

# TIE-26 光学玻璃的均匀性

## 前言

肖特提供均匀性高达 H5 的深加工光学玻璃。I 线玻璃甚至可以提供更高的均匀性等级。可达到的均匀性主要取决于玻璃类型和尺寸。有一系列均匀性 H4 或更高的玻璃能够现货供应。

例如,肖特 N-BK7<sup>®</sup> 玻璃具有高均匀性,可大量生产均匀性为 H4 和更高的200毫米以上的尺寸。

1. 均匀性的定义	1
2. 整体不均匀性的产生	1
3. 均匀性等级	2
4. 测量设备	3
5. 均匀性测量方法	4
6. 测量精度	6
7. 检验证书和测量结果说明	6
8. 材料选择/含义	8
9. 结论	11
10. 文献	11

## 1. 均匀性的定义

光学玻璃最重要的特性之一是材料折射率的空间均匀性极好。一般来讲,可以区分材料折射率的整体和大范围均匀性以及玻璃均匀性的小范围偏离。条纹是玻璃均匀性在空间上小范围的变化。小范围变化是指大约0.1到2毫米的距离上的变化(有关条纹的更多信息请参阅 TIE-25),而空间上大范围的整体折射率均匀性涉及到整个玻璃件。

## 2. 整体不均匀性的产生

整体不均匀性的产生主要有3个原因:

- 熔炼工艺:光学玻璃主要采用连续熔炼工艺生产。熔炼过程中化学组分的梯度会导致折射率的不均匀性。梯度产生的原因是特定组分的表面挥发和/或与模具壁材料接触的熔体部分发生反应。为了在连续熔炼和浇铸过程中进行工艺控制,折射率被描述为时间的函数。在不同的时间通过浇铸获得的具有最高均匀性的玻璃,其折射率在时间上几乎保持不变。

- 热平衡导致的密度变化:

热力平衡会引起玻璃密度的变化。在较高温度下达到平衡密度的时间比较低温度下的短。在转变温度  $T_g$  附近,不同温度达到的平衡密度是不同的。折射率均匀性是玻璃中密度分布的函数。接近  $T_g$  时,不受控制的玻璃冷却过程会产生折射率的空间不均匀性。在光学玻璃生产过程中,后续的精密退火可防止这种不均匀性。

玻璃必须从略高于  $T_g$  的温度开始缓慢冷却,以防止形成热梯度。对大尺寸光学玻璃进行精密退火以达到高均匀性是一个非常耗时的过程。

- 冷却过程中温度梯度导致的永久应力。



## TIE-26 光学玻璃的均匀性

肖特 均匀性等级	ISO 10110 第4部分均匀性等 级	最大折射率偏差, 按 照 ISO 10110 第4部 分	最大折射率偏差 按照 ISO 12123 和肖特光学玻 璃目录	适用性
S0	0	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$		偏差公差, 单个切割件的均匀性始终更好
S1	1	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$		偏差公差 适用于单个切割件
H1		$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	适用于单个切割件
H2	2	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	适用于单个切割件
H3	3	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	适用于单个切割件
H4	4	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	适用于单个切割件, 不适用所有尺寸, 不适用所有玻璃类型
H5	5	$\pm 0.5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	适用于单个切割件, 不适用所有尺寸, 不适用所有玻璃类型

表1: 均匀性等级。

### 3. 均匀性等级

根据 ISO 标准 10110 第4部分 [5], 具有更高折射率均匀性要求的玻璃可分为5个等级。单个玻璃件的肖特均匀性等级 H1 至 H5 包含 ISO 等级 1 至 5。肖特使用 ISO 标准中的 0 级和 1 级来描述偏差公差。

偏差公差是玻璃件之间的折射率偏差 [4]。ISO 12123 用峰谷值表示最大折射率偏差。最新的光学玻璃目录 [6] 使用这个定义。光学玻璃所需的均匀性应根据具体应用和光学元件的最终尺寸来确定。这个数值被定义为所需测量光阑内折射率 (例如物理尺寸的 95%) 内的最大偏差。

