
玻璃非球面模压制造

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41393.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

玻璃非球面模压制造。导读

精密非球面透镜广泛应用于消费电子、车载成像、安防监测以及先进光学系统等领域。尽管塑料透镜因成本低、制造灵活而被广泛采用，但对于高端光学应用而言，玻璃仍凭借更优异的热稳定性、更低的双折射、更低的色散以及更丰富的材料体系，展现出不可替代的优势。如何以高精度、低成本方式实现玻璃非球面透镜的大批量制造，已成为先进光学制造的重要课题。近期，来自香港中文大学和美国俄亥俄州立大学等多个研究团队以Precision glass aspherical lens manufacturing by compression molding: a review为题，在Light: Advanced Manufacturing发表综述文章，该文围绕玻璃非球面透镜模压制造，系统梳理了技术发展脉络、核心物理机制、关键工艺环节与新兴制造路线，为下一代精密光学制造提供了较为完整的研究图景。

一、为什么是玻璃非球面透镜

在成像系统中，球差、色差和彗差等像差会显著影响成像质量，因此非球面透镜已成为高性能光学系统中的关键元件。当前高体量光学模组大量采用塑料非球面透镜，但玻璃材料在高温性能、抗划伤性、低双折射和低色散等方面更具优势，更适合面向高性能、高可靠性应用。与此同时，传统玻璃透镜制造通常依赖磨削、研磨和抛光等工艺，这类流程更适合球面或较低复杂度光学元件，而在高通量制造高精度非球面玻璃透镜方面存在效率与一致性限制。正因如此，模压成形逐渐成为玻璃非球面透镜制造的重点发展方向。

