}
K_{12}	$+8 \times 10^{-7}$	-2.7×10^{-7}	-3.2×10^{-7}	$+11.2 \times 10^{-7}$
$\Delta n_{最大}$	$+23 \times 10^{-7}$	到 -21×10^{-7}	$+3.0 \times 10^{-7}$	到 -3.2×10^{-7}

a. 根据统计学方法测量的, 图 2

b. 分别测量的平均误差 $f_n = [\sum f^2 / (n-1)]^{1/2} = \pm 0.6 \times 10^{-7}$

定温度,玻璃达到一明确的结构平衡。在转换范围以上的温度,很短时间内就达到平衡。在转换温度时的平衡要1至120分钟的范围;在低于转换温度60℃时,例如对于SK-16玻璃是 4×10^5 分钟。在还要低的温度,平衡时间特别长,非平衡的条件实际保持不变。倘若在如下情况下退火某种玻璃,在指定玻璃块的各部分温度过程一样,于是所有这些部分的热力学不平衡也一样,并且折射率相同,那末就无化学的不均匀性并且消除掉由形变造成的不均匀性。

表1说明特殊热处理对折射率差的影响。玻璃取样K-0到K-12取自直径为400毫米的BK-7盘子中在图1说明的诸位置。

表1的第二行说明在特殊温度处理前折射率的变化,即由熔化过程(a)和退火过程(b)两者所引起的不均匀性,根据第二行,由(a)和(b)引起的不均匀性的范围从 $+23 \times 10^{-7}$ 到 -21×10^{-7} 。消除由热力学上的不平衡引起的不均匀性(b)之后,在第三行里指出的最大不均匀性减到从 $+3 \times 10^{-7}$ 到 -3.2×10^{-7} 。在大块玻璃中只有如此小的折射率变化现在是我们能得到最好的折射率变化,但只能在小心控制熔化过程时才能得到。表II-IV说明具有类似高的化学均匀性的大玻璃块的其他例子。根据这些表,只能在这四次熔化中有一次能得到 $\pm 3 \times 10^{-7}$ 均匀性。

表2 由一个1,500毫米×1,500毫米×20毫米平板的熔化和退火过程引起的不均匀性,玻璃型号BK 7 (根据统计学方法测量的,图2)

取 样	精确退火之后均匀性($K_0 - K_x$)的测定由熔化过程(a)加退火过程(b)引起的均匀性	在实验室里热处理(高精度退火)之后均匀性($K_0 - K_x$)的测定,只由熔化过程(a)引起的均匀性	(a+b)-(a)
K_0	0	0	
K_1	$+ 5 \times 10^{-7}$	$\pm 0 \times 10^{-7}$	$+ 5 \times 10^{-7}$
K_2	$+ 23 \times 10^{-7}$	$+ 5 \times 10^{-7}$	$+ 18 \times 10^{-7}$
K_3	$+ 16 \times 10^{-7}$	$+ 9 \times 10^{-7}$	$+ 7 \times 10^{-7}$
K_4	$+ 5 \times 10^{-7}$	$+ 3 \times 10^{-7}$	$+ 2 \times 10^{-7}$
K_5	$+ 3 \times 10^{-7}$	$+ 5 \times 10^{-7}$	$- 2 \times 10^{-7}$
K_6	$+ 17 \times 10^{-7}$	$+ 11 \times 10^{-7}$	$+ 6 \times 10^{-7}$
K_7	$+ 7 \times 10^{-7}$	$+ 2 \times 10^{-7}$	$+ 5 \times 10^{-7}$
K_8	$+ 18 \times 10^{-7}$	$+ 7 \times 10^{-7}$	$+ 11 \times 10^{-7}$
K_9	$+ 16 \times 10^{-7}$	$+ 5 \times 10^{-7}$	$+ 11 \times 10^{-7}$
K_{10}	$+ 24 \times 10^{-7}$	$+ 3 \times 10^{-7}$	$+ 21 \times 10^{-7}$
K_{11}	$- 8 \times 10^{-7}$	$- 3 \times 10^{-7}$	$- 5 \times 10^{-7}$
K_{12}	$- 23 \times 10^{-7}$	$- 12 \times 10^{-7}$	$- 11 \times 10^{-7}$
K_{13}	$- 3 \times 10^{-7}$	$- 6 \times 10^{-7}$	$+ 3 \times 10^{-7}$
$\Delta n_{\text{最大}}$	$+ 24 \times 10^{-7}$ 到 $- 23 \times 10^{-7}$	$+ 11 \times 10^{-7}$ 到 $- 12 \times 10^{-7}$	