根据光学元件的体积、玻璃类型和毛坯玻璃尺寸的不同, 对单个切割件进行测量。直径达 500 毫米的玻璃件可使用现有的菲索干涉仪测量。直径达 1500 毫米的玻璃件可在直径最大 500 毫米的子孔径中测量。然后用拼接软件合并单个测量。可以为单个切割件提供干涉图。

表 1 列出了适用的均匀性等级。

根据下式, 光学元件内的折射率偏差会导致通过玻璃件时波前畸变:

$$\Delta s = d \cdot \Delta n$$

$\Delta s$  为波前偏差,  $d$  为玻璃厚度,  $\Delta n$  为玻璃中折射率偏差峰谷值。例如: 一个平面波穿过 50 毫米厚的 H2 级平面玻璃件, 最大畸变为  $50 \text{ mm} \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 500 \text{ nm}$ 。通过相同厚度的 H5 级玻璃件导致的最大波前畸变为 50 nm。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

### 4. 测量设备

由于基于干涉的积分方法可以直接测量入射波前畸变,因此这种方法是用于均匀性评估的测量方法的首选,尤其是相位测量干涉法。通过对玻璃样本中的光路进行积分来评估均匀性。因此,无法检测光束方向上的折射率线性梯度。为了抑制表面的不规则性,玻璃样本要么放在两块油板之间并通过浸油接触,要么经过抛光并在不同方向上测量,以消除表面影响。肖特使用这两种方法。

肖特在美因茨使用两台蔡司的 DIRECT100 菲索干涉仪进行均匀性测量,采用最大孔径508毫米(20英寸)和300毫米(12英寸)肖特北美公司在杜里埃使用 Zygo 干涉仪可通过600毫米孔径进行测量。图1为 DIRECT100 布置示意图。

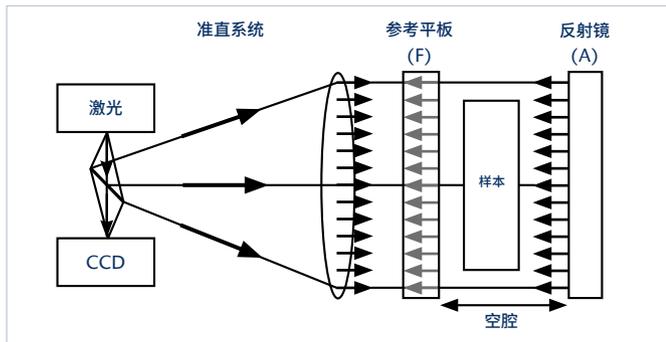


图1: 干涉仪布置示意图。

该装置由一个氦氖激光光源和一大准直透镜组成,后者将激光束转变为全孔径。准直后的平行光束穿过部分反射的参考平板。部分光线被参考平板反射回来。剩余光线进入空腔,第一次穿过样本。穿过样本后,光线被一个平面镜反射回来,第二次穿过样本、参考平板和准直镜,然后在 CCD 阵列上与参考平板反射回来的光线发生干涉,干涉条纹被记录下来。

参考平板(F)和自动准直镜(A)都用 ZERODUR® 制造。干涉仪采用卡尔蔡司 [1] 的直接测量干涉法。该方法能够实时提供干涉图以及从干涉条纹计算得到的波前畸变。2毫秒即可得到一次干涉图数据。

40毫秒后可得到完整的波前数据集。因此,不到3分钟就可对4000个波前数据集计算平均值。

玻璃的折射率偏差取决于热光系数引起的温度。因此,玻璃内的温度梯度会影响测量精度。必须采取特殊措施来减少样本内的温度变化。干涉仪的房间装有空调。一个特殊的隔室将干涉仪空腔与干涉仪的房间分开。(见图2)。这个隔室的温度稳定性为  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ,隔室周围空间的温度稳定性为  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 。一个特殊的传送系统将制备好的样本送入干涉仪空腔中。



图2:  
12英寸 DIRECT100,  
机械手将样本  
放入空腔。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

