SCHOTT
凝智慧 享未来 肖特科技



热尺寸稳定性

零度® – 热膨胀趋近于零的微晶玻璃。为您加分。



为我们的未来加分

您是否对能够实现成像和数字化未来的特殊材料感兴趣？在本手册中，我们将介绍零度®微晶玻璃的相关信息，该玻璃广泛用于需要高分辨率光学和精密工程设计的最高热尺寸稳定性的应用。

深入了解零度®的世界，了解有关这种微晶玻璃如何为科学和工业提供支持的详细信息。对于开始使用或指定这种产品的人员，我们概述了材料属性和加工可能性。关于未来的提示：我们的一些图片标有“AI 生成”。



为我们的未来加分

4 简介 | 为精度加分

8 航空 | 为安全加分

12 航天 | 为探索加分

16 天文 | 为发现加分

20 微芯片 | 为数字化加分

24 显示屏 | 为亮丽加分

28 计量 | 为准确性加分

32 为您加分

技术规格

34 热膨胀趋近于零

40 内部品质

44 加工

50 抗弯强度

54 其他属性

56 技术规格



零度®是一种微晶玻璃，在广泛的温度范围内热膨胀均趋近于零。这种非凡特性意味着，需要最高精度的应用可以避免几何形状和零件之间的距离变化，即使存在温度变化也是如此。在接下来的内容中，我们将概述零度®微晶玻璃用于满足严格要求的一些应用。零度®的主要特性是：

热膨胀趋近于零

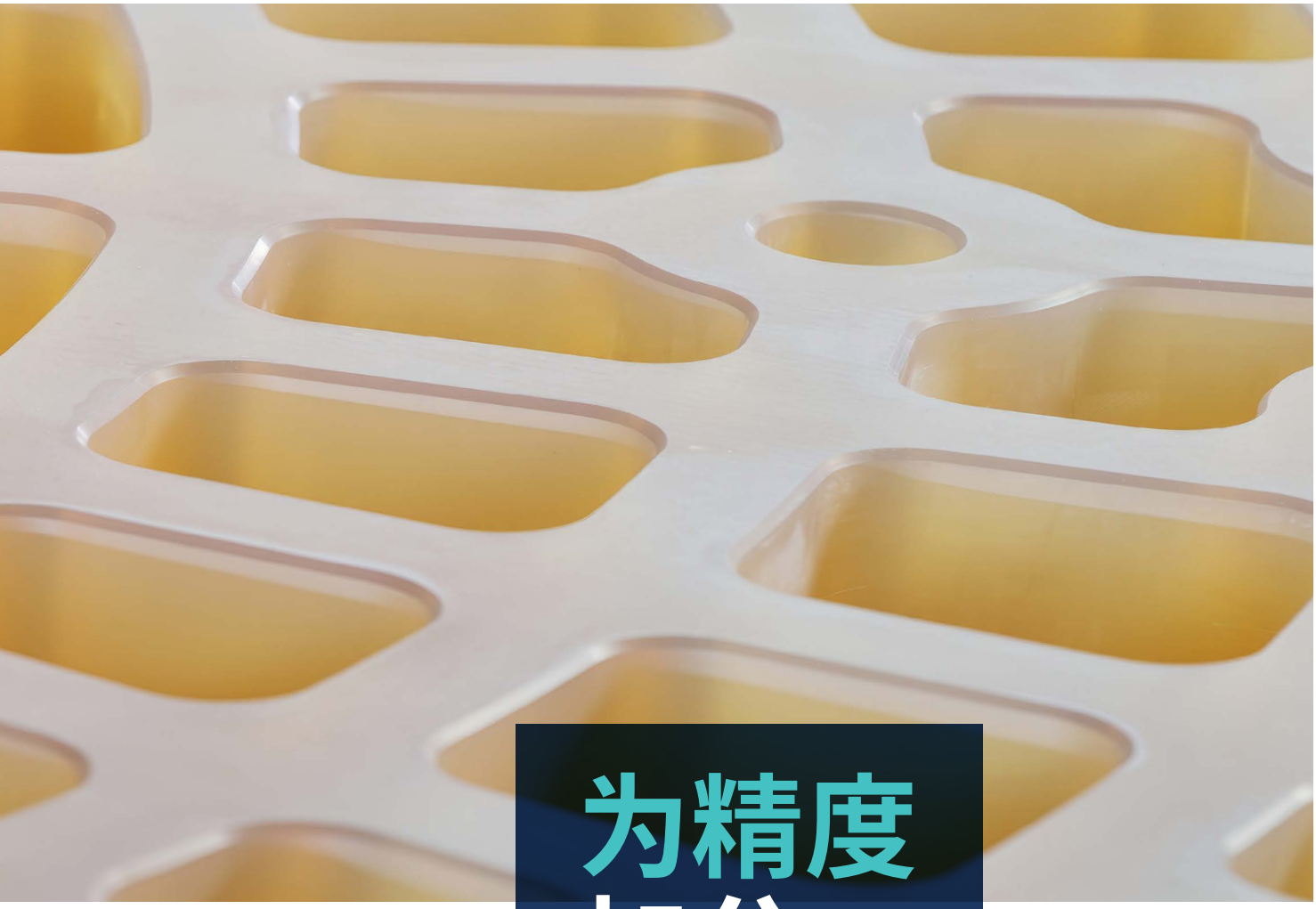
较低的净热膨胀与工作温度范围相匹配，可达到 0 ± 7 ppb/K 的准确度。

高度均匀的特性

在高达4.25米的整块材料中，低CTE和材料特性均匀性好。

CNC 定制 3D 形状

从几厘米到4米不等，可提供大型轻量化和未轻量化的复杂形状。



为精度加分

最高内部材料品质

确保稳定的结果和出色的抛光性能。

可靠性

高抗弯强度和寿命可预测性赋予它出色的可靠性。

极端条件下可用

从地面到太空，从干燥到潮湿，从压力传感器到真空，零度®在恶劣条件下均可使用。

透气性低

为环形激光陀螺仪中的氦氖激光应用提供长期稳定性。



肖特4 米
级坯件退火

零度®材料特性

零度®是无机无孔锂铝硅氧化物微晶玻璃，具有残余玻璃相中均匀分布纳米晶体的特点。

肖特在位于德国美因茨总部生产零度®微晶玻璃的历史已经超过 50 年，采用的两步工艺如下：第一步，精心挑选的原材料进行熔化、浇铸到模具中，然后退火以获得玻璃态。第二步，精确的晶化工艺通过纳米晶体的受控生长将这种玻璃态转化为零度®微晶玻璃。这些晶体的负线性热膨胀系数可补偿剩余玻璃态的正膨胀。

零度®的高均一性和内部品质可归因于成熟的熔融和晶化工艺，可在直径达 4.25 米的大体量零度®坯件中实现如此卓越的质量。本手册的技术规格部分提供了详细的材料特性，以支持您的材料规格。



在五轴数控机床的三点支架上磨削4米级毛坯件

零度®加工

肖特还在加工和交付大量单体和成型坯件方面提供专业支持。我们使用研磨和抛光工艺按照客户的技术图纸进行生产，我们可以生产从单件到批量生产的所有产品。

例如 2024 年，我们按时完成了欧洲南方天文台极大望远镜主镜的 949 个镜面基板的生产。“加工”章节将为您提供有用的数据，以支持您的技术规格流程并确保产品的可行性。

本目录总结了零度®微晶玻璃的最重要特性，并引用了某些肖特出版物。

有关这些出版物的完整列表，请参见此处的下载部分：

schott.com/zerodur


AI



为安全加分

商用飞机配备了先进的导航系统，这些系统对于航班的安全运行至关重要。通过这些系统，飞行员可以在任何给定时间精确确定飞机的位置，确保安全及时到达。



CNC 成型和双面抛光零度®坯件

航空航天行业依靠带有加速度计和陀螺仪的导航系统来测量所有三个方向 (x, y, z) 的线性加速度和角速度，以确定飞机的确切速度和位置。这些仪器的集成对于现代航空领域所需的复杂操纵和导航 至关重要。

一种陀螺仪技术利用了萨格纳克效应，该效应指的是沿着闭环在相反方向旋转的两个光束之间发生相移。这种环形激光陀螺仪由零度®微晶玻璃制成：整个激光束在一个称为陀螺仪主体的零度®玻璃块中运行。对于光束控制，零度®用作高反射镜以及检测器光学元件组件棱镜的基板材料。

您知道吗...

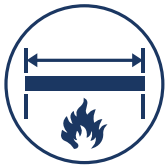
...飞机上的零度®环形激光陀螺仪每天行驶距离约为地球圆周的 4,700 倍。



飞行员在飞机上航行

依靠具有低 CTE 的零度®微晶玻璃可实现非常一致的光束长度。此外，微晶玻璃具有极低的氦气渗透性，可防止作为激光介质的氦气发生脱气。这两种特性相结合，可实现极为精确的位置测量（0.001°/h 零偏稳定性），以及非常长的环形激光陀螺仪使用寿命（60,000 小时）。

