

# 基于有限元仿真的硫系玻璃模压工艺参数优化

刘学儒<sup>\*\*</sup>, 薛常喜<sup>\*</sup>

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 基于硫系玻璃材料  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的热机械特性,建立了模压工艺模型,仿真模拟了模压温度、摩擦系数及模压速率对硫系玻璃材料模压成型后等效应力的影响。与 L-BAL42 材料的模压仿真数据进行对比,讨论了硫系玻璃与传统可见光玻璃在模压工艺上的区别,并优化了模压工艺参数。研究表明,随着模压温度的升高、摩擦系数和模压速率的降低,材料模压成型后的等效应力减小。与对照材料相比,硫系材料  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  最适合通过改变模压速率来改变等效应力。

**关键词** 光学制造; 玻璃模压工艺; 等效应力; 有限元分析; 硫系玻璃

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082203

## Optimization of Molding Process Parameters of Chalcogenide Glass Based on Finite Element Simulation

Liu Xueru<sup>\*\*</sup>, Xue Changxi<sup>\*</sup>

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Based on the thermodynamic properties of chalcogenide glass material  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$ , the molding process model is established. The effects of molding temperature, friction coefficient and molding rate on the equivalent stress of chalcogenide glass after molding are simulated. Through the comparison with the molding simulation data of L-BAL42 material, the difference between chalcogenide glass and traditional visible light glass in the molding process is discussed, and the parameters of the molding process are optimized. The research results show that the equivalent stress decreases with the increase of molding temperature, the decrease of friction coefficient and molding rate. Compared with the control material, the chalcogenide material  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  is the most suitable for changing the equivalent stress by changing the molding rate.

**Key words** optical fabrication; glass molding process; equivalent stress; finite element analysis; chalcogenide glass

**OCIS codes** 220.4610; 160.2750; 220.1250

## 1 引言

硫系玻璃在近红外至中红外区域 ( $2\sim 15\ \mu\text{m}$ ) 具有良好的透过性能和化学稳定性。使用光学玻璃模压技术模压硫系玻璃,具有生产效率高、成本低的特点<sup>[1-2]</sup>。法国 Umicore 公司使用  $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$  和  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  制作了球面和衍射透镜,提出成型温度应高于软化温度,以使硫系玻璃获得足够的流动性。Zhou 等<sup>[3]</sup> 提出模压温度高出硫系玻璃软化温度  $30\ ^\circ\text{C}$  左右为最佳。针对硫系玻璃模压难以一次成型的问题,本文利用有限元软件,仿真模拟了硫系玻

璃的模压过程,以缩短工艺研发周期,提高成型精度和光学性能<sup>[4-6]</sup>。

## 2 光学玻璃模压理论

### 2.1 光学玻璃模压技术

光学玻璃模压工艺是一种高效制备复杂形状的超精密光学元件的技术,其工艺原理是利用玻璃材料从熔融态向固态转化的过程是连续可逆的热加工过程,在玻璃的转变温度  $T_g$  附近,对玻璃和模具进行加温加压,直接模压成型符合要求的透镜<sup>[7]</sup>,与传统的加工工艺相比,省去了粗磨、精磨、抛光等

收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-03-06; 录用日期: 2018-03-16

\* E-mail: xcx272479@sina.com; \*\* E-mail: liuxueru0403@163.com

工序<sup>[8]</sup>。

玻璃模压工艺过程可分为加热、加压、退火及冷却四个阶段,如图 1 所示。加热阶段需先将模压腔抽成真空再充入高压稀有气体,以防止玻璃高温反应,然后利用红外线把玻璃毛坯和模具一起加热至模压温度。在模压运动过程中,上模固定不动,下模向上移动对坯料施加压力,熔化的玻璃被压制成模芯的面型,后在一较小恒定的压力下,玻璃进行缓慢冷却退火。最后快速冷却到环境温度脱模<sup>[9]</sup>。