表 3 由一个1,500毫米×1,500毫米×200毫米平板的熔化和退火过程引起的
的不匀性, 玻璃型号BK 7 (根据统计学方法测量的, 图 2)

取 样	精确退火之后均匀性 (K_0-K_x)的测定, 由 熔化过程(a)加退火过 程(b)引起的均匀性	在实验室里热处理(高精度退 火)之后均匀性(K_0-K_x) 的测定, 只由熔化过程 (a) 引起的均匀性	(a + b) - (a)
K_0	0	0	
K_1	- 6×10^{-7}	- 1×10^{-7}	- 5×10^{-7}
K_2	+ 12×10^{-7}	+ 5×10^{-7}	+ 7×10^{-7}
K_3	+ 20×10^{-7}	+ 9×10^{-7}	+ 11×10^{-7}
K_4	- 23×10^{-7}	- 12×10^{-7}	- 11×10^{-7}
K_5	+ 6×10^{-7}	+ 3×10^{-7}	+ 3×10^{-7}
K_6	+ 13×10^{-7}	+ 4×10^{-7}	+ 9×10^{-7}
K_7	- 15×10^{-7}	- 7×10^{-7}	- 8×10^{-7}
Δn 最大	+ 20×10^{-7} 到 - 23×10^{-7}	+ 9×10^{-7} 到 - 12×10^{-7}	

表 4 由熔化和退火过程引起不匀性, 玻璃型号BK 7 (尺寸: 400毫米×400
毫米×100毫米), (根据统计学方法测定的, 图 2)

取 样	精确退火之后均匀性 (K_0-K_1)的测定, 由 熔化过程(a)加退火过 程(b)引起的均匀性	在实验室里热处理(高精度退 火)之后均匀性(K_0-K_x) 的测定, 只由熔化过程 (a) 引起的均匀性	(a + b) - (a)
K_0	0	0	
K_1	- 15×10^{-7}	- 4×10^{-7}	- 11×10^{-7}
K_2	- 18×10^{-7}	- 8×10^{-7}	- 10×10^{-7}
K_3	+ 13×10^{-7}	+ 6×10^{-7}	+ 7×10^{-7}
K_4	+ 4×10^{-7}	+ 3×10^{-7}	+ 1×10^{-7}
K_5	- 6×10^{-7}	+ 1×10^{-7}	- 7×10^{-7}
K_6	+ 15×10^{-7}	+ 10×10^{-7}	+ 5×10^{-7}
K_7	+ 10×10^{-7}	+ 8×10^{-7}	+ 2×10^{-7}
K_8	+ 8×10^{-7}	+ 1×10^{-7}	+ 7×10^{-7}
K_9	+ 8×10^{-7}	+ 5×10^{-7}	+ 3×10^{-7}
K_{10}	+ 18×10^{-7}	+ 8×10^{-7}	+ 10×10^{-7}
Δn 最大	+ 18×10^{-7} 到 - 18×10^{-7}	+ 10×10^{-7} 到 - 8×10^{-7}	

一定要采用干涉测量法。Schott基本上采用两种干涉方法：

(1) 累积法 使用一个Twyman或一个剪切干涉仪。被检验的玻璃片必须有两个几乎是平面-平行的表面。使用两块非常精确的夹板和匹配被测玻璃折射率的一种浸液就能消除表面的不规则。