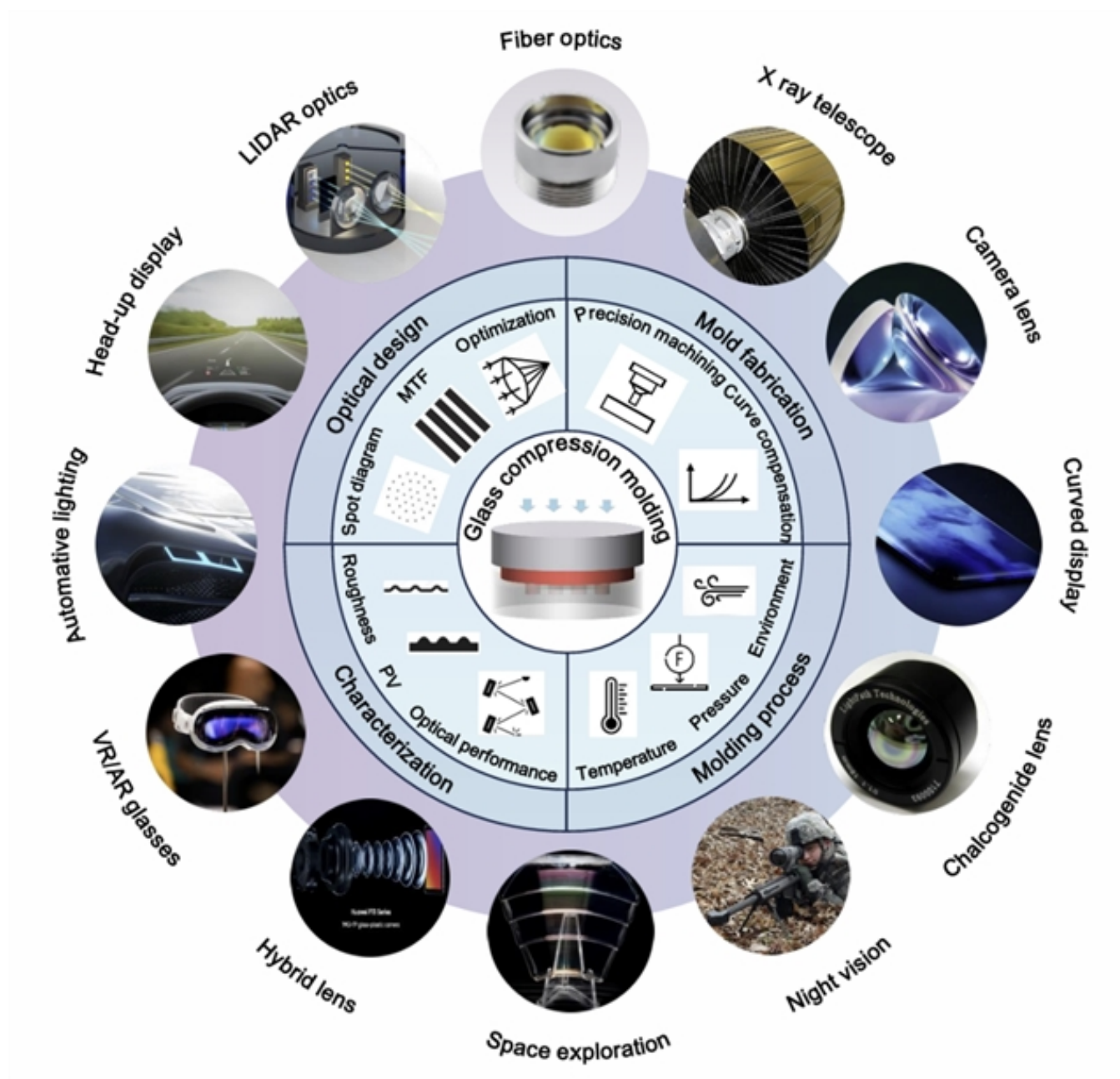


图1：模压玻璃透镜的商业和科学应用示意图，包括光纤通信、用于X射线望远镜反射镜、曲面玻璃显示器、热成像瞄准器以及用于空间望远镜设计的透镜环段、AR/VR应用、汽车照明组件和汽车抬头显示器等

二、玻璃模压中的核心问题

该综述并未停留在工艺现象描述层面，而是从基础物理出发，对玻璃模压中的关键机制进行了系统总结。作者指出，在模压温度与成形压力下，玻璃表现出明显的黏弹性特征。成形与冷却过程中，结构松弛、应力松弛、热传导与模具-玻璃界面行为共同决定最终透镜的形状精度、残余应力、双折射与折射率分布。围绕这些问题，论文重点讨论了模压设备演化、模具材料选择与加工、光学玻璃特性、热-力耦合建模以及工艺补偿与优化方法。随着制造公差不断收紧，虽然图像质量和装调稳定性会提升，但工艺窗口也会随之变窄，制造周期更长，良率控制难度更高。因此，精密玻璃模压本质上是一项需要在性能、成本和可制造性之间持续平衡的系统工程。

1. 光学设计

在成像系统中，球差、色差和彗差等像差会显著影响成像质量，而非球面透镜正是抑制这些像差、提升紧凑光学系统性能的关键元件。论文指出，当今大量消费级镜头模组几乎每一片镜片都采用非球面设计，以在有限空间内实现更优成像表现。相较塑料材料，玻璃不仅更利于色差校正，也在偏振敏感、低双折射应用中更具优势，因此在高端成像、显示和沉浸式光学系统中具有不可替代性。若想真正发挥玻璃材料的性能优势，就必须解决其高精度、低成本、大批量制造问题，而这正是玻璃模压技术存在的根本意义。

2. 模压装备与成形过程

论文在后续部分系统梳理了玻璃模压装备的发展。从早期 Kodak 的玻璃模压装置到后续商业化玻璃模压机，玻璃模压逐渐形成了以加热系统、位置与压力伺服控制、保护气氛或真空环境、冷却控制等为核心的工艺装备体系。作者指出，玻璃模压的独特难点在于其本质上是一个热成形过程：不仅要把玻璃加热到转变温度以上完成复制，还要在后续冷却中严格控制温度历程，以保证镜片形貌、尺寸和内部应力的一致性。因此，设备并不只是模压玻璃，而是在温度、压力、环境和时间之间实现高精度协同控制。