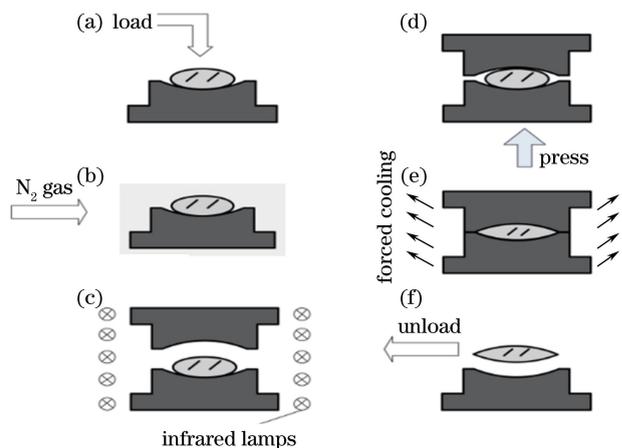


图 1 模压工艺流程示意图

Fig. 1 Flow chart of molding process

2.2 黏弹性理论

光学玻璃材料在不同的温度下表现出不同的应力应变响应,在建立有限元软件模型时选择更能体现玻璃材料应力应变特性的 Burgers 模型作为黏弹性模型,如图 2 所示,将弹簧、阻尼器串联的模型与弹簧、阻尼器并联的模型串接,即把一个 Maxwell 模型和一个 Kelvin 模型串联连接<sup>[10-11]</sup>,其中  $\eta_1$  为 Maxwell 模型中阻尼器的黏度系数,  $E_2$  为 Kelvin 模型中弹簧的弹性模量。

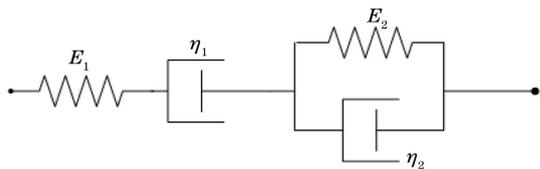


图 2 Burgers 模型

Fig. 2 Burgers model

模型的本构方程为

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_1 \epsilon + q_2 \dot{\epsilon}, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为应力;  $\epsilon$  为应变;  $p_1 = \frac{\eta_2}{E_1} + \frac{\eta_2 + \eta_3}{E_3}$ ,  $E_1$  为 Maxwell 模型中弹簧的弹性模量,  $E_3$  为总体的弹性模量;  $p_2 = \frac{\eta_2 \eta_3}{E_1 E_3}$ ,  $q_1 = \eta_2$ ,  $q_2 = \frac{\eta_2 \eta_3}{E_3}$ ,  $\eta_2$  为 Kelvin 模型中阻尼器的黏度系数,  $\eta_3$  为总体的黏度系数。

蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} [1 - \exp(-t/\tau_d)], \quad (2)$$

式中  $\sigma_0$  为  $t=0$  时的应力; 延迟时间  $\tau_d = \eta/E$ ,  $\eta$  为黏度系数,  $E$  为弹性模量;  $t$  为时间。

2.3 高温蠕变关系

应力  $\sigma$ 、温度  $T$  及结构因子  $s$  被认作是影响蠕变速率的三个独立变量,即

$$\epsilon \propto f(T)f(\sigma)f(s). \quad (3)$$

因此在不考虑材料内部结构的情况下,硫系玻璃模压过程中的总应力为蠕变应力与热应力之和<sup>[12]</sup>。

3 非球面面型及硫系材料特性

3.1 非球面面型尺寸

图 3 所示为有限元仿真的非球面几何形状,下表面的球面半径为 17 mm,上表面为非球面,非球面  $Z$  公式为

$$Z = \frac{CX^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2X^2}} + C_4X^4 + C_6X^6 + C_8X^8, \quad (4)$$

式中近轴曲率  $C=1/R$ ,  $R$  为非球面顶点处的曲率半径;  $X$  为非球面上任意一点到达非球面对称轴的距离;  $k$  为二次曲面偏心率;  $C_4$ 、 $C_6$ 、 $C_8$  为非球面的高次项系数。参数数值如表 1 所示。

