

文章编号 1004-924X(2026)18-2832-12

纳米精度玻璃非球面柱阵列透镜模压成形制造

舒成松^{1*}, 张道恒¹, 谭海丹¹, 郑鑫宇², 尹韶辉², 李 明³

- (1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 亚琛科技(深圳)有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要:玻璃非球面柱阵列透镜具有低像差、高准直、良好匀光能力和高集成度等优点,在高功率激光及光通信耦合等领域具有广阔应用前景,然而,其制造面临模具加工难、模压面形难以调控等难题。本文通过建立柱阵列仿真模型,对模具进行优化设计及面形误差预测,进而实现模具预补偿。提出了针对低熔点玻璃的模具基材选择、Ni-P 电镀层热处理、单点金刚石刨削加工和 Ti-DLC 涂层提升模具硬度和耐磨性的微结构阵列模具制造成套工艺路线,采用多步加热与退火、模压速率分段控制模压成型工艺开展模压试验。试验结果表明,该工艺加工的非球面柱面平均表面粗糙度为 S_a 1.553 nm,平均面形精度为 PV 0.208 μ m,模压出的非球面柱阵列玻璃透镜面形精度 $PV \leq 0.3 \mu$ m,表面粗糙度 $S_a \leq 3$ nm。模具预补偿方法和制造工艺可为批量生产低熔点微结构阵列玻璃光学元件提供参考。

关键词:非球面柱阵列;玻璃透镜;预补偿;模具制造;阵列模压成形

中图分类号:TB133 文献标识码:A

doi:10.3724/OPE.20263418.2832 CSTR:32169.14.OPE.20263418.2832

Nanometer-precision manufacturing of glass aspheric cylindrical lens arrays by precision glass molding

SHU Chengsong^{1*}, ZHANG Daoheng¹, TAN Haidan¹, ZHENG Xinyu², YIN Shaohui², LI Ming³

- (1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Technology Aachen Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

* Corresponding author, E-mail: csshu@gzu.edu.cn

Abstract: Glass aspheric cylindrical lens arrays offer low aberration, high collimation efficiency, excellent beam homogenization capability, and a high degree of optical integration, showing considerable potential for applications in high-power laser systems and optical communication coupling. However, their fabrication remains challenging because of the difficulty in machining high-precision array molds and the limited controllability of form accuracy during precision glass molding. In this study, a simulation model of the cylindrical lens array was established to optimize the mold design and predict form errors, thereby enabling

收稿日期:2026-06-12;修订日期:2026-07-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 52130503);贵州省科技计划项目(No. 黔科合基础-[2024]青年 119, No. 黔科合基础 MS[2025]619, No. 黔科合重大[2025]038, No. 黔科合支撑[2026]一般 221);贵州大学特岗基金(No. 贵大特岗合字[2024]09号)

mold pre-compensation. A complete process chain for fabricating microstructured array molds for low-melting-point glass was proposed, including mold substrate selection, heat treatment of the Ni-P electroplated layer, single-point diamond planing, and Ti-DLC coating to enhance mold hardness and wear resistance. Precision molding experiments were subsequently conducted using a multi-step heating and annealing strategy combined with segmented control of the molding rate. The experimental results show that the fabricated aspheric cylindrical surfaces achieved an average areal surface roughness of S_a 1.553 nm and an average form accuracy of PV 0.208 μm . The molded glass aspheric cylindrical lens arrays exhibited a form accuracy of $PV \leq 0.3 \mu\text{m}$ and a surface roughness of $S_a \leq 3 \text{ nm}$. The proposed mold pre-compensation method and integrated manufacturing process provide an effective technical reference for the mass production of low-melting-point glass optical components with microstructured array features.

Key words: aspheric cylindrical lens array; glass lens; pre-compensation; mold fabrication; array precision glass molding

1 引 言

非球面柱阵列透镜是一类在单一方向上具有非球面光焦度、在正交方向上呈周期性排布的微结构阵列光学元件。与传统球面柱阵列透镜相比,其可利用高阶非球面系数调控边缘光线传播,有效减小球差、彗差和像散,改善线聚焦质量及能量分布均匀性,具有大数值孔径、高填充因子、小型化和易集成等特点,广泛应用于半导体激光快轴准直与光束整形、激光加工线光斑匀化、光通信耦合、三维轮廓测量、微显示照明及光学传感等领域^[1-2]。目前,玻璃非球面柱阵列透镜主要采用超精密磨削、抛光和离子束修形等冷加工方法制造。其中,超精密磨削和抛光适合加工碳化钨、碳化硅、光学玻璃等硬脆材料,可获得较高的轮廓精度和较低的表面粗糙度,是非球面柱阵列透镜及其模具制造的重要方法。但对于小节距、高矢高、大长宽比和连续柱面母线结构,冷加工存在工具轮廓误差及磨损误差难以控制、脆性材料易产生亚表面损伤、加工效率较低以及阵列单元一致性难以保证等问题。精密玻璃模压利用玻璃在转变温度以上的黏弹性和可塑性,将精密模具轮廓直接复制到玻璃表面,具有近净成形、制造效率高、批量一致性好和单位成本低等优势^[3],为非球面柱阵列透镜的高精度批量制造提供了有效途径。然而,非球面柱阵列透镜具有连续非旋转对称柱面和周期性微结构,其模压过程涉及玻璃整体流动、局部型腔充填、界面摩擦黏附、冷却收缩和残余应力释放等多场耦合作

用。模具-玻璃界面黏附及模具表面涂层性能还会直接影响玻璃流动、脱模质量、复制精度和模具寿命^[4-5]。因此,开展柱阵列模具制造、模压成形仿真、面形误差预测及模具补偿研究,是实现纳米精度玻璃非球面柱阵列透镜制造的关键。

国内外学者围绕阵列模具加工、玻璃模压仿真及面形误差控制开展了相关研究。在阵列模具加工方面,Yu等^[6]针对玻璃微非球面柱阵列透镜模具的超精密磨削,提出了基于砂轮实时轮廓和法向残余误差的轮廓误差补偿方法,将传统包络磨削后的轮廓误差由 13.7 μm 降低至 1.22 μm 。Zhang等^[7]采用摆动金刚石刀具加工高深宽比微透镜阵列,Shu等^[8]通过高精度模具加工与玻璃模压制备了曲面非球面复眼微透镜阵列,为复杂阵列模具制造提供了技术基础。在模压成型仿真方面,王启林等^[9]建立了非球面微柱面透镜阵列精密玻璃模压模型,分析了模压温度、压力和保压时间对玻璃充型及成形质量的影响。Gong等^[2]研究了工艺参数对模压玻璃柱阵列透镜复制精度和阵列一致性的影响。Zhao等^[10]、AI等^[11]和Wang等^[12]分别研究了硫系玻璃微透镜阵列和D-K9玻璃微透镜阵列模压过程中的热力耦合行为、变形机理及型腔充填规律,揭示了工艺参数与玻璃流动变形之间的关系。Zhu等^[13]针对复杂聚合物微结构热压过程中的填充问题进行研究,认为材料进入黏流状态后流动能力增强,但复杂型腔的充分填充还需通过限制横向流动提高模腔压力,材料黏度、载荷、保压时间、型腔结构及流动约束共同决定模压填充能力,为非球