3. 模具制造

在玻璃模压中，模具表面质量几乎直接决定了最终镜片的表面质量与几何精度，因此模具制造是整个工艺链中最关键的步骤之一。由于玻璃模压通常在高温条件下进行，模具材料必须同时具备高硬度、高温稳定性和化学惰性，这使得碳化钨、碳化硅等超硬材料成为主流选择，但也带来了加工成本高、加工难度大的问题。围绕这一瓶颈，作者不仅回顾了传统精密磨削与抛光路线，还讨论了激光辅助单点金刚石加工、硅模具加工、超声振动辅助加工以及软模热压印等新方法。这些新技术的共同目标，是以更高效率、更低损伤制造高质量光学模具，为复杂非球面、微结构和阵列化玻璃光学的复制提供支撑。

4. 光学玻璃与模压基础物理

论文第四部分聚焦于光学玻璃材料及模压过程中的核心物理问题，这是全文最具基础研究特色的部分。玻璃在模压温度和成形压力下表现出明显的黏弹性，且其性能对温度历程高度敏感。围绕这一点，论文系统讨论了黏度-温度关系、热传导、应力松弛、结构松弛、折射率变化和残余应力形成机制。特别值得注意的是，玻璃在冷却过程中并不会像晶体那样迅速达到热平衡，而是会因结构松弛产生体积、密度和折射率变化；与此同时，温度梯度和热膨胀失配还会引入残余应力和双折射。这意味着，玻璃模压并不是简单的热压复制，而是一个材料行为、热力耦合和光学性能相互耦合的复杂过程。

5. 快速加热模压

传统玻璃模压的一个突出短板，是整个模具组件都需要经历升温 and 降温过程，导致制造周期长、能耗高、效率受限。针对这一问题，论文专门总结了快速加热模压的发展路线。作者指出，利用玻璃在红外波段的半透明特性，或通过导电薄膜、石墨烯类涂层、微波等方式实现局部快速加热，有望只对成形区域进行高效加热，而不必让整个模具系统反复热循环。这样的技术路线可以显著缩短工艺周期，提高产能，并为微小尺寸、阵列化玻璃光学元件制造带来新的可能。快速加热因此不仅是工艺改进，更可能改变玻璃模压的生产组织方式。

6. 晶圆级玻璃模压

在这一部分中文章进一步把视野拓展到晶圆级玻璃模压。与单枚透镜模压不同，晶圆级工艺强调在一片玻璃基底上同时复制大量微透镜或微结构光学单元，从而显著提高批量制造效率。作者指出，这一路线特别适用于红外微透镜阵列、传感器封装、MEMS 集成等场景，但同时也带来了更高要求，例如整片玻璃预制体的温度均匀性、模具与玻璃热膨胀系数匹配、阵列边缘区域的变形控制等。论文认为，晶圆级玻璃模压是未来玻璃微光学制造的重要方向，其意义不仅在于更快，更在于把玻璃模压推进到更高通量、更高集成度的制造层级。

7. 工艺开发与优化

在论文最后一部分，作者把重点放在玻璃模压的工艺开发与优化上。由于玻璃在模压和冷却过程中会发生热收缩、应力释放、折射率变化等多重耦合效应，最终镜片往往与原始设计存在偏差，因此必须借助数值模拟和迭代补偿策略进行工艺优化。论文总结了有限元分析、模具型面补偿、工艺参数优化、实验设计方法以及神经网络、遗传算法等智能优化手段，强调玻璃模压正在从经验驱动走向模型驱动和数据驱动。文中还对常规模压、快速加热模压和晶圆级玻璃模压的几何精度、表面粗糙度、制造周期和单位成本进行了比较，显示出新型工艺路线在效率和成本方面的明显潜力。

三、总结与展望

总体而言，这篇综述从历史发展、材料行为、模具制造到过程物理与新兴应用，对玻璃非球面透镜模压成形制造进行了较为全面的梳理。文章不仅总结了该领域已有研究成果，也明确指出了未来持续推进的关键方向，包括更精准的材料与过程建模、更高一致性的模具制造、更高效的热管理策略，以及面向新型红外光学、微纳结构和系统级封装的制造拓展。随着消费电子、智能驾驶、红外感知和微型光学系统的快速发展，兼具高性能与规模化潜力的玻璃模压制造有望在下一代精密光学制造中扮演更重要角色。该综述的发表，也为学术界与产业界理解这一技术的发展脉络与未来趋势提供了重要参考。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.001>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。

作者：Allen Y. Yi 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发