

激光与光电子学进展

曲面复眼玻璃透镜模压过程仿真研究

李逸群, 舒成松, 尹韶辉*

湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082

摘要 为了揭示曲面复眼玻璃透镜光学精密模压过程中各个子眼应力分布变化状况,通过建立有限元模型,应用 MSC. Marc 有限元软件对不同工艺参数下的玻璃透镜模压、保压阶段进行了仿真研究,得到了温度、模压速率、模压力对子眼应力的影响规律和模压力、位移曲线。然后,对不同模压方式下应力变化过程进行研究,发现在球形预形体变形量较大的场合,恒速率模压工况会出现随下压量增加导致外力过大、阻碍应力松弛的现象。最后,对保压阶段进行研究,得到了不同保压力对填充效果和子眼应力分布的影响规律。

关键词 光学制造; 复眼透镜; 模压成形; 有限元分析

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213320

Simulation of Molding Process for a Curved Compound Eye Glass Lens

Li Yiqun, Shu Chengsong, Yin Shaohui*

National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University,
Changsha 410082, Hunan, China

Abstract This study aimed to investigate the changes in stress distribution of each compound eye during optical precision molding of curved compound eye lens. This paper built a finite element model using MSC. Marc to present a simulation study of the molding and holding stages of the glass lens under different process parameters. For this, the effect of temperature, molding velocity, and molding pressure on the stress of each compound eye, as well as the molding pressure and displacement curves, were obtained. Our findings for spherical preforms with a large deformation showed that the constant velocity molding condition increased downward displacement, leading to excessive external forces that prevent stress relaxation. The holding stage was further studied to obtain the pattern of effect of different holding forces on the filling effect and stress distribution in the compound eye.

Key words optical fabrication; compound eye lens; molding process; finite element analysis

1 引言

复眼透镜结构通常具有体积小、质量小、视场大、灵敏度高、可测速等优点^[1-2],在航空航天、国防军工、光电信息、生物医疗、运载交通、智能机器人等产业的红外探测、智能制导、成像衍射等高端光学系统中具有广泛应用前景。目前,大多数研究中复眼透镜的材料以有机玻璃^[3]、光敏树脂^[4-5]等聚合物材料为主。与聚合物材料相比,玻璃具有抗高温高湿、硬度高及光学性能优异等优势,是最为理想的制造复眼阵列等光学元件的材料。Song 等^[6]较早开展了玻璃材料曲面复眼透镜制造的研究,在球面玻璃上超精密磨削加工出非球

面透镜阵列。

在光学玻璃材料上加工非球面复眼阵列微结构表面,目前可采用的技术有光刻、蚀刻、LIGA、电子束写、超精密机械加工、热压成形复制等,但这些方法各有其自身的缺陷和使用的局限性,生产效率低、工艺稳定性差,不能满足高精高效大批量生产的需求^[7-8]。而玻璃热压成形技术则可有效解决这些难题,该技术利用玻璃从熔融态向固态转化过程的连续可逆的热加工性质,在高温、无氧的条件下通过模具对玻璃毛坯施加一定的压力,从而将模具型面的形状复制到受热软化的玻璃表面上,再经退火冷却固化,得到所要求的光学设计表面,具备重复精度高、无污染、净成形、可批量化生

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-12; 录用日期: 2022-01-21; 网络首发日期: 2022-01-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0116900)、国家自然科学基金(52130503)

通信作者: *yinshaohui@hnu.edu.cn

产等优势。模压制造出高精度的非球面复眼阵列玻璃透镜,掌握模压过程中的温度场、应力场及填充情况是关键。由于玻璃模压成形在高温密封条件下进行,无法对成形过程中的填充率、应力场等进行实时监测。在此条件下,有限元仿真成为预测模压仿真过程的温度场、应力场及填充情况的有效手段。Yi等^[9-10]仿真研究了非球面透镜模压过程、退火过程的残余应力和轮廓偏移。Zhou等^[11]研究了不同黏弹性参数对仿真结果的影响,通过实验确定广义麦克斯韦模型精度最高。余剑武等^[12]对V形槽结构透镜在不同模压工艺参数下的填充率和残余应力进行了仿真研究。Sarhadi等^[13]使用ABAQUS的FORTRAN子程序建立玻璃的黏弹性模型并使用圆环压缩实验验证其准确性,并使用该模型研究了平面透镜阵列模压与退火过程工艺参数。Vu等^[14]通过实测的玻璃和模具表面几何形貌建立接触传热模型,通过不同粗糙度的模具实验验证了模型的准确性。付秀华等^[15]对模压硫系玻璃非球面透镜不同沉积工艺下的增透膜应力进行了仿真研究,并对增透膜的光谱透过率和附着力进行了实验验证。由于复眼阵列结构单元尺寸小、数量多,存在填充率低、残余应力高等问题,有必要开展模压仿真对其温度场、应力场及填充率的预测,目前有关这方面的研究比较少。