面柱阵列透镜的充型分析提供了参考。在面形误差控制方面,高立恒等^[14]面向光纤准直非球面微透镜阵列,采用局部螺旋金刚石铣削方法加工非球面微透镜阵列模具,并结合模具轮廓预补偿提高了模压透镜的面形精度。Shu等^[15]提出了玻璃非球面透镜模压面形误差的高精度补偿方法,一次补偿后将非球面透镜的面形精度PV由0.618 6 μm 提升至0.15 μm 。Zhang等^[16]建立了XY多项式自由曲面模芯预补偿模型,并通过有限元仿真预测残余应力和冷却变形。Zhou等^[17]将机器学习用于硫系玻璃非球面透镜模压面形误差预测与补偿。Zeng等^[18]建立了双面微透镜阵列对准误差及模芯一套筒非线性热膨胀模型,通过优化高温配合间隙将模压阵列的对准误差控制在约10.56 μm ,获得了均匀度为97.81%的匀化光斑。随后,Zeng等^[19]提出以高转变温度玻璃微透镜阵列作为模芯的玻璃-玻璃模压方法,实现了凹凸双面微透镜阵列的高精度对准成形,整形光斑均匀度达到97.23%。此外,阵列透镜充型率和表面粗糙度演化^[20]以及模压阵列元件宏微尺寸检测^[21]等研究,也为提高阵列玻璃元件的成形质量提供了依据。综上,现有研究主要在阵列模具加工、模压仿真、界面调控和误差补偿等方面,针对纳米精度非球面柱阵列透镜这一具有连续非旋转对称柱面、周期阵列单元和严格母线精度要求的光学元件,仍缺乏从光学设计、模压成形仿真、面形误差预测、模具补偿到模具制造工艺试验验证的系统研究。

因此,本文围绕纳米精度非球面柱阵列透镜玻璃模压成形制造开展研究。首先,建立非球面柱阵列透镜仿真模型,对非球面柱阵列开展优化设计、工艺参数优化及成形面形误差预测。在此基础上对非球面柱阵列模具进行预补偿并开展柱阵列单点金刚石车刀刨削加工,最后,开展柱阵列透镜模压工艺试验与质量评价,验证仿真优化和模具补偿方法的有效性,最终实现高精度玻璃非球面柱阵列透镜的模压成形制造。

2 非球面柱阵列透镜设计

以K-LCV161作为光学玻璃材料,在Zemax光学软件中以最小光斑为优化目标,将均方根RMS和Spot Radius作为优化函数,对非球面方程

的系数进行优化求解。优化求解后设计了单个有效径为 $\varphi 1\text{ mm}$ 的非球面柱面透镜,非球面方程为:

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \sum_{i=1}^n A_{2i} x^{2i}, \quad (1)$$

其中: z 为光轴方向坐标,mm; x 为垂直于光轴方向的坐标,mm; k 为锥常数, c 为曲率半径 R 的倒数, A_{2i} 为非球面系数; i 为非球面系数序数,其非球面参数如表1所示。

表1 非球面柱阵列透镜设计参数

Tab. 1 Design parameters for aspheric cylindrical lens arrays

非球面系数	系数值
R	0.724 2
k	-0.486 839
A_4	-3.008 219 1E-02
A_6	8.289 450 5 E-02
A_8	0.266 979 63
A_{10}	0.431 734 96

柱阵列透镜通常有连续排布和间隔排布两种排布方式,间隔排布通常是为了在通过切割修整后批量化制造多个单体柱状透镜。本设计中采用间隔排布方式,为确定单元非球面柱透镜的间距,采用有限元仿真方法分析透镜及模具在成型时的应力场,对柱状透镜进行优化设计。在MSC.Marc仿真软件中将间距 L 分别设置为0,0.5,1,1.5 mm,玻璃为K-LCV161,上模具和下模具材料为C71500铜镍合金,玻璃及模具热机械参数见表2,仿真输入参数见表3,仿真模型如图1。

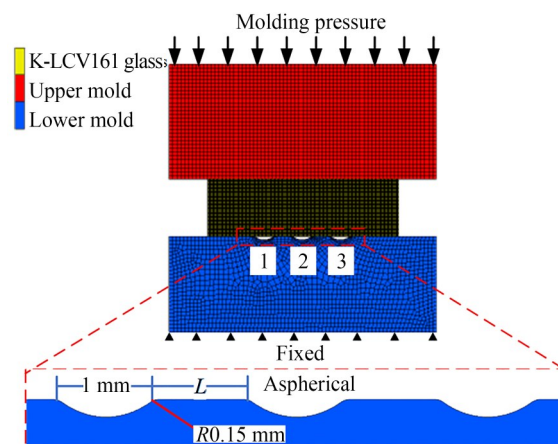


图1 仿真模型

Fig. 1 Simulation model

表 2 玻璃和模具材料机械参数
Tab. 2 Mechanical properties of the glass and mold materials

物理参数	C71500	K-LCV161
密度 $\rho(25\text{ }^{\circ}\text{C})/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8.94×10^3	3.26×10^3
杨氏模量 $E(25\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{GPa}$	156	45.1
泊松比 ν	0.22	0.274
热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	29.4	0.661
热膨胀系数 $\alpha(100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C})/(\text{K}^{-1})$	16.2×10^{-6}	6.7×10^{-6}
模压温度热膨胀系数 $\alpha/(\text{K}^{-1})$	$16.5\sim 17\times 10^{-6}$	1.36×10^{-4}
比热容 $C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	376	634
转变点温度 $T_g/^{\circ}\text{C}$	—	426
屈服点温度 $A_f/^{\circ}\text{C}$	—	469

模压温度为 485 ℃,模压力为 156 N,得到间距 L 分别为 0,0.5,1,1.5 mm 四种阵列结构完全填充时透镜及模具的应力分布如图 2 所示。由图 2(a)可知,柱阵列透镜的应力随着间距的增大呈先减少后增加的趋势,在非球面柱透镜间距为 0.5,1 mm 时产生的应力呈相似分布。由于 2 号非球面柱面透镜位于中间位置,应变较小故而应力较小。应力主要集中在 1,3 号非球面柱面透镜的非球面向平面过渡的逃逸 R 角处,这是由于玻璃在模压填充过程中由中心向水平方向流动时

