

# TIE-41 大型光学玻璃坯件

## 前言

肖特在为高要求应用生产和提供高均匀性大型光学玻璃坯件方面拥有丰富的经验。激光熔合系统、大型干涉仪或用于显微光刻的光刻机系统中都使用大型高均匀性玻璃坯件。未来极大望远镜的科学仪器需要光学玻璃用于制造对尺寸和波前稳定性有严格要求的组件，例如用于大气色散校正和激光导星系统。

肖特在生产和提供大型光学玻璃坯件应用方面拥有丰富的经验。最常见的大型光学玻璃是肖特 N-BK7<sup>®</sup>。但其他类型的玻璃，如 F2 或 LLF1 也可以达到1000毫米及以上的规格。生产这样的大型均匀光学玻璃坯件需要对所有工艺步骤进行严格控制。

本技术信息讨论了在生产大型光学玻璃时出现的各种问题：哪些类型的玻璃可以生产大尺寸？可生产的最大尺寸是多少？

1. 生产高均匀性的大型光学玻璃坯件 .....	1
2. 大型光学玻璃坯件整体折射率均匀性的测量 .....	4
3. 子孔径拼接 .....	7
4. 均匀性测量结果的温度依赖性 .....	9
5. 光学玻璃的最大生产尺寸 .....	9
6. 大型肖特 N-BK7 <sup>®</sup> 和 LLF1 圆柱形坯件的均匀性 .....	12
7. 大型肖特 N-BK7 <sup>®</sup> 条状玻璃的均匀性 .....	13
8. 生产顺序 .....	14
9. 建议 .....	15
10. 文献 .....	16

## 1. 生产高均匀性的大型光学玻璃坯件

生产大型光学玻璃坯件时，有许多参数会影响可达到的均匀性。肖特的大型光学玻璃坯件使用连续式熔窑生产。连续式熔窑分为三个独立区域：熔炼区、精炼区和混合区。原料批次不断加入到熔炼区中并熔化。原料批次经过精心配制和混合，可长期保持很高的折射率稳定性。原料熔炼过程中，化学反应会产生气泡。在熔炼室中，这些气泡有助于使熔体首次达到均匀。熔融的玻璃通过上升管流入精炼室。

精炼区的温度升高，以降低熔体的粘度并增加气泡的浮力。气泡上升到熔体表面，原料成分中的精炼剂可以额外给予支持。接着，精炼后的玻璃熔体在混合坩锅中被机械搅拌，以最大限度减少熔体中的条纹（剩余密度起伏/不均匀性）。然后，在热成型工艺中玻璃通过送料机浇铸在任意尺寸和形状的模具中。最后，模具在电加热炉中缓慢冷却至室温，以免因温度快速变化而破裂。



## TIE-41 大型光学玻璃坯件

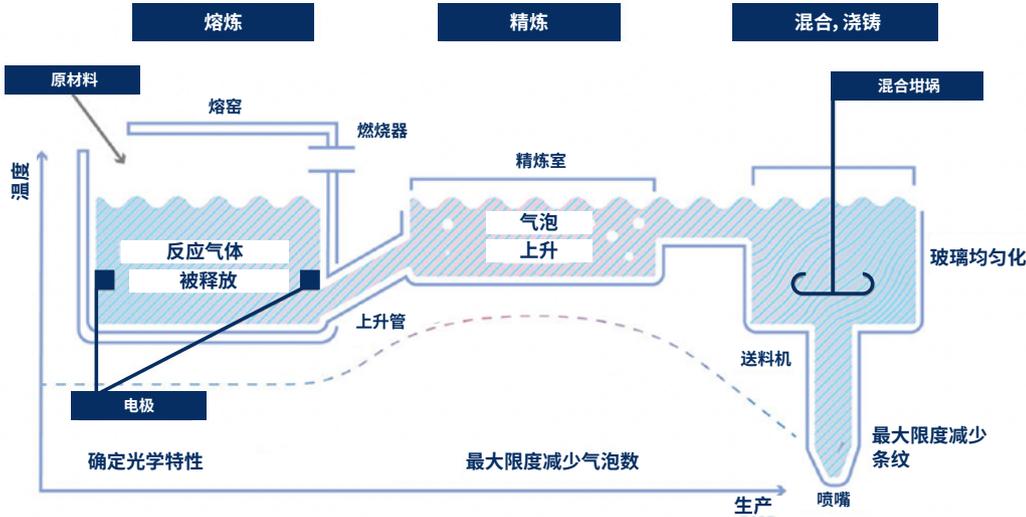


图1: 光学玻璃熔窑示意图, 包括空间温度变化。从原材料熔化到浇铸的整个过程需要耗费数小时。

在连续式熔窑生产过程中, 每隔两小时都会抽取样品, 以进行严格的折射率控制。图2表示了典型的熔窑控制图。只要达到了稳定的工艺, 折射率偏差很小, 就可以开始生产大型铸件。直径达1500毫米的大型光学玻璃坯件的浇铸需要几个小时。必须非常精确地控制材料流入模具的过程。在这个过程中, 玻璃的光学特性必须尽可能保持恒定。折射率随时间变化会导致坯件中出现空间折射率分布。

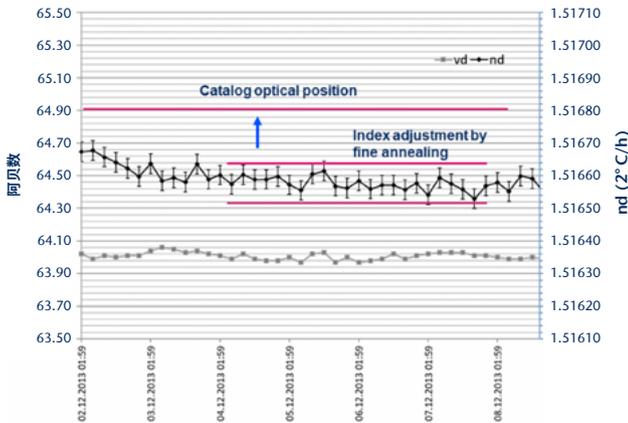


图2: 肖特 N-BK7® 连续熔炼过程中折射率和阿贝数随时间的变化。

在熔融和铸造过程中, 有限元模拟玻璃的热力学行为可以帮助优化生产参数, 以实现铸件的最佳折射率均匀性。图3中给出了一个示例。该模拟用颜色表示出在圆柱形模具中热成型后横截面上玻璃年龄的空间分布。