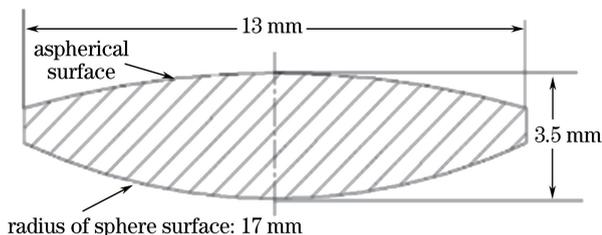


图 3 非球面几何形状

Fig. 3 Aspheric geometry

表 1 非球面透镜参数

Table 1 Aspheric lens parameters

Parameter	$k$	$C$	$C_4$	$C_6$	$C_8$
Value	0.1	0.037	$-1.61923 \times 10^{-5}$	$6.91142 \times 10^{-8}$	$-6.62010 \times 10^{-11}$

### 3.2 硫系材料属性

硫系玻璃是指以元素周期表 VIA 族中 S, Se, Te 为主并引入一定量其他类金属元素所形成的玻璃,具有优良的近中红外透过性和极佳的消热差性能<sup>[13-14]</sup>。综合考虑了各类红外材料的光学性能、力学性能和热稳定性,选择  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  硫系玻璃材料作为模压研究对象,其在  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波长范围具有优良的透过性能。 $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  硫系玻璃材料的热机械性质如表 2 所示<sup>[15]</sup>。模具材料为碳化钨(WC),其热机械

表 2  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  硫系玻璃的热机械性质参数

Table 2 Thermomechanical parameters of  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  chalcogenide glass

Parameter	Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Coefficient of thermal expansion / $^{\circ}\text{C}$	Soften temperature / $^{\circ}\text{C}$	Transition temperature / $^{\circ}\text{C}$
Value	4.86	3.1	0.26	$15.96 \times 10^{-6}$	301	286

表 3 WC 模具的热机械性质参数

Table 3 Thermomechanical parameters of WC mold

Parameter	Coefficient of thermal expansion / $^{\circ}\text{C}$ (0-400 $^{\circ}\text{C}$ )	Elastic modulus /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Poisson ratio
Value	$4.1 \times 10^{-6}$	$570 \times 10^9$	0.22

表 4 L-BAL42 的热机械性质参数

Table 4 Thermomechanical parameters of L-BAL42

Parameter	Young modulus / GPa	Poisson ratio	Coefficient of thermal expansion / $^{\circ}\text{C}$	Soften temperature / $^{\circ}\text{C}$	Transition temperature / $^{\circ}\text{C}$
Value	89.1	0.247	$8.8 \times 10^{-6}$	506	607

## 4 仿真研究及分析

由于坯料与模芯的挤压运动,光学玻璃透镜在模压过程中会产生较大的内应力,这种应力不仅会造成透镜的变形甚至破损,影响成型质量,还会造成透镜内部不均匀,降低光学系统的成像质量。这里主要研究了模压温度、摩擦系数和模压速率对内应力的影响,采用控制变量的方法,进行了三组对照实验。另外,引入了对照材料 L-BAL42 的模压仿真数据,与  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的仿真数据进行了对比。

### 4.1 模压温度的影响

在默认材料内部为均匀状态的情况下,仿真过程中的等效应力为蠕变应力与热应力之和,将摩擦系数设定为 0.1,模压速率为  $0.1\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,不同模压温度下的等效应力分布情况如图 4 所示。

在不同模压温度下, $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  样本与 L-BAL42 样本内部最大和最小等效应力的变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知,随着温度的升高,两种材料的最大等效应力与最小等效应力都呈下降趋势,这是因为

特性如表 3 所示。选取了日本小原光学公司生产的 L-BAL42 玻璃作为对比材料,其热机械性质如表 4 所示。通过对比可以看出,与可模压的可见光玻璃相比,硫系玻璃具有更低的转变温度  $T_g$ ,比一般的低熔点可见光玻璃更容易与模芯发生黏连,并且具有更大的脆性。在硫系玻璃模压过程中,容易产生微量气体,影响成型质量,甚至导致玻璃破损。因此,研究模压温度的选取和内应力的释放对硫系玻璃的模压工艺具有重要意义<sup>[16-17]</sup>。