零度®微晶玻璃制成的环形激光陀螺仪具有高精度、可靠性和长使用寿命等特点，是更安全航空旅行的完美导航硬件解决方案。



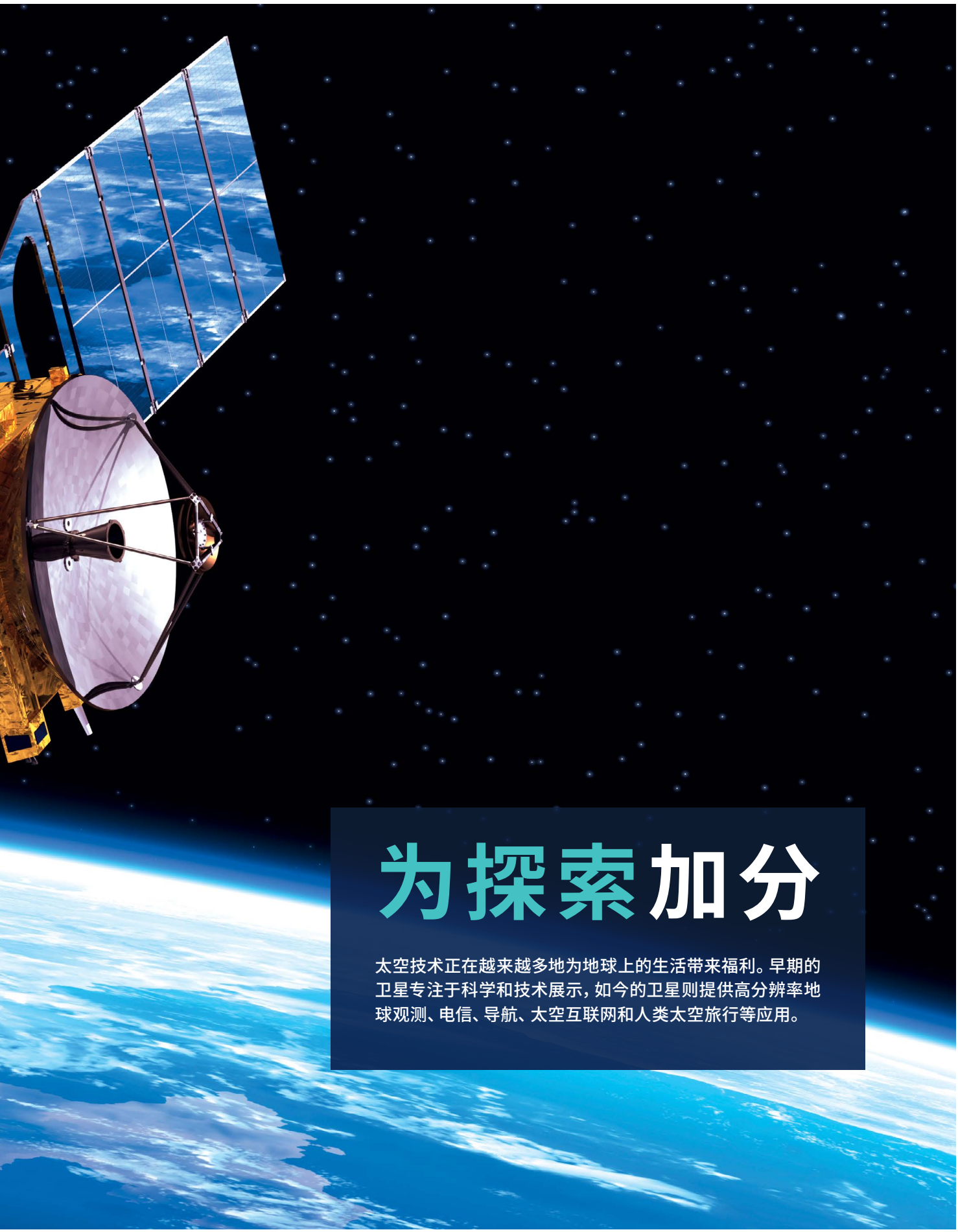
热膨胀趋近于零



透气性低

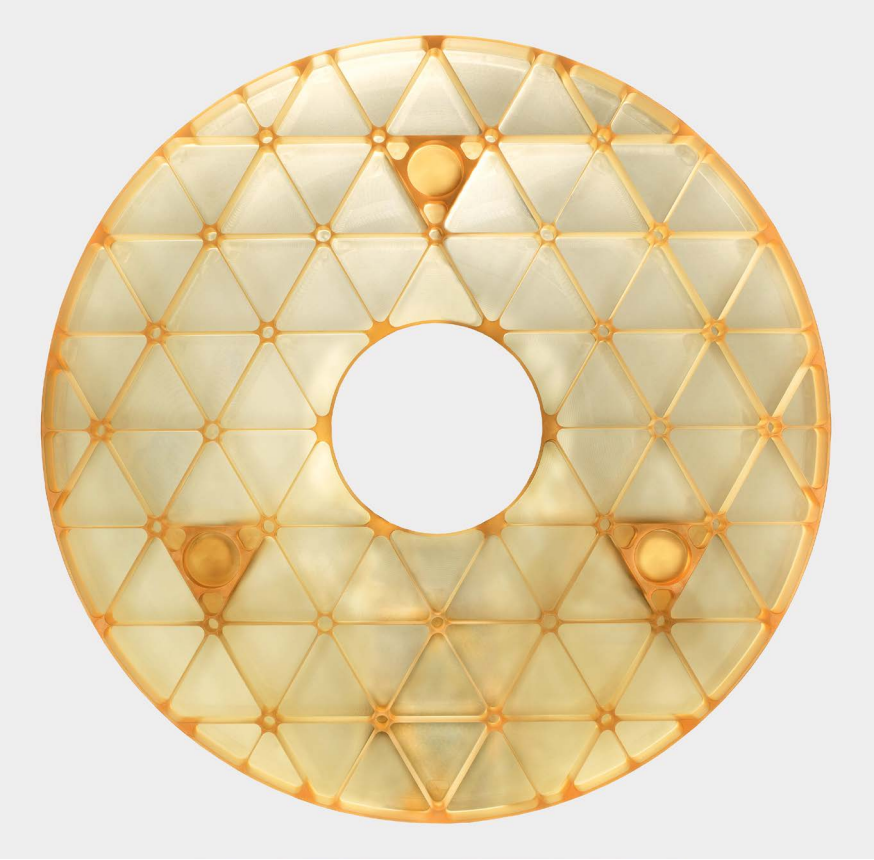


3D 渲染



为探索加分

太空技术正在越来越多地为地球上的生活带来福利。早期的卫星专注于科学和技术展示，如今的卫星则提供高分辨率地球观测、电信、导航、太空互联网和人类太空旅行等应用。

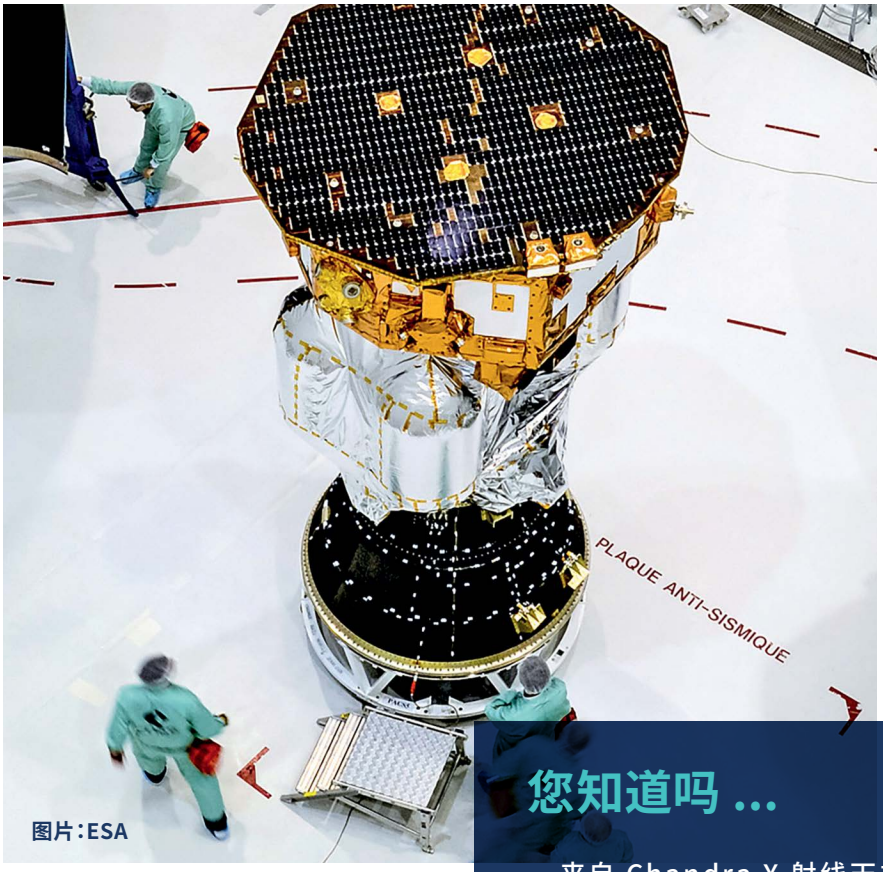


直径为 1.2 米的轻量化零度®镜面坯件

诸如哈伯太空望远镜或 James Webb 太空望远镜之类的大型太空观测站已经突破了科学进步的技术界限。这些望远镜需要极其稳定的材料来生成遥远天体的高分辨率图像，例如皮米稳定性。但是，高分辨率地球观测光学元件也需要热稳定和机械稳定的组件，以承受发射条件和太空中的恶劣环境。这种热稳定性需要在轨道的整个轨迹中保持，这会在光学器件上产生热梯度。此外，卫星光学器件需要尽可能轻，同时不会降低性能或稳定性。

零度®镜面基板在广泛的温度范围内表现出趋近于零的热膨胀，可以根据太空任务的运行温度进行定制。零度®结合了材料整体个位数的 ppb/K CTE 均一性，可在每个轨道上提供出色的热稳定性。

太空光学器件用零度®镜面基板通常采用 CNC 研磨方法，重量轻，质量可减少 90% 以上。除了其设计之外，镜面基板的机械稳定性还取决于其表面质量，这通过复杂的蚀刻技术来进行增强，以经受住发射。



图片：ESA

将 LISA Pathfinder 载荷集成到 Vega 发射器中

肖特通过光学表面的细粒度和严格形状公差，提供零度®坯件的加工和精密研磨，可实现直接精密工具抛光，在光学制造过程中节省抛光时间。

轻量化零度®镜面基板和组件提供高热稳定性，可在严苛的太空环境中实现高分辨率成像。

您知道吗 ...

...来自 Chandra X 射线天文台的第一张图像显示了超新星仙后座 A 中的一个中子星。Chandra 于 1999 年置于观测轨道上，从那时起，它一直在距离地球 16,000 到 133,000 公里的椭圆轨道上飞行。Chandra 在最近的任务中，一直在通过指向它所识别黑洞位置附近的三个 X 射线源来探索这些中等尺寸的黑洞。



热膨胀趋近于零



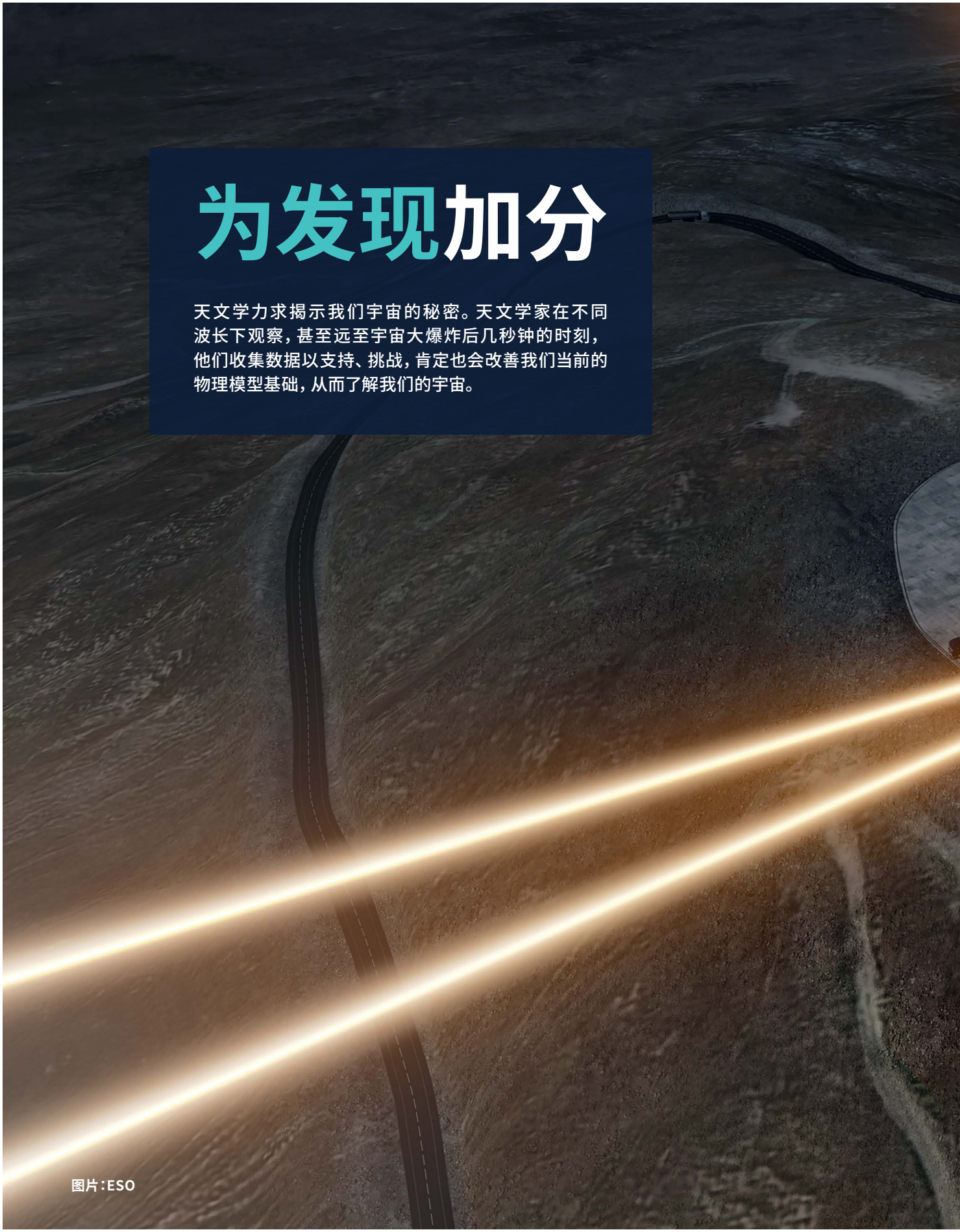
高度均匀的特性



可靠性



极端条件下可用

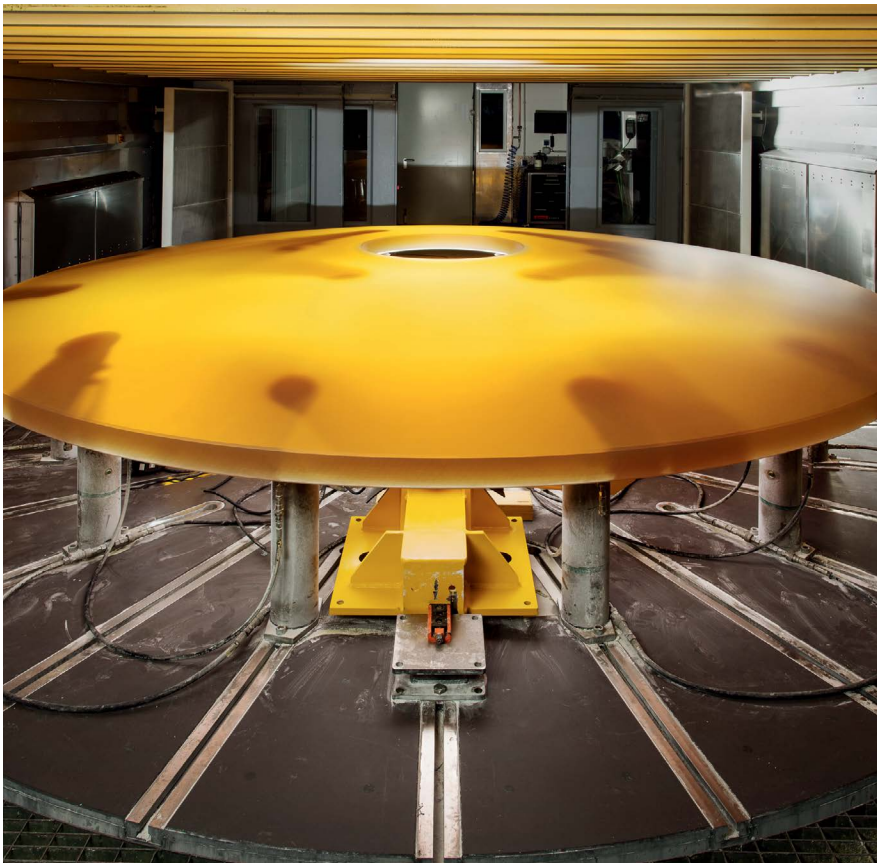


为发现加分

天文学力求揭示我们宇宙的秘密。天文学家在不同波长下观察，甚至远至宇宙大爆炸后几秒钟的时刻，他们收集数据以支持、挑战，肯定也会改善我们当前的物理模型基础，从而了解我们的宇宙。

图片：ESO



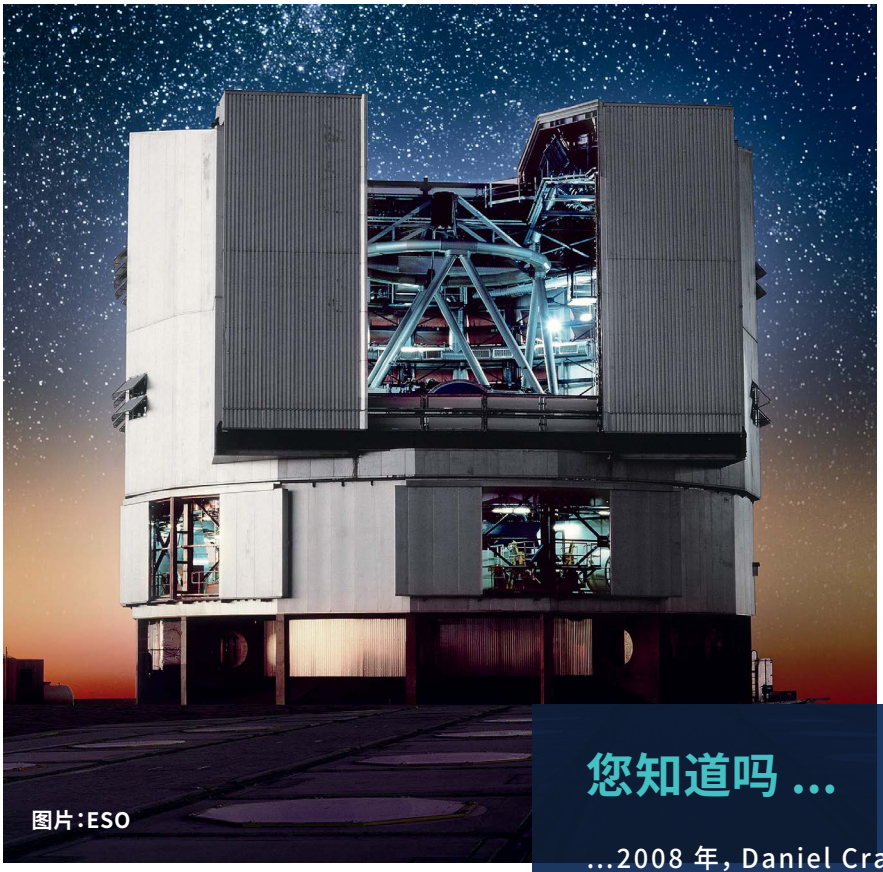


用于极大望远镜次镜的4 米级零度®镜面基板

为了实现这一目标，天文学家需要强大的望远镜，这些望远镜被视为人类制造过的一些最先进的机器。

在深远太空观察天体的关键在于收集足够的光子并避免或减轻来自地球大气的图像干扰。因此，望远镜设计及其材料、组件和检测器需要支持很大且精确对齐的光圈，以便它们在观察过程中不会丢失任何光子。望远镜位置的 24 小时的温度变化会影响观测，因此需要光学元件（尤其是镜面）极高的热稳定性。

为了克服这些挑战，Calar Alto 天文台选择了零度®微晶玻璃作为镜面基板，尽管当时微晶玻璃刚刚开发了几年。其微小样本的热膨胀趋近于零，因此说服了海德堡 Max Planck 天文学院的天文学家选择这种新材料。其 12 个直径为 0.3 米至 3.6 米坯件的订单被视为微晶玻璃零度®商业化的开端日期。有史以来最大的零度®坯件（直径 8 米），用作欧洲南方天文台 (ESO) 甚大望远镜 (VLT) 的主镜镜面。如今，肖特经常生产直径达 4.25 米的坯件。



ESO 的 VLT 主要依赖于由零度®制成的 8 米主镜

您知道吗 ...