(2) 统计学法 用此种方法检验从玻璃毛坯切割出来的分别为40毫米×10毫米×10毫米和20毫米×10毫米×10毫米的取样，并且用干涉方法测量折射率的差（见图2）。在许多情况下方法（1）和（2）的结果相同。可是有些情况两种方法给出能再现的不同结果。根据第二种方法测量的不匀性较高并且是正确的测量，但是用第一种方法测量的值会表现出比实际上存在的较好的均匀性。图3说明一种不匀性分布的例子，根据我们的看法和经验，用第一种方法不能获得它，因为不能够测量出用调整干涉仪反射镜的方法所补偿的线性折射率梯度 $\Delta n_{s,t}$ 。

换言之，用第一种方法不能检测线性的折射率梯度或光学楔，而是可以测出线性梯度的偏差 $\Delta n_{s,t}$ 。譬如在平面平行配置中使用的窗口，用光学方法而不是用机械方法获得最后的平行度。在这种情况下，小的线性 Δn 不被引起注意，也就不重要。然而，在大型的透镜毛坯里，未被检测出来的光学楔会影响由它制作出来的透镜，使其实际离中心。第一种方法的另一个缺点是：所测的不匀性是对检验的玻璃块厚度上的累积。然而用第二种方法可以测定准确的均匀性。用第一种累积法，精度是0.2波长；而第二种方法精度是0.01波长。第二种方法的缺点当然是要检验的玻璃毛坯必须具有切出的检验块。因此说，这种方法的主要目的是对能否改进均匀性做重要调查，即判断譬如怎样的熔炼和退火方法造成最高的均匀性。为了连续生产控制和为买主制备检验证据，切出检验块用较高精度和较可靠的方法（2）来证实累积法（1）。