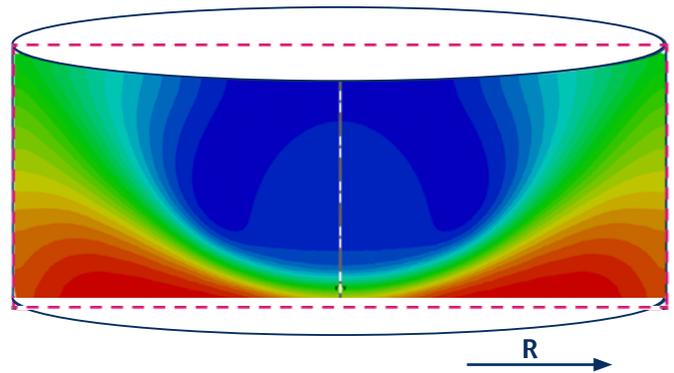


图3: 在圆柱形模具中热成型后模拟的横截面玻璃年龄 (颜色表示玻璃年龄)。

→ ← | 返回索引

SCHOTT

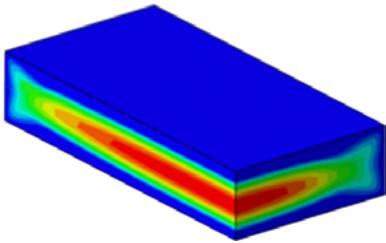
凝智慧 享未来 肖特科技

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

从质量上看,相同送料时期的玻璃会形成洋葱状形式。最早送入的玻璃靠近模具底部(红色)和侧壁。最晚送入的玻璃构成中间部分(蓝色)。在实际生产中,这个结构取决于操作条件,并且会因温度依赖的玻璃粘度和密度而变化,甚至可能引起自由对流模式,并且需要适当控制。

折射率均匀性也受精密退火过程中的温度分布影响。每个铸件都需要进行精密退火,将折射率调整到所需的光学位置(参见图2中表示折射率目标的粉色线)。在精密退火过程中,玻璃被加热到高于玻璃化温度的温度(在光学玻璃目录或数据表中列为 $T_g$ ,通常相当于玻璃粘度 $10^{13}$  dPas)。高于 $T_g$ 保持一段时间(由玻璃体积决定)后,玻璃以 $T_g$ 和 $T_g-150$  K之间的一个精确定义的速率冷却,以调整折射率(见TIE-29)。然后可加快退火速率,冷却至室温。

### 快速退火后的剩余应力



由于温度差与玻璃件厚度的平方成正比,退火速率显著影响最终应力双折射,因此也会随着总厚度的增加而显著影响折射率均匀性。玻璃块料的典型退火速率介于 $0.5$  K/h 和  $1.5$  K/h之间,这种情况下的典型总退火时间最长为4周。如果大型光学玻璃件以低于 $0.5$  K/h 的速率退火,总退火时间将长达12周。

图4表示了矩形铸件的“四分之一部分”精密退火后应力双折射的有限元模拟示例(为便于模拟,使用了对称条件)。颜色编码显示了在快速和缓慢退火速率下中间和外部之间的应力变化。在缓慢的退火速率下,机械应力差异更小,折射率均匀性更好。但是,退火速率仅仅是需要考虑的一个方面,其他因素包括炉内温度均匀性、炉体设置和其他细节。

### 缓慢退火后的剩余应力

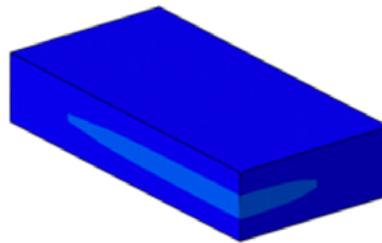


图4: 矩形肖特 N-BK7® 坯件在快速(左)和缓慢(右)退火情况下的应力分布。只展示了矩形铸件的“四分之一部分”(为便于模拟,使用了对称条件)。

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 2. 大型光学玻璃坯件整体折射率均匀性的测量

肖特北美公司在杜里亚使用 Zygo 24" Verifire MST, 可以通过600毫米 (24英寸) 孔径进行测量。Zygo 干涉仪还带有一个5轴电动工作台。肖特在美因茨使用蔡司的508毫米 (20英寸) DIRECT100 菲索干涉仪测量大型光学玻璃坯件的均匀性。

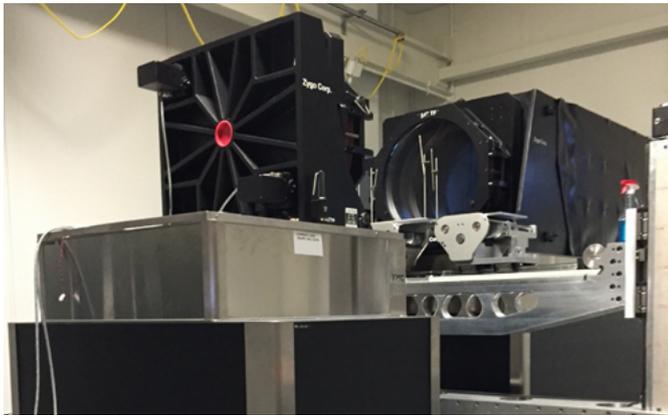


图5: 肖特北美公司在杜里亚使用24英寸孔径 Zygo Verifire MST 干涉仪。

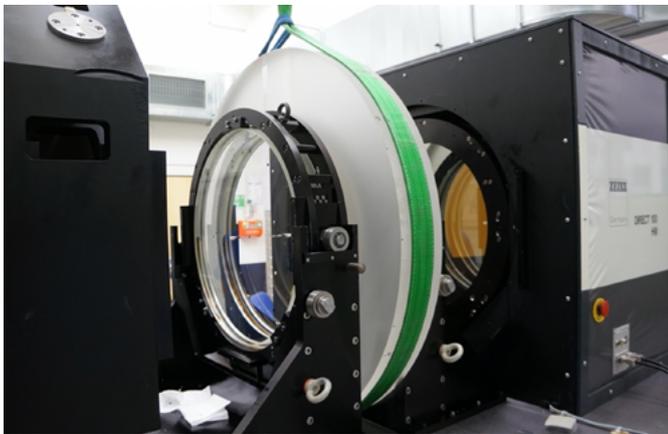


图6: 在德国美因茨, 直径950毫米的肖特 N-BK7® 准备好使用 DIRECT 100 以油板夹层方法测量均匀性。

测量折射率均匀性时, 必须消除样本表面的影响。肖特使用两种测量方法: “油板夹层”方法和“抛光样本”方法。

使用“抛光样本方法”或 PHom 方法 (ISO 17411) 时, 必须将样本上下表面抛光。上下表面之间还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。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。