因挤压而产生了较大的应力。而间距为 0 mm 时在两沟槽尖点处出现了应力集中产生较大应力。随着非球面柱面透镜的间距增大,玻璃向外横向流动时与模具的接触面增大,在摩擦阻力的作用下产生的应变增大导致最大应力增大。由图 2(b)可知,模具的最大应力随着非球面柱面透镜间距的增加逐渐减小,虽然增大间距会降低模具应力,但会增加透镜应力。考虑到模具及非球面柱面透镜的应力,并预留一定的切割余量切割成单体透镜,因此非球面柱透镜间距确定为 1 mm。

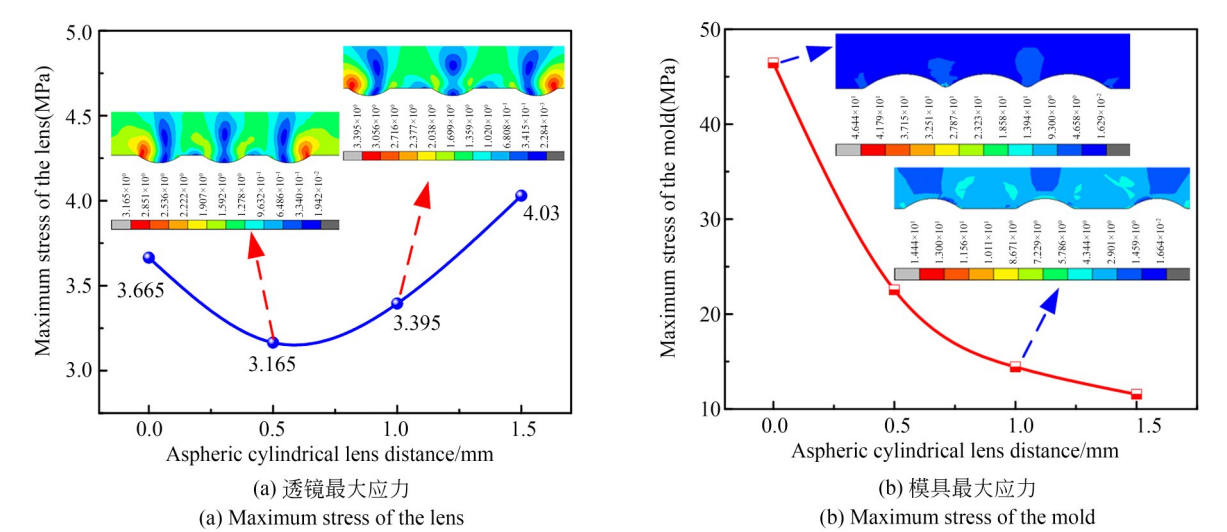


图 2 非球面柱面透镜间距对模具及玻璃透镜成形应力影响
Fig. 2 Effect of the aspheric cylindrical lens distance on the forming stresses of the mold and glass lens.

表 3 仿真输入应力松弛和结构松弛参数^[15]

Tab. 3 Simulation input glass stress relaxation and structural relaxation parameters

剪切模量 G_i	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	
(MPa)(470 °C)	17 699.42	0.558	0.008 84	2.98×10^{-5}	1.56×10^{-6}	
松弛时间 τ_i (s)(470 °C)	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	
	0.013 8	509.748	2 467.856	3 283.889	3 328.162	
TRS 热流变参数	$T_r/^{\circ}\text{C}$	C_1	C_2			
	470	2.07	5.49			
特征参数	$\Delta H^*/R\text{ (K)}$		x	$\alpha_{\text{vg}}(^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\alpha_{\text{vl}}(^{\circ}\text{C}^{-1})$	
	52 394.91		0.77	6.7×10^{-6}	1.36×10^{-4}	
Kohlrausch 形状因子	β_k	τ_{vref}				
	0.7	0.7				
KWW 方程参数	ω_1	ω_2	ω_3	τ_{v1}	τ_{v2}	τ_{v3}
	0.118 17	0.497 66	0.373 05	0.053 93	1.429 6	0.390 58

3 非球面柱阵列透镜模压面形误差预测与模具补偿

3.1 面形误差预测

在退火冷却阶段逐渐将玻璃内部应力释放,并完成微柱状阵列透镜的冷却收缩成型。为预测收缩完成后的轮廓偏差,将模压温度为 495 °C,模压力为 156 N 条件下的模压阶段结果导入退火冷却阶段作为初始条件,同时将表 3 中 K-LCV161 光学玻璃的结构松弛参数输入仿真软件中进行退火仿真。仿真过程中采用分段式冷却,退火温度分别设置为 430 °C,360 °C 和 25 °C,每个阶段的持续时间分别为 150 s,150 s 和 250 s,得到退火冷却阶段微柱状阵列透镜的轮廓偏差如图 3 所示。

从图 3(a)可知,在透镜中心位置玻璃未能够实现完全填充,沿着径向方向产生的轮廓偏差逐渐增大。在最中心位置,由于模压玻璃预型体为平片,在模压力作用下软化的玻璃发生挤压形变实现非球面柱面型腔填充,最中心位置深度最大,填充最为困难,而边缘轮廓偏差逐渐增大主要是由于退火冷却收缩阶段的形变产生。提取仿真的非球面和模具节点坐标,将非球面透镜中心与模具轮廓曲线中心对齐纵坐标相减,利用插值法拟合出非球面透镜及模具方

程得到形状误差如图 3(b)所示,可知在退火冷却后 1 号、2 号、3 号非球面柱面透镜的最大面形误差分别为 PV 1.78 μm , PV 1.99 μm 和 PV 1.75 μm 。

3.2 非球面柱阵列模具预补偿

将模具预补偿因子设为 α ,将非球面方程在有效径内离散化,可得到在最大半径处预补偿后的离散点非球面透镜方程为:

$$\begin{aligned} Z_{a\max} - Z_{b\max} = & \frac{c_a x_{\max}^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_a) c_a^2 x_{\max}^2}} + \sum_{i=1}^N A_{ia} x_{\max}^i - \\ & \frac{c_b x_{\max}^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_b) c_b^2 x_{\max}^2}} - \sum_{i=1}^N A_{ib} x_{\max}^i. \end{aligned} \quad (2)$$

$$PV_{\text{预补}} = Z_{a\max} - Z_{b\max} = PV_{\text{sim}} - PV_{\text{object}}, \quad (3)$$

$$k_{ia} \cdot c_a = k_{ib} \cdot c_b (1 + \alpha), \quad (4)$$

其中: A_{ia} 为补正后的高次项非球面系数, A_{ib} 为原设计的非球面方程系数, k_{ia} , c_a 分别为补正后的圆锥系数和曲率半径, k_{ib} , c_b 分别为原设计的非球面方程圆锥系数和曲率半径, $Z_{a\max}$, $Z_{b\max}$ 分别为补正前后的 Z 向高度值, PV_{sim} 和 PV_{object} 分别为仿真预测和补偿的目标轮廓误差, $PV_{\text{预补}}$ 为透镜面形精度收缩变形补偿量。