### 5. 均匀性测量方法

测量均匀性时,必须消除样本表面的影响。肖特使用两种方法进行均匀性测量:“油板夹层”方法和“抛光样本”方法。

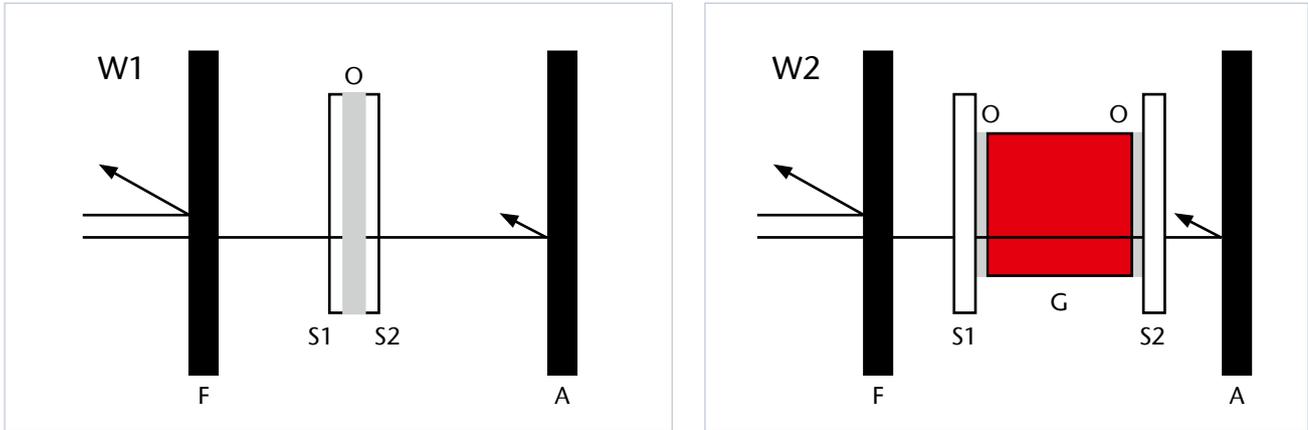


图3: 油板夹层测量方法的布置。

使用“油板夹层”方法时,将样本放在两块玻璃板之间(图3中的 S1 和 S2)。这两块玻璃板的表面经过精确抛光。玻璃板通过浸油(O)与样本接触,浸油的折射率与样本相同。使用这个测量方法时样本(G)无需抛光。只要求研磨表面的平面度约为2微米。测量时,首先测量不带样本时的油板(W1),然后减去带样本的油板的测量值(W2)。

这个结果就构成样本的均匀性图。浸油与样本的折射率必须非常匹配( $\Delta n$  应小于  $1 \cdot 10^{-4}$ ),这一点对于这个方法达到高测量精度非常重要。要测量具有不同折射率的很多不同的光学玻璃时,可使用三种浸油混合物。使用“油板夹层”方法可以测量折射率从1.473至1.651的光学玻璃。