本文以非球面复眼阵列为研究对象,在非线性有限元软件MSC.Marc中建立非球面复眼阵列仿真模型,在确定玻璃和模具材料的热-机械参数的基础上,计算了玻璃的黏弹性仿真参数,开展了模压成形和保压阶段的非球面复眼阵列仿真,分析了透镜应力变化过程及模压温度、速率、模压力和保压参数对应力分布的影响,通过优化模压工艺参数,为模压成形工艺试验参数提供参考依据。

2 模压仿真中玻璃黏弹性参数的确定

现阶段的相关研究中,一般选择多个麦克斯韦模型并联组成的广义麦克斯韦模型来表达玻璃的应力松弛特性,该模型如图1所示。

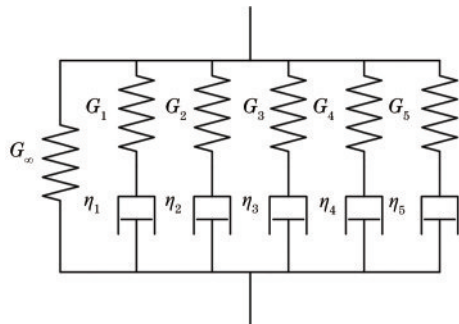


图1 六阶广义麦克斯韦模型

Fig. 1 Sixth-order generalized Maxwell model

根据线性黏弹性理论和玻尔兹曼叠加原理,黏弹性材料的力学松弛行为是其整个历史上各个松弛过程的线性加和的结果,由此可以得出广义麦克斯韦模型剪切应力表达式^[16]为

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\xi) \frac{d\epsilon}{d\xi} d\xi + G(t)\epsilon(0), \quad (1)$$

式中: $G(t)$ 是剪切应力松弛模量函数,可以用 n 阶 prony 级数表示。一般选择六单元广义麦克斯韦模型^[11],可以比较准确地描述玻璃的应力松弛现象,

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^5 G_i \exp(-t/\tau_i), \quad (2)$$

式中: G_∞ 是时间无限长时的剪切模量; G_i 是每个麦克斯韦单元的剪切模量; τ_i 是每个麦克斯韦单元的松弛时间。

$$G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^5 G_{i0}. \quad (3)$$

初始剪切模量 G_0 是无穷时间下的剪切模量与每个单元的剪切模量之和。根据现有研究,一般选择六阶广义麦克斯韦用于仿真中的材料参数设置。本文研究采用的玻璃预形体材料选择住田公司的低熔点光学玻璃 K-LCV-161, 转变点温度 426 °C, 屈服点温度 469 °C。玻璃的黏弹性参数通过最小单轴压缩蠕变实验获得的蠕变曲线计算得到,如表1所示。

表1 玻璃在 470 °C 时的应力松弛参数

Table 1 Stress relaxation parameters for glass at 470 °C

G_i	Value	τ_i	Value
G_1	17699.4	τ_1	0.00138
G_2	0.55804	τ_2	509.944
G_3	0.00884	τ_3	2467.92
G_4	2.98083	τ_4	3284.07
G_5	1.56884	τ_5	3327.79
G_∞	0.20191		

材料黏弹性与温度关系密切,高温下的黏弹性行为要比常温下更加剧烈,在常温下需要较长时间才能实现的黏弹性行为可以在高温下通过较短时间实现。这就是说,改变温度尺度和改变时间的尺度是等效的,简称为时温等效性。符合该特性的材料称为热流变简单材料。如图2所示,对数坐标下的不同温度的松弛曲线可以通过参考温度 T_{ref} 的松弛曲线沿对数坐标轴直接平移一个位移因子 $\log \alpha_t$ 得到

$$\log \tau(T) = \log(\alpha_T) + \log \tau(T_{ref}). \quad (4)$$

位移因子一般采用 WLF (William-Landel-Ferry) 方程计算,表示为

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})}. \quad (5)$$

通过不同温度下玻璃的剪切松弛模量曲线拟合得到玻璃的 WLF 方程参数,如表2所示。

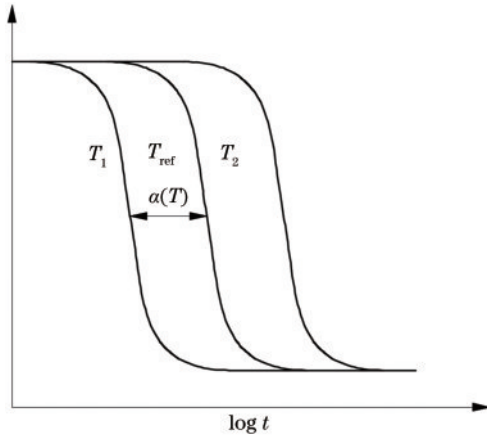


图 2 玻璃简单热流变特性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the simple thermo-rheological properties of glass