...2008 年，Daniel Craig 主演的 007 电影《大破量子危机》中的场景是在 ESO VLT 场地附近的 Paranal Residencia 酒店拍摄的。这家地下酒店建筑屡获殊荣，位于 Cerro Paranal 山上，用于接待 ESO 的游客。

如今，世界最大型天文台很多都依赖于零度®镜面基板。肖特为 ESO 的极大望远镜 (ELT) 连续生产了 949 个镜面坯件。它们不仅在一整个基板上表现出个位数的 ppb/K CTE 均一性。而且在基板之间所达到的 CTE 分布 +/- 20 ppb/K 也好于规格要求，反映了多年来通过完善制造过程实现的材料特性的出色可再现性。

50 多年来，零度®微晶玻璃一直是许多恒星和太阳地面天文台的首选镜面基板。



热膨胀趋近于零



高度均匀的特性



CNC 定制 3D 形状



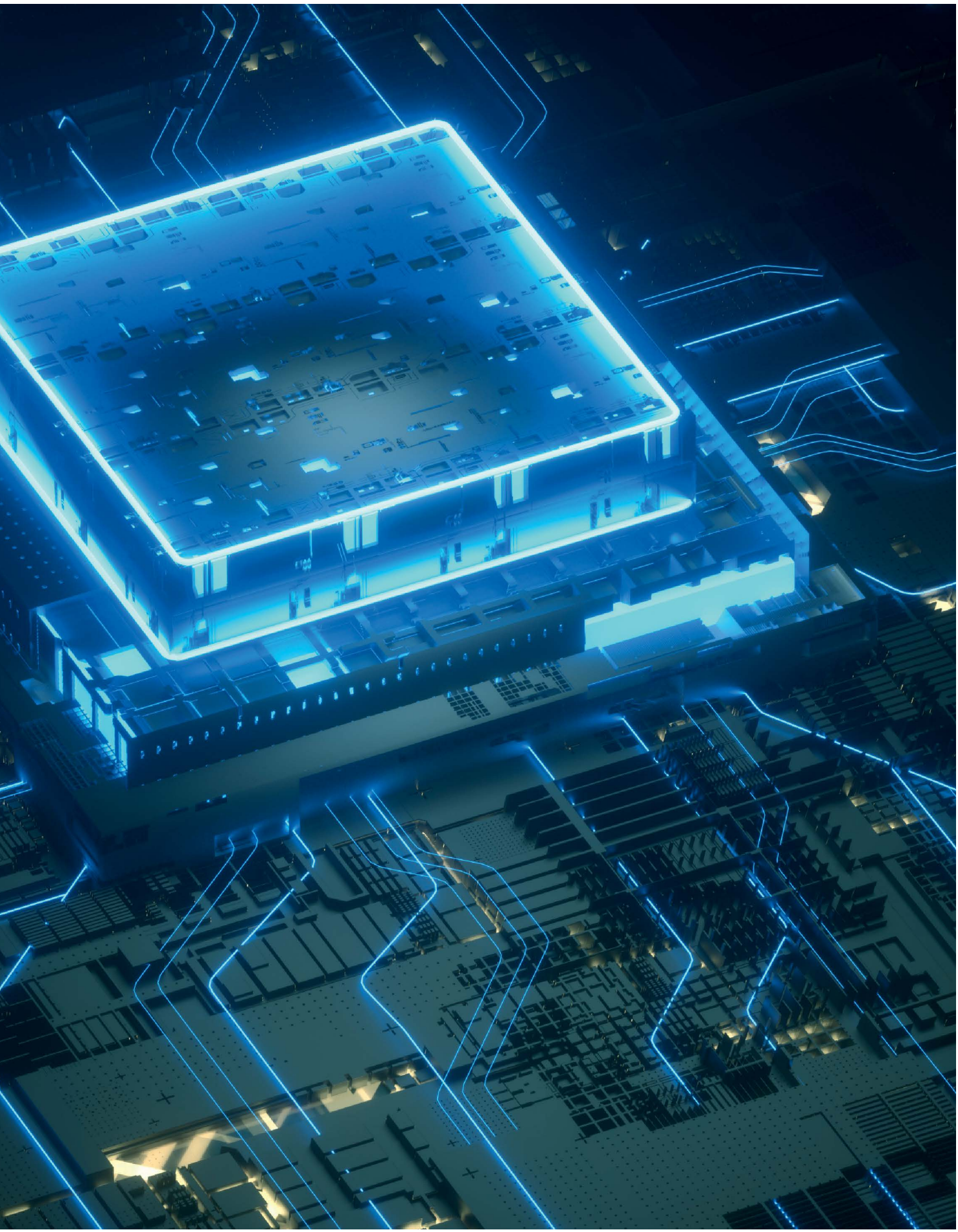
极端条件下可用

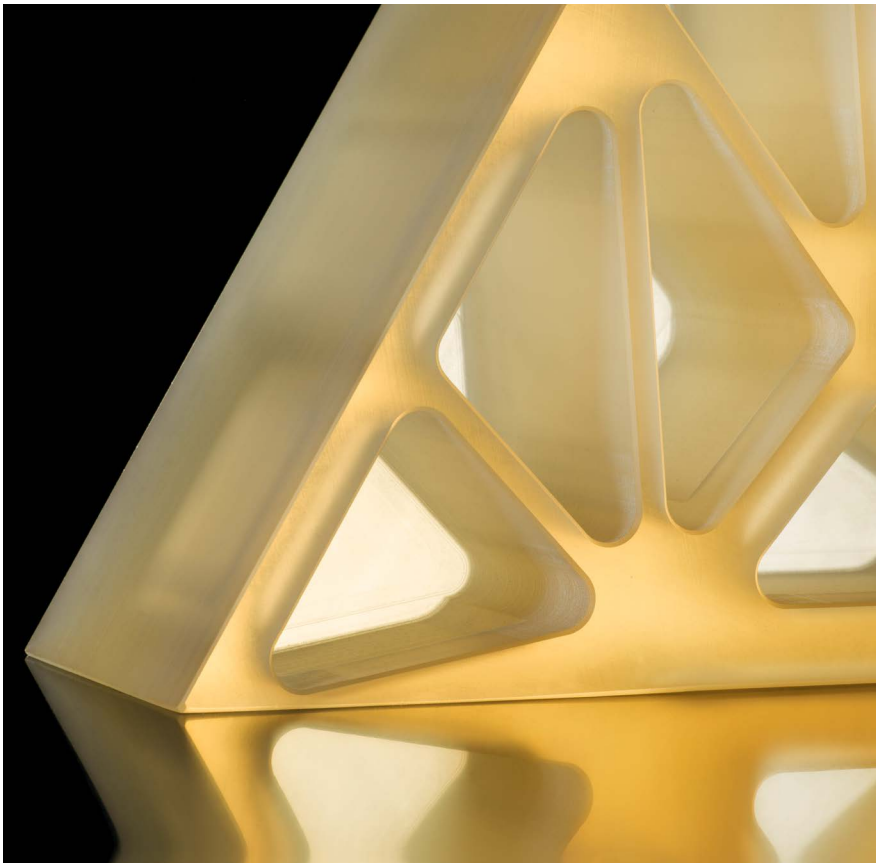


为数字化加分

微芯片在我们的生活中发挥着重要作用，这在物联网、自动驾驶和人工智能等新兴技术中更加明显。我们依靠微芯片来实现这些技术的可用性和可靠运行。

3D 渲染



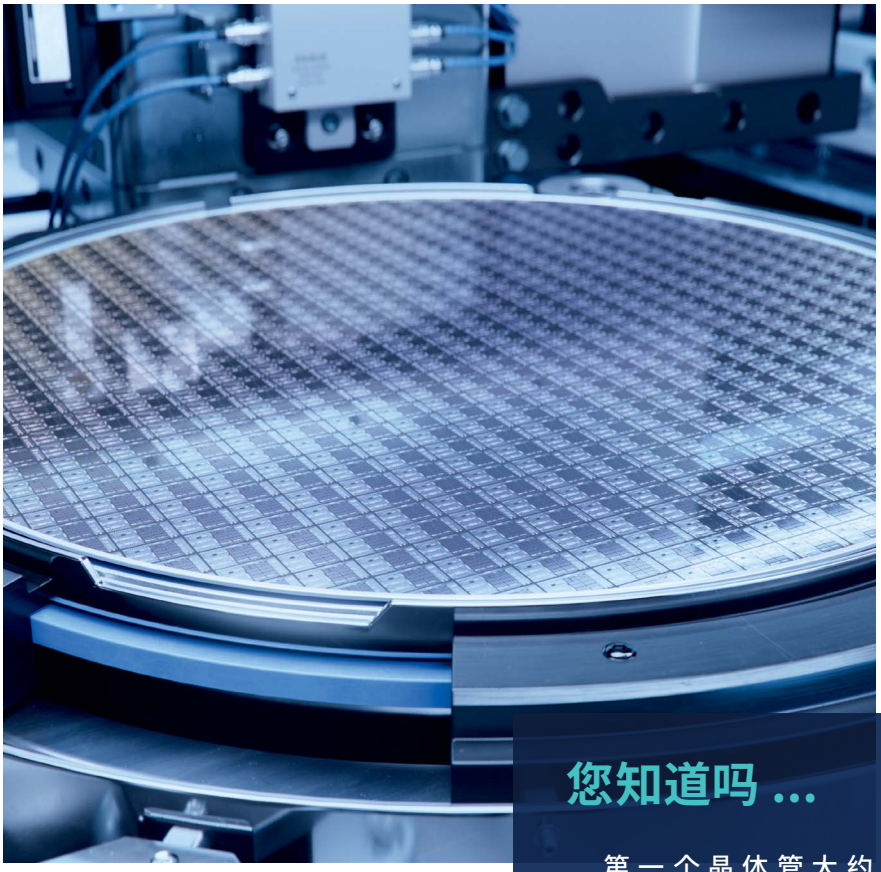


带镂空几何形状的轻量化零度®结构

尽管微芯片的尺寸没有增加，但根据摩尔定律，过去的二十年中晶片上晶体管数量增加了 1000 倍。

由于晶体管密度更高，达到纳米级尺寸的更精细结构，芯片性能得以提高。为实现这一点，复杂的定位系统需要使微芯片基片（即晶圆）与光掩模板对齐，以提供纳米级精度和准确度的结构信息。

半导体光刻技术中此系统和其它系统使用的材料需要极高的热稳定性：因此，它们需要具有极低的热膨胀系数来支持精确对齐。此外，必须保证整个组件（尺寸可达数百毫米）的稳定性。使用零度®微晶玻璃可在芯片制造中实现最高精度。计算机和智能手机中现代集成电路的极小结构是使用零度®微晶玻璃组件生产的。



硅晶圆生产

您知道吗 ...

...第一个晶体管大约是人手的大小。它由贝尔实验室科学家 John Bardeen、Walter Brattain 和 William Shockley 于 1947 年推出。如今，最小的晶体管仅由一个银原子组成，正在德国卡尔斯鲁伊理工学院 (KIT) 进行研究。

零度®的热膨胀趋近于零，是支撑定位系统的首选材料。其 CTE 甚至可以根据室温附近的应用温度进行定制，用于进行微芯片的光刻结构成形。零度®的个位数 ppb/K CTE 均一性即使在出现局部温度梯度时也能保持热稳定性。此外，零度®可以通过 CNC 磨削等工艺根据客户的设计加工成形。