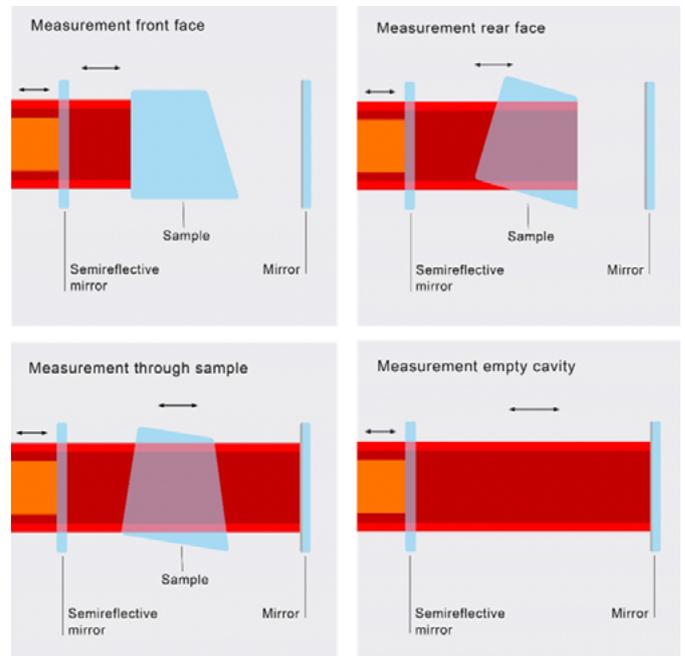


图7: PHom方法 (ISO 17411) 4次测量示意图, 用于测量折射率均匀性。

→ ← | 返回索引

SCHOTT

凝智慧 享未来 肖特科技

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

使用“油板夹层”方法时，将样本放在两块玻璃板之间。这两块玻璃板的表面经过精确抛光。玻璃板通过浸油与样本接触，浸油的折射率与样本相同。采用这个方法时，只需将样本表面研磨达到良好的平整度，无需抛光。测量时，首先测量不带样本时的油板（校准位置），然后减去带样本的油板的测量值（测量位置）。

浸油与样本的折射率必须精确匹配，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。

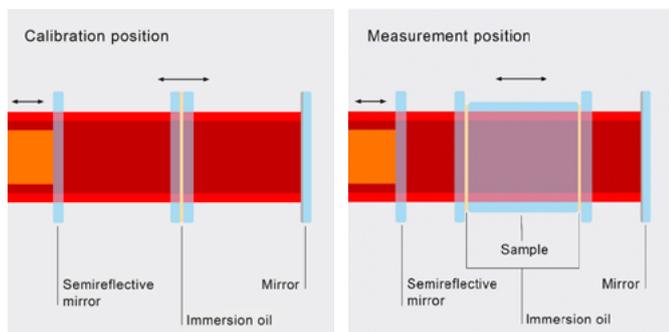


图8：“油板夹层”方法2次测量示意图，用于测量折射率均匀性。

德国美因茨主要用 DIRECT100 菲索干涉仪实施“油板夹层”方法，美国杜里亚则使用 Zygo Verifire MST 实施“抛光样本法”。

测量结果是经过颜色编码的样本折射率均匀性图，如图9所示。每种颜色代表与任意原点的折射率差值。

大孔径均匀性测量可能导致干涉图中出现“白点”（即无法评估的区域），其原因或者是使用的大油板上有通气孔（图9中颜色图的中心可以看到），或者是采用了基准标记拼接。

折射率均匀性证书中包含所有相关的均匀性测量结果和泽尼克数据（如果在圆形孔径上测量），以便对测量结果进行单独分析。

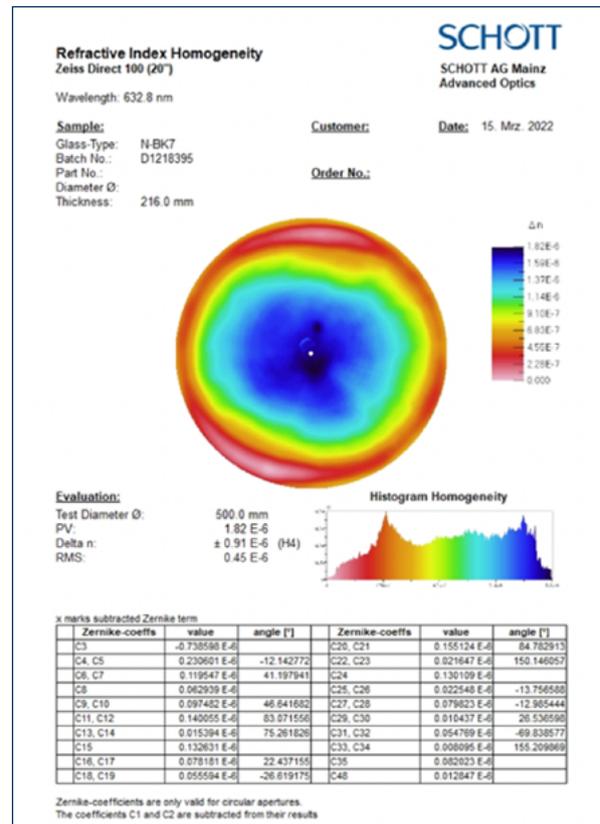


图9：折射率均匀性证书，带有错误的折射率分布颜色图。

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

根据 ISO 10110-18:2018 和 ISO 12123:2018, 光学玻璃的均匀性分为5个等级。如图10所示, 均匀性由最大的折射率偏差决定。1997年发布的旧 ISO 10110-4 定义得到了修订, 因为之前的  $\pm$  记号公差极限意味着需要绝对折射率测量能力, 这一点不适用于菲索干涉仪测量。

等级编号为线性, 从 H1 到 H5。指定的峰谷极限不成线性比例。H5 等级的范围比 H1 低得多, 如图11所示。

肖特 均匀性等级符号	新 ISO 12123:2018 和 ISO 10110-18:2018		旧 ISO 10110-4: 1997年	一般适用于
	等级符号	公差极限 $\Delta n$ [ $10^{-6}$ 或 ppm]	公差极限 $\Delta n$ ( $\pm$ 记号) [ $10^{-6}$ 或 ppm]	
	NH100	100	$\pm 50$	常见 应用 尺寸
H1	NH040	40	$\pm 20$	
H2	NH010	10	$\pm 5$	毛坯 玻璃的 部分体积
H3	NH004	4	$\pm 2$	
H4	NH002	2	$\pm 1$	不适用所有尺寸 不适用所有 玻璃类型
H5	NH001	1	$\pm 0.5$	