表 2 K-LCV-161 玻璃 WLF 方程参数

Table 2 Parameters of the K-LCV-161 glass WLF equation

Parameters of the WLF equation	
T_{ref}	470
C_1	2.07
C_2	5.49

3 仿真模型的建立

3.1 玻璃和模具的热机械参数

玻璃预形体材料选择低熔点光学玻璃 K-LCV-161。模具材料为铜镍合金 C71500, 兼具了镍的高硬度、耐高温性和耐磨性以及铜的易加工性, 并且在高温下依然能保持良好的力学性能。玻璃和模具的热机械特性参数如表 3 所示。

表 3 玻璃和模具材料的热机械特性

Table 3 Thermomechanical properties of glass and mold materials

Material property	KLCV-161	C71500
Young's modulus /MPa	45112	156000
Poisson's ratio μ	0.274	0.22
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3.26	8.94
Thermal conductivity $K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.661	29.4
Thermal expansion $\alpha / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	7.014 ($t \leq 426 \text{ }^\circ\text{C}$), 128.66 ($t > 426 \text{ }^\circ\text{C}$)	16.2

3.2 有限元模型的建立

由于整个模压过程在模压机成形室内完成, 无法对玻璃内部应力进行实时检测, 要掌握模压过程中玻璃的温度、应力分布实时变化规律, 借助有限元软件仿真是一个比较好的方法。由于子眼结构的存在, 曲面复眼结构无法简化为二维轴对称模型, 必须采用三维模型进行研究。本文使用非线性有限元软件 MSC.Marc 对复眼透镜模压过程的各子眼应力变化进行研究, 从而得到各阶段工艺参数对透镜质量的影响规律, 并对工艺参数进行优化。

玻璃预形体为直径 7 mm 球形预形体, 下模具复眼结构如图 3(a) 所示, 基底为半径 20 mm 球面, 子眼为非球面, 非球面参数如表 4 所示, 上模具曲面为半径 20 mm 球面。建立模压过程的三维仿真模型, 模具部分按照实际尺寸参数建模, 仅省略对模压过程没有影响的倒角等结构。

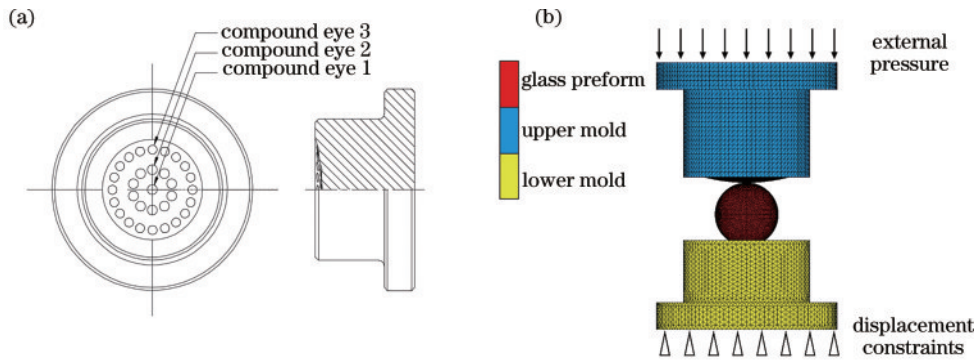


图 3 复眼结构及有限元模型边界条件示意图。(a) 下模具复眼结构; (b) 模型边界条件

Fig. 3 Schematic diagram of the compound eye and boundary conditions of the finite element model. (a) Schematic diagram of the lower mold compound eye structure; (b) model boundary conditions

$$y = \frac{x^2}{R \left[1 + \sqrt{1 - (K + 1) \frac{y^2}{R^2}} \right]} + Ay^4 + By^6. \quad (6)$$

根据仿真结果来看, 模型网格划分越粗, 与实际体积差别越大, 重划分后体积变化越大, 对于结果影响越

表 4 复眼非球面参数

Table 4 Aspheric parameters of compound eyes

Compound eye	R	K	A	B
Compound eye 1	1.2010	-0.9800	0.0340	0.0086
Compound eye 2	1.1530	-0.0028	-0.0390	-0.0310
Compound eye 3	1.0020	-0.9950	0.0590	0.0210