零度®组件有助于光刻机准确定位接触外界温度的晶圆。

热膨胀趋近于零

高度均匀的特性

CNC 定制 3D 形状

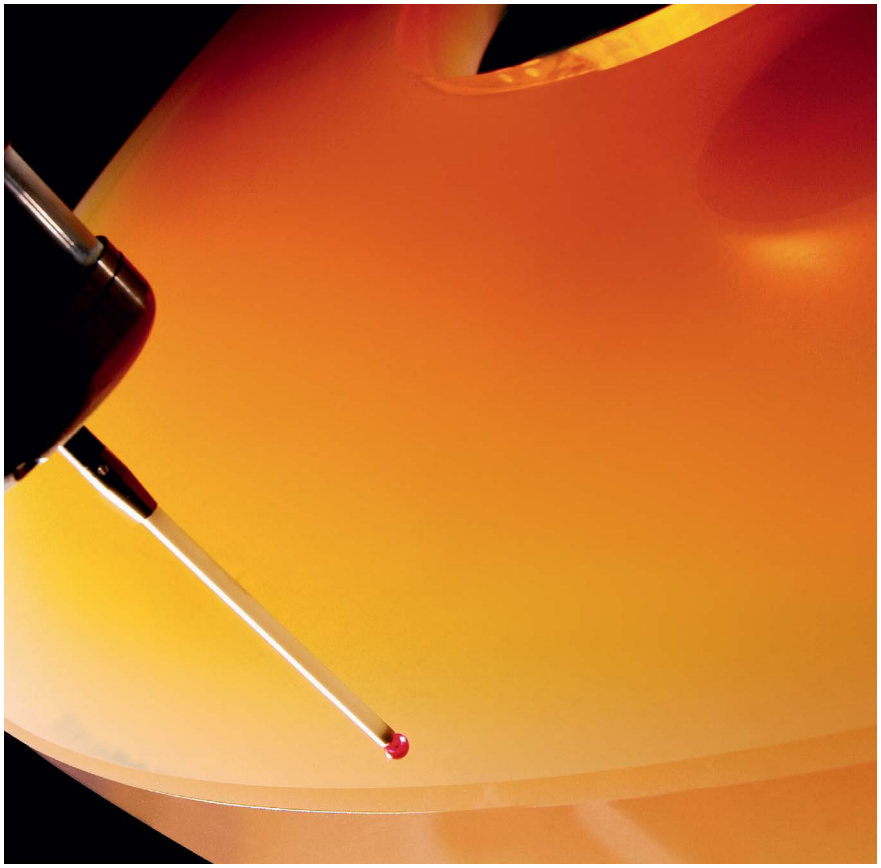
极端条件下可用


10:22
WED 18
2
AI



为亮丽加分

显示屏已成为我们生活中不可或缺的部分。它们将我们与世界联系起来，是我们日常工作的重要组成部分，为我们提供清晰的图像和明亮的色彩。

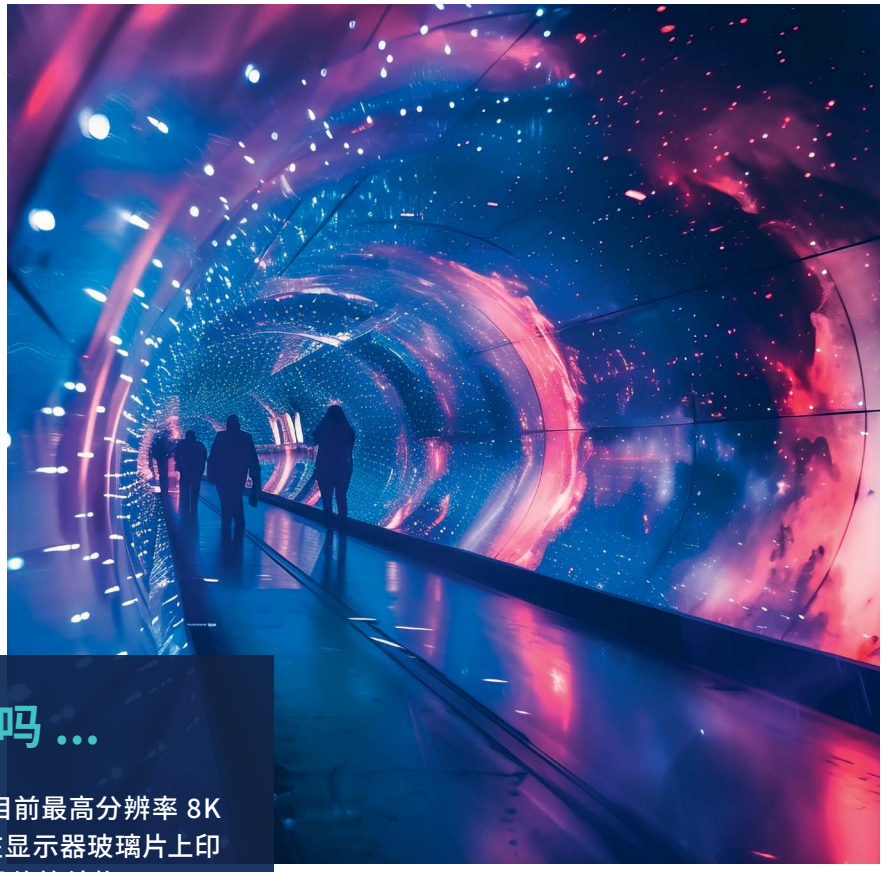


大型单体零度®坯件

平板显示屏生产采用的光刻方法与微芯片生产类似。这需要大型光学器件来提高像素密度，同时能够将像素间距缩小到接近一微米。

而零度®微晶玻璃具有极低的热膨胀和出色的抛光性能，因此成为了这些光学器件中的最佳镜面基板。此外，生产大尺寸零度®坯件并同时保持整体均一特性的能力，使得光掩膜图案能够以 2.0 µm 的分辨率成像。

由于微晶玻璃整体具有较低的 CTE 值和出色的抛光性，大型零度®基板可用于绝大多数平板显示屏光刻技术。



用于展会和活动的展示隧道

您知道吗 ...

...为了生产目前最高分辨率 8K 电视，必须在显示器玻璃片上印制近 1 亿个晶体管结构。

热膨胀趋近于零

高度均匀的特性

CNC 定制 3D 形状

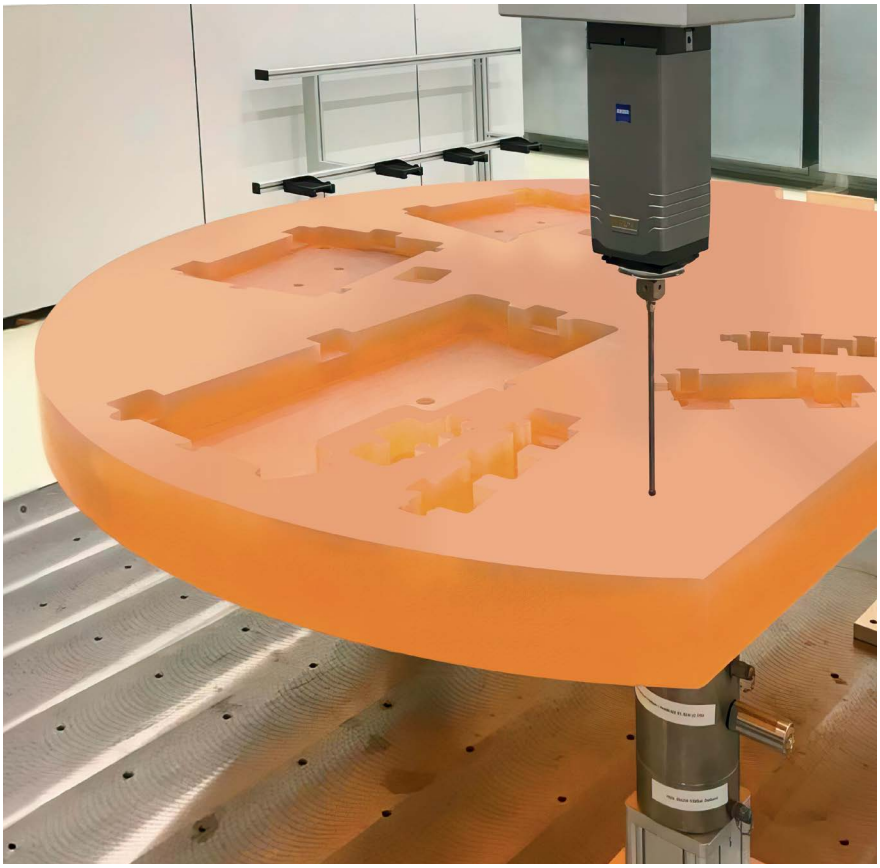
极端条件下可用


AI



为准确性加分

在制造业中，可靠的生产过程以及保证最高质量的高处理量，这是必备因素。在每个加工步骤或质量检查和迭代制造过程中，计量对于保证生产线上产品的一致性至关重要。

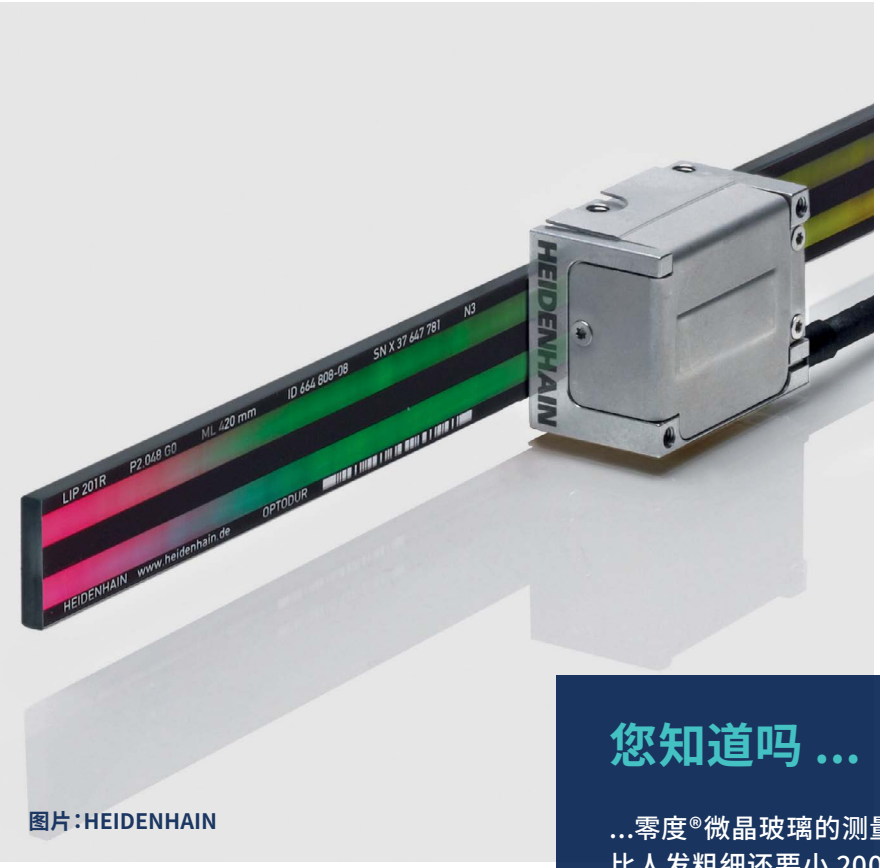


用于 W. M. Keck 天文台 Keck Planet Finder 仪器的零度® 光学工作台

对齐系统就好像标尺，但它带有复杂的编码系统，可将产品定位到微米和纳米级精度。在如此之小的裕度下，如果无法完全避免温度梯度，则对齐系统的热膨胀会影响其准确度。

零度®微晶玻璃制成的长度规可实现纳米范围内的高精度定位，因为它在室温周围的较大温度范围内 (0°C–50°C) 的热膨胀趋近于零。在受控温度环境中使用时，能够根据特定温度范围调整热膨胀系数，从而实现更高的热稳定性。

计量应用使用零度®微晶玻璃，因为其热膨胀趋近于零，可实现纳米级精度的测量。



图片：HEIDENHAIN

HEIDENHAINLIP 200 曝光线性编码器可实现 31.25 pm 的测量步进

您知道吗 ...

...零度®微晶玻璃的测量分辨率比人发粗细还要小 200 万倍。

热膨胀趋近于零

高度均匀的特性

CNC 定制 3D 形状

极端条件下可用



为您加分

我们是一个由科学家、工程师和项目经理组成的团队，对零度®材料充满热情，拥有50多年的零度®材料研究经验和加工专业技术。

凭借我们的能力和零度®微晶玻璃专业技术，我们与客户密切合作，实现其高精度应用。作为强大而可靠的合作伙伴，我们：

- 通过持续研究提供出色的材料专业技术，关于零度®的技术论文多达 100 多篇
- 通过自己的能力提供材料，满足零度®当前和未来市场需求
- 在新制造中心提供加工能力，以实现复杂的形状和公差
- 针对您的技术规格提供工程咨询和设计成本
- 提供有限元分析，以模拟复杂零件的第一本征频率
- 提供实现您的公差所需的最精确的坐标测量机和计量
- 在德国各合作伙伴公司提供零度®酸蚀刻，以去除表面下的损坏并提高表面强度
- 提供包装设计来安全运输零度®零件，且直径可达 4.2 米
- 提供先进的项目管理，能力满足您的项目要求
- 提供本地销售代表和售后服务，包括现场支持
- 符合 ISO 9001 和 ISO 14001 的综合质量、环境和安全管理体系

我们是根据 DIN EN ISO/IEC 17025 对许多玻璃特性进行测试的认证实验室，也是微晶玻璃膨胀特性参考样本的认证实验室。

我们致力于实现项目成功。

告诉我们如何进一步为您提供支持，为您的使命增添优势。

挑战玻璃。挑战我们！
https://www.schott.com/opportunity-lab-inquiry

热膨胀趋近于零



平均线性热膨胀系数

零度®微晶玻璃附带了 0°C 至 50°C 温度范围内的平均线性热膨胀系数 (CTE)，其六个膨胀等级如下：

表 1
肖特提供的热膨胀系数公差等级

CTE (0°C; 50°C) 规格公差	
膨胀等级 2	0 ± 0.100 ppm/K
膨胀等级 1	0 ± 0.050 ppm/K
膨胀等级 0	0 ± 0.020 ppm/K
膨胀等级 0 Special	0 ± 0.010 ppm/K
膨胀等级 0 Extreme	0 ± 0.007 ppm/K

针对应用温度曲线进行优化的 CTE	
零度® TAILORED	0± 0.020 ppm/K （± 0.010 ppm/K 可按要求提供）

零度® SPECIAL 和 EXTREME

我们通过优化生产控制，并使用采用先进 CTE 计量设备的统计测量程序，同时保持所有其他材料特性和出色质量，从而实现 SPECIAL 和 EXTREME 等级。

零度® TAILORED

零度® TAILORED 可优化组件的热膨胀行为，以满足客户的个性化应用温度曲线要求。它基于一种考虑结构松弛效应的物理材料模型。[1]

图 1 显示了零度® TAILORED 材料用作超大望远镜镜面基板的示例。智利 Cerro Armazones 建筑工地的温度在 100 小时内在介于 0°C 和 14°C 之间的范围内变化。零度® EXTREME 的相对长度变化 Δ l/l 为 0.5 ppm，而零度® TAILORED 在这些温度下的长度变化仅为 0.08 ppm。

要订购零度® TAILORED，请指定您的应用温度范围和温度变化率 (°C/h)。

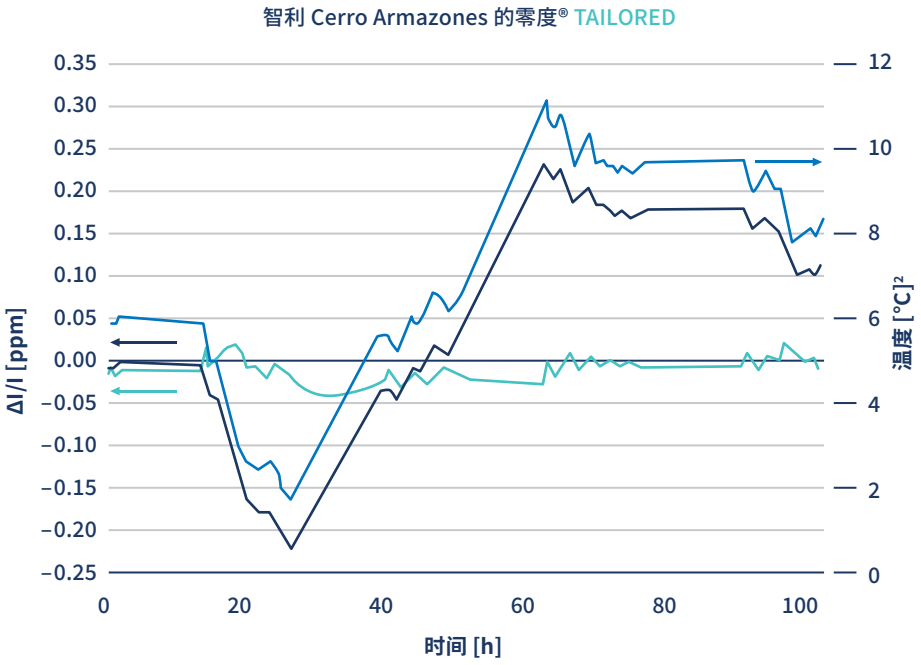


图 1
零度® TAILORED 针对 ESO 位于智利阿塔卡马沙漠的超大望远镜所在地 Cerro Armazones 山顶典型温度曲线的热膨胀

[1] Ralf Jedamzik, Thoralf Johansson 和 Thomas Westerhoff, 零度®在任意温度曲线下的热膨胀行为建模，位于“Proc. SPIE 7739”, 2010 年；
https://doi.org/10.1117/12.855980