为保证模具矢高一致,选取 1 号柱面的轮廓偏差 PV 1.78 μm 进行补偿。对于有效直径约为

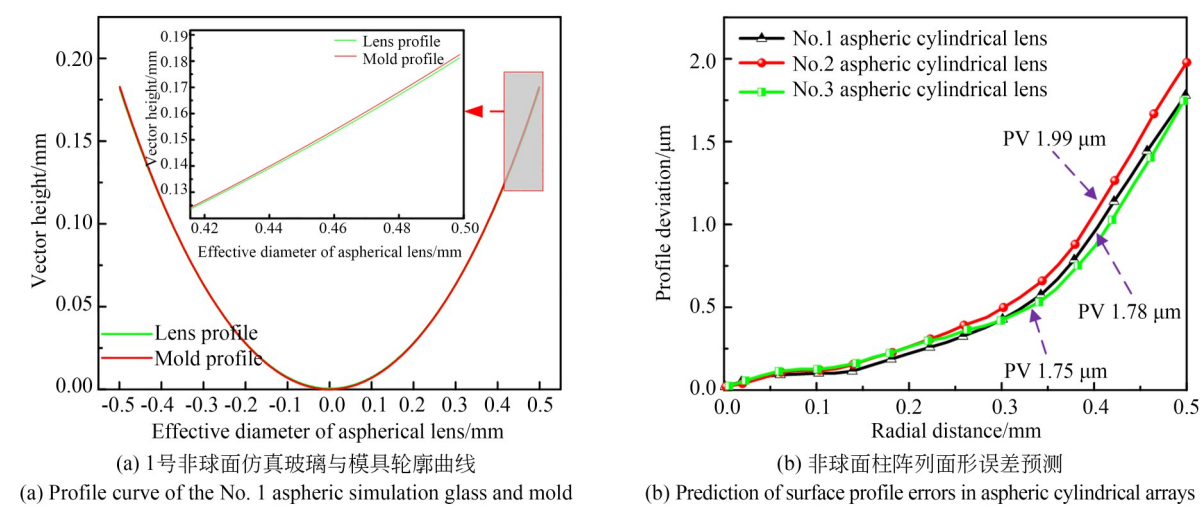


图3 退火冷却阶段柱阵列透镜面形偏差预测

Fig. 3 Prediction of profile errors in cylindrical lens arrays during the annealing and cooling stages

1 mm 的非球面柱面透镜,当形状精度 $PV \leq 0.4 \mu\text{m}$ 时,其光学性能足以满足必要的使用要求。在此情况下,可以完全补偿仿真预测的形状误差。但由于仿真预测结果中存在一定程度的固有误差,当采用完全补偿时会存在过度补偿的可能,这可能会导致表面形状误差值增大。因此,本研究中预留了一定的补偿余量,即目标补偿形状精度 PV 设置为 $0.4 \mu\text{m}$,可计算出面形误差预补偿量为 $1.38 \mu\text{m}$ 。在此参数下由公式(2)~公式(4)联立可求解出模具的预补偿因子 $\alpha = 0.00654$,预补偿后模具非球面方程系数如表4所示。

表4 预补偿后模具非球面方程系数

Tab. 4 Coefficients of the aspheric equation for the mold after pre-correction

非球面系数	系数值
R	0.719 464
k	-0.486 839
A_4	-3.068 021E-02
A_6	8.565 916E-02
A_8	-2.795 281E-01
A_{10}	4.579 982E-01

3.3 非球面柱阵列模具制造

在玻璃精密模压中碳化钨等超硬材料常用于模具材料,但在非球面柱阵列制造中砂轮易磨

损使面形精度一致性难以保证。为此,本文提出了一种高精度非球面柱阵列模具制造工艺(图4),选择与Ni-P合金具有相近热膨胀系数且车削性能和硬度优异的C71500 CuNi合金作为模具材料基底,首先在C71500铜镍合金表面采用单点金刚石车刀切削加工出非球面柱面轮廓,再采用化学镀工艺在CuNi表面电镀一层 $300 \mu\text{m}$ 厚的高磷化镍(Ni-P)膜层(磷、镍含量分别为12%和88%)。为消除因Ni-P材料在高温条件下晶化转变引起的模具变形,对Ni-P涂层进行高温热处理(在氮气氛围下进行,热处理温度为 550°C ,时间2 h),使其完成晶化转变,以提高Ni-P的硬度、模压精度和模具寿命。使用5轴超精密自由曲面加工机床(UPN150G5,江苏优普纳科技有限公司)对非球面阵列模具进行单点金刚石切削加工。单点金刚石微切削加工时主轴不旋转,通过Y轴的伺服来实现沿Y轴方向的纵向进给,同时刀具安装在工作台支架上做横向进给运动。选用圆弧半径 0.5 mm ,前角 0° ,后角 15° ,夹角 35° 的天然金刚石刀具,以进给速率 300 mm/min ,切深 $10 \mu\text{m}$ 进行粗加工获得非球面柱状阵列轮廓,电镀Ni-P并热处理后进行表面精加工,进给速率为 0.5 mm/min ,切深 $1 \mu\text{m}$ 。为防止模压过程中模具的磨损及玻璃与模具之间的黏附,采用磁过滤阴极真空电弧(FC-VA)沉积系统在Ni-P模具表面镀一层厚度约为

200 nm 的 Ti/Ti-DLC 复合膜,其中过渡层 Ti 的厚度约为 80 nm。镀膜中使用的靶材为高纯钛靶(99.999%), C_2H_2 流量为 80 sccm,沉积时间分别为 20 s 和 60 s。沉积前沉积室的基本压力

被抽至 4×10^{-3} Pa,在直流 110 A 和电压 20 V 的条件下生成 Ti 和碳等离子体,通过弧形过滤电磁场导管将电离后的离子导入处理室,过滤器线圈电流分别为 2.5 A 和 3.5 A。

