

非球面光学玻璃透镜的模压仿真研究

倪佳佳¹ 范玉峰² 陈文华¹

(¹浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310023)
(²浙江科技学院机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要 利用非线性有限元软件 MSC. Marc 建立非球面光学玻璃透镜模压的有限元模型,选择广义 Maxwell 模型作为粘弹性模型输入,设定边界条件,进行了玻璃加热和模压阶段的仿真,查看并分析其温度及应力变化。观察了接触点上的应力情况,得知等效应力随曲率的增减而增减。模拟了 4 组温度下透镜模压的应力应变情况,对结果进行分析,得知等效应力随着温度的升高而减小,应变随着温度的升高而增大,580 ℃下的应力应变效果最好。模拟了 3 组模压速率下的应力情况,得知等效应力随着速率的增大而增大。但是过高的温度或过低的速率都将引起不必要的浪费,0.1 mm/s 时模压效果最佳。

关键词 光学制造;玻璃模压;等效应力;应变;有限元方法;粘弹性

中图分类号 TH164 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.032201

Simulation Study of Molding of Aspherical Optical Glass Lens

Ni Jiajia¹ Fan Yufeng² Chen Wenhua¹

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China

² School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A finite element model of optical glass aspherical lens is constructed with the nonlinear finite element software MSC. Marc. The general Maxwell model is chosen as the viscoelasticity model and the boundary conditions are set, the heating and pressing processes are simulated, and their temperature and stress are observed and analyzed. The equivalent stress at the touching point is observed, and the result is that it increases when the curvature increases, and decreases when the curvature decreases. Pressing processes at 4 different temperatures are simulated, and their stress and strain effects are compared. The result shows that the equivalent stress decreases when the temperature increases, and the equivalent total strain increases when the temperature increases. 580 ℃ is the optimized temperature. Stresses at 3 different molding velocities are simulated, and the result shows that the equivalent stress increases when the velocity increases. But high temperature or low velocity causes unnecessary waste. 0.1 mm/s is the optimized velocity.

Key words glass mold pressing; equivalent stress; strain; finite element method (FEM); viscoelasticity

OCIS codes 220.1250; 220.4000; 220.4610

1 引言

近年来,在高像素数照相机及高密度 DVD 读取市场需求的驱动下,发展低成本、高精度的非球面光学元件的成型技术已成为市场竞争中的关键^[1]。用传统的研磨技术生产非球面透镜过程繁杂,难度高,效率

收稿日期: 2012-10-29; **收到修改稿日期**: 2012-12-28; **网络出版日期**: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51005212)、浙江公益性技术应用研究计划(2011C21003)和中国科学院空间激光通信及检测技术重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 倪佳佳(1987—),女,硕士研究生,主要从事机械设计及其理论方面的研究。E-mail: 648190917@qq.com

导师简介: 陈文华(1963—),男,博士,博士生导师,主要从事机械设计与制造等方面的研究。

E-mail: chenwh@zstu.edu.cn

低下;而玻璃模压技术是把软化的玻璃放于高精度的模具中,在加温加压和无氧的条件下,一次性直接模压出达到使用要求的光学零件,无需抛光打磨,工艺流程简单,生产效率高,而且可反复使用,减短生产周期。在过去,工程师们往往通过试模压-测量面形-补偿模具面形-再试模压的模式进行,这样经常会造成很大的误差,而且表面精度不高;若反复实验,不仅浪费时间,还浪费金钱。近年来,随着有限元仿真软件的开发和发展,使用有限元仿真玻璃模压过程,利用仿真结果指导实验的应用也越来越多。

Zhou 等^[2]研究发现,在超过玻璃转变温度几十度的情况下,玻璃具有明显的粘弹性性能,他们还通过单轴压缩实验研究了应力、温度和应变速率值之间的关系。通过与 Maxwell、Kelvin、Burgers 3 个粘弹性模型进行拟合,得出 Burgers 模型的有效性并获得相应的杨式模量和粘度。用 Marc 软件对模压工艺进行有限元仿真,得到温度分布、应力应变和应变速率的变化,并反过来预测玻璃的变化。