→ ← | 返回索引

SCHOTT

凝智慧 享未来 肖特科技

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

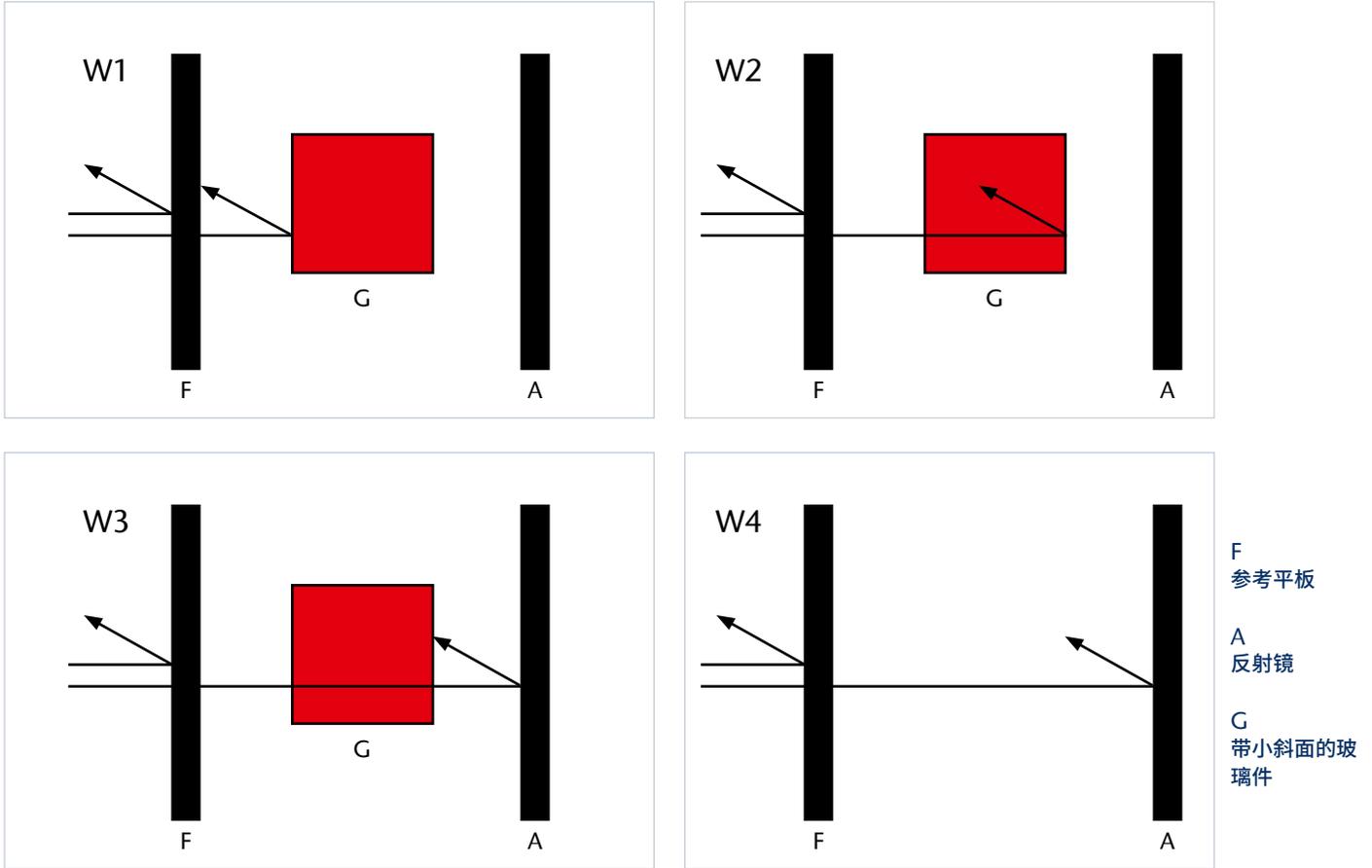


图4: 抛光样本测量方法。

对于无法使用“油板夹层”方法测量的光学玻璃,必须使用“抛光样本”方法 [3]。使用这个方法时,必须对样本两面抛光,使其达到适度的光学质量。此外,上下表面之间必须做出几个角分的小斜面。均匀性测量由先

后4次测量组成(见图4)。首先需要测量空腔。然后测量3次样本。分别在光线穿过时、从背面反射以及从正面反射时测量样本。然后将这4个测量值合并,评估均匀性分布。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

### 6. 测量精度

如前所述,光学玻璃的均匀性是通过用干涉法评估波前变化来测量的。因此,干涉仪的测量精度以纳米波前偏差(峰谷值)表示。

干涉仪的精确度可通过空腔的可重复性测量来评估。可重复性在3–4 纳米峰谷值的范围内,即所谓的干涉仪的“噪声”。

波前测量的总精确度受到温度均匀性、浸油折射率的匹配准确度以及准备工作(油板夹层测量布置,为抛光方法制备样本)等因素的影响。

油板夹层测量方法的标准差在  $\pm 10$  纳米波前偏差(峰谷值) 范围内。

$\pm 10$  纳米波前精确度的实际含义是,测量均匀性等级 H5 ( $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ ) 时,样本厚度至少需要达到 10–20 毫米。测量的灵敏度随着样本厚度的增加而提高。

### 7. 检验证书和测量结果说明

对于每次均匀性测量,客户都可获得均匀性检验证书。对于使用 DIRECT100 的测量,检验证书中包含被测样本的均匀性图。这个带有颜色编码的均匀性图表示了测量孔径内的折射率变化。不同颜色代表不