图10: 均匀性等级

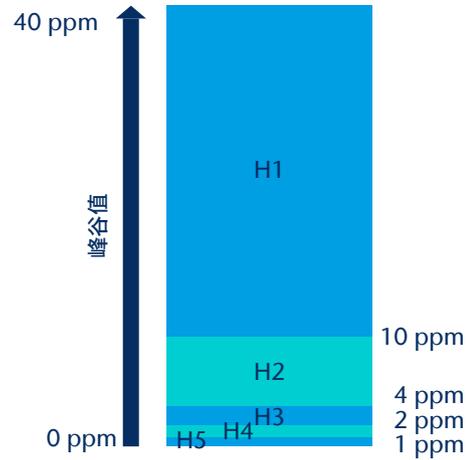


图11: 均匀性等级不成线性比例

进行均匀性测量时, 标准做法是测量后减去泽尼克倾斜系数和活塞系数后进行评估。进行大孔径均匀性测量时, 还要额外减去泽尼克近似中的焦点项。焦点像差会导致焦距发生变化, 这可以在光学装置中轻松调节。图12展示了从干涉仪数据中减去泽尼克重建波前的焦点项的示例。

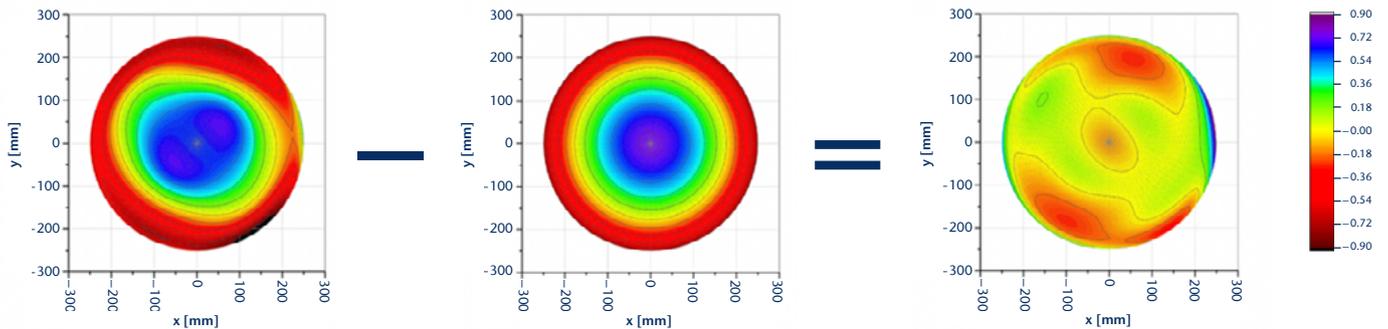


图12: 从泽尼克系数重建波前中减去焦点项

→ ← | 返回索引

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 3. 子孔径拼接

测量1000毫米或1500毫米直径的光学玻璃坯件时,使用500毫米的子孔径。这些子孔径均匀分布,确保良好的面积覆盖。图6展示了500毫米油板与直径950毫米、厚100毫米的肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件放在 DIRECT 100 干涉仪上。坯件经过精磨,达到适合油板夹层方法的平整度。

拼接时,通常测量4至6个子孔径,然后用拼接软件组合在一起。蔡司 DIRECT 100 干涉仪不使用自动载物台来定位坯件,因此测量中必须使用基准标记,使软件能够找到每个子孔径测量值彼此之间的正确位置。

图13左侧表示了用于拼接直径950毫米的肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件的子孔径排列。一共使用6个子孔径来覆盖950毫米直径坯件的约89%的面积。每一个500毫米直径孔径都经过调整,确保接触到坯件的物理边缘。在中间的400毫米直径上刻印了几毫米大小的浅圆形标记作为6个基准标记。中心还有一个基准标记。每两个子孔径的重叠区中包含两个共同的基准标记。软件中正确记录了每个基准标记。软件会移动子孔径,找到基准标记之间的最佳匹配。

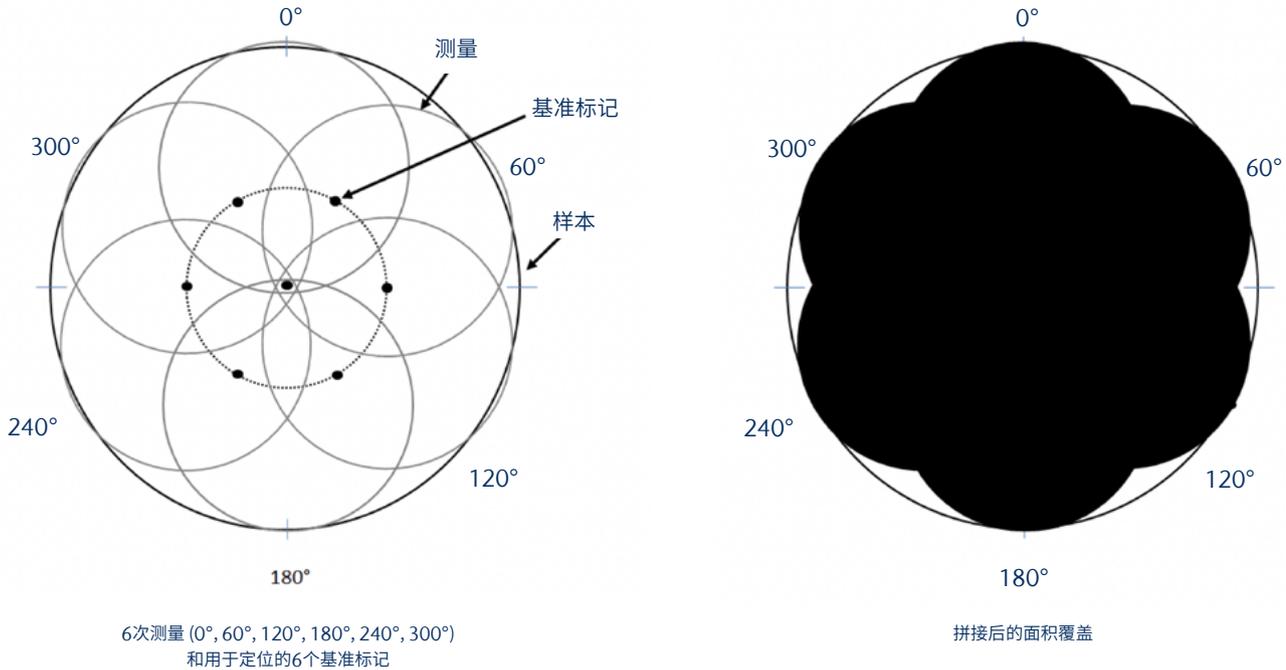
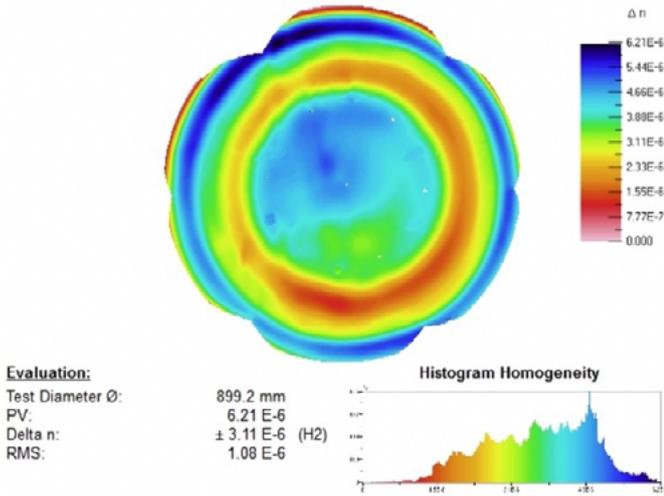