之后,他们用平板单轴压缩玻璃圆柱实验研究了玻璃的粘弹性性能,通过对 Burgers 模型和 Maxwell 模型的曲线拟合分别获得了玻璃的弹性模量和粘度。对玻璃模压工艺进行有限元仿真,使得应力/应变分布可视化,从而可以预测玻璃中残余应力的分布^[3]。

尹韶辉等^[4]研究了不同的温度和速率对玻璃模压工艺的影响,得出残余应力随着速率的减小而减小、随着温度的增长而降低的结论。

以上研究都针对整个模压过程,包括加热、模压和退火冷却,分析结果的残余应力等情况。模压阶段是玻璃模压工艺最为关键的一步,它直接影响到成型透镜的形状和精度。本文采用有限元方法(FEM)对模压阶段的过程进行仿真,查看其变形,再利用该有限元模型研究成形参数对玻璃在模压时的影响并进行理论分析。

2 玻璃透镜模压成型方法

玻璃透镜模压成型过程如图 1 所示,可分为以下步骤。1) 加热:把玻璃与预形体放入模具中,合上套有石英玻璃管的模压腔,充入 N_2 ,之后用红外线加热模具和玻璃至模压温度,如图 1(a)所示。2) 挤压:固定上模,驱动下模向上直至两模合并。软化的玻璃受到挤压,填满整个模具,如图 1(b)所示。3) 退火:模具在较低的挤压载荷下闭合,并在缓慢的冷却速率下冷却,直至达到玻璃的退火点以下。该过程是为了消除内部应力,如图 1(c)所示。4) 冷却:撤销挤压载荷,成型透镜和模具快速冷却至室温,此时取出透镜,如图 1(d)所示。

在模压过程中,需要考虑很多的参数,如模压温度、挤压载荷和模压速率等,而不同的玻璃又对应不同的参数,这样才能制造出精密的透镜。温度和挤压速率在模压阶段中十分重要,直接影响了镜片成形和工艺时间。

因此本文采用 FEM 仿真透镜的模压过程,研究成形参数对工艺的影响,并进行参数优化。

3 玻璃模压理论

玻璃属于非晶体,在室温下呈现固体状态,既硬又脆;在转变点以上软化点(SP)以下时,呈现显著的粘弹性状态;在软化点以上时,又呈现出液体状态。在模压温度范围内,玻璃的变形为粘弹性变形,表现为蠕变和松弛。蠕变是粘弹性材料受到一个突加恒定应力的作用,其应变随时间逐渐增加的一种力学行为;松弛是粘弹性材料受到一个突加恒定应变的作用,其应力随时间逐渐减小的一种力学行为^[5]。工程上常常使用粘弹性力学模型来描述蠕变和松弛行为,常见的有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型和广义的 Maxwell 模型。实验表明广义 Maxwell 模型最能反映玻璃模压和退火阶段的变形特征^[6]。图 2 为五单元广义 Maxwell 模型,其中阻尼器代表粘性行为,弹簧表示弹性行为。本文只研究其模压时的变形,模压时的应

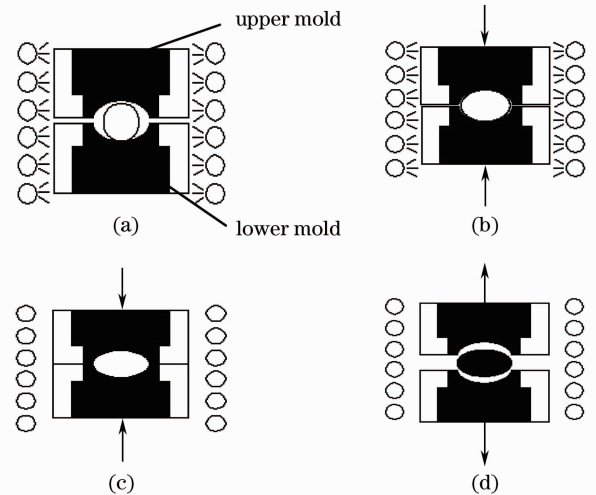


图 1 玻璃透镜模压成型方法
Fig. 1 Molding process of glass lens

变包括蠕变应变和热应变,其中主要为蠕变应变。用广义 Maxwell 模型来描述其蠕变,蠕变应变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 \omega_\infty}{E_\infty} + \sigma_0 \sum_{i=1}^n \omega_i \left(\frac{1}{E_i} + \frac{t}{\eta_i} \right), \quad (1)$$