同的折射率值。因此,颜色变化代表了折射率偏差,也就是代表了不均匀。在这个均匀性图中,均匀性表示为峰谷值变化。图5表示了沿着色图中箭头方向的典型的均匀性分布颜色图和一维“高度”图。

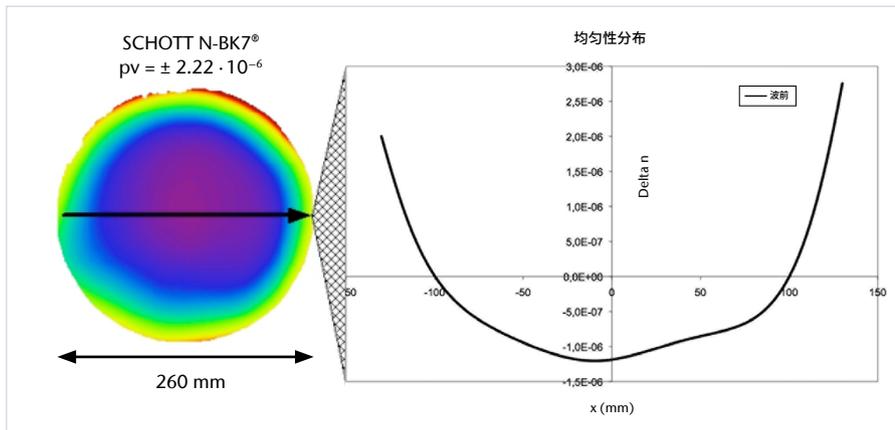


图5: 2D 均匀性颜色图和沿箭头方向的一维图形。

→ ← | [返回索引](#)

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

波前畸变的形状（以及均匀性分布）可在数学上被描述为若干独立像差项之和的多项式函数。这些像差项包含表示焦点、像散、彗差和波前内球面像差的系数。平移偏差和倾斜偏差会提前从波前中减去。肖特使用泽尼克多项式展开对波前进行分解 [2]。