图13: 直径950毫米坯件的拼接排列方法,6个子孔径和基准标记(左图)和相应的面积覆盖范围(右图)

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

图14是以折射率均匀性颜色图表示的拼接测量结果。选择6个子孔径形成典型的花朵形状。此外,能看到7个基准标记的白点。减去焦点项后的峰谷值均匀性为 6.2 ppm, 孔径为900毫米。可以在证书中注明给定孔径的泽尼克系数。



x marks subtracted Zernike term						
	Zernike-coeffs	abs. value	angle [°]	Zernike-coeffs	abs. value	angle [°]
x	C3	6.356961 E-6		C20, C21	0.332177 E-6	-60.542973
	C4, C5	0.274795 E-6	-57.092022	C22, C23	1.619213 E-6	123.250778
	C6, C7	1.422577 E-6	126.526306	C24	1.691265 E-6	
	C8	1.148929 E-6		C25, C26	0.765559 E-6	-24.008448
	C9, C10	0.507214 E-6	6.652020	C27, C28	0.478036 E-6	20.128992
	C11, C12	0.472163 E-6	-33.383049	C29, C30	0.468402 E-6	17.122158
	C13, C14	1.677076 E-6	135.138824	C31, C32	0.247809 E-6	78.112213
	C15	1.001621 E-6		C33, C34	0.316289 E-6	-6.895075
	C16, C17	0.504862 E-6	23.716408	C35	0.108778 E-6	
	C18, C19	0.510711 E-6	5.057528	C48	0.479701 E-6	

Zernike-coefficients are only valid for circular apertures.  
The coefficients C1 and C2 are subtracted from their results

图14: 检验直径900毫米的肖特 N-BK7<sup>®</sup>, 减去焦点项后的折射率均匀性和泽尼克系数。

拼接干涉法实际中测量大型光学元件(X射线反射镜、望远镜的反射镜等)的常用方法。但是,实施这种技术并不容易。准确地说,由于拼接干涉法涉及多个重叠测量,因此在标准测量中通常无关紧要或者被忽略的误差在这个方法中表现为重叠误差。

将数据混合产生一个平滑的最终数字——这个操作并不复杂——并不会消除这些重叠误差的存在,必须分析和处理这些重叠误差才能获得最终的真实数字,因为每种误差都会产生不同的总误差。

为了说明拼接方法的实际困难,下面列出了在拼接测量中普遍存在的一些典型误差源:

- 校正:** 必须校正总体数字,以便二阶项(即“彗”、“像散”)不会在整个组成部分上传播:这些部分拼接起来没有重叠误差,因此无法通过对拼接数据的简单分析检测到。
- 振动:** 相移对振动具有固有灵敏性,因此需要良好的振动控制:干涉条纹透印会产生可见的重叠误差,但也会产生一些轻微的随机变形,出现低振幅拼接。减少后者的一种方法是使用较大的重叠值。
- 热漂移:** 这可能是拼接方法中最糟糕的问题:由于对大型坯件的操作是一项长时间操作,可能会渐渐发生热漂移,使重叠的子孔径之间产生轻微失配。这反过来会导致上述低振幅拼接,但没有小范围的干涉条纹透印效果。

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 4. 均匀性测量结果的温度依赖性

在测量大型均匀坯件时，正确控制大型玻璃坯件的温度差非常重要。温度差会导致折射率发生变化。在20°C至30°C温度范围内和632.8纳米波长条件下，肖特 N-BK7® 的折射率温度系数约为 2.7 ppm/K。表2指出了肖特 N-BK7® 坯件中温度差对折射率均匀性的影响。肖特 N-BK7® 中约1K的温度差导致不均匀性为 2.7 ppm，这相当于均匀性等级H3。

$\Delta T$ [K] =>	$\Delta n$ 峰谷值 [ppm]	均匀性等级
14.7	40	H1
3.7	10	H2
1.5	4	H3
0.7	2	H4
0.4	1	H5

表1: 肖特 N-BK7® 中约1K的温度差导致不均匀性 2.7 ppm (H3)

图15表示了直径1000毫米、厚100毫米的肖特 N-BK7® 坯件的温度环境从17°C变到22°C后的预期温度差。坯件中心和边缘之间的温度差至少需要17.1个小时才能降至 0.05 K 以下。

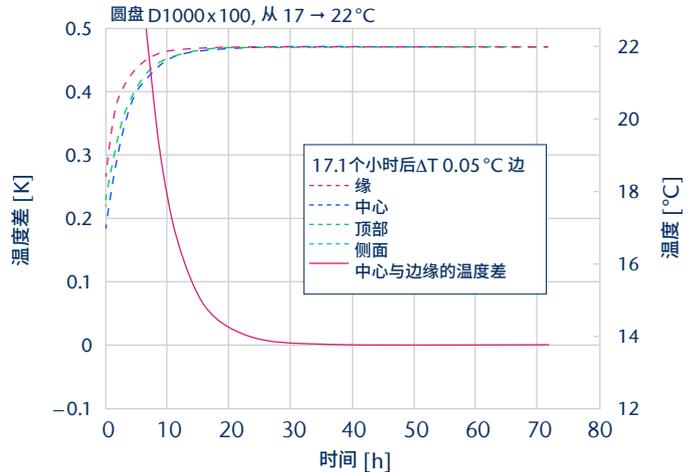


图15: 直径1000毫米、厚100毫米的肖特 N-BK7® 坯件所需的温度调节时间。

### 5. 光学玻璃的最大生产尺寸

光学玻璃的最大可用尺寸与尽可能保持均匀性稳定所需的工艺参数和几何形状相关。因此，典型最大铸件直径约为1200毫米，厚度为200至300毫米，具体取决于直径。图16展示了直径1500毫米模具中的液体肖特 N-BK7® 玻璃。