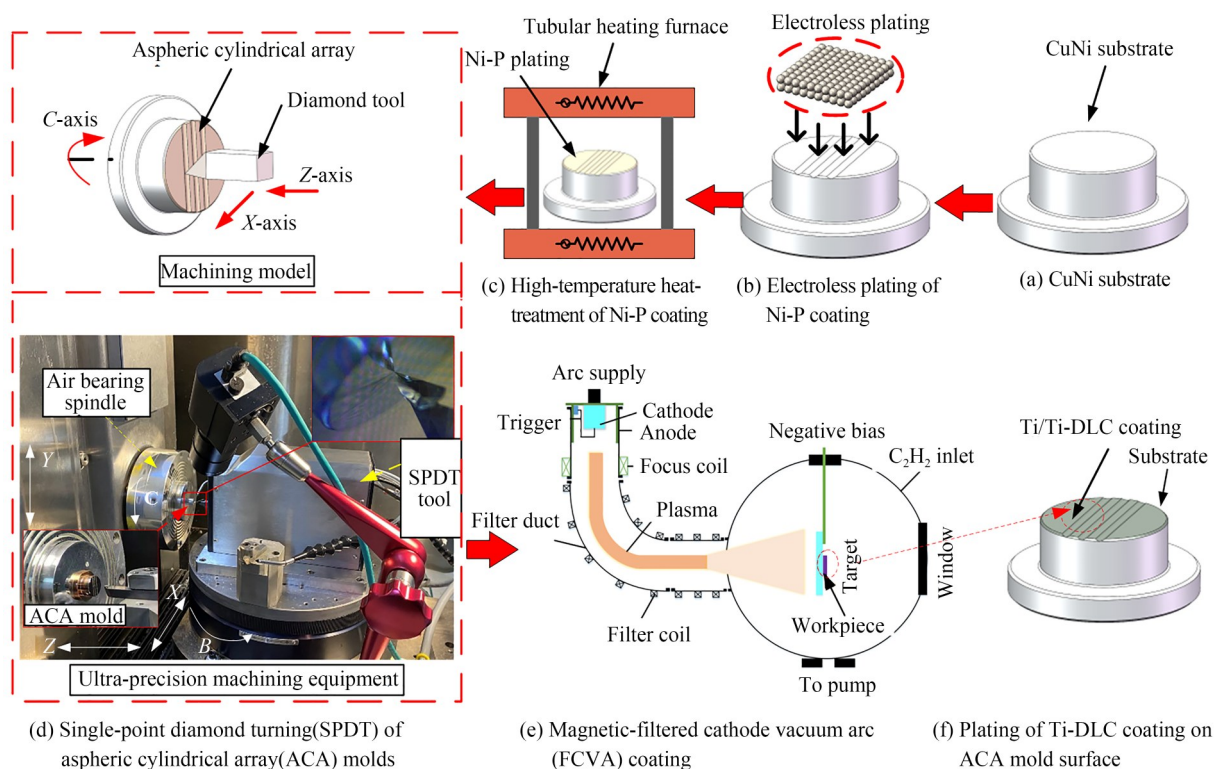


图 4 非球面柱阵列模具制造工艺

Fig. 4 Manufacturing process for aspheric cylinder array mold

加工后的模具如图 5(a)所示,可以看出模具表面光洁度较高,利用超景深显微镜对柱状非球面阵列模具轮廓形貌进行检测,获取了柱面的形貌数据,柱面截面与设计非球面轮廓相吻合。以测点 2 为检测对象利用 UA3P 测量每一条非球面柱面的面形精度,得到加工后的对应的非球面柱面 1,2,3 的面形精度分别为 PV 0.21 μm , PV 0.213 μm , PV 0.197 μm (图 5b),表面粗糙度分别为 S_a 1.721 nm, S_a 1.632 nm, S_a 1.615 nm,可以看出微削工艺中刀具磨损对非球面柱阵列的面形精度影响较小且可获得较高的表面质量,满足模压的精度要求。由于采用 FCVA 沉积工艺镀膜离子为 100% 离化的等离子,沉积能量高,形成的涂层更加致密,在镀膜前后其表面粗糙度和面形精度变化不大,甚至优于镀膜

前^[4],故不再测量镀膜后模具的表面粗糙度和面形精度。

3 条微柱状阵列模具测点 1、测点 2 和测点 3 的表面粗糙度 S_a 和模具面形精度 PV 检测结果如表 5 所示。

由表 5 可知在测点 1-1 位置的表面粗糙度最小为 S_a 0.916 nm,平均表面粗糙度为 S_a 1.553 nm,测点 1 为刚开始车削位置,刀具性能较好,后期逐渐趋于稳定。平均面形精度为 PV 0.208 μm ,同一条非球面柱阵列从前到后的测点面形精度略微增大,说明刀具损耗对模具面形精度有一定的影响,但加工出的微柱状阵列模具仍具有较高的面形精度和较低的表面粗糙度,证明了微削工艺加工微柱状阵列模具的可行性。

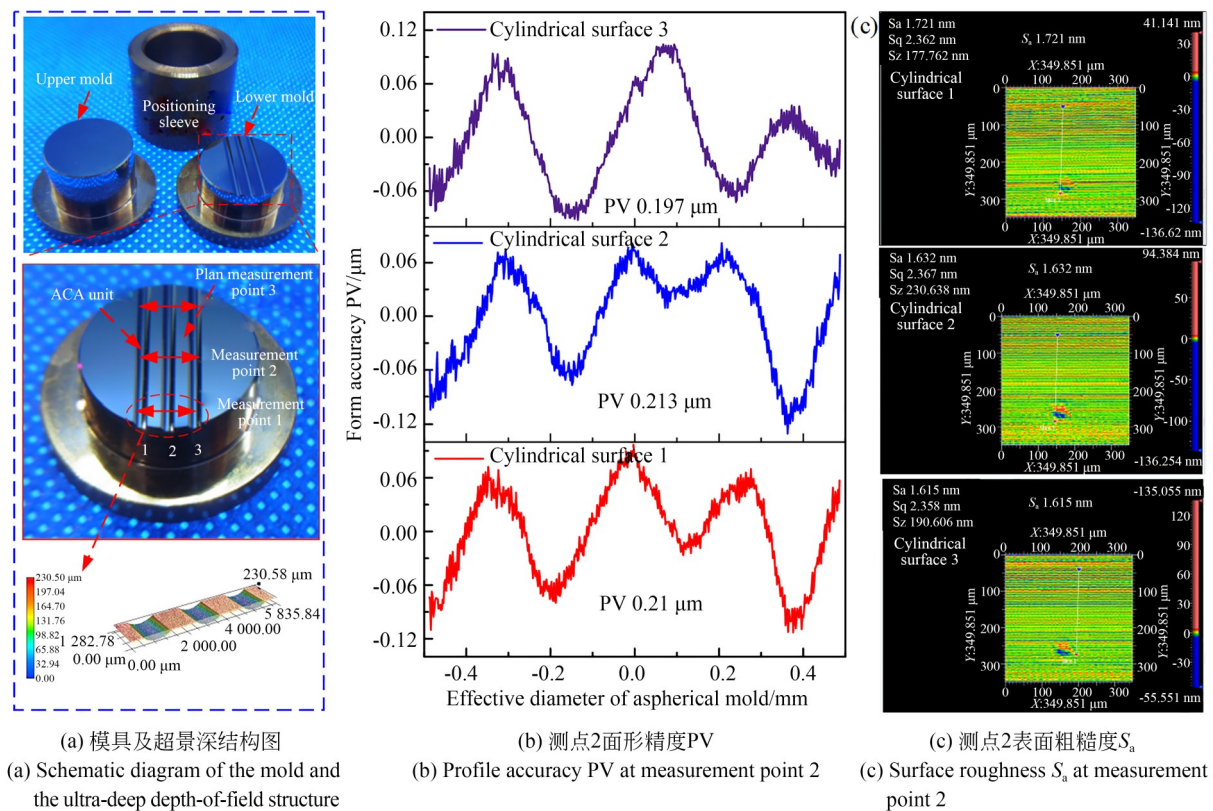


图5 非球面柱阵列模具加工结果

Fig. 5 Machining results for an aspheric cylinder array mold

表 5 微柱状阵列模具表面质量检测结果

Tab. 5 Results of surface quality testing for cylindrical array molds

测点位置	表面粗糙度 S_a /nm	面形精度 PV/ μ m
1-1	0.916	0.213
1-2	1.721	0.21
1-3	1.640	0.224
2-1	1.652	0.196
2-2	1.632	0.213
2-3	1.559	0.213
3-1	1.636	0.194
3-2	1.615	0.197
3-3	1.607	0.216