随着模压温度的上升,玻璃内部黏度降低,内部应力减小。计算 4 组数据,得到  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的等效应力对单位温度的平均变化率为  $-0.0095\ \text{MPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,L-BAL42 的等效应力对单位温度的平均变化率为  $-0.1227\ \text{MPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。不同的热力学特性造成两种材料对模压温度变化的响应不同,可以看出温度对硫系玻璃等效应力的影响偏小。虽然温度升高会降低等效应力,但是过高的模压温度会降低模压效率,也容易让硫系玻璃与模具发生化学反应,影响成型质量,降低模具的使用寿命。

### 4.2 摩擦系数的影响

在模压过程中,模具和玻璃之间的摩擦力也会影响等效应力,模具和玻璃之间的摩擦力属于恒定剪切力,摩擦力的大小与摩擦系数成正比。将模压温度设定为  $340\ ^{\circ}\text{C}$ ,模压速率为  $0.1\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,不同摩擦系数下的等效应力分布情况如图 6 所示,硫系玻璃与模具间的摩擦系数依次为 0.1、0.4、0.7、1.0。

在不同摩擦系数下, $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  样本与 L-BAL42 样本内部最大和最小等效应力的变化趋势如图 7 所示。

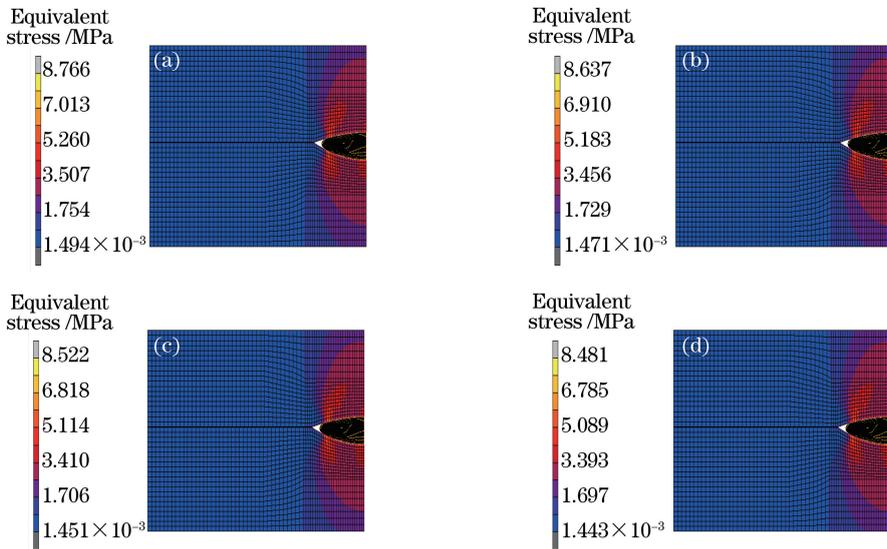


图 4 不同模压温度下的等效应力分布。(a) 330 °C ;(b) 340 °C ;(c) 350 °C ;(d) 360 °C

Fig. 4 Equivalent stress distributions under different molding temperatures.