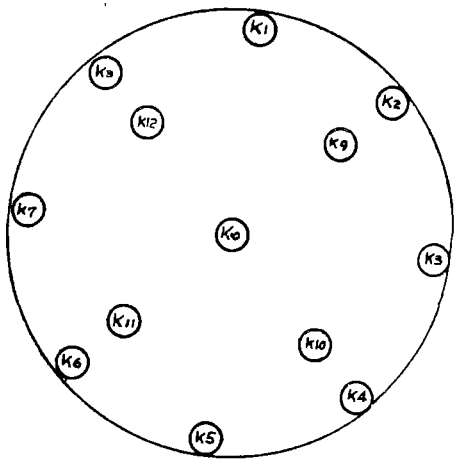


图1 玻璃毛坯取样的排列。BK 7型，直径为400毫米，厚为47毫米

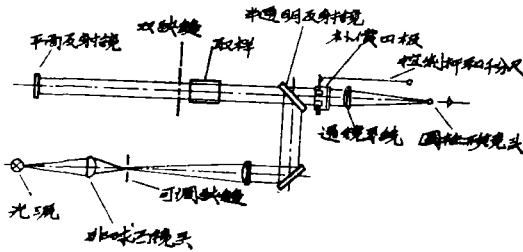


图2 改进的瑞利干涉仪

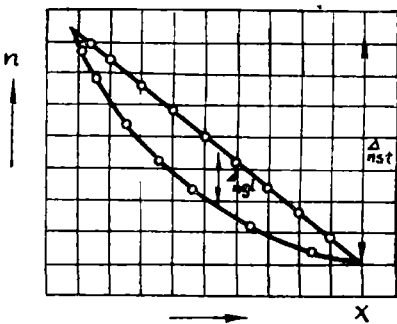


图3 折射率的位置函数

测量方法

为了获得表1—4所要求的测量精度，

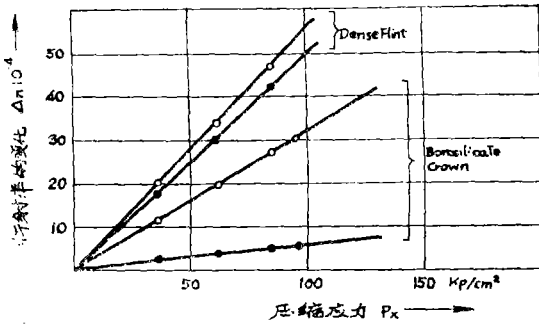


图4 折射率的变化作为所施压缩应力的函数 (x- 是振动平行于压缩方向的光矢量, o- 是振动垂直于压缩方向的光矢量)。

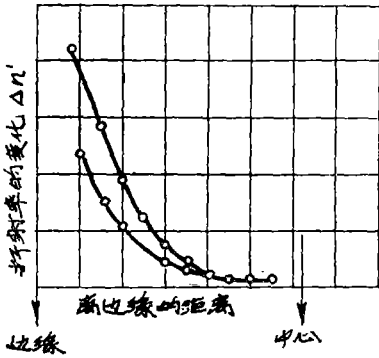


图5 在离开边缘的各种距离处的一个变形盘子的有效折射率的变化 (o- 是振动垂直于边缘的光矢量; ●- 是与边缘振动平行的光矢量)。

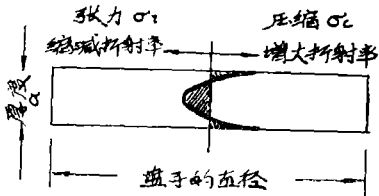


图6 一个盘子中心的应力分布和所产生的折射率变化(观察方向垂直于轴)。

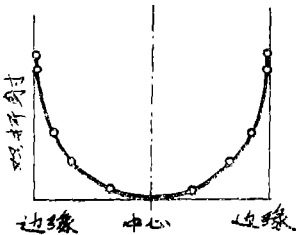


图7 盘子中的双折射的分布(观察方向=轴的方向)

持久的胁变对均匀性的影响

在许多情况下使用双折射值作为由玻璃胁变引起的象差的判据。但是双折射 ($n_y - n_x$) 不给出关于折射率变化的肯定信息, 这些变化是由变形梯度和合成波象差引起的。因此光学表里不作进一步解释特定双折射数值 (Brewster常数) 是不实际的而且使人糊涂。早在1961年我们研究了一种方法能测定由单轴应力引起的绝对折射率的变化 $\Delta n = f(P_x)$ 。图4说明这些测定过程的结果。如果玻璃受流体静压力, 虽然无双折射, 但折射率仍变化。压缩造成正的, 张力造成负的, 折射率改变。玻璃中的胁变不仅影响双折射而且还影响绝对折射率的变化 (见5图)。

举一种普通情况作为例子。在一个盘子的中心, 光束L通过带张力 σ_t 和压缩 σ_c 的玻璃层da (见图6)。根据下面的等式:

$$\int \sigma_t da + \int \sigma_c da = 0,$$

由正的折射率变化补偿负的折射率变化。另外, 沿着盘子的轴径向和切向胁变相等, 即沿着盘子的轴, 不能测定双折射。然而, 对于边缘, 切向胁变增加, 结果双折射不断增加 (图7)。在一个圆柱形盘子中, 趋向边缘时压缩比张力增加得多。这就造成边缘折射率的附加增加 (在图5中已说明)。因此, 由退火引起的持久胁变造成对称的不均匀性。用一个直径约为500毫米的BK7盘子由双折射引起的折射率的差 ($n_y - n_x$) 约为 2×10^{-7} , 而在盘子的边缘和中心之间由胁变引起的有效的折射率的差 Δn 约为 4×10^{-7} 。根据图4, 表现相同双折射的铅玻璃盘折射率的变化大得多。

译自: Schott Optical Glass
Technical Information
No. 13, July 1976
(于和平译 卢寿楠校)