3.4 非球面柱阵列透镜玻璃模压成形

在微柱状阵列透镜模压中,选择尺寸为 $\varphi 10\times 1.5$ mm的K-LCV161低熔点光学玻璃作为预形体,基于加工的微柱状模具采用多步加热与退火、模压速率分段控制模压成型工艺进行试验,模压成型设备为日本SYS的七工位模压成型机。预热1、预热2、预热3、冷却1、冷却2的温度

分别设置为350℃,430℃,480℃,430℃和350℃。模压工位选择模压力为0.07 MPa,在压型工位上施加周期性模压力,初压为0.01 MPa,周期10 s,加压力为0.01 MPa。将模压温度分别设置为480℃,485℃,490℃,495℃,500℃,得到不同温度下微柱状阵列玻璃透镜的下压量和面形精度如表6所示。

由模压实验结果可知在模压力0.07 MPa,温度480℃时模压650 s后玻璃模压的位移量为

表 6 不同模压温度下玻璃光学元件的成型性能

Tab. 6 Molding properties of glass optical elements at different molding temperatures

温度/℃	时间/s	下压量/ μ m	面形精度 PV/ μ m		
			柱面1	柱面2	柱面3
480	650	659	1.775	1.874	1.899
485	400	607	1.742	1.812	1.845
490	400	910	0.413	0.549	0.455
495	400	1 105	0.268	0.219	0.263
500	220	1 098	0.338	0.278	0.314

659 μm , 模压温度在 490 $^{\circ}\text{C}$ 以下时均因玻璃填充不完全, 所以面形精度 PV 值较大。随着温度升高到 495 $^{\circ}\text{C}$, 相同模压力下获得的下压量为 1 105 μm , 此时非球面的柱面已完全填充并向四周流动接触套筒内壁, 模压时间为 400 s, 获得较小的面形精度 PV 值。当温度升高到 500 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在相同载荷下只需要 220 s 就达到接近 1 105 μm 的下压量, 但此时非球面柱阵列透镜粘附在模具表

面。而当模压力增加到 0.08 MPa 时, 在 495 $^{\circ}\text{C}$ 时模压的非球面柱阵列出现碎裂, 部分玻璃残渣粘附在玻璃表面, 说明较高温度下黏附更明显, 因此合适的模压温度和模压力对成型质量有重要影响。在模压温度为 495 $^{\circ}\text{C}$, 模压力为 0.07 MPa 时获得表面质量较好的玻璃微柱状非球面阵列透镜, 选择柱面 1, 2, 3 的中间位置检测面形精度和表面粗糙度, 检测结果如图 6 所示。

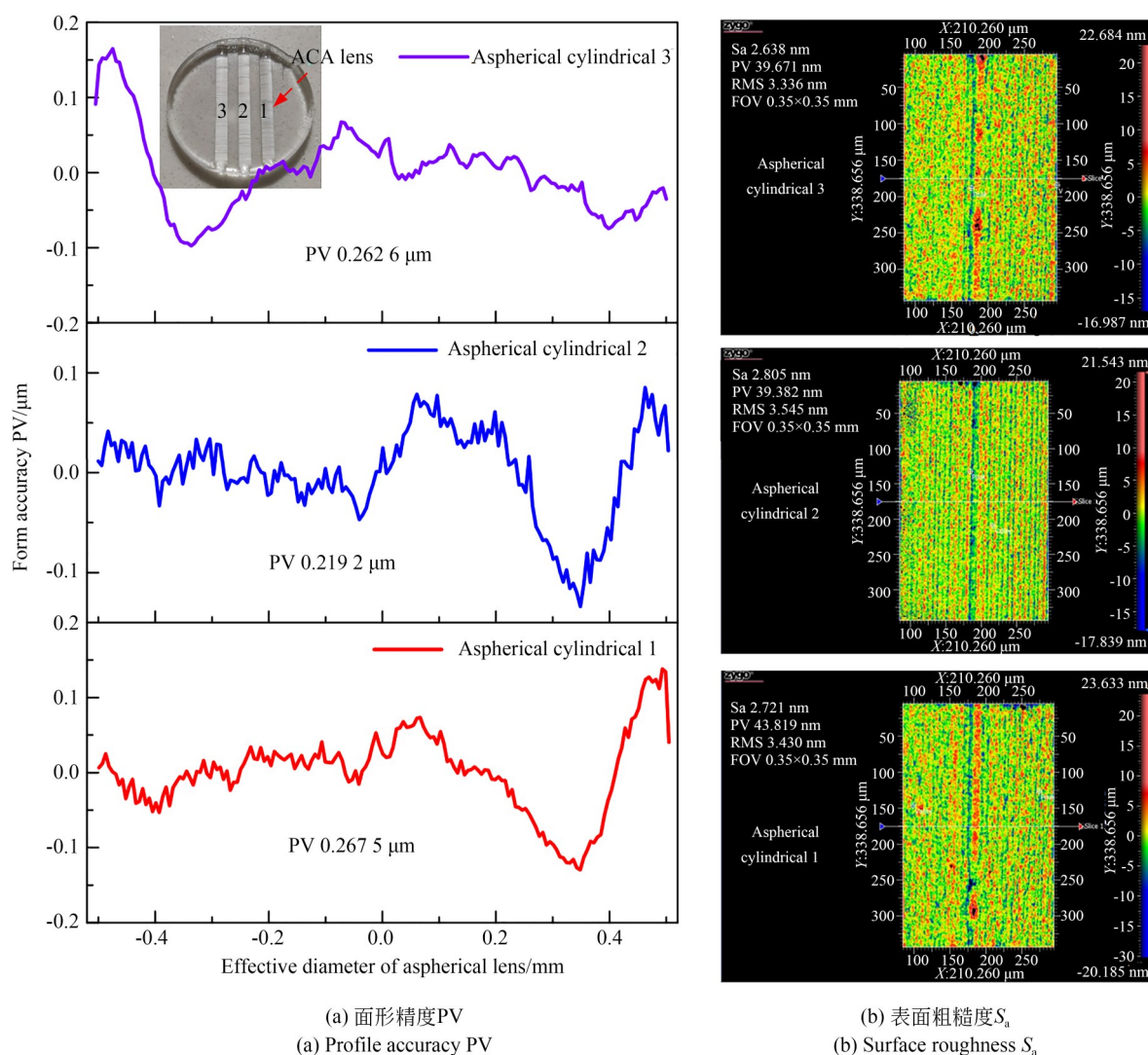


图 6 非球面柱阵列透镜模压结果

Fig. 6 Molding results for an aspheric cylindrical lens array

由图 6 可知, 在模压温度为 495 $^{\circ}\text{C}$, 模压力为 0.07 MPa 时微柱状阵列透镜柱面 1, 2, 3 的面形精度 PV 分别为 0.268 μm , 0.219 μm , 0.263 μm , 表面粗糙度 S_a 分别为 2.721 nm, 2.805 nm,