式中 $n = 5$, E_i 、 η_i 、 ω_i 分别为杨氏模量、粘度和权重因子, σ_0 为 $t = 0$ 时给定的应力值。

应力和应变的方程为

$$\sigma = F/S_t, \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (3)$$

式中 F 为模压力, S_t 为面积, l 和 l_0 分别为变化后的长度和原始长度。

粘弹性材料在高温时应力松弛较快,在低温时较慢。其温度对粘弹性的影响用转换函数 $A(T)$ 来表示。本模型采用的转换函数是 Tool-Narayanaswamy 转换函数^[6]:

$$\ln A(T) = \frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right), \quad (4)$$

式中 T_{ref} 为参考温度, T 为模压过程中的实际温度, H 为活化能, R 为理想气体常量。

4 玻璃模压的有限元仿真及结果

4.1 有限元模型的建立

有限元仿真用 MSC. Marc 软件进行, MSC. Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件,具有极强的结构分析能力,可以完成各种线性 and 非线性结构分析^[7]。采用 Marc 软件来模拟玻璃的模压过程,从而得出最优的成型温度和模压速率。本文所采用的玻璃毛坯是 L-BAL42^[6],模具的材料是 WC J05^[6],它们的机械特性和热力学特性如表 1 和表 2 所列。模压所采用的有限元模型是二维轴对称模型,如图 3 所示。该模型是对称模型,取 1/4,上模为抛物线球面 $y = x^2/8$,下模为平面,以 mm 为单位;玻璃半径为 1.1 mm。网格划分采用四边形单元,用三单元广义 Maxwell 模型作为粘弹性变形模型。玻璃为粘弹性体,模具模仁为弹性体。模拟时不考虑摩擦以及玻璃和模具之间的热交换。上模固定,下模以一定速率向上运动。

表 1 玻璃 L-BAL42 的热力学和机械性能参数

Table 1 Thermodynamic and mechanical properties of glass L-BAL42

Property	Value
Transition temperature T_g /°C	506
Yielding temperature A_i /°C	538
Softening point SP/°C	607
Thermal expansion coefficient α /(10^{-6} /°C)	7.2(-30 °C ~ 70 °C)
	8.8(100 °C ~ 300 °C)
Thermal conductivity κ /[W/(m·°C)]	1.028
Density d /(g/cm ³)	3.05
Specific heat C_p /[J/(kg·°C)]	750
Modulus of elasticity E /(10^8 N/m ²)	89100
Modulus of rigidity G /(10^8 N/m ²)	35700
Poisson's ratio ν	0.247

表 2 模具 WC J05 的热力学和机械性能参数

Table 2 Thermodynamic and mechanical properties of mold WC J05

Property	Value
Modulus of elasticity E /(10^8 N/m ²)	650000
Poisson's ratio ν	0.2
Density ρ /(kg/m ³)	15200
Thermal expansion coefficient α /(10^{-6} °C ⁻¹)	4.8
Thermal conductivity κ /[W/(m·°C)]	97

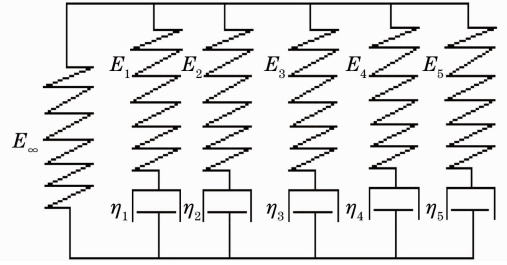


图 2 五单元广义 Maxwell 模型

Fig. 2 5-pair general Maxwell model

4.2 热边界条件和摩擦的设立

在模压之前,玻璃和模具的温度已达到一致,此时它们之间没有热量传递。热边界条件为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h_M(T - T_M), \quad (5)$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = h_N(T - T_N), \quad (6)$$