只有当给定的波前具有圆形孔径时,对其进行泽尼克多项式展开才有效。

对于某些应用,了解泽尼克系数以模拟光学装置中元件引起的波前畸变非常重要,因此,肖特圆形孔径均匀性检验证书中包含关于泽尼克系数的信息。

图6表示了具有适当的主要像差多项式的一维均匀性分布。右图为 3D 均匀性分布。

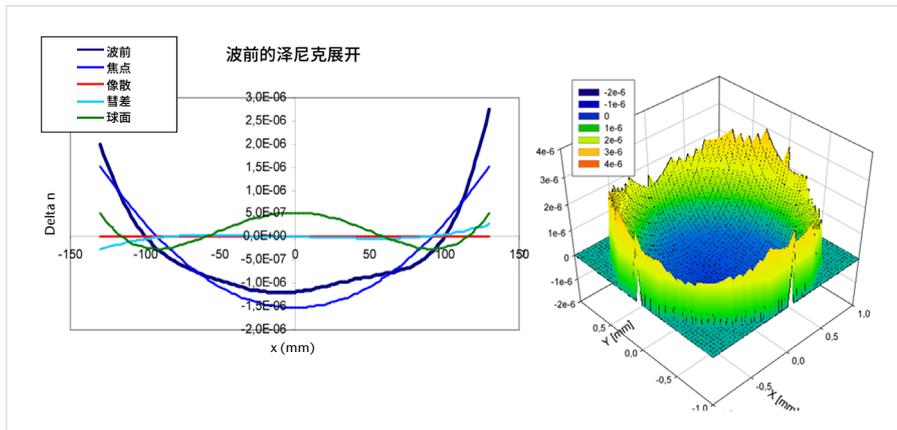


图6: 泽尼克多项式展开示例。

在大多数光学玻璃应用中,可在透镜设计中补偿焦点项,也就是通过调节透镜距离来重新对焦。在大多数情况下,从整个波前减去焦点项后的峰谷值均匀性远低于初始值(见图7)。

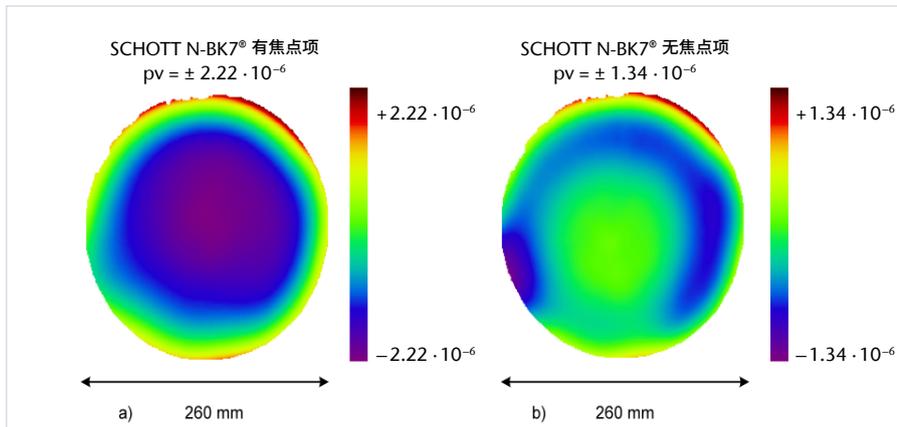


图7: 肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件,带和带不带焦点像差。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

### 8. 材料选择/含义

从熔炼过程中选择均匀材料有若干种标准。熔炼过程中折射率与时间的关系图可用于评估所生产的玻璃是否具有更高的均匀性。最佳结果是折射率随时间保持恒定,这意味着要达到高均匀性,应从图中曲线斜率接近零的区域取出玻璃。

选择高均匀性玻璃的另一个标准是条纹检测。一般来说,整体高度均匀的玻璃中没有条纹。图8a表示了无条纹 N-BAK1 玻璃块的均匀性测量,图8b表示了来自同一熔体的有条纹 N-BAK1 玻璃块的均匀性测量。无条纹玻璃块的均匀性比有条纹的好两倍。DIRECT100 干涉仪的空间分辨率不够高,无法呈现出条纹本身。

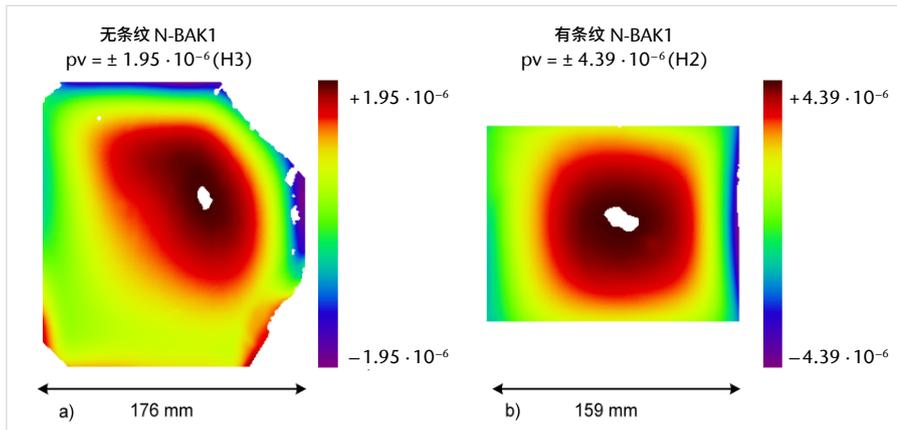


图8: 条纹数量是均匀玻璃的选择标准。

无论玻璃规格是圆形还是块状,大多数均匀性分布都表现出旋转对称性。因此,如果通过切割和研磨来减小大型铸件的直径,均匀性就会增加。

图9表示了圆盘形肖特 N-BK7<sup>®</sup> 玻璃件(起始直径260毫米)的均匀性,均匀性是直径的函数。玻璃圆盘直径260毫米时均匀性为 H2 级,250毫米时为 H3,210毫米时为 H4,170毫米时为 H5。一般来说,可以观察到均匀性随直径的减小而增加。