[2] 温度数据来源：公共数据库服务器：**http://sitedata.tmt.org/**
2008 年 6 月 1 日和 4 日，白天，带空调

零度® TAILORED Cryo

零度®微晶玻璃的热膨胀行为可在低温范围内优化。在低至约 90K 的温度下，热膨胀可小于 0 +/- 0.1 ppm/K。1

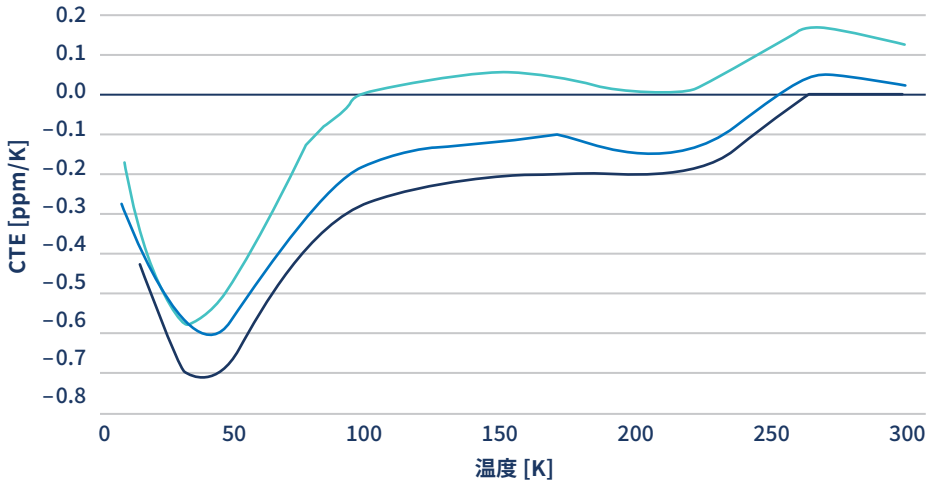


图 2
零度® TAILORED Cryo 与两个非定制零度®样本的热膨胀系数比较，由德国布伦瑞克联邦物理技术研究所测量

CTE 测量准确度

CTE 测量使用标准化、高精度和可重现的膨胀法测量程序进行，专属于肖特股份公司。[2]

在 0°C 至 50°C 的温度范围内，测量设置可提供表 2 中的准确性和重复性。

	准确性	重复性 (95%)
标准	± 0.010 ppm/K	± 0.005 ppm/K
高级	± 0.003 ppm/K	± 0.001 ppm/K

表 2
热膨胀系数测量准确性和重复性

下面图 3 显示了零度® TAILORED 从 -50°C 加热到 +100°C 期间的典型相对膨胀长度 Δl/l 和 CTE。

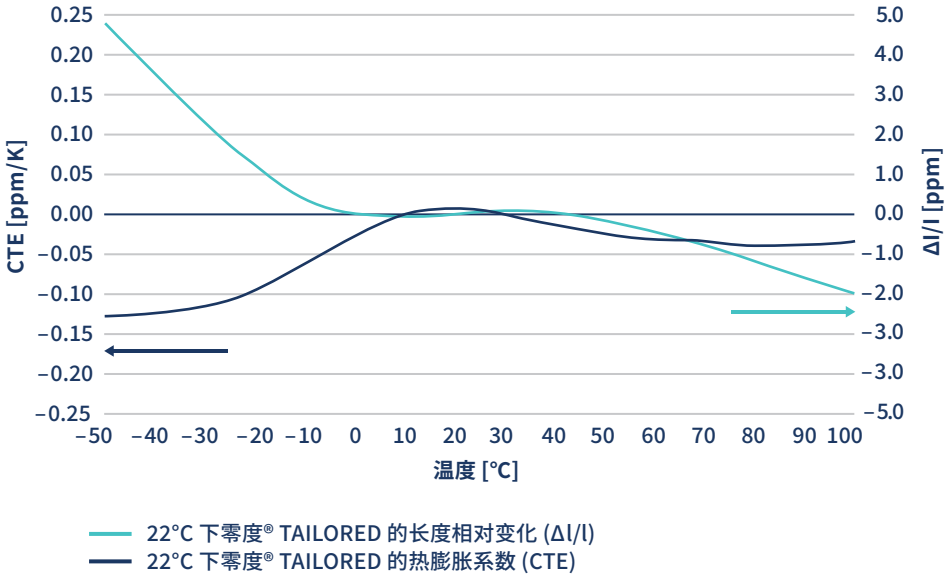


图 3
热膨胀系数（左轴，浅蓝色）和相对长度变化（右轴，深蓝色）与 -50°C 和 +100°C 之间温度的关系

在 -50°C 和 +100°C 之间的长度总变化

< 10 ppm

[1] Jedamzik, Westerhoff, 适合低温应用的零度 TAILORED，位于“Proc.SPIE 9151”, 2014 年, **https://doi.org/10.1117/12.2055086**

[2] Jedamzik, Westerhoff, 零度线性热膨胀系数的均一性：十年评估回顾，位于“Proc.SPIE 10401”, 2017 年, **https://doi.org/10.1117/12.2272902**

热膨胀系数的均一性

CTE 均一性通常通过从所用体积周边区域提取样本来评估。图 4 显示了为进行统计评估而牺牲性切割为多个样本的坯件均一性评估。计算了最高值和最低测量值之间的 CTE 差值。在规定的尺寸等级中确保了线性膨胀的均一性。CTE 均一性以 ppb/K 表示。

个位数
整体 CTE 均一性

CTE (0°C; 50°C) 均一性公差（波峰到波谷）	
最大直径 4.0 m	≤ 20 ppb/K
最大直径 2.5 m	≤ 15 ppb/K
最大直径 1.5 米	≤ 10 ppb/K

可应要求提供更低公差。

表 3
CTE 均一性公差

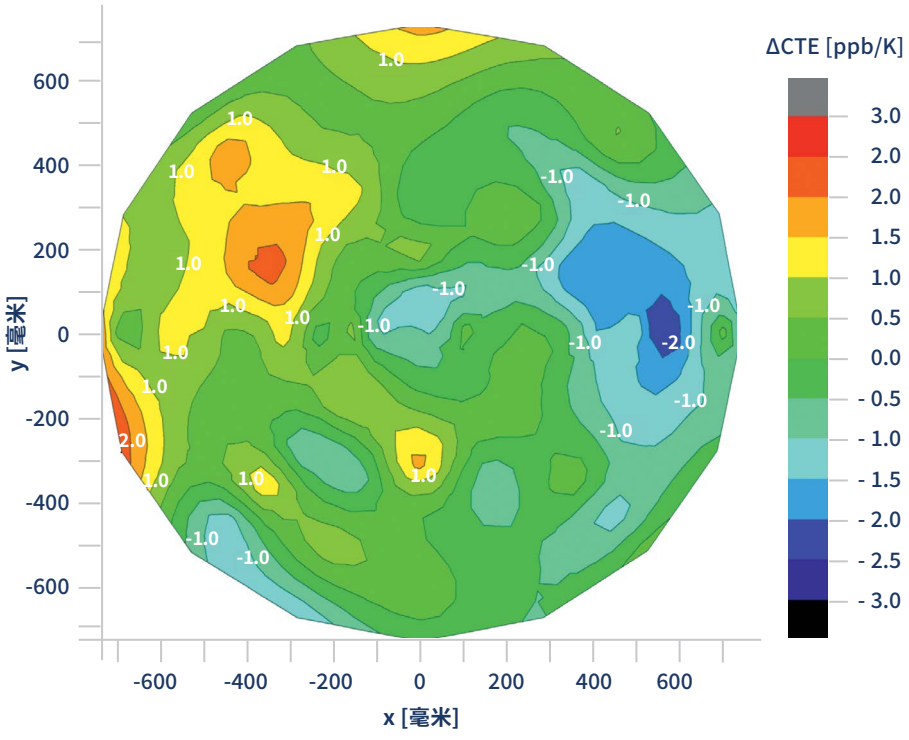


图 4
一个 1.5 米直径的坯件的 CTE 分布，测定的 CTE 均一性为 5 ppb/K

130°C 至 320°C 之间的建议应用温度冷却速率

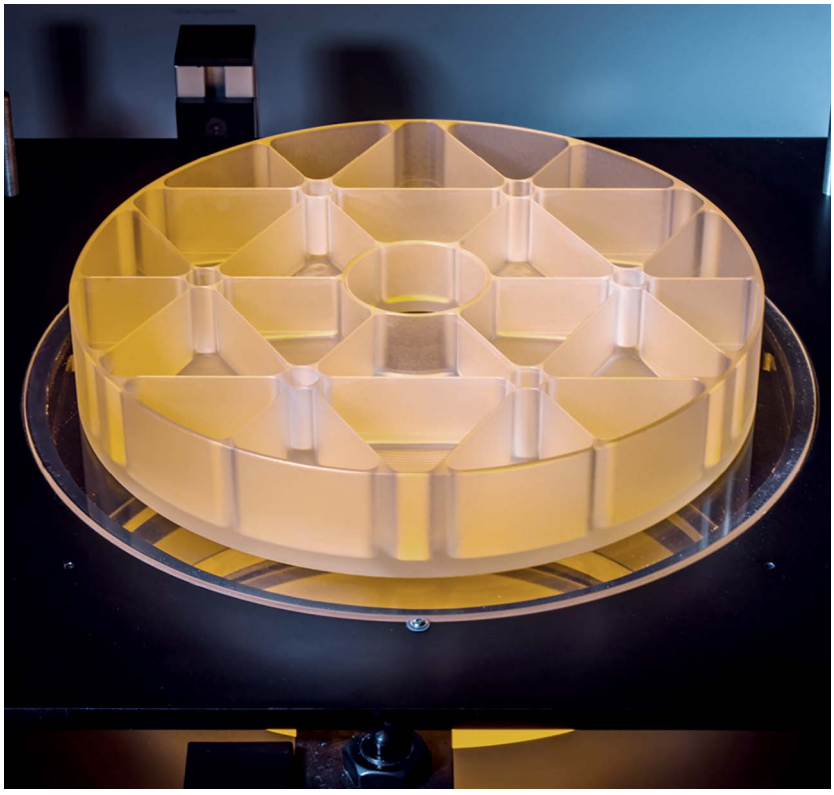
前面章节所示的标准和定制 CTE 曲线假设暴露在高达 100°C 的温度下。如果零度®微晶玻璃从 130°C 和 320°C 之间的应用温度冷却到室温，且冷却速率与初始冷却速率不同，则可能会发生变化。

初始冷却速率为 3°C/h。应用和初始冷却速率之比每快 10 倍都会导致 25 ppb/K 的永久性 CTE 变化。[1]

最高应用温度

600°C

请注意，在高于 100°C 的温度下且无法正确冷却的情况下使用零度®会影响 CTE 规格。

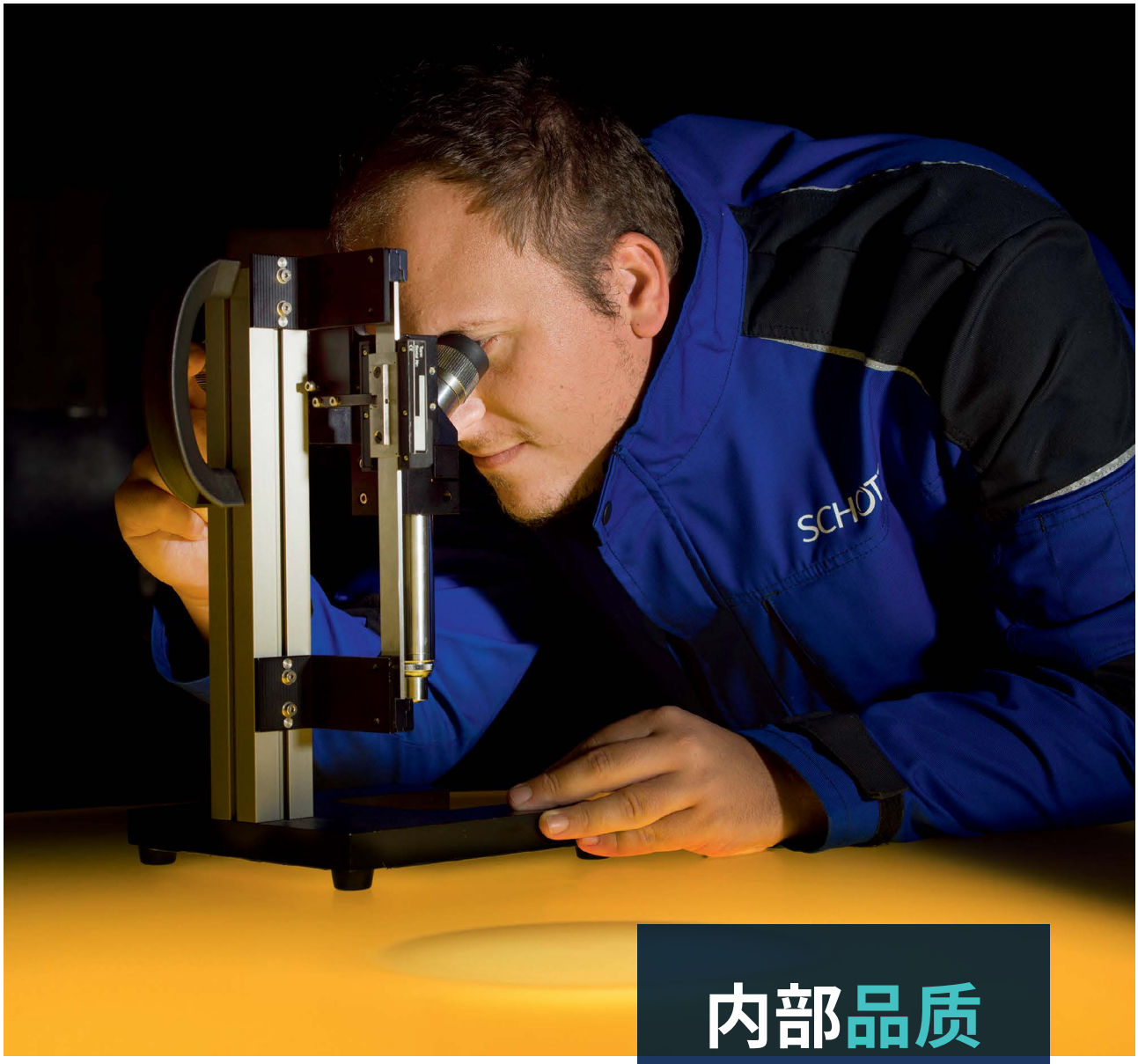


300 毫米直径轻量化零度®镜面坯件

随着时间推移的长度稳定性

长度为 400 毫米的零度®微晶玻璃制测量块已在 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)，即德国国家计量研究所与波长标准进行了干涉法连接。保持在 20°C 的杆随着时间的推移展示了收缩现象。然而，收缩率几乎无法测量，并且随着时间的推移呈指数级下降。对于大多数应用，这样的收缩并不会有影响。

[1] Jedamzik, Westerhoff, 在高温下使用零度®的建议，
“Proc.SPIE 10706”, 2018 年, **https://doi.org/10.1117/12.2311648**



内部品质

气泡和夹杂物

零度®坯件中的夹杂物主要是含有气体或固体夹杂物的气泡。对于光学表面，可通过设定更严格的要求来定义关键层。在检查零度®零件时，应考虑所有直径 > 0.3 毫米的夹杂物。如果夹杂物的形状不是规则球形，则应报告平均直径，即长度和宽度的平均值。