大,但是网格划分过细又可能带来计算过慢和结果不收敛等问题,因此,需要合理选择网格大小。玻璃预形体部分按照 0.2 mm 间隔布种子点,模具按照图纸建模,模具球面及子眼结构部分 0.2 mm 间隔布种子点,其余部分按 0.5 mm 间隔布种子点。模型采用前沿法四面体网格划分,采用曲率控制功能对曲面网格进行细化,为减少计算量,对模具网格采用系数设置为 1.4 的内部加粗,上模具划分 62673 个单元,下模具划分 121341 个单元,玻璃划分个 98446 个单元。单元类型

选择 134 号全积分单元。由于模压过程中,球形预形体产生很大变形,直接计算会导致单元畸变严重,无法得到合理的结果,因此,本文使用 MSC. Marc 软件的网格重划分功能对网格进行重划分,重划分准则选择 Patran 四面体网格重划分准则。如图 3(b) 所示,对模具下表面施加位移约束,上表面根据工况的不同分布施加模压力边界条件或者位移边界条件。

为了研究不同工艺参数对应力变化的影响,分别对模压、保压阶段进行仿真,仿真工艺参数如表 5 所示。

表 5 模压仿真工艺参数

Table 5 Process parameters for molding simulation

Group	Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Molding velocity $v / (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Molding pressure P / MPa	Holding pressure P / MPa	Holding time t / s
1	475,480,485,490	10	-	-	-
2	475,480,485,490	-	1.5	-	-
3	485	5,10,20,50	-	-	-
4	485	-	0.5,1.0,1.5,2.0	-	-
5	485	-	1.5	0.5,1.0	50
6	485	-	1.5	1.0	50,100,150

4 仿真结果分析

4.1 模压温度对各子眼应力的影响

曲面复眼透镜模压结束时应力分布如图 4 所示,透镜最大应力出现在变形量最大的透镜中心位置,最小应力出现在透镜边缘处,此处玻璃沿径向没有约束,有充

分的空间进行应力松弛。子眼 1 位于透镜中心,应力最大,子眼 1 到子眼 3 应力依次降低。透镜的上表面区域相对于存在子眼结构的下表面区域,应力分布更加均匀。不同模压温度下相同模压速率、模压力模压各子眼应力分布如图 5 所示,在模压温度范围内,模压温度越高,透镜应力越低。说明随着温度升高,杨氏模量和黏

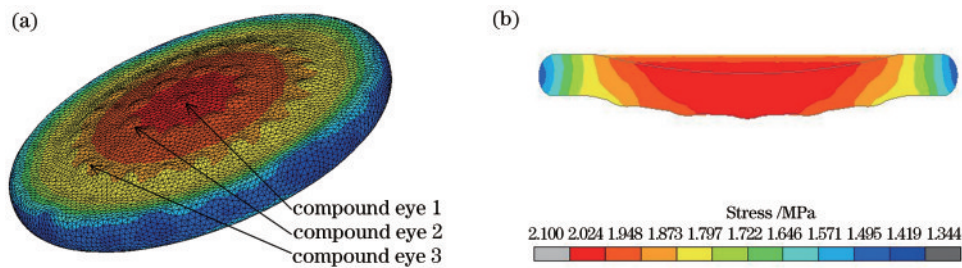


图 4 模压仿真结果。(a)示意图;(b)透镜截面应力分布云图

Fig. 4 Molding simulation results. (a) Diagram; (b) stress distribution for lens sections