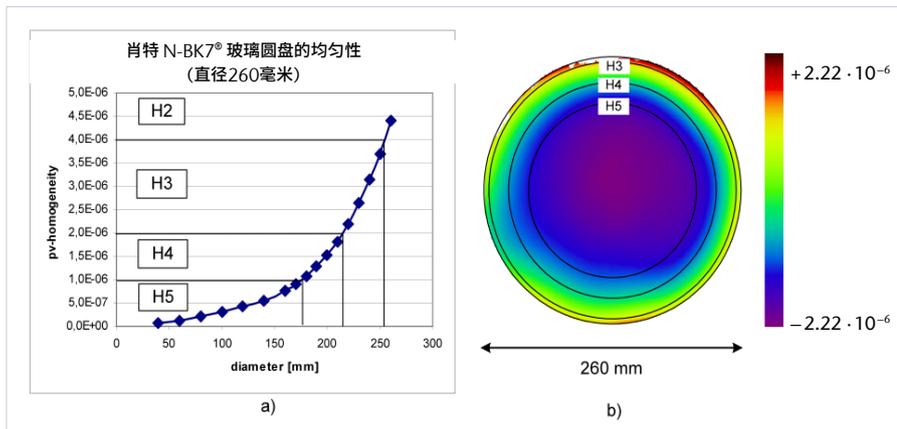


图9: 均匀性是直径的函数。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

玻璃圆盘边缘附近存在最大的均匀性偏差。均匀性在模具壁方向上减小的原因可能在于浇铸工艺。浇铸过程中的玻璃流动形成特定的对流模式。坩埚从下往上、从内向外被逐渐填充。填充坩埚所需的时间里，折射率的轻微变化会反映在后来的折射率分布中。

这种现象尤其是在大块坯件的生产过程中会产生影响。与耐火坩埚壁材料发生的其他反应会降低玻璃外部区域的均匀性。

图10表示了直径840毫米的肖特 N-BK7® 圆盘的均匀性测量结果。在464毫米孔径内达到了H4 级质量。

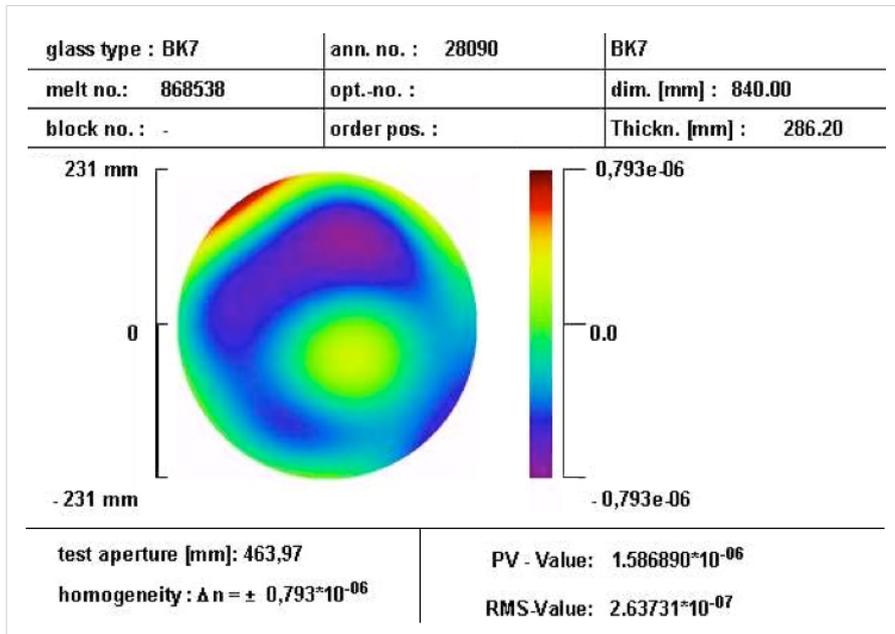


图10: 直径840毫米的肖特 N-BK7® 圆盘的均匀性。

在均匀性测量中，浇铸过程中熔体折射率的微小差异在边/边方向上比在顶/底方向上更显著。图11表示了肖特 N-BK7® 玻璃块的顶/底和边/边方向上的均匀性分布。边/边方向上的均匀性低于顶/底方向上的均匀性。这一观察对于为极高质量的棱镜应用选择材料可能很重要。