2.638 nm, 三条非球面柱面透镜的面形精度及表面粗糙度几乎一致, 说明利用提出的模具制造方法进行玻璃光学元件模压具有较高一致性和表面质量。分别选择微柱状阵列模具及模压的三

枚非球面柱阵列玻璃透镜柱面 1,2,3 中间位置的表面粗糙度及面形精度进行对比,如图 7 所示。

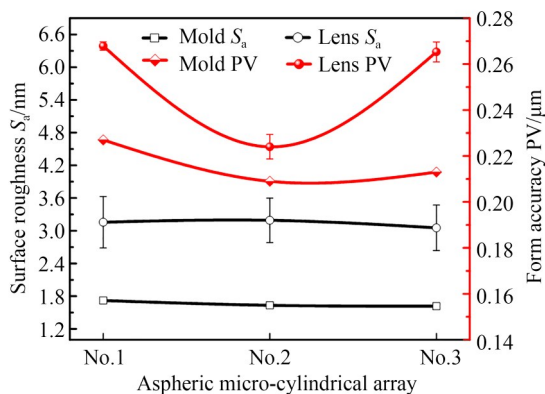


图 7 微柱状阵列模具及模压后玻璃光学元件表面质量对比

Fig. 7 Comparison of surface quality between cylindrical array molds and molded glass optical elements

从图 7 可以看出模具和玻璃透镜的面形精度 PV 值变化不大,其原因为通过预补偿几乎将玻璃热膨胀及结构松弛引起的热形变消除,而微小差异主要是由于多次模压过程中模具面形精度的下降。由于模具无横向约束,玻璃在填充过程中界面流变阻力的降低使玻璃更倾向于沿垂直于柱面的方向流动,造成边缘位置的柱面填充效果相对于中心柱面较差,在退火冷却阶段玻璃收

缩的作用使玻璃透镜柱面 1 和柱面 3 的面形精度 PV 值相对较大。相比较而言,模压后的玻璃光学元件粗糙度相对于模具出现约 1 nm 的变化,其平均表面粗糙度为 S_a 2.72 nm,而模具的平均粗糙度为 S_a 1.66 nm。从柱面 1,2,3 的表面粗糙度 S_a 可以看出,尽管整体表面具有较低的粗糙度,但在表面仍可观察到沿加工方向分布的弱条纹状微观纹理,在玻璃模压过程中,该类微弱表面纹理可能通过界面复制传递至玻璃表面,从而对成形玻璃的局部微观形貌及表面粗糙度产生一定影响。同时从图 6 (b) 的玻璃表面粗糙度图像中发现玻璃表面有一定的划痕,主要是由于加压周期中初始模压力较大使玻璃在流动填充过程中形成局部应力集中而使玻璃光学元件出现局部缺陷。此外,多次模压循环往复的热-机耦合作用机制使模具表面恶化也是玻璃光学元件表面粗糙度上升的另一原因。

为进一步评价模具表面 Ti-DLC 涂层与基材的结合性能及耐磨性,利用镀膜后的模具在模压温度为 495 °C 下开展 100 次 K-LCV161 玻璃柱阵列透镜模压后,采用纳米划痕仪(德国 Bruker/Ti980)对涂层与基体之间的结合力进行评价,划痕测试使用圆锥形金刚石探针(半径:5 μm ,锥角:60°,试验载荷:200 mN,划痕长度:500 μm),并测量多次模压后模具的表面粗糙度变化,结果如图 8 所示。

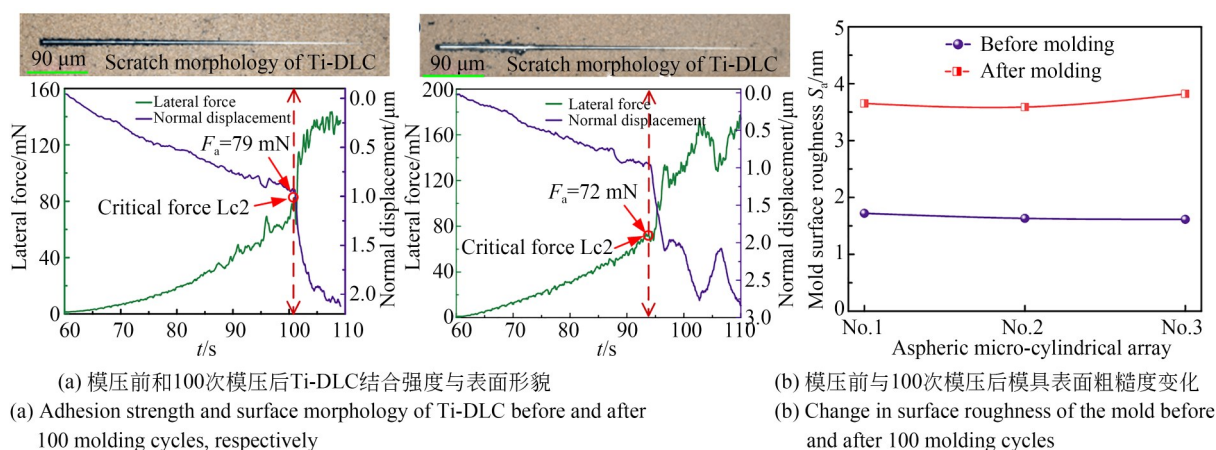


图 8 模压前后非球面柱阵列模具结合强度及表面质量变化

Fig. 8 Changes in adhesion strength and surface quality of the aspheric cylindrical array mold before and after molding

由图 8(a) 可知,模压前涂层的结合力为 79 mN,模具在经过 100 次模压后,涂层的结合力为

72 mN (图 8b),高温模压后结合强度整体变化不大,结合光镜下的膜层划痕形貌可以看出膜层与

Ni-P基材的粘结强度良好,整个划痕中几乎没有出现裂纹、碎片、分层或剥落现象,说明增加过渡层可增强膜层组成结构的连续性,避免界面因热膨胀系数差异而产生的应力集中,从而显著提高附着力。模具表面非球面柱阵列1,2,3的表面粗糙度分别为 S_a 3.653 nm, S_a 3.590 nm, S_a 3.820 nm,相对于模压前的表面粗糙度分别为 S_a 1.721 nm, S_a 1.632 nm, S_a 1.615 nm (图8c),可以看出多次模压后模具表面粗糙度有所上升,但整体表面粗糙度 $S_a \leq 4$ nm,仍然能够满足精密玻璃模压的使用要求,说明Ti/Ti-DLC复合膜具有较好的稳定性和耐磨性,在Ni-P模具表面镀Ti/Ti-DLC涂层是可行的。