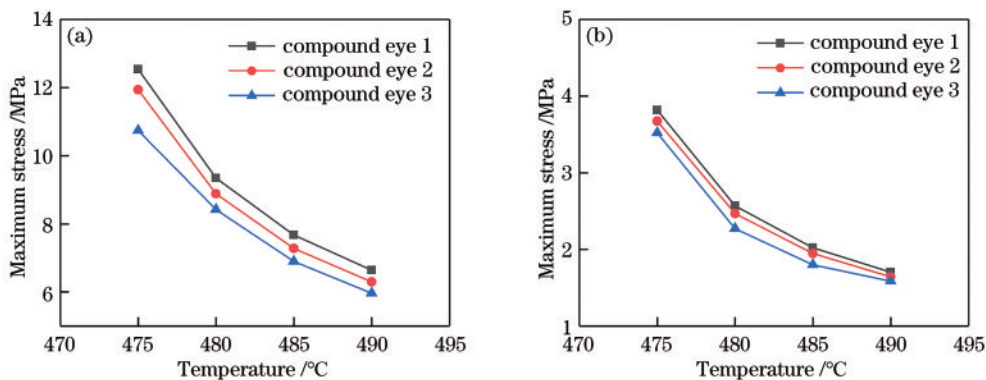


图 5 不同模压工况下应力-温度曲线。(a)恒模压速率、不同温度下各子眼应力;(b)恒模压力、不同温度下各子眼应力

Fig. 5 Stress-temperature curves for different molding conditions. (a) Stress in each sub-eye for different temperatures at constant molding velocity; (b) stress in each sub-eye for different temperatures at constant molding pressure

度降低,玻璃的流动性增强,应力松弛现象更加明显。不同温度下恒速率模压外加载荷-时间曲线如图 6(a)所示,相同模压速率不同温度下的外加载荷相差 955.05 N,在模压过程中,随着下压过程,玻璃预形体变形越来越困难,所需模压力也随之增加。不同温度下恒力模压位移-时间曲线如图 6(b)所示,相同模压力不同温度下位移相差 0.534 mm。同样,随着下压过程,玻璃预形体变

形越来越困难,相同模压力下模压速率逐渐降低。在恒定模压力的工况下,可以观察到玻璃预形体的形变是快速的弹性形变和蠕变的组合。温度越高,玻璃变形越容易,模压结果应力越小,恒定模压力工况下下压越快。但是,在温度过高的情况下,当玻璃接近软化点温度时,模具与玻璃容易发生黏附,导致脱模时对模具表面造成损伤,影响模具寿命。因此,选择模压温度为 485 °C。

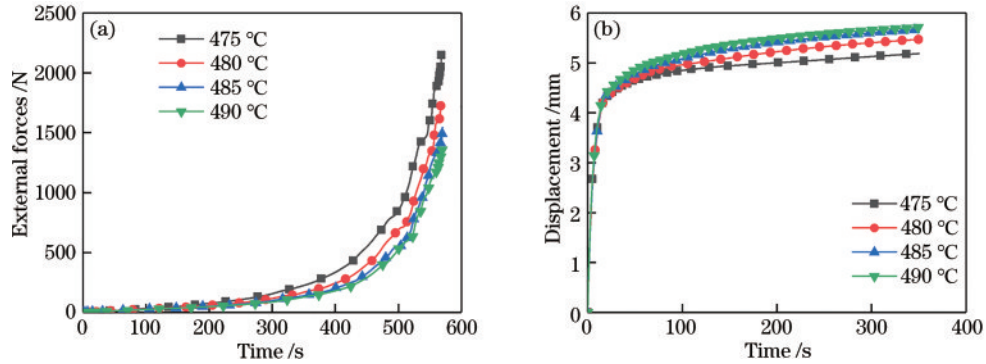


图 6 不同模压工况下模压工艺参数-温度曲线。(a) 10 μm/s 模压速率下不同温度外加载荷-时间曲线;(b) 1.5 MPa 模压力下不同温度位移-时间曲线

Fig. 6 Molding process parameters-temperature curves for different molding conditions. (a) External forces-time curves for different temperatures at 10 μm/s molding velocity; (b) displacement-time curves for different temperatures at 1.5 MPa molding pressure

根据结果可以看出,对于相同的下压量,恒力模压的结果要优于恒速率模压,需要的模压时间短,子眼应力更小且分布更加均匀。因此,需要对这两种模压方式的整个模压过程应力分布变化进行研究。

4.2 恒速率模压与恒模压力模压对比

选择 485 °C 下,恒速率模压和恒模压力模压两种工况,透镜应力-时间曲线如图 7(a)所示,应力-位移曲线如图 7(b)所示。恒模压力模压工况下,应力-时间曲线中应力快速增大的时间段与位移-时间曲线中近似瞬时弹性形变的部分相对应,应力-位移曲线中最大应力的位移对应近似瞬时弹性形变的下压量约为

4.2 mm,此时透镜应力达到最大值,在此之前,恒速率模压的透镜应力小于恒力模压。当下压量为 4.2 mm 时,根据外加载荷-时间曲线可知,外加载荷为 245.8 N,通过上模具面积可以换算得出压强为 0.783 MPa,在较小的模压力和较低的模压速率的情况下,恒速率模压工况的应力较小,然而随着下压量继续增加,透镜的变形越来越困难,为保持固定下压速率,所需要的外加载荷会急剧增加,导致应力快速增大,同时,过大的外加载荷阻碍了应力松弛的进行,导致透镜应力一直增加,而恒模压力工况则有较为明显的应力松弛过程。