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

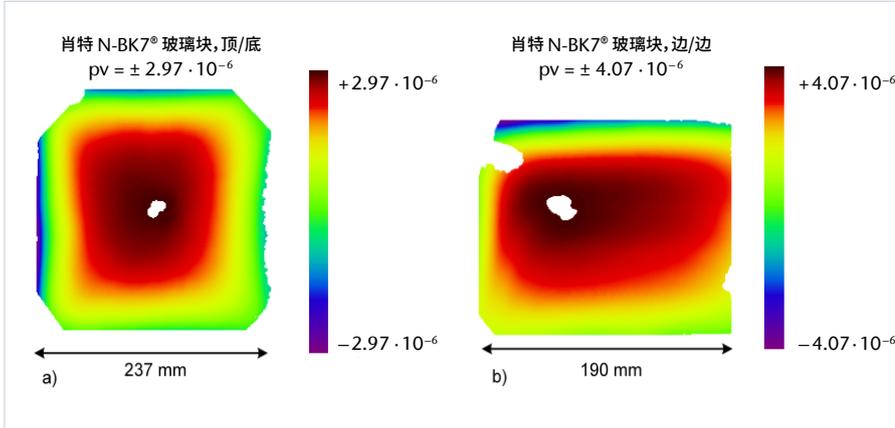


图11: 均匀性取决于观察方向。

可达到的均匀性还在很大程度上取决于玻璃类型和生产工艺。肖特可现货提供多种高均匀性的精密退火切割件光学玻璃。

至少直径的90%都能达到指定的均匀性。对于更小的直径,也可以按要求提供更高的均匀性。

表2概括列出了可提供的玻璃类型、尺寸和均匀性等级。

肖特 N-BK7<sup>®</sup> 和 F2 可为棱镜应用提供,会在两个相互垂直的方向上进行均匀性检查。

玻璃类型*	供应规格*	最大可提供尺寸*	均匀性等级
F2	圆盘	Ø 290 mm, 厚度: 100 mm	H4
LF5	圆盘	Ø 220 mm, 厚度: 45 mm	H4
LLF1	圆盘	Ø 220 mm, 厚度: 45 mm	H4
肖特 N-BK7 <sup>®</sup>	块状	400 mm x 400 mm x 70 mm	H4
	块状	250 mm x 250 mm x 100 mm	H4
N-FK5	圆盘	Ø 240 mm, 厚度: 50 mm	H4
N-FK51A	圆盘	Ø 200 mm, 厚度: 40 mm	H4
N-KZFS11	圆盘	Ø 170 mm, 厚度: 40 mm	H4
N-LAK22	圆盘	Ø 200 mm, 厚度: 50 mm	H4
SF5	块状	150 mm x 150 mm x 60 mm	H4

\*可根据要求提供其他玻璃类型、供应规格和尺寸(尺寸取决于玻璃类型)。

→ ← | 返回索引

## TIE-26 光学玻璃的均匀性

### 9. 结论

一般来说,光学玻璃的整体折射率均匀性优于  $40 \cdot 10^{-6}$  (包括 ISO 10110 第4部分均匀性等级1)。

大多数深加工光学玻璃的均匀性可以达到 H2 或更好。肖特可以提供均匀性高达 H5 的光学玻璃。可达到的均匀性取决于玻璃类型和尺寸。对于特殊应用,肖特还可以提供在两个相互垂直方向上的高度均匀性。

### 10. 文献

- [1] The new ZEISS Interferometer, 72 Proceedings of SPIE's Int. Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering, Küchel, M., San Diego, paper 1332, 1990
- [2] Interferogram analysis for optical testing, Malacara, D., Servin, M.; Malacara, Z.: Marcel Dekker Inc., 1998
- [3] Homogeneity testing by phase sampling interferometry, Schwider, J., Appl. Opt. 24, pp. 3059–3061, 1985
- [4] SCHOTT Optical Glass Pocket Catalogue
- [5] ISO/DIS 10110 – part 4; Preparation of drawings for optical elements and systems; Material imperfections – Inhomogeneity and striae, 1994
- [6] ISO 12123 Specification of raw optical glass, 2010

← | [返回索引](#)

更多相关信息请联系:

[schott.com](http://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](mailto:info.china@schott.com)

**SCHOTT**  
凝智慧 享未来 肖特科技