(a) 330 °C ; (b) 340 °C ; (c) 350 °C ; (d) 360 °C

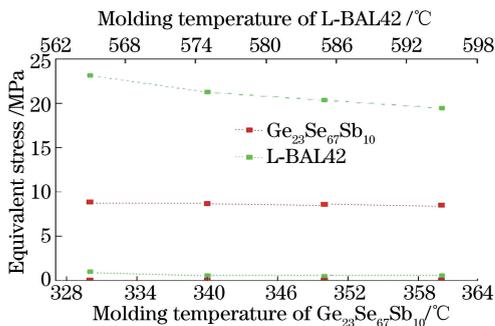


图 5 不同模压温度下的等效应力变化

Fig. 5 Equivalent stress changes under different molding temperatures

由图 7 可知,选取的摩擦系数越大,两种材料的最大等效应力和最小等效应力也越大。因为随着摩擦系数的变小,模芯与硫系材料相互运动时的阻力也会变小。4 组数据中 Ge<sub>23</sub>Se<sub>67</sub>Sb<sub>10</sub> 的等效应力对单位摩擦系数的平均变化率为 0.008 MPa, L-BAL42 的等效应力对单位摩擦系数的平均变化率为 0.2944 MPa。可以通过给模芯镀膜的方式获得较小的摩擦系数。对于硫系玻璃,镀膜可以有效防止因摩擦系数过大,表面残余应力得不到充分释放而与模具发生黏连的问题,这对提高成型质量以及模具寿命都有重要的作用。

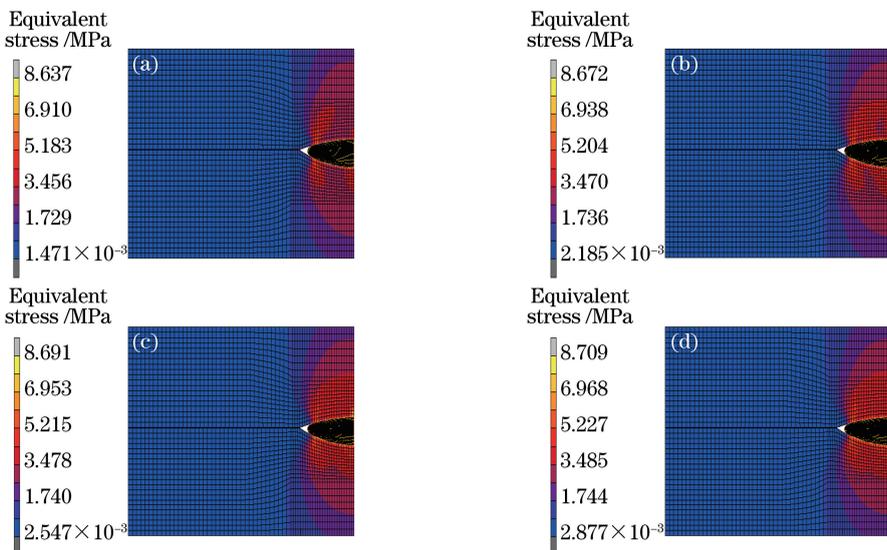


图 6 不同摩擦系数下的等效应力分布。(a) 0.1 ;(b) 0.4 ;(c) 0.7 ;(d) 1.0

Fig. 6 Equivalent stress distributions under different friction coefficients. (a) 0.1 ; (b) 0.4 ; (c) 0.7 ; (d) 1.0

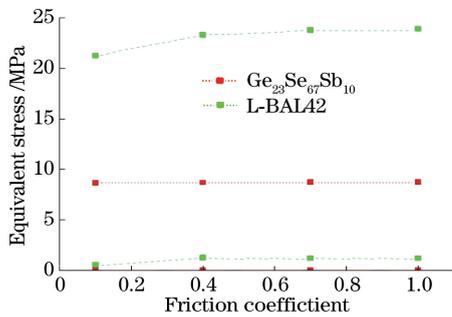


图 7 不同摩擦系数下的等效应力变化  
Fig. 7 Equivalent stress changes under different friction coefficients

### 4.3 模压速率的影响

模压速率是加压阶段最重要的工艺参数之一。模压速率选择不当会导致透镜破裂、气孔、折射率不均等缺陷,而这些缺陷都与加压后残余应力的分布关系密切,因此研究模压速率对等效应力的影响十分重要。将模压温度设定为 340 °C,摩擦系数为 0.1,不同模压速率下的等效应力分布如图 8 所示。

在不同模压速率下,Ge<sub>23</sub>Se<sub>67</sub>Sb<sub>10</sub> 样本与 L-BAL42 样本内部最大和最小等效应力的变化趋势如图 9 所示。