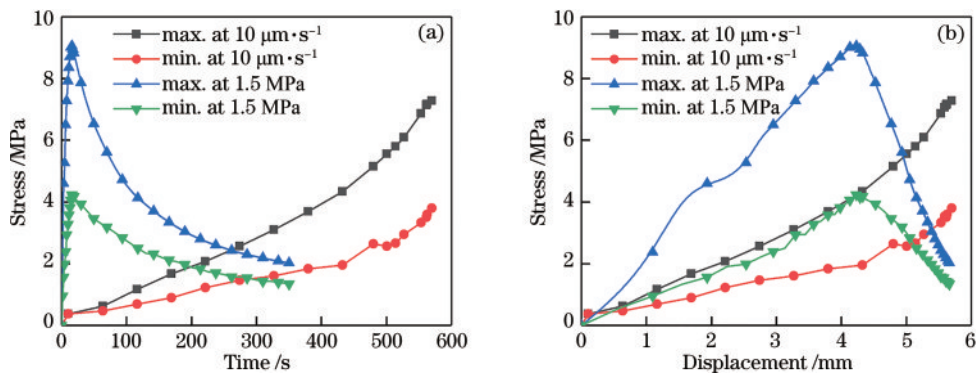


图 7 两种模压工况下应力变化过程对比曲线。(a)两种模压工况下应力-时间曲线;(b)两种模压工况下应力-位移曲线

Fig. 7 Comparative curves of the stress change process under two molding conditions. (a) Stress-time curves for two molding conditions; (b) stress-displacement curves for two molding conditions

对于使用球形预形体模压的情况:当变形量较大时,采用恒模压力模压的效果要优于恒速率模压;当变形量较小时,恒速率模压效果更好。对于预形体变形很

大的恒速率模压工况,在模压阶段后期为了保证模压速率恒定又会导致外力过大,对模具寿命造成影响,从而阻碍了应力松弛过程,导致残余应力过大。因此,本

文选择恒定模压力的模压方式。

4.3 模压速率对各子眼应力的影响

在模压温度 485 °C、不同模压速率下,各子眼应力如图 8 所示,模压速率越快,变形越剧烈,玻璃应力松弛时间不够,导致透镜应力过大,模压速率对每个子眼

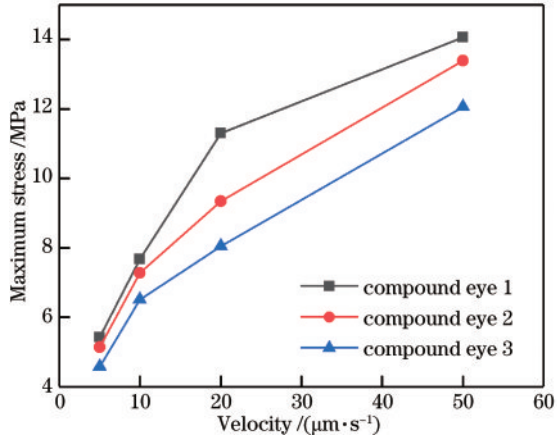


图 8 不同模压速率下各子眼应力

Fig. 8 Stress in each sub-eye at different molding velocities

影响程度基本相同。外加载荷-时间曲线如图 9(a)所示,外加载荷-位移曲线如图 9(b)所示,对二者进行对比可以看出,不同速率下外加载荷随下压位移的变化趋势是一致的,说明外加载荷由玻璃的变形大小直接决定。模压速率越高,所需外加载荷越大,过大的外加载荷也会对模具寿命造成影响。当模压速率过低时,玻璃的变形导致生产效率过低。综合考虑,在只能采用恒速率模压的情况下,选择模压速率为 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

4.4 模压力对各子眼应力的影响

在模压温度 485 °C、不同模压力下,各子眼应力如图 10(a)所示,模压力越高,玻璃变形越快,相同模压时间下的应力越大,模压力对各子眼应力影响程度基本相同。不同模压力模压位移-时间曲线如图 10(b)所示,模压力越大,下压速率越快,模压时间越短。模压力恒定后,随着模压过程的进行,模压速率逐渐降低,但是在模压力较小的情况,即使继续延长模压时间,仍然无法达到所需要的下压量,导致透镜厚度增加,无法达到设计的光学性能。所以,在保证能达到所需下压量的情况下,应选择较小的模压力(1.5 MPa)。