4 结 论

本文对非球面柱阵列进行了仿真优化设计,确定了柱阵列间的模具间距为1 mm时玻璃内部残余应力较小,填充性能较好,并预测了退火冷却后微柱状透镜阵列1号、2号、3号非球面的最

大面形误差分别为PV 1.78 μm , PV 1.99 μm 和PV 1.75 μm 。基于预测的面形误差对模具进行预补偿设计,提出了一种高精度非球面柱阵列模具制造工艺,加工出高表面质量的非球面阵列模具,平均表面粗糙度为 S_a 1.553 nm,平均面形精度为PV 0.208 μm 。采用多步加热与退火、模压速率分段控制模压成型工艺,模压出的非球面柱阵列玻璃透镜面形精度 $PV \leq 0.3 \mu\text{m}$,表面粗糙度 $S_a \leq 3$ nm。所提出的制造工艺可为批量生产低熔点微结构阵列玻璃光学元件提供有效的指导。

作者贡献声明:

舒成松:模具加工与补偿方法的提出,论文构思和撰写,基金支持;
张道恒:实验数据分析,论文初稿撰写;
谭海丹:论文审核与编辑写作;
郑鑫宇:模具加工;
尹韶辉:基金支持;
李明:资源及装备支持。

参考文献:

- [1] ZHONG L, LI Y L, FU S K, *et al.* Semiconductor laser collimation and shaping design based on the combination of a rotationally symmetrical lens and a cylindrical lens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2024, 41(11): 2004-2013.
- [2] GONG F, DING B X, WANG B, *et al.* Precision replication and quality analysis of the molded glass cylindrical lens array[J]. *Optics Express*, 2025, 33(6): 12780.
- [3] 舒成松,董浩,尹韶辉,等.高精度微结构玻璃光学元件阵列模压技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1967-1985.
SHU C S, DONG H, YIN S H, *et al.* Research progress of high precision micro structure glass optical element array molding technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1967-1985. (in Chinese)
- [4] ZHAO H H, ZHANG L C. Mold-glass interface adhesion mechanisms in precision glass molding[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2025, 14: 1588934.
- [5] SHU C S, YE Y F, YIN S H, *et al.* Microstructure, mechanical, tribological, and glass molding properties of ta-C coating on tungsten carbide molds via filtered cathodic vacuum arc technology[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(22): 37144-37156.
- [6] YU S M, YAO P, XU J M, *et al.* Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspherical-cylindrical lens array based on the real-time profile of wheel and normal residual error[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 312: 117849.
- [7] ZHANG X Q, CHEN Z Z, CHEN J N, *et al.* Fabrication of a microlens array featuring a high aspect ratio with a swinging diamond tool[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 75: 485-496.
- [8] SHU C S, GUO X P, YIN S H, *et al.* Fabrication of curved aspheric compound eye microlens array with high surface quality by precision glass molding[J]. *Precision Engineering*, 2023, 82: 129-139.
- [9] 王启林,姚鹏,王一帆,等.非球面微柱面透镜阵列精密玻璃模压仿真研究[J]. *中国激光*, 2024, 51(20): 2002104.
WANG Q L, YAO P, WANG Y F, *et al.* Simulation of precision glass molding for aspherical cylindrical microlens arrays[J]. *Chinese Journal of Lasers*,

- 2024, 51(20): 2002104. (in Chinese)
- [10] ZHAO Y B, LIU Y, XUE C X, *et al.* Thermodynamic coupling analysis of precision molding process for chalcogenide glass microlens array under multiple loads[J]. *Optics Express*, 2025, 33(1): 1569.
- [11] AI H T, XUE C X, LI H X, *et al.* Investigation on deformation mechanism and filling behavior in precision glass molding of D-K9 microlens arrays [J]. *Optics Express*, 2026, 34(8): 15326.
- [12] WANG G, ZHOU T F, SUN X W, *et al.* Study on deformation behavior of glass in high-temperature molding for massive unit microlens arrays[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(32): 43038-43048.
- [13] ZHU X L, SIMON T W, CUI T H. Hot embossing at viscous state to enhance filling process for complex polymer structures[J]. *Microsystem Technologies*, 2012, 18(3): 257-265.
- [14] 高立恒, 于谦, 周天丰, 等. 光纤准直非球面微透镜阵列模压成形[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(1): 75-83.
- GAO L H, YU Q, ZHOU T F, *et al.* Precision glass molding for fiber collimating aspherical microlens array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(1): 75-83. (in Chinese)
- [15] SHU C S, ZHANG D H, YIN S H, *et al.* High-precision compensation method for the form error of a glass aspheric lens in precision glass molding [J]. *iScience*, 2025, 28(7): 113016.
- [16] ZHANG Z G, LIU Y, LI C, *et al.* Precision glass molding technology for XY polynomial freeform optical elements with simulations and experiments [J]. *Optics Express*, 2024, 32(13): 22905.
- [17] ZHOU T F, GAO L H, YU Q, *et al.* Machine learning for aspherical lens form accuracy improvement in precision molding of infrared chalcogenide glass [J]. *Precision Engineering*, 2024, 90: 156-163.
- [18] ZENG Z H, ZHOU T F, YU Q, *et al.* Alignment error modeling and control of a double-sided microlens array during precision glass molding[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10: 48.
- [19] ZENG Z H, ZHOU T F, ZHOU Z K, *et al.* Glass-glass molding of concave-convex double-sided microlens arrays with high alignment accuracy [J]. *Precision Engineering*, 2025, 94: 80-90.
- [20] LI K S, WANG C J, GONG F. The filling ratio and surface roughness evolution of glass array lens in precision glass molding[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2025, 8(1): 2.
- [21] 杨高, 陈裕杰, 周陈标, 等. 热压成形玻璃微透镜阵列的宏微特征尺寸测量[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(3): 20240459.
- YANG G, CHEN Y J, ZHOU C B, *et al.* Measurement of macro and micro characteristic dimensions for glass microlens arrays produced by hot embossing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(3): 20240459. (in Chinese)

通讯作者:



舒成松(1992—),男,贵州毕节人,博士,副教授,2023年于湖南大学获得博士学位,主要研究方向为光学玻璃模压工艺及模具超精密加工方面的研究。E-mail: csshu@gzu.edu.cn

作者简介:



张道恒(2001—),男,贵州贵阳人,硕士研究生,2024年于贵州大学获得学士学位,主要研究方向为微结构阵列玻璃模压技术研究。E-mail: 1015350524@qq.com