式中 κ 为玻璃热导率, h_M 为模具与玻璃间的传递系数, T 为玻璃表面温度, T_M 为模具温度, h_N 为玻璃与氮气间的传递系数, T_N 为氮气温度。 h_M 与模具、玻璃的接触面压力、接触面温度、摩擦系数等因素有关; h_N 与氮气流动速度、流动方向和型腔几何形状等因素有关。通常取 $h_M = 2800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $h_N = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[8]。玻璃和模具之间的摩擦可以看成恒剪切摩擦力,其表达式为

$$f_s = m\tau, \quad (7)$$

式中 f_s 为剪切摩擦力, τ 为剪切屈服应力, m 为摩擦因数。在这次模拟中,因为玻璃与模具之间为粘性接触,所以 m 为 1.0^[8]。

4.3 有限元仿真结果

在模压过程中,设定较高温度可缩短加压时间及降低负荷,但粘黏问题较严重,模具寿命较短;若设定较低温度,由于玻璃的粘度较高,必须加以高压,但是高压容易导致模具变形,破坏涂层,从而降低模具的使用寿命^[9]。所以必须选择合适的模压温度。在转化点(T_g)温度以下时,素材破坏而无法成形。在变形点(A_i)以上、软化点 SP 附近时,变形能量大而容易成形。但若太靠近 SP,又将出现玻璃在自重下变形模式的进程难以控制的问题,所以一般取高于 A_i 点 $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 为模压温度。选取加热温度为 580°C ,模压速率为 0.1 mm/s ,观察并分析透镜在该加热和模压过程中的变化。

从图 4 可以看出,加热开始时,模具先达到指定温度 580°C ,然后透镜从与下模的接触点开始慢慢加热。加热完成后,模具和玻璃达到同一温度。

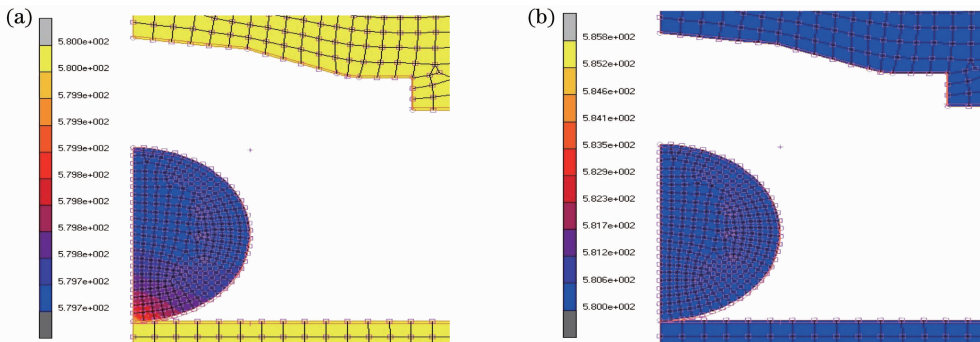


图 4 加热过程的温度分布。(a)加热 34 s 之后的温度分布;(b)加热完成后的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the heating process. (a) After heating for 34 s; (b) heating completed

图 5(a)和(b)分别是模压 8.5 s 和 9.89 s 时玻璃的应力情况。从图中可以看出,玻璃内部的应力从中间慢慢向边缘转移,这说明玻璃内部的材料流动是由中心向外的。玻璃透镜上表面的应力比下表面的大,这可能是因为上表面的曲率较大,接触的面积较小,也可能是由玻璃上表面与上模瞬间接触产生的。在透镜右边缘,由于玻璃与模具的瞬间接触,产生了一个瞬间应力,导致该区域产生亮点。透镜底部中心的应力几乎为 0。模具的应力明显大于玻璃透镜的应力,这就意味着在玻璃模压工艺中,模具需要承受较大的力,从而要求模具具有较好的强度、硬度等力学性能。