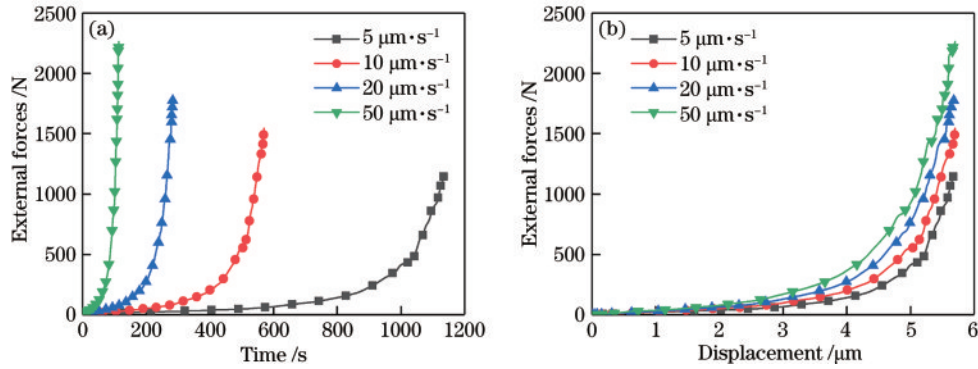


图 9 不同模压速率外加载荷曲线。(a)外加载荷-时间曲线;(b)外加载荷-位移曲线

Fig. 9 External force-time curves for different molding velocities. (a) External force-time curves; (b) external force-displacement curves

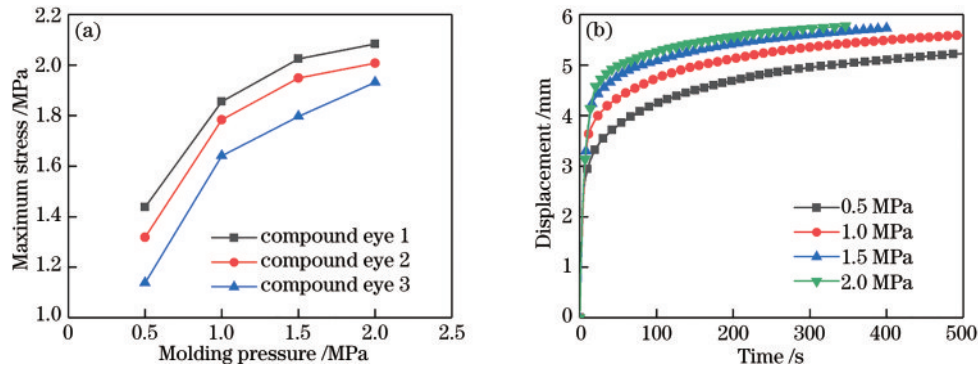


图 10 不同模压力对各子眼应力的影响。(a)各子眼应力;(b)位移-时间曲线

Fig. 10 Effects of different mold pressures on the stress of each sub-eye. (a) Stress in each sub-eye; (b) displacement-time curves

4.5 保压阶段仿真结果分析

保压阶段不同保压力下的上模具位置-时间曲线如图 11(a)所示。当保压力过低时,在保压阶段开始时会出现回弹现象,对透镜面型精度、微结构填充率造成影响。不同保压力保压阶段各子眼应力-时间曲线

如图 11(b)所示,保压力越小,应力松弛越快,在较大的保压力下可以通过延长保压时间来改善保压效果。随着保压过程的进行,应力下降的速率变慢,因此为提高生产效率,需要合理控制保压时间。综合考虑,选择保压力为 1 MPa,保压时间为 100 s。

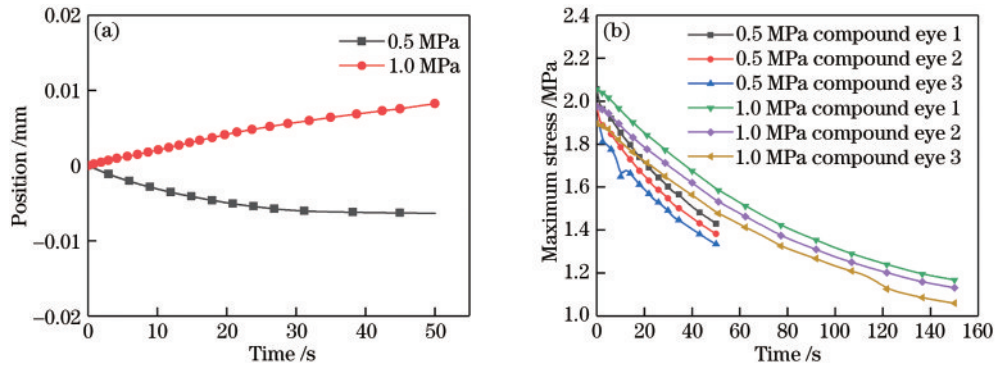


图 11 保压结果曲线。(a)上模具位置-时间曲线;(b)最大应力-时间曲线

Fig. 11 Results curves of holding phase. (a) Position of the upper mold-time curves; (b) maximum stress-time curves