在生产大型规格光学玻璃时，玻璃本身有一些限制因素。玻璃的特有化学成分不仅会影响其光学特性，而且还会影响热力学等特性，例如粘度、熔体与熔窑材料的反应、结晶倾向以及处理熔炼和浇铸过程的必要灵敏度。不同的光学玻璃具有不同的粘度特性。玻璃的粘度限制着玻璃流速，但也会影响可达到的均匀性。必须限制玻璃流速，以确保各向同性地连续流入模具，防止出现条纹。这就需要很长的浇铸时间，从几个小时到几乎一天。在这个过程中，所有技术参数和环境参数都必须尽可能保持稳定。

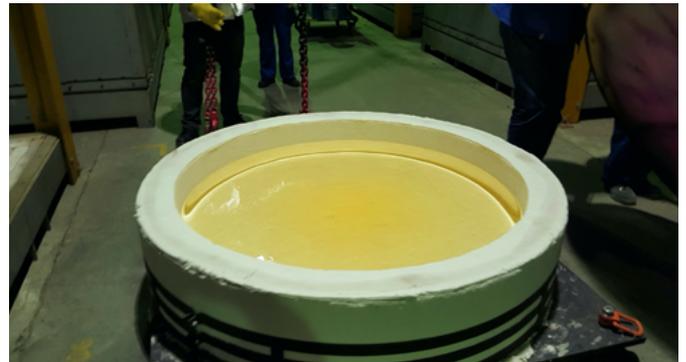


图16: 模具与直径1500毫米的肖特 N-BK7® 铸件。

→ ← | 返回索引

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

采用连续式熔炼技术的典型光学玻璃生产规格为条料、块料和圆盘料。大多数光学玻璃可以制成截面为 160 x 38 毫米的条状玻璃。有些玻璃只能制造较小的厚度，因为它们有结晶倾向。肖特 N-BK7<sup>®</sup> 的一个非常特殊的大型生产规格是体积约为 900 mm x 450 mm x 100 mm<sup>3</sup> 的大矩形条料。图17展示了一块横截面为 450 mm x 100 mm 的肖特 N-BK7<sup>®</sup> 条状玻璃。原则上，条料的长度仅受到可用的精密退火方法和切割设备的限制。



图17: 肖特 N-BK7<sup>®</sup> 条状玻璃，横截面约为 450 x 100 毫米

除了条状玻璃外，采用连续式熔炼工艺的最常见的生产规格是块状玻璃。典型块料的尺寸为 200 x 200 x 180 毫米。可以生产为块料的玻璃包括 LF5, LLF1, N-BAK, 肖特 N-BK7<sup>®</sup>, N-F2, N-FK5, 一些 SK, F 和 SF 玻璃。根据特殊要求，也可使用连续式熔窑生产圆盘状玻璃规格。过去生产过直径280毫米到约1500毫米的圆盘状玻璃规格。最大可生产的标准规格和均匀性请参阅袖珍目录中表1.6。

传统的硼硅酸盐冕玻璃、钡冕玻璃、重冕玻璃、氟冕玻璃和铅硅酸盐火石玻璃是最常用于生产大尺寸的玻璃。许多其他类型的玻璃，尤其是具有优异光学特性的玻璃，如非常低的色散或特殊的局部色散，由于具有结晶倾向，都无法制成大尺寸玻璃。

表2中为最常见的光学玻璃系列列出了可能的玻璃尺寸和首选玻璃类型。

可生产最大1200毫米大尺寸的最常见光学玻璃是肖特 N-BK7<sup>®</sup> 和 F2。使用大型连续式熔窑，采用可达到高光学均匀性的最佳方法，BK 玻璃可达到的最大尺寸为1500毫米直径和500毫米厚度，这相当于肖特 N-BK7<sup>®</sup> 重2.2吨。

火石玻璃生产为防辐射玻璃块料，尺寸可达 1500 x 1000 x 200 毫米。

FK5HTi, LLF1HTi 和 LF5HTi 玻璃为光刻行业进行了优化，以满足对超高品质玻璃的需求。它们可用于直径达300毫米的微光刻设备中。

此外，还可以生产折射率高达1.8的大尺寸 SF 型玻璃。过去生产过直径达500毫米的 SF1，而 SF6 直径可以等于或大于1000毫米。

原则上，使用现有的大型连续式熔窑，LLF, LF, F 和 SF 玻璃可以生产直径达1000毫米、厚度达300毫米的规格。如果进一步研发，最大可达到1500毫米直径和500毫米厚度，或者其他具有相同体积的尺寸。尺寸主要受到浇铸时间和条纹特点的限制。

一些 SF 玻璃也可作为无铅 N 型玻璃订购。这种 N 型玻璃具有几乎相同的折射率和阿贝数，但在熔炼和浇铸中的特性常常完全不同。原则上，所有 N 型 SF 玻璃仅限于最大直径160毫米的条状玻璃。

镧玻璃 (LAK, LAF 和 LASF)，磷酸盐玻璃 (PSK, PK) 和氟玻璃 (FK) 在铸造和冷却过程中有结晶倾向。这些玻璃在阿贝数图中有很极端的位置。为了防止发生不受控的结晶，必须以非常可控的方式尽快跨越结晶的临界温度范围。随着模具尺寸的增加，这种控制越来越困难。因此，许多玻璃无法生产大尺寸。

LAK, LAF 和 KZFS 玻璃可以生产又长又宽、厚度较小的条状规格。因此，目前可提供最大直径160毫米、厚43毫米的透镜。如果进一步研发，可以实现 280 x 280 x 80 毫米的尺寸。

如果进一步研发，FK 和 PK 玻璃类型可生产300毫米直径和80毫米厚度。

→ ← | 返回索引

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

使用坍塌法可能可以制造具有一定预成形曲率的更大直径。玻璃被重新加热，直到变软，并在自重作用下流动。将其放在直径更大、底部为曲面的模具中，在总体积足够的条件下，这有助于玻璃获得新的所需形状。一般来说，这个过程不会影响玻璃的质量。

图18展示了肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件在模具中坍塌后达到2200毫米直径。玻璃可以完全填满模具。这是有史以来生产的最大肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件。边缘厚度约为60毫米。