4.4 玻璃与上模接触点的等效应力

取玻璃球与上模的第一个接触点 A 点(如图 6 所示),观察其在模压时的应力变化,如图 7 所示。从 A 点刚接触上模到非球面的拐点,应力都是增大的,而到达拐点之后应力有所减小,模压完成后应力最小,这是

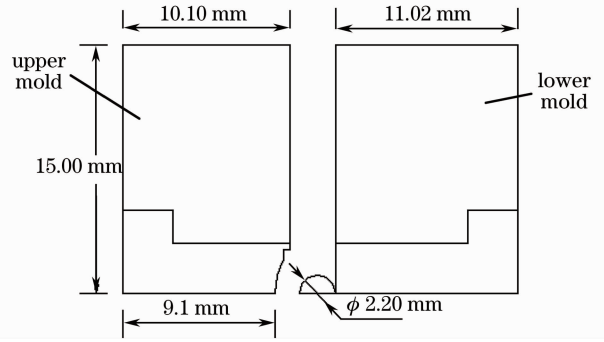


图 3 L-BAL42 的模压的有限元模型

Fig. 3 FEM model of L-BAL42 molding

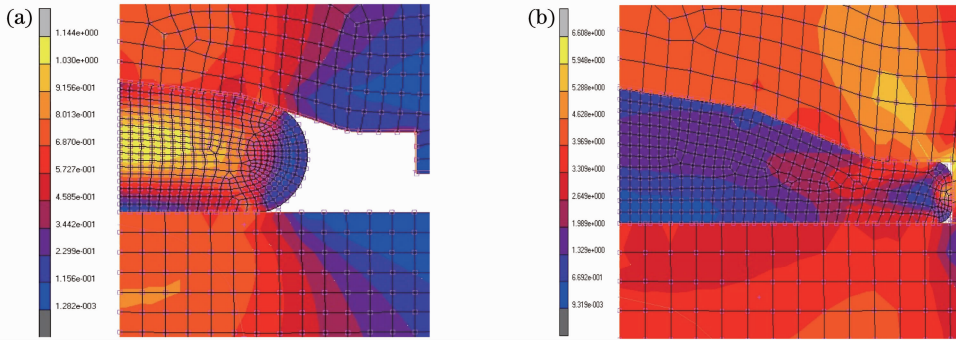


图 5 模压时的应力分布。(a)模压 8.5 s 后;(b)模压 9.89 s 后

Fig. 5 Stress distribution in the pressing process. (a) After pressing for 8.5 s; (b) after pressing for 9.89 s

由于非球面的曲率在慢慢增大,接触面很小, S_t 较小,由(2)式可知,应力随着面积的减小而增大。此后应力开始减小是因为边缘的几个节点处于平面区域,该区域变形相对较小,接触面积较大,所以应力较小。

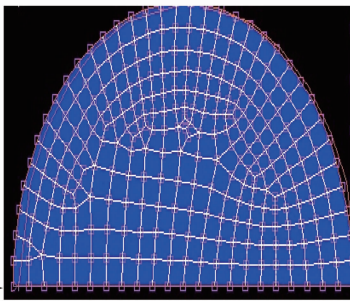


图 6 观察点 A 示意图

Fig. 6 Observation point A

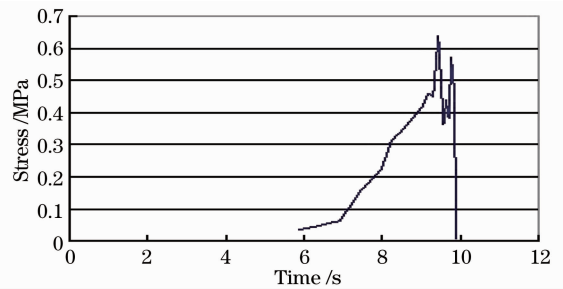


图 7 A 点的时间-等效应力变化图

Fig. 7 Plot of equivalent stress at different time at the point A

5 成型参数的讨论

温度和速率是模压阶段最关键的两个因素,直接影响到成型透镜的形状和精度,还有加工工艺的时间和成本。为了研究不同的温度对模压的影响,选取了 560 °C、570 °C、580 °C 和 590 °C 4 个温度进行模压,模压速率为 0.1 mm/s。