	标准	4 级	3 级	2 级	1 级	0 级
每 100 立方厘米的平均夹杂物数量：	5.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
零度®零件的不同直径或对角线的单个夹杂物最大直径（毫米）：						
关键层：						
< 500 毫米	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4
< 2000 毫米	2.0	1.8	1.6	1.5	1.2	1.0
< 4000 毫米	3.0	2.5	2.0	1.8	1.6	1.5
非关键层：						
< 500 毫米	3.0	2.0	1.5	1.0	0.8	0.6
< 2000 毫米	6.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0
< 4000 毫米	10.0	8.0	6.0	6.0	6.0	6.0

根据要求提供定制化规格。

表 4
零度®中夹杂物的品质等级

对于小于 500 毫米的坯件，平均每 100 立方厘米仅有
一个
尺寸为
0.4 毫米
的夹杂物

体应力

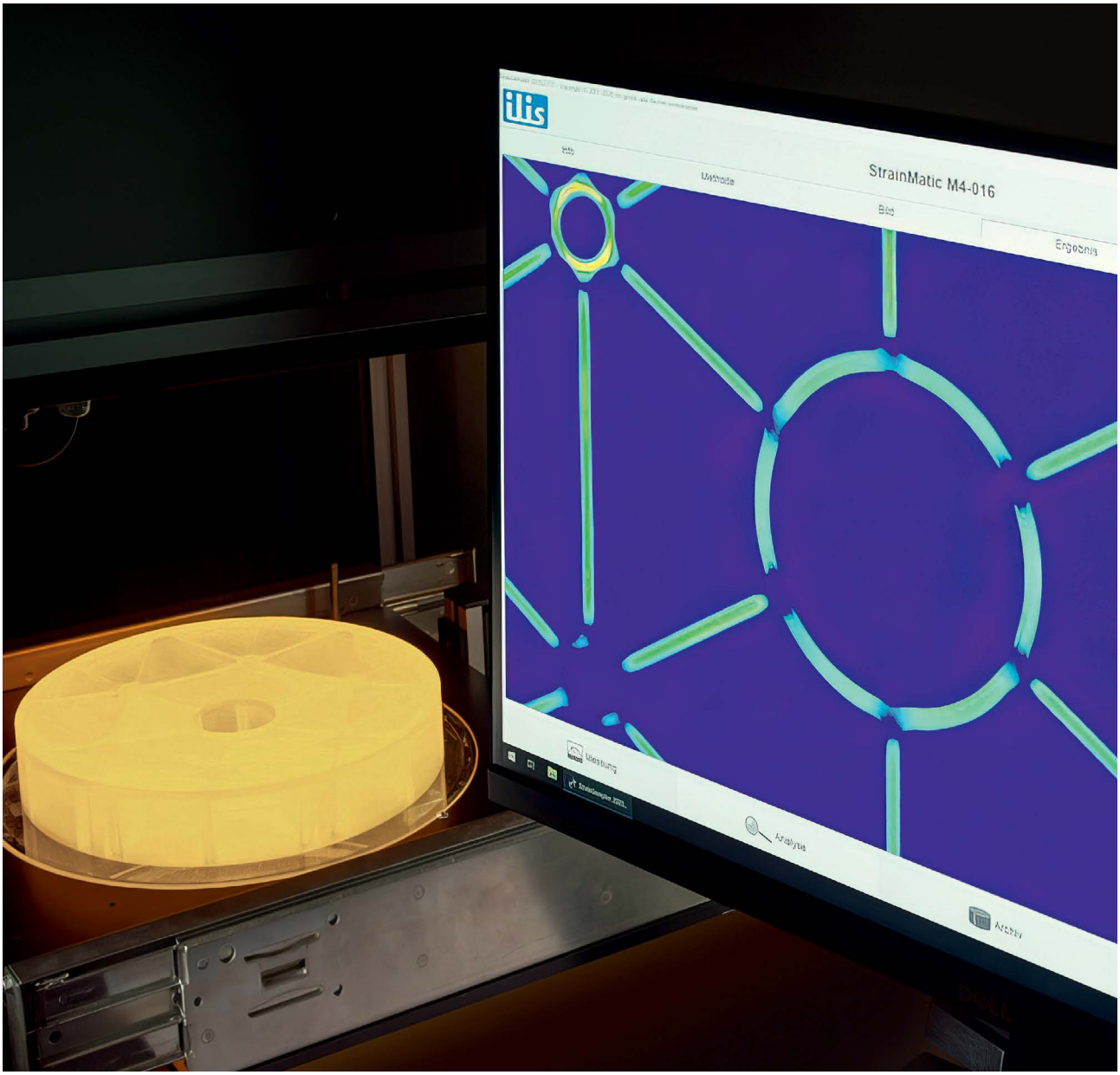
所有零度®零件均经过精密退火处理，以实现较低且对称分布的永久性体应力。在距离边缘为直径 5% 的位置，对圆盘形和圆柱形毛坯进行体应力诱发双折射的轴向测量。对于长方体毛坯，在垂直于平板表面的较长边中央的若干位置进行测量。

将其记录为检测方向上每个厚度的光程差。使用工业高分辨率偏振仪进行此测量。

直径或对角线零件的体应力双折射 [纳米/厘米]	标准	4 级
< 500 毫米	6	4
< 2000 毫米	12	10
< 4000 毫米	15	12

根据要求提供定制化规格。

表 5
零度®体应力的品质等级



用于在零度®产品中进行高精度应力双折射测量的成像偏振仪

条纹

条纹是局部封闭的透明区域，其组合物与基本材料仅有很小的差异。它们通常为条状（或通常称为带状），但有时为螺纹形。条纹的应力双折射测量为以纳米为单位的光程差，如表 6 中所列。

对于厚度超过 250 毫米的零件，光程差以纳米/厘米条纹长度表示，并且其规格单独指定。肖特使用工业高分辨率成像极谱仪系统进行此测量。

不同直径或对角线长度毛坯，由条纹 [nm/striae] 引起的应力双折射	标准	4 级	3 级	2 级	1 级
< 500 毫米	60	45	30	5	/
< 2000 毫米	60	45	30	30	5
< 4000 毫米	60	45	30	30	30

根据要求提供定制化规格。

表 6
零度®中条纹引起的应力双折射的质量等级

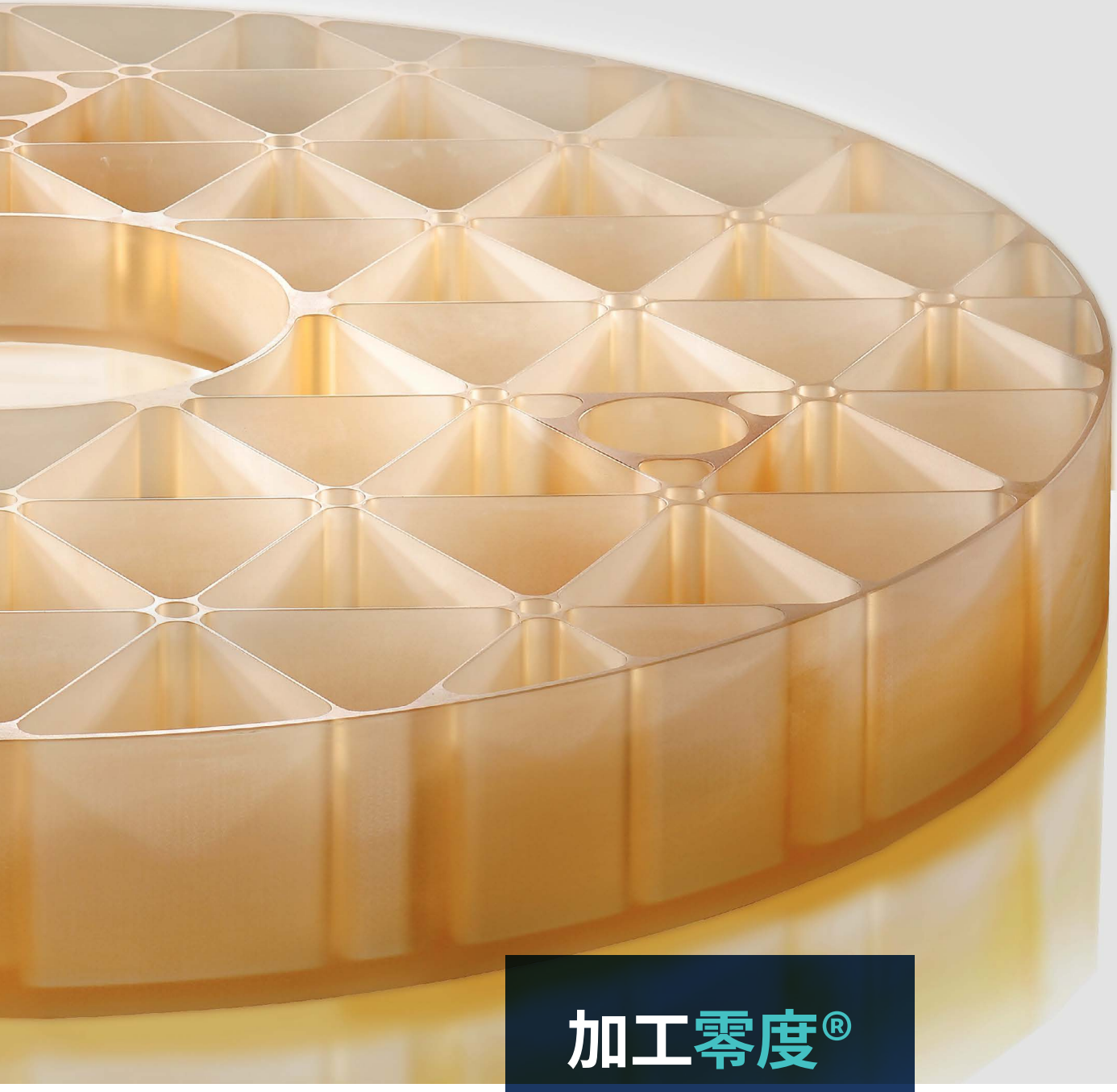
对于所提及夹杂物、条纹和体应力规格之外的其他要求，请随时向我们咨询。如果订单中未规定质量等级，肖特将提供标准质量等级的零度®。



肖特可根据您的技术规格提供定制结构。

生产成本在设计阶段会受到很大影响，因此肖特的应用工程师会在加工零度®方面提供长期的专业支持。

加工能力中心具备强大能力，能够生产直径从几毫米到 4.2 米的零度®结构。

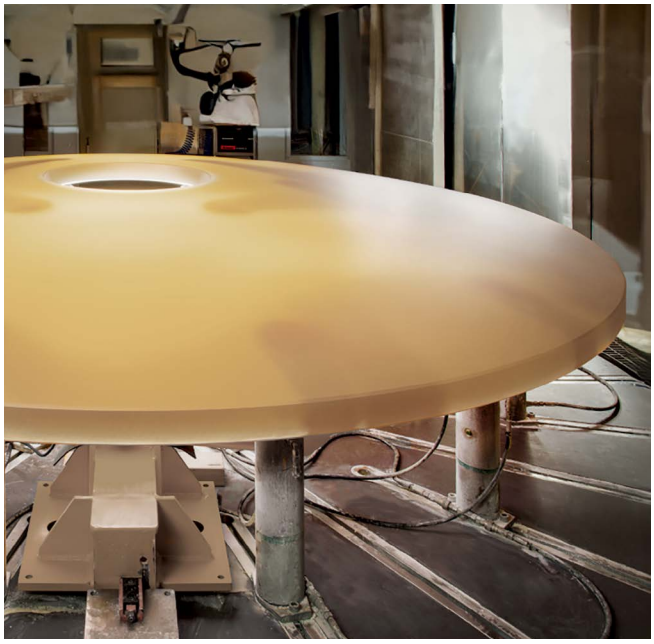


加工零度®

肖特的现代化机床群包括 20 多台三轴或多轴数控机床，可满足广泛的客户要求（见下一页）。我们的标准金刚石磨具介于 D20 和 D151 之间，通常可产生 Ra < 3.5 µm 的平均表面粗糙度。可根据客户要求或基于内部或外部研磨工艺，使用更细粒度和不同的加工参数实现 Ra < 1 µm 的更光滑粗糙度。

肖特的数控机床生产能力和研磨产品

肖特凭借其现代化的数控机床，可以生产各种不同几何形状的零度®产品，包括孔、盲孔、半封闭孔，甚至是自由形状表面。可实现的公差在很大程度上取决于零件的几何形状和尺寸。

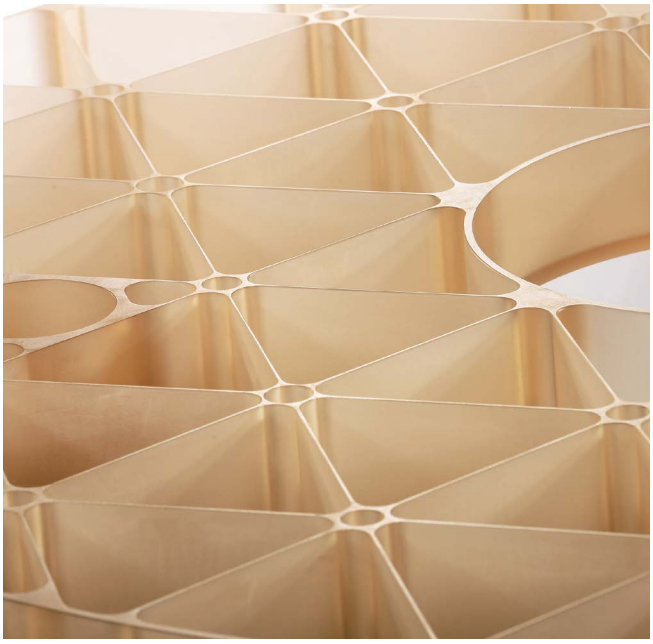




大型定制零件
5 轴加工中心
行程距离（长 × 宽 × 高）：4,500 × 6,000 × 1,300 立方毫米
最大工件**直径**：5,000 毫米
最大工件重量：40 t
刀具主轴 | 最大主轴速度：14,000 rpm
机器控制系统：Siemens 840D
3 轴定位精度：0.04 毫米
特点：内部和外部冷却，机械和真空夹持，旋转台