5 结 论

本文通过对曲面复眼透镜模压过程进行有限元仿真,得到了以下结论:

1) 透镜内部应力分布受变形量影响,越靠近透镜中心位置,变形量越大,子眼应力越高,越靠近边缘位置的子眼应力越低,没有子眼结构的表面应力分布比子眼结构表面应力分布更加均匀。

2) 模压温度直接影响玻璃的松弛时间,对各个子眼应力有较大影响,模压过程中在保证玻璃和模具不发生黏附的情况下,应尽量选择较高模压温度。

3) 在模压过程中玻璃预形体变形较大的情况下,选择恒力模压更合适。恒速模压会导致模压阶段后期外力过大,阻碍应力松弛过程和降低模具寿命,各子眼应力差值更大。模压速率越高,各子眼应力越大,速率对各子眼应力影响程度基本相同,且所需外加载荷受变形量和模压速率影响。恒力模压工况下,模压力对各子眼应力影响程度基本相同,保证下压量的情况下可选择较小的模压力来降低各子眼应力。

4) 在保压阶段,为改善应力松弛效果,可以选择降低保压力或者延长保压时间,但是过低的保压力会造成回弹,影响子眼填充效果。因此,保压力对每个子眼填充效果的具体影响规律还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 房丰洲,张皓洋,宋乐,等. 仿生复眼系统制造与应用研究进展[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(6): 434-442.
Fang F Z, Zhang H Y, Song L, et al. Development of fabrication and application of artificial compound eye system[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(6): 434-442.
- [2] 巩宪伟,鱼卫星,张红鑫,等. 仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 34-45.
Gong X W, Yu W X, Zhang H X, et al. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 34-45.
- [3] Chen M J, Xiao Y, Tian W L, et al. Theoretical and experimental research on error analysis and optimization of tool path in fabricating aspheric compound eyes by precision micro milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 558-566.
- [4] Chen J W, Cheng J Y, Zhang D P, et al. Precision UV imprinting system for parallel fabrication of large-area micro-lens arrays on non-planar surfaces[J]. Precision Engineering, 2016, 44: 70-74.
- [5] Lian G G, Liu Y S, Tao K K, et al. Fabrication and characterization of curved compound eyes based on multifocal microlenses[J]. Micromachines, 2020, 11(9): 854.
- [6] Song Y M, Xie Y Z, Malyarchuk V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. Nature, 2013, 497(7447): 95-99.
- [7] 尹韶辉,霍建杰,周天丰,等. 小口径非球面透镜模压成形加热加压参数仿真[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(1): 35-39.
Yin S H, Huo J J, Zhou T F, et al. Simulation of the heating and pressing parameters of micro aspheric lens molding process[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(1): 35-39.
- [8] 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]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1967-1985.
- [9] Yi A Y, Tao B, Klocke F, et al. Residual stresses in glass after molding and its influence on optical properties[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 402-406.
- [10] Su L J, Yi A Y. Finite element calculation of refractive index in optical glass undergoing viscous relaxation and analysis of the effects of cooling rate and material properties[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2012, 3(3): 263-274.
- [11] Zhou T F, Yan J W, Masuda J, et al. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4484-4489.
- [12] 余剑武,李婵,尹韶辉,等. 微V形槽玻璃元件模压成

- 形有限元应力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 8-14.
- Yu J W, Li C, Yin S H, et al. Finite element analysis on stress of micro V-groove components in GMP[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(8): 8-14.
- [13] Sarhadi A, Hattel J H, Hansen H N. Three-dimensional modeling of glass lens molding[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2015, 6(2): 182-195.
- [14] Vu A, Helmig T, Vu N, et al. Numerical and experimental determinations of contact heat transfer coefficients in nonisothermal glass molding[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 103(2): 1258-1269.
- [15] 付秀华, 王海峰, 张静, 等. 模压硫系玻璃元件红外增透膜的研制[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2031003.
- Fu X H, Wang H F, Zhang J, et al. Development of infrared antireflection coating for molded chalcogenide glass elements[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2031003.
- [16] Zhang Y Y, Yin S H, Liang R G, et al. New testing and calculation method for determination viscoelasticity of optical glass[J]. Optics Express, 2020, 28(1): 626-640.