5.1 不同温度、相同速率下的比较

4 个温度下的应力分布情况、最大应力变化及应变分布情况、最大应变变化分别如图 8、表 3、图 9 和表 4 所示。

表 3 不同温度下的最大应力

Table 3 Values of highest stress at different temperatures

Temperature / °C	Highest stress / MPa
560	8.868
570	8.250
580	6.608
590	5.984

表 4 不同温度下的最大应变

Table 4 Values of highest strain at different temperatures

Temperature / °C	Highest strain / MPa
560	1.528
570	1.535
580	1.487
590	1.568

从以上结果可以看出,应力随着温度的升高而减小,应变随着温度的升高而变大。这是因为随着温度的升高,玻璃内部分子链断裂,玻璃材料的流动性增强,玻璃的粘度越来越低,所以模压所需的时间减小^[10]。

从玻璃处于模压阶段的蠕变方程(1)式中得知,应变随着温度的升高而变大。应变变大,由应变方程(3)式可知 l 变大,所以 S_t 变大,根据应力方程(2)式可知,应力就小。但是 $590\text{ }^\circ\text{C}$ 靠近软化点,这会导致模具耗损太大从而降低模具使用寿命,而且玻璃与模具的接触面会产生较严重的黏着问题。所以 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 是最佳的模压温度。

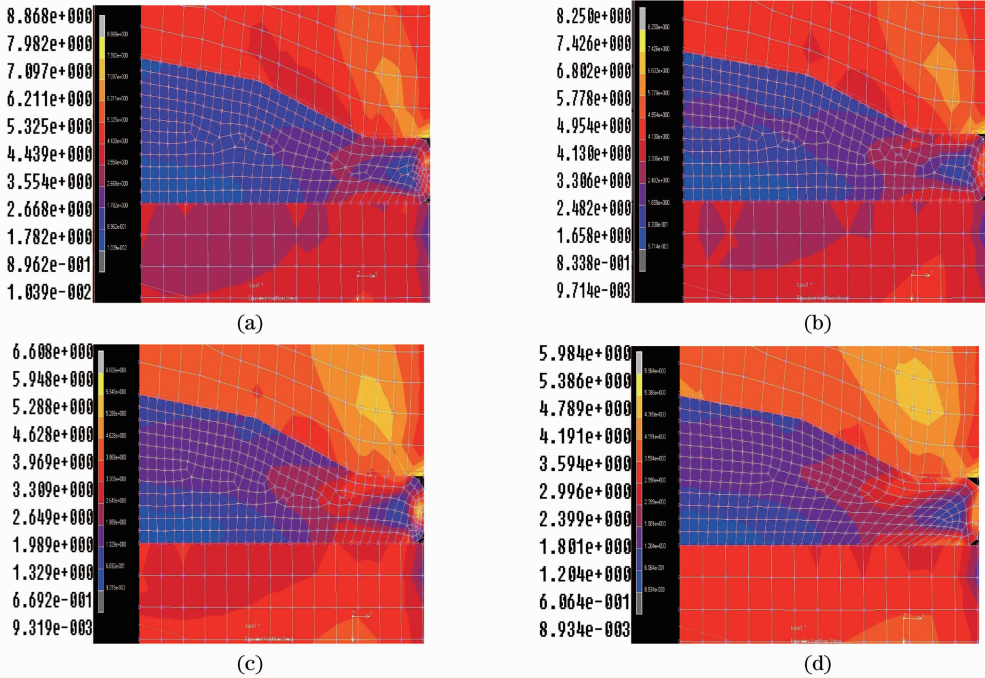


图 8 不同温度、相同速率(0.1 mm/s)下模压之后的应力分布情况。(a) $560\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $570\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $580\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $590\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 8 Stress distributions after molding at different temperatures when molding pressing is implemented with the same velocity of 0.1 mm/s. (a) $560\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $570\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $580\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $590\text{ }^\circ\text{C}$