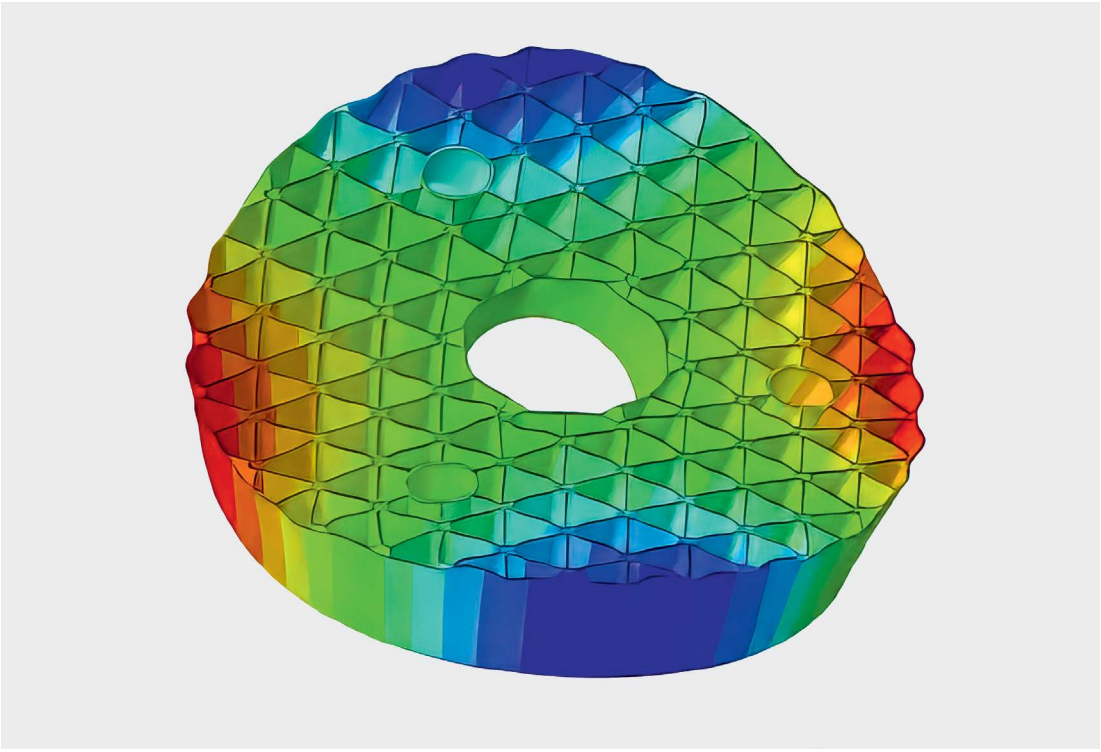
中型零件加工中心
5 轴加工中心
行程距离（长 × 宽 × 高）：2,200 × 2,200 × 1,600 立方毫米
最大工件**直径**：2,000毫米（可按要求提供 2,600毫米）
最大工件重量：5 t
刀具主轴 | 最大主轴速度：10,000 rpm
机器控制系统：Heidenhain TNC 640
3 轴定位精度：0.01 毫米
特点：内部和外部冷却，机械和真空夹持，线性台





小零件加工
3 轴加工中心
行程距离（长 × 宽 × 高）：1,100 × 560 x 510 立方毫米
最大工件范围（长 × 宽 × 高）：1,000 × 470 × 300 毫米
最大工件重量：50 kg
刀具主轴 | 最大主轴速度：10,000 rpm
机器控制系统：Siemens 840D
3 轴定位精度：0.01 毫米
特点：内部和外部冷却，机械和真空夹持，线性台

高精度研磨操作
5 轴加工中心
行程距离（长 × 宽 × 高）：1,310 ×1,250 × 600 立方毫米
最大工件范围（长 × 宽 × 高）：1,250 × 1,200 × 600 毫米
最大工件重量：2.5 t
刀具主轴 | 最大主轴速度：12,000 rpm
机器控制系统：Heidenhain TNC 640
3 轴定位精度：0.01 毫米
特点：内部和外部冷却，机械和真空夹持，回转和旋转台



典型轻量化结构的 FEM 固有频率模拟（左）

ZEISS MMZ-G 坐标测量机，带用于内部标准测量的反射镜（右）

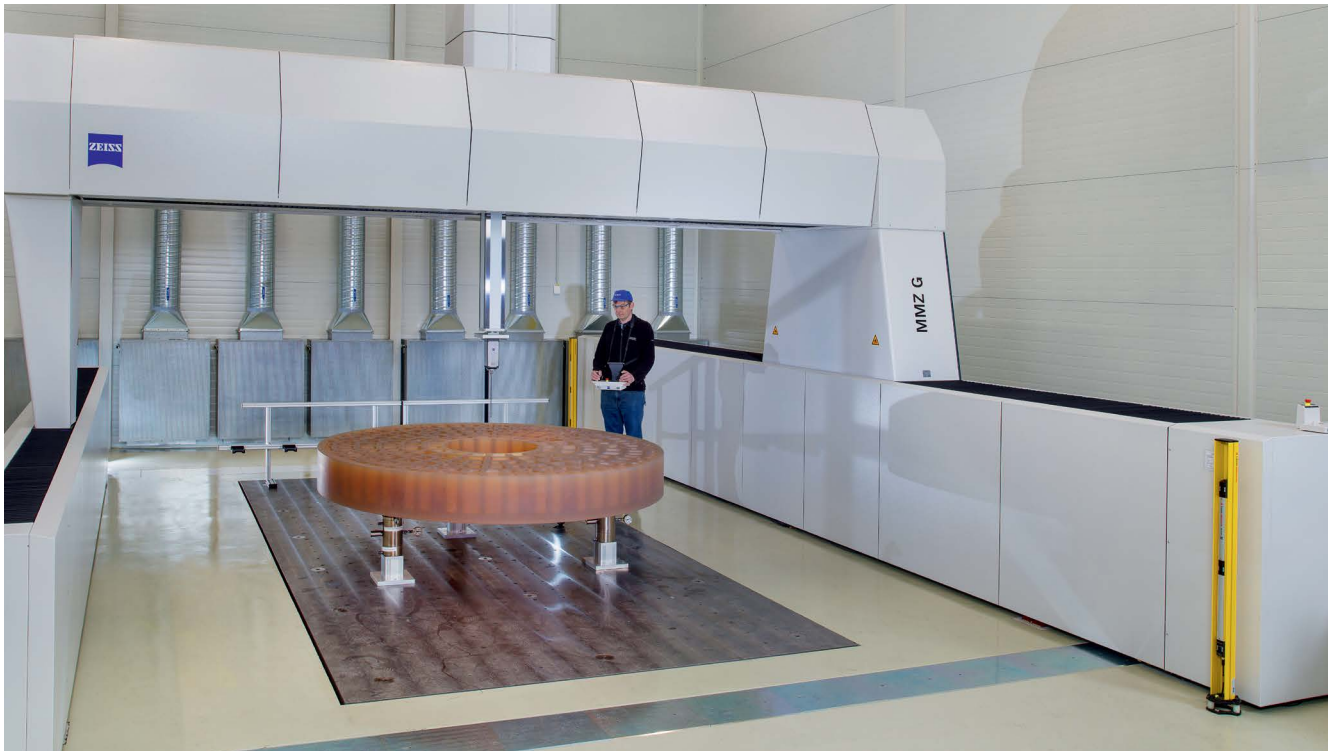
零度®轻量化

肖特的关键能力之一是生产轻质量化结构，这在太空应用的大型镜面基板中尤其有用。肖特在零度®加工方面不断改进，这也得以实现了具有挑战性的凹槽高度与肋条厚度的纵横比。由此在满足客户质量要求的同时实现了高耐用性。可以实现超过 90% 的重量减轻，应用工程师使用有限元分析（FEA）支持镜面基板的设计。

所有零件在所有锋利边缘上都带有倒角，以防止边缘损坏。肖特采用成熟的去除亚表面损伤的工艺对轻质结构进行酸蚀刻。光学表面等不应蚀刻的区域可在该过程中遮盖保护。

鉴于材料的脆性，无法直接在其中形成螺纹。相反，建议将螺纹金属嵌件粘合到零度®组件中。

除了 CAD/CAM 协助外，肖特的应用工程师还支持运输箱和零度®搬运工具的设计和制造。



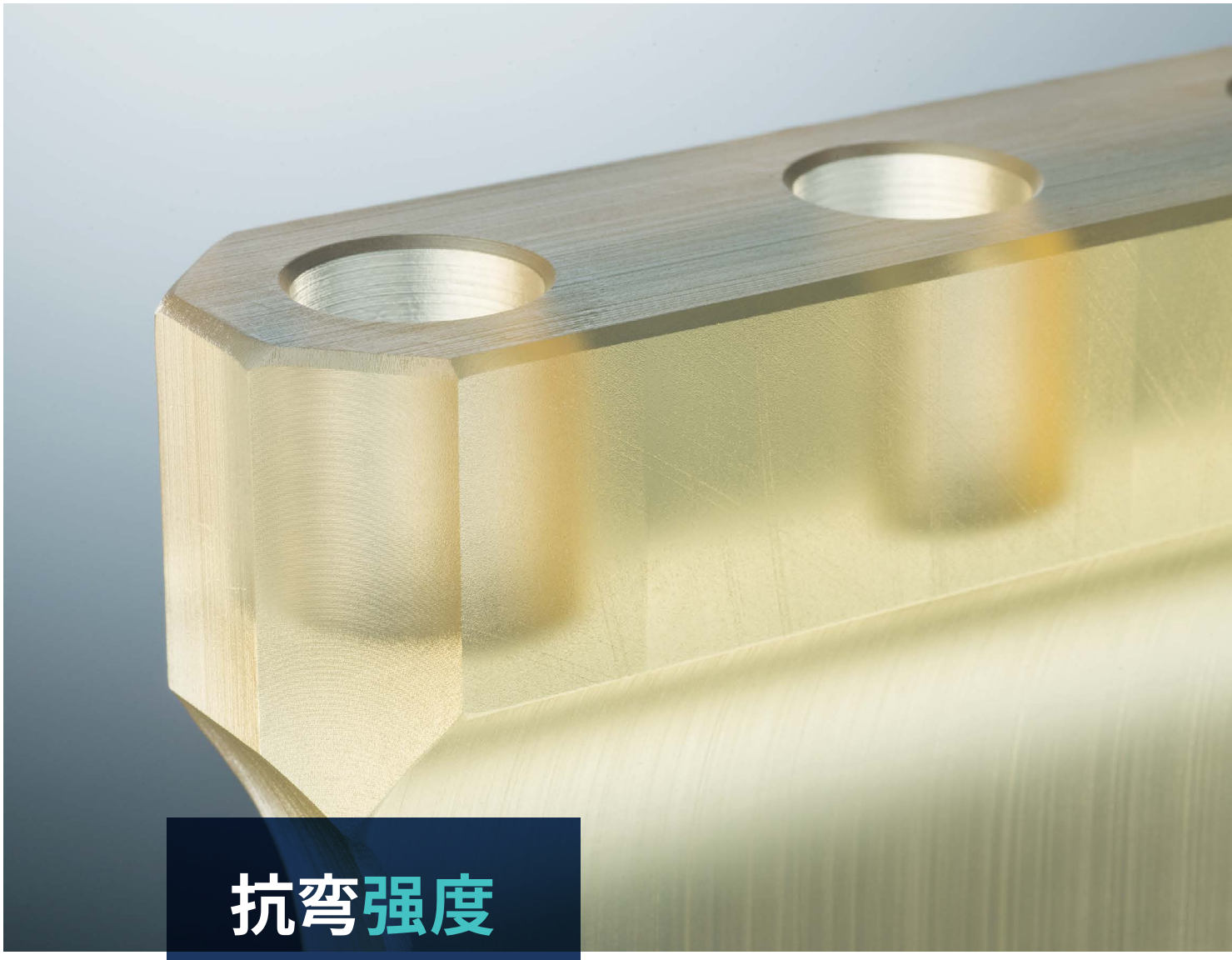
高精度 CMM 测量：

肖特广泛的 CMM 功能可以验证各种几何产品规格。除了用于较小几何形状的几个 ZEISS PRISMO 系统外，还可以使用 ZEISS MMZ-G 和徕卡移动式激光跟踪仪测量大体积零件。

ZEISS MMZ-G 的行程距离为 5 × 6 × 2 米 (X × Y × Z)。所有测量任务均由通用软件 ZEISS CALYPSO 编程和执行。

高度精确的触觉测量，长度公差

≤ 1.0 µm +L/1500 毫米



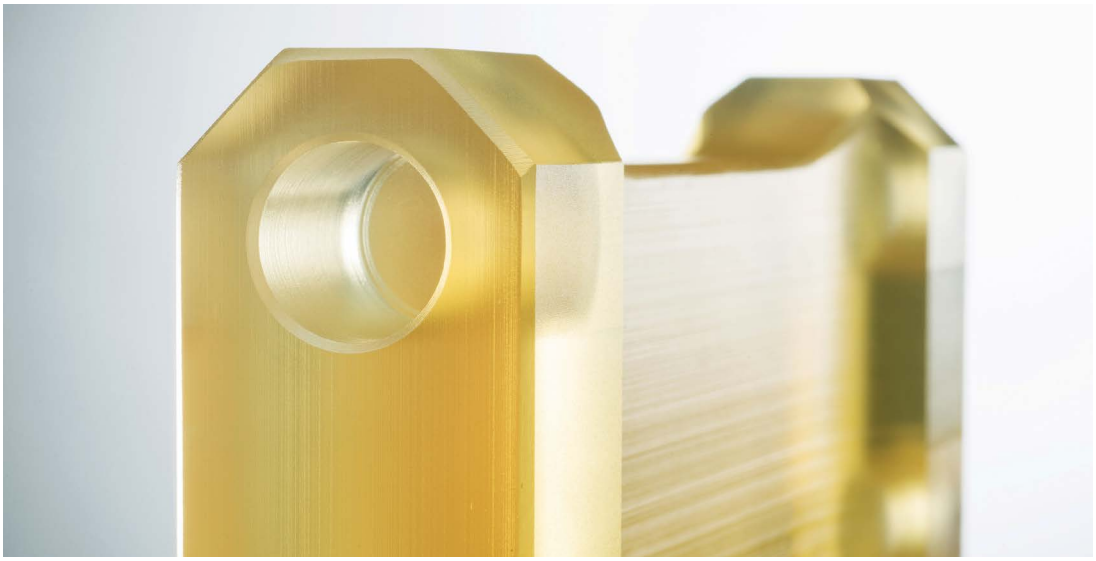
抗弯强度

关于零度®微晶玻璃强度的广泛数据

玻璃和微晶玻璃的抗弯强度不是一项材料常数。它主要取决于表面抛光后的下层损坏程度、加载几何形状以及特定零件在其预期应用中的环境条件。最大下层损坏深度决定了特定零件在拉伸应力区域中可以承受的载荷。这反映在确定断裂应力阈值的韦布尔分布的概率方法中。







研究的零度®样本的断裂应力结果遵循统计学三参数韦布尔分布。低于该阈值应力时，失效概率接近零。使用肖特研磨工艺制备的不同表面条件的韦布尔参数以及有关零度®微晶玻璃抗弯强度的更多信息，请参见文献[1]。

[1] Hartmann，基于断裂应力阈值模型的零度®结构最低使用寿命：回顾，位于“Optical Engineering 第 58 期第 2 版”，2019 年，https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.020902