图18: 坍塌后肖特 N-BK7<sup>®</sup> 坯件直径达到2200毫米

材料/玻璃类型系列	当前能力可达最大尺寸 [GD 单位 mm]	研发后可达最大尺寸 [GD 单位 mm]	受以下限制	首选玻璃类型
BK	∅ 1200 x 300	∅ 1500 x 500 或相同体积	CT, CS, ES	肖特 N-BK7 <sup>®</sup>
LLF, LF, F, SF, (FK)	∅ 1200 x 300	∅ 1500 x 500 或相同体积	CT, CS, ES	LLF1/LLF1HTi, LF5HTi, F2, SF6, (N-FK5)
FK, PK	∅ 160 x 40	∅ 300 x 80	Cryst, VS	N-FK51A
LAK, LAF,	300 x 160 x 43	280 x 280 x 80	Cryst, VS	N-LAK8, N-LAK9
KZFS	300 x 160 x 43	360 x 280 x 80	Cryst, VS	N-KZFS4

CT: 浇铸时间  
CS: 中心条纹  
ES: 边缘条纹  
VS: 体积条纹  
Cryst: 结晶  
GD: 总直径

表2: 玻璃类型及其相关生产信息

→ ← | 返回索引

**SCHOTT**

凝智慧 享未来 肖特科技

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 6. 大型肖特 N-BK7® 和 LLF1 圆柱形坯件的均匀性

图19表示了厚度100毫米、直径1150毫米的肖特 N-BK7® 坯件在直径870毫米孔径上的均匀性测量结果。焦点像差泽尼克项已减去。峰谷均匀性约 3.9 ppm，相当于 H3 级。颜色图中的小白点来自6次单个测量的拼接基准标记。

重要的是要认识到有一点很重要，那就是光学玻璃的均匀性再较小孔径上通常表现要好得多。图20表示了100毫米子孔径对整个坯件的系统性评估。减去活塞和倾斜项后，大多数孔径得到的均匀性为 H5 (< 1 ppm 峰谷值，绿色)，所有其他孔径得到的均匀性为 H4 (< 2 ppm 峰谷值，黄色)。

100 x 100 子孔径上的均匀性  
(活塞和倾斜项已减去)

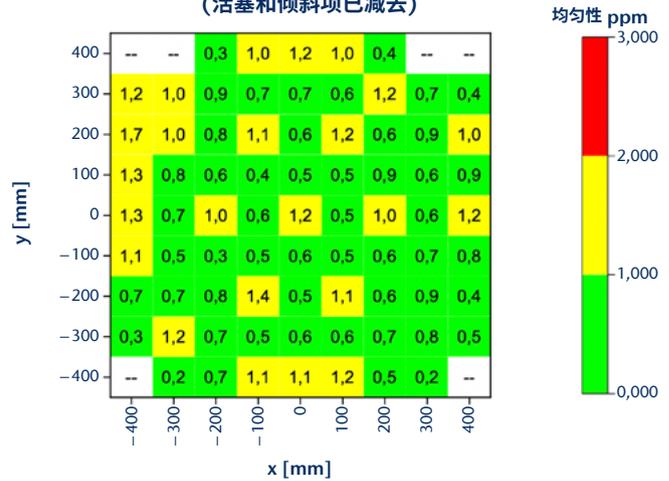


图20: 同一个坯件在所有 100 x 100 毫米子孔径上具有 H4 和 H5 等级(减去活塞和倾斜项后)! 每个正方形中的数字表示峰谷折射率偏差。

870毫米直径孔径上的均匀性  
(活塞、倾斜和焦点项已减去)

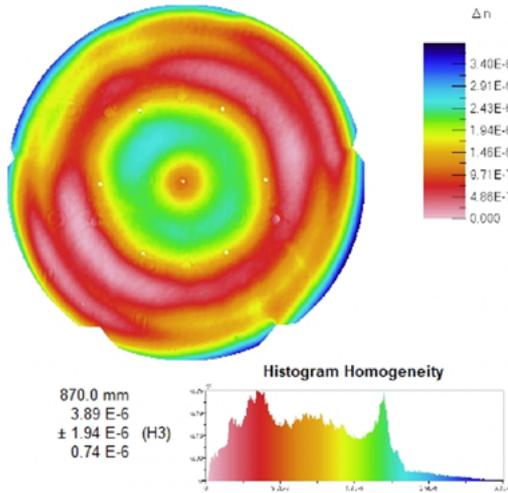


图19: 直径1150毫米的肖特 N-BK7® 坯件在870毫米孔径上测量得到 H3 级(活塞、倾斜和焦点项减去后)。

**Sample:**  
Glass-Type: LLF1  
Batch No.: 2028360  
Part No.: A  
Size: 884.2 x 975.4 mm  
Thickness: 95.1 mm

**Customer:**  
  
**Order No.:**  
999999999

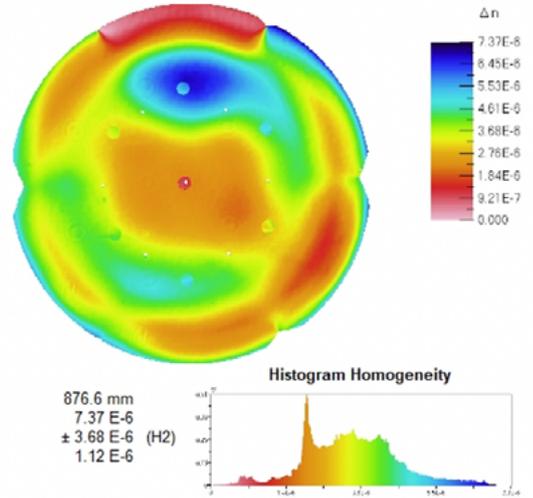


图21: 直径900毫米的 LLF1 具有 H2 级!

→ ← | 返回索引

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

图21表示了900毫米 LLF1 坯件在876毫米和95毫米厚度测量孔径上的均匀性测量结果证书。使用500毫米孔径 Direct 100 干涉仪进行测量。峰谷折射率均匀性为 7.4 ppm, 减去焦点项后相当于 H2 级。

### 7. 大型肖特 N-BK7® 条状玻璃的均匀性

大型肖特 N-BK7® 应用的另一种生产规格是可以连续生产的大型条料 (见图22)。这种坯件的典型尺寸为 900 x 450 x 100 mm<sup>3</sup>, 其均匀性几乎在整个孔径上都优于 4 ppm 峰谷值 (H3)。应力双折射通常都非常低 (< 5 nm/cm), 没有条纹或波纹等小范围偏差。



图22: 900 x 450 x 100 mm<sup>3</sup> 连续生产的肖特 N-BK7® 条料!