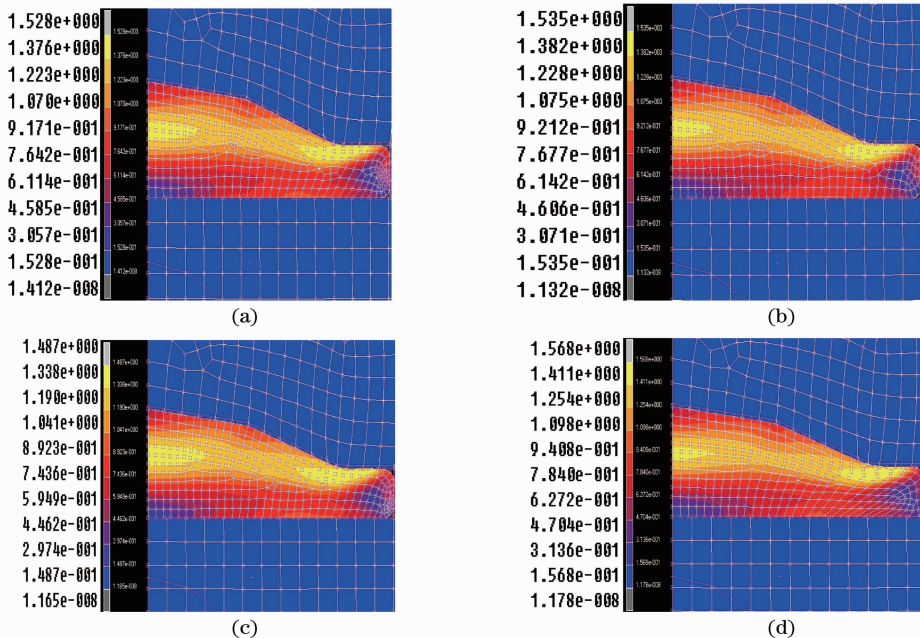


图 9 不同温度、相同速率下的模压之后的应力分布情况。(a) $560\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $570\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $580\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $590\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 9 Stress distributions after molding at different temperatures when molding pressing is implemented with the same velocity. (a) $560\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $570\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $580\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $590\text{ }^\circ\text{C}$

5.2 不同速率、相同温度下的比较

基于上述研究,模拟了在 580 °C 的条件下速率对于模压的影响,分别采用 0.05 mm/s、0.1 mm/s 和 0.15 mm/s。不同速率下的应力分布情况如图 10 所示,最大应变变化如表 5 所示。

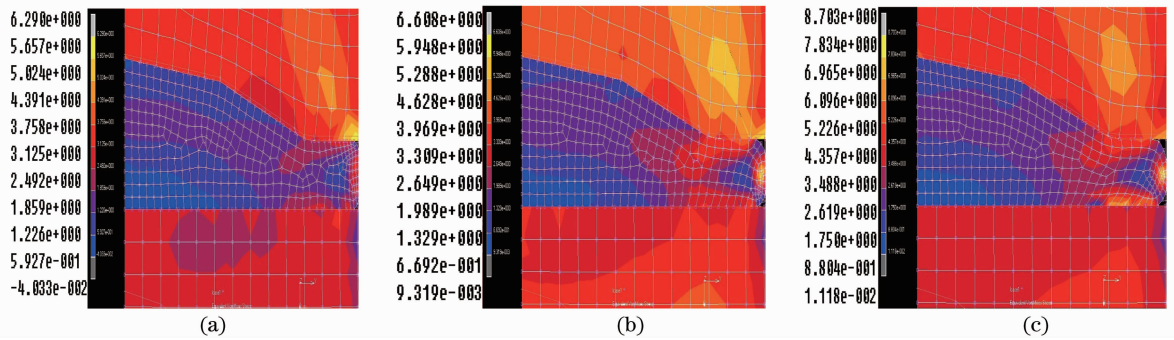


图 10 相同温度(580 °C)、不同速率下模压之后的应力分布情况。(a) 0.05 mm/s; (b) 0.1 mm/s; (c) 0.15 mm/s

Fig. 10 Stress distributions after molding with different velocities when molding pressing is implemented at the same temperature. (a) 0.05 mm/s; (b) 0.1 mm/s; (c) 0.15 mm/s