对于 D151 磨削表面，根据三参数 Weibull 拟合，断裂应力阈值为 47.3 MPa（图 5）。更精细地研磨和蚀刻适当厚度的表面层可显著增加该阈值。

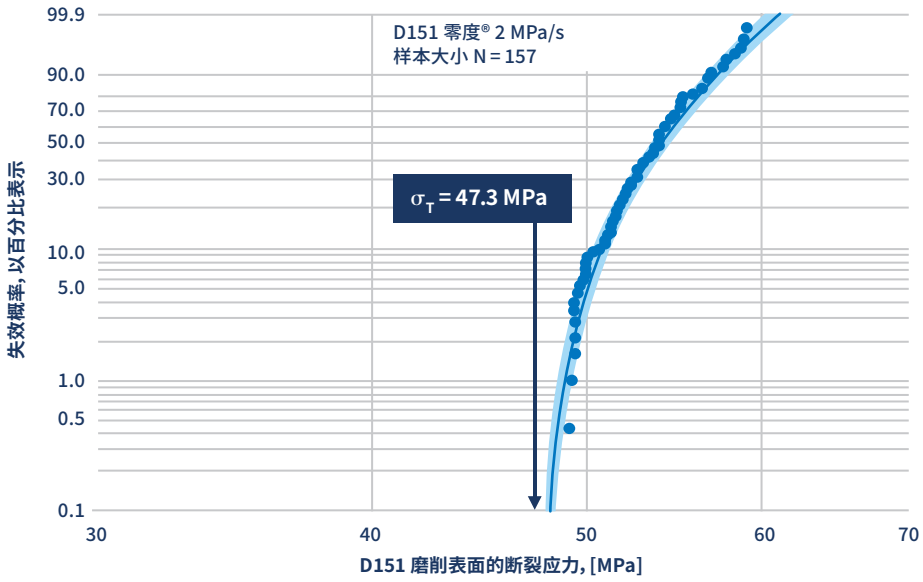


图 5
断裂应力调查：
施加 2 MPa/s 时，失效概率与断裂应力的函数关系

对于金刚石粒度介于 D151（粗粒度，深蓝色）和 D25（细粒度，粉色）之间的研磨表面，该阈值在 40 至 70 MPa 之间（图 6，图表左侧）。图表右侧显示了 D151 和 D64 研磨和随后酸蚀的分布：EXX 表示蚀刻掉XX µm 的一层。每个表面去除 83 µm 厚的一层可将强度提高到 100 MPa 以上。有关详细信息，请参阅文献。[1]

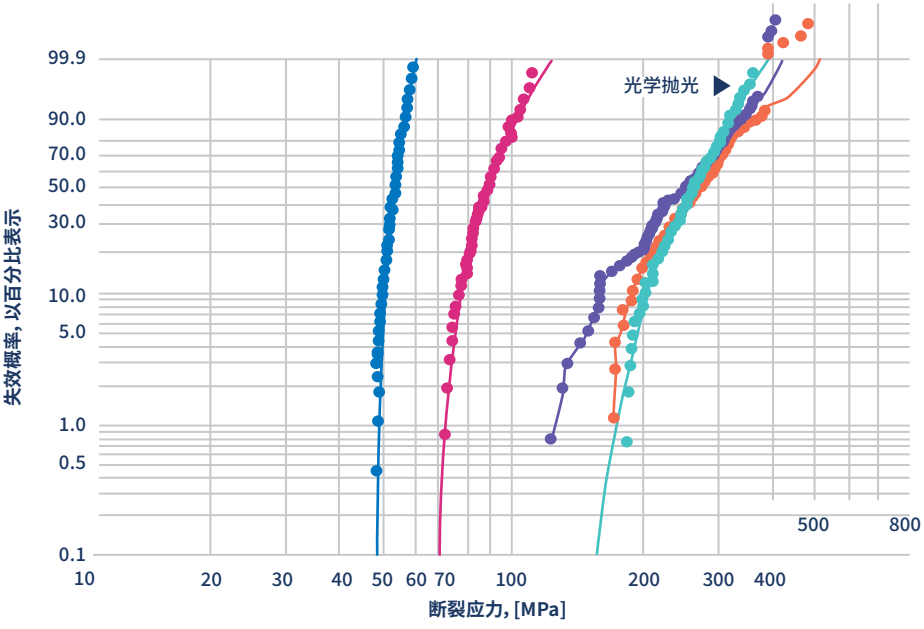


图 6
D64 和 D151 是金刚石粒度分布；
E 值界定蚀刻掉的 µm

样本	N	最小	最大
D151	157	49.1	59.2
D25	86	70.7	112.0
D151 E83	91	124.7	405.8
D64 E73	65	172.9	486.5
光学抛光	93	185.5	364.4

亚临界微裂纹生长的疲劳影响由应力腐蚀常数定义，零度®以在正常湿度、干燥和极度干燥等关键环境条件下该常数的可靠性而为人称道。断裂应力样本数据的可用性允许计算使用寿命，同时考虑疲劳效应。

使用阈值应力可以计算最短使用寿命，而不考虑任何过早失效。这适用于没有额外划痕或缺陷的表面，这些不是表面制备过程的特征。该最短使用寿命计算方法的有效性由长期测量数据提供支持。

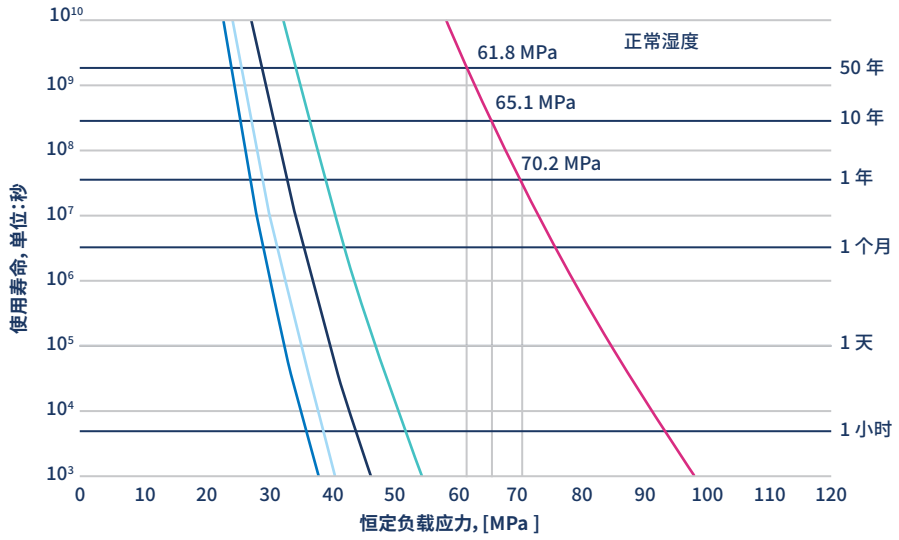
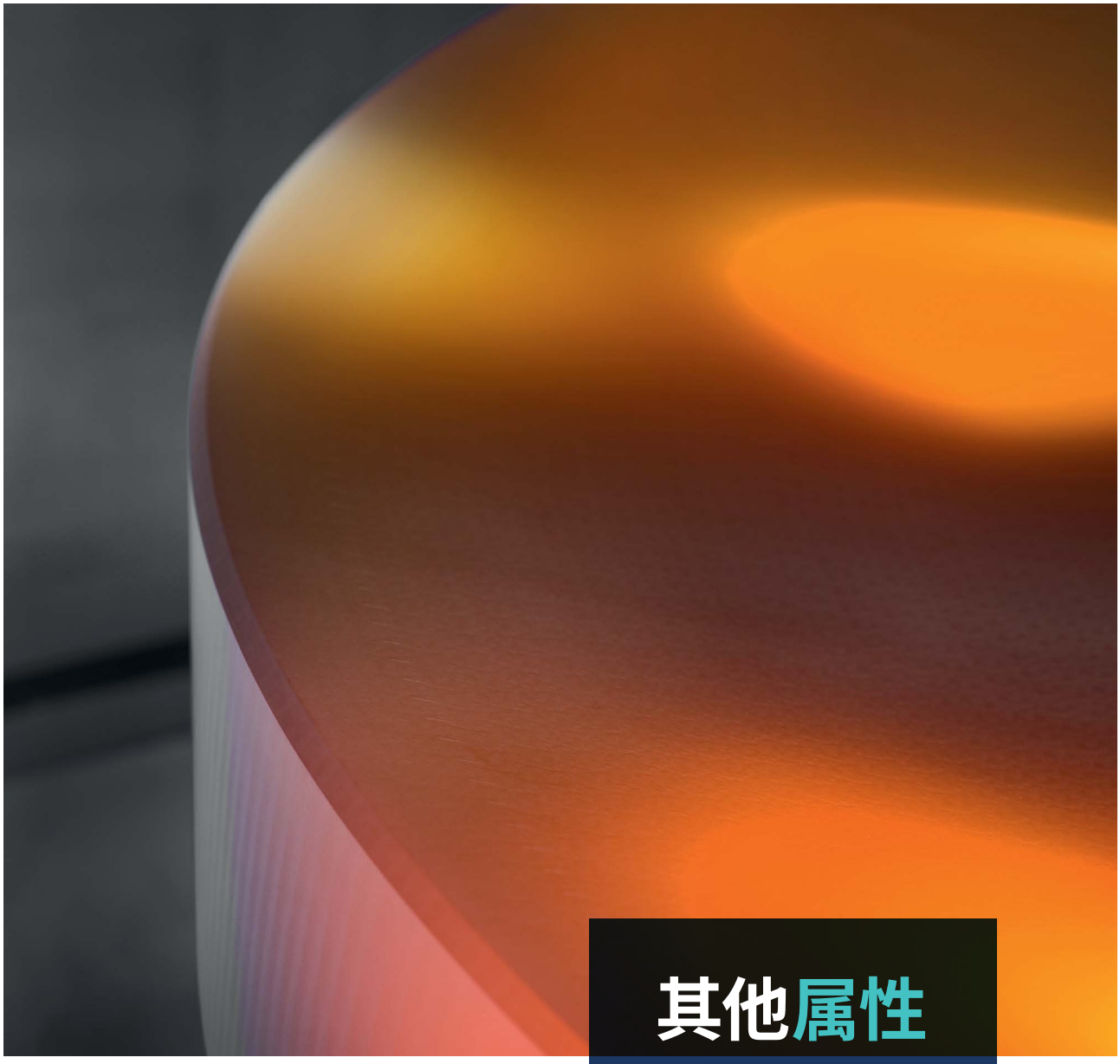


图 7
零度®组件在正常湿度条件下的耐久性，使用四种不同的磨具（D151、D46、D35、D25）进行加工，然后进行研磨和蚀刻

- D151 = 47.3 MPa
- D46 = 51.0 MPa
- D35 = 57.4 MPa
- D25 = 67.7 MPa
- 蚀刻 = 120.0 MPa

[1] Hartmann，基于断裂应力阈值模型的零度®结构最低使用寿命：回顾，位于“Optical Engineering 第 58 期 第 2 版”，2019 年，https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.020902



其他属性

惰性

在环境温度下，零度®表面不受酸（氢氟酸除外）、碱、盐和染料溶液的影响，在 170 小时后不会留下残留痕迹。但是，浓硫酸在高温下可能损坏该材料。即使在高达 600°C 的温度下，云母、石墨、MgO 和 SiO_2 等建筑保温材料在 5 小时后也只会与零度®发生可忽略不计的反应。

镀膜

零度®基板可镀金属和电介质膜等。由于其耐化学腐蚀性强，镜面反射膜可以反复剥离。抛光表面易于清洁和重新镀膜。

机械、光学和化学特性

	零度®
20°C 下的导热性 λ [W/(m · K)]	1.46
20°C 的热扩散率指数，[10^{-6} m^2/s]	0.72
20°C时的热容cp[J/(g · K)]	0.80
20°C 的杨氏模量 E [GPa] - 平均值	90.3
泊松比	0.24
密度 [克/立方厘米]	2.53
努氏硬度 HK 0.1/20 (ISO9385)	620
折射率 n_d	1.5424
阿贝数 ν_d	56.1
580 纳米的内部透射率 5 毫米厚度 10 毫米厚度	 0.95 0.90
λ = 589.3 纳米时的应力光学系数 K，[10^{-6} MPa^{-1}]	3.0
耐水性等级（ISO 719）	HGB 1
耐酸等级（ISO 8424）	1.0
耐碱等级（ISO 10629）	1.0
耐候性	1 级
耐污染性	0 级
20°C 时的电阻率 ρ，[Ω · cm]	$2.6 \cdot 10^{13}$
ρ = 108 [Ω · cm] 的温度，Tk100 [°C]	178
氦气渗透性 [atoms/(cm · s · bar)] 20°C 时 100 °C 时 200 °C 时	 $1.6 \cdot 10^6$ $5.0 \cdot 10^7$ $7.2 \cdot 10^8$

表 7
零度®的机械、光学和化学特性



联系我们！

告诉我们如何为您的未来加分。

技术规格

我们所有的技术信息、认证、数据表和出版物也可在我们的网站上找到。请扫描二维码或访问 **schott.com** 查找！

扫描我们的二维码，了解相关概览！

零度®主页

安全数据表

联系方式

如有任何疑问，请致电 **+86 (0)21 5330 0666** 或发送电子邮件至 **info.china@schott.com** 联系我们

免责声明

肖特认为本手册中所包含信息在出版时是准确的。肖特对本手册中的信息不做任何形式的告知或保证。在适用法律允许的最大范围内，肖特不承担因使用或滥用本手册中的信息、任何不准确性，以及任何肖特产品不符合本手册中包含的任何陈述、描述、产品特征或其他信息而产生或以其他方式相关的所有明示或暗示担保以及所有直接、间接、特殊或后果性责任。客户或用户承担与其使用本文所含产品和/或信息相关的所有风险和责任。本手册中的信息并非全部或部分产品规格。客户或用户有责任自行进行测试，并确定产品是否适合特定应用。有关肖特产品的安全使用、处理和处置信息，请参阅安全数据表。

未经肖特书面许可，不得将本手册中的任何内容解释为授予使用本手册中显示的任何商标、服务标志、徽标或图像的任何许可或权利。

© 2024 SCHOTT AG.保留所有权利。除非另有明确说明，否则所有文本和图片版权规肖特所有。

图片来源

第 11 页：iStock/Getty Images Plus #1404694/alnilam | 第 12/13 页：iStock/Getty Images Plus/#466727938/3DSculptor | 第 20 页：iStoc k/Getty Images/#1435908716/Jason marz | 第 23 页：iStoc k/Getty Images Plus/#1468266086/SweetBunFactory | 第 23 页：Getty images/Frederic J. Brown/#631172996 | 第 56 页：iStock/Getty Images #956969682/rush

第 2/3、8/9、24/25、27 和 28/29 页：使用 Midjourney Web app 创建。

如果图片参考中未注明，则这些是肖特的图片。

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，邮编：200233
电话：+86 (0)21 5330 0666, info.china@schott.com

CHINESE 08/2026