图23表示了这种条状玻璃在 800 x 400 mm<sup>2</sup> 测量孔径上的均匀性结果。在杜里亚使用 Zygo 24" Verifire MST 进行测量。折射率的峰谷偏差为 2 ppm, 根据 ISO 10110-18 相当于 H4 级。未见小范围折射率偏差。

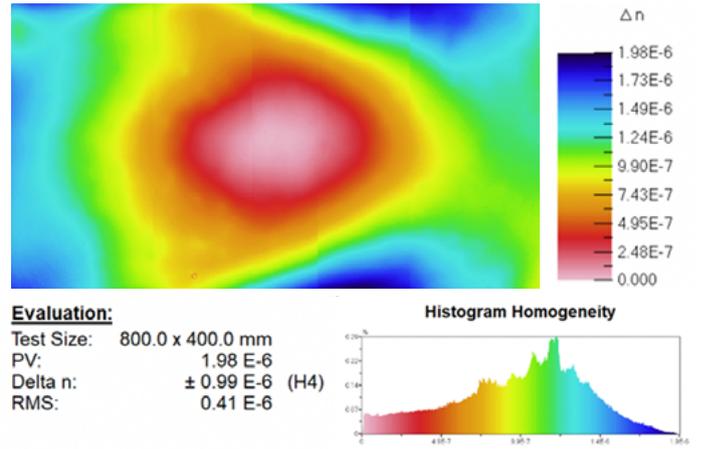


图23: 800 mm x 400 mm 肖特 N-BK7® 条料为 H4 级!

→ ← | 返回索引

SCHOTT

凝智慧 享未来 肖特科技

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 8. 生产顺序

坍塌后的大型坯件的总生产周期很容易就能长达一年。表3列出了不同的生产步骤和相应的所需时间(周数)。一个直径1500毫米坯件的准备过程以及熔炼、精炼和浇铸工艺步骤大约一共需要7周。

目前的连续式熔窑无法只生产一个大型玻璃坯件。为了满足对高均匀性的要求,必须在浇铸的这段时间内确保折射率非常稳定。必须先消除新熔体开始形成时的正常变化,才能开始浇铸。只有在生产开始一两天之后,才能开始首次浇铸。因此,如果只需要一个坯件,这个坯件的价格就必须涵盖要与该坯件一起生产的所有玻璃的总成本。剩余的玻璃可能会因为需求有限以及折射率和色散方面的特殊光学定位而无法出售。含铅型的玻璃尤其如此,因为这种玻璃不再用于消费类光学元件。

浇铸过程结束后,必须将尚粘稠的熔体直接送入粗退火炉。热玻璃熔体在专门的粗退火炉中大约需要6周时间冷却至室温。所需时间取决于所生产玻璃的尺寸和类型,需要缓慢降温,以防坯件因内应力而破裂。在粗退火过程中,模具周围的温度场必须尽可能保持稳定。

生产步骤	周数
1. 生产大型模具	16
2. 熔炼、精炼、浇铸	1
3. 粗退火和首次检查	6
4. 精密退火	17
5. 为检查进行预加工(抛光面达到中等平整度规范,以进行条纹和夹杂物检验,精密研磨,以进行干涉测量),切割样本用于测量光学特性(折射率、阿贝数、内部透射率)	4
6. 检查内部质量(条纹、气泡和夹杂物、应力双折射)	1
7. 用菲索干涉仪测量均匀性	1
8. 根据要求的坯件形状进行最终加工——检查几何形状	2
<b>在所有资源都可按时提供的情况下的最佳总时间</b>	<b>48</b>

表3: 大型光学玻璃坯件的生产顺序表中列出了每个步骤所需的典型生产时间(周数)。大型坍塌玻璃坯件的总生产时间超过1年。

首次检查是否存在条纹、气泡和夹杂物后,玻璃坯件进行精密退火。这是大型光学玻璃坯件的生产中最耗时的过程。精密退火过程决定了最终折射率、光学均匀性和应力双折射。玻璃的化学成分对折射率影响只在 $10^{-3}$ 范围内。精密退火过程决定了最终值小数点后第6或第7位数字。

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

在这个温度范围内冷却时，必须尽可能地减小大型玻璃中的温度差。在某个体积的不良导热体中产生的温度差与其尺寸并非线性关系，而是与板材厚度的平方成正比。因此，即使可以浇铸较大较厚的坯件，达到高均匀性所需的退火时间也会变得非常长——太长而无法实际应用。

精密退火结束后，对玻璃进行内部质量检查和均匀性测量。

### 9. 建议

上述这些因素决定了大型光学元件的可提供性。最后提出以下一些建议：

- 透射光学元件的尺寸应尽可能小。这一点尤其适用于大透镜的厚度。厚度决定了透镜的热惯性，这是在光学元件的生产和运作中导致许多问题的原因。由于对体积中温度差的影响成平方关系，即使厚度减小一点点也会有所帮助。
- 大型透镜会是独特而灵敏的部件。它们在光学系统中起着关键作用，发生事故后更换它们需要很长时间。因此，建议从最开始到透镜最终安装在望远镜结构中，在整个生产过程中采用专门的风险管理程序。

- 大多数内部瑕疵，如条纹或夹杂物，会导致杂散光或光线偏转。如果它们靠近中间像平面，也可能看得见。应考虑进行模拟计算来评估这些瑕疵的影响，防止规格过高，并尽早找到限制条件以寻找补救方法。这同样适用于温度梯度引起的不均匀性。最有希望大幅降低不均匀性的方法是保持热稳定性，并将其包含在自适应光学校正反馈回路中。

肖特有信心生产大型玻璃坯件凭借现有的方法，肖特提供可尽力生产的产品。如果目前的项目所需的玻璃类型和尺寸无法预先实现，则可以考虑开发新产品。不过，开发时间和生产周期通常需要很长时间，因此应尽早开始。

→ ← | [返回索引](#)

## TIE-41 大型光学玻璃坯件

### 10. 文献

- [1] R. Jedamzik, U. Petzold, “Optical Glass: Refractive index homogeneity from small to large blanks”, Proc. SPIE 10914, 2019
- [2] R. Jedamzik, U. Petzold, V. Dietrich, V. Wittmer und O. Rexius, “Large Optical Glass Blanks for the ELT Generation”, Proc. SPIE 9912, 2016
- [3] P. Hartmann, R. Jedamzik, “Large Optical Glass Lenses for ELTs”, Proc. SPIE Vol. 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy SPIE Orlando 2006
- [4] R. Jedamzik and P. Hartmann, “Large optical glass blanks for astronomy”, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 5494, 382 (2004)

 | [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