表 5 相同温度不同速率下的最大应力

Table 5 Values of the highest stress with different velocities

Velocity /(mm/s)	Highest stress /MPa
0.05	6.290
0.1	6.608
0.15	8.703

从上述结果可以看出,最大等效应力随着速率的增大而增大。这是因为在模压力、温度即粘度相同的情况下,随着模压速率的增大,模压所需的时间减少,根据玻璃在模压时的蠕变方程(1)式可以得出,此时蠕变应变变小。应变变小,由应变方程(3)式知 l 变小,所以 S_i 减小,根据应力方程(2)式可以得到,在给定的模压力下,应力就会增大。3 个速率下,0.05 mm/s 的时间最长,0.15 mm/s 的时间最短。速率过慢大大浪费了时间和金钱,过快则容易引起较高的应力。综上所述,0.1 mm/s 的模压速率效果最好。

6 结 论

在选择了粘弹性模型之后,用 MSC. Marc 软件进行了建模和模压仿真,得到如下结论:玻璃边缘的应力比中心的大,透镜底部中心应力几乎为 0,这就说明玻璃内部的材料流动是由中心向外的。玻璃透镜上表面的应力比下表面的大,这可能是由于上表面的曲率较大,接触的面积较小引起的。选取了观察点,考察其在模压阶段的应力变化。在开始模压时,上模的表面曲率由大变小,导致接触面由小变大,所以该点上的应力呈先增后减的趋势。在模拟了 560 °C、570 °C、580 °C 和 590 °C 4 个温度的模压情况后,得出在 4 个温度下,随着温度的增加,最大等效应力减小,应变变大。考虑模具的磨损与接触面间的黏着问题,580 °C 是最佳温度。在此基础上,模拟了模压速率为 0.05、0.1、0.15 mm/s 时的模压,通过比较玻璃和模具的应力之后,得出随着速率的增加,最大等效应力增加。但是过慢的模压速率会引起不必要的浪费,过快的模压速率会引起较高的应力集中。所以 0.1 mm/s 是最佳模压速率。

参 考 文 献

- Xin Qiming. Trends of optical plastic aspheric technologies[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 11~16
辛企明. 光学塑料非球面技术的发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(12): 11~16
- Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Tsunemoto Kuriyagawa. Evaluating the viscoelastic properties of glass above transition temperature for numerical modeling of lens molding process[C]. *SPIE*, 2008, **6624**: 662403
- Tianfeng Zhou, Tsunemoto Kuriyagawa, Jiwang Yan *et al.*. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(9): 4484~4489

- 4 Yin Shaohui, Wang Yufang, Zhu Kejun *et al.*. Numerical simulation of ultraprecision glass molding for micro aspherical glass lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2021~2024
尹韶辉, 王玉方, 朱科军 等. 微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟[J]. 光子学报, 2010, **39**(11): 2021~2024
- 5 Zhang Yitong. Theory of Thermoviscoelasticity[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002
张义同. 热粘弹性理论[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002
- 6 Tianfeng Zhou. Research on High-Precision Glass Molding Press for Optical Elements[D]. Japan: Tohoku University, 2009. 1~137
- 7 Yin Shaohui, Jin Song, Zhu Kejun *et al.*. Stress analysis of compression molding of aspherical glass lenses using finite element method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(10): 111~115
尹韶辉, 靳松, 朱科军 等. 非球面玻璃透镜模压成型的有限元应力分析[J]. 光电工程, 2010, **37**(10): 111~115
- 8 Yin Shaohui, Huo Jianjie, Zhou Tianfeng *et al.*. Simulation of the heating and pressing parameters of micro aspheric lens molding process[J]. *J. Hunan University (Natural Science)*, 2011, **38**(1): 35~39
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
- 9 Jiwang Yan, Takashi Oowada, Tianfeng Zhou *et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2009, **209**(10): 4802~4808
- 10 Jiwang Yan, Tianfeng Zhou, Jun Masuda *et al.*. Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis[J]. *Precision Engineering*, 2009, **33**(2): 150~159