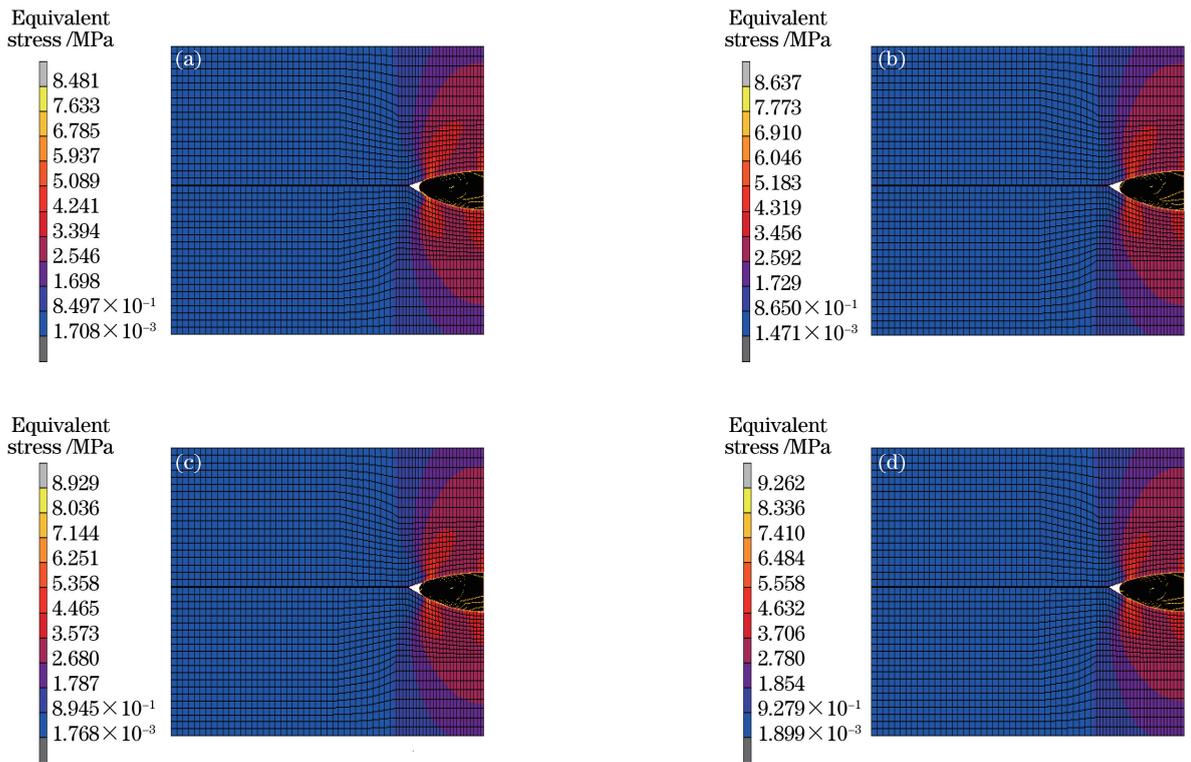


图 8 不同模压速率下的等效应力分布。(a)  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $0.10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $0.15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $0.20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$   
Fig. 8 Equivalent stress distributions under different molding rates. (a)  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
(b)  $0.10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $0.15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $0.20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

由图 9 可知,两种材料透镜内部最大等效应力和最小应力随模压速率的增大而增大,高模压速率使得模压过程中没有充足的时间释放内应力,而低模压速率也会使加工效率降低。在 4 组数据中,Ge<sub>23</sub>Se<sub>67</sub>Sb<sub>10</sub> 的等效应力对单位模压速率的平均变化率为  $5.22 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}$ ,L-BAL42 的等效应力对单位模压速率的平均变化率为  $69.13 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}$ ,可见与 L-BAL42 相比,硫系玻璃对模压速率的响应偏小,但与其他工艺参数相比,模压速率对硫系玻璃等效应力的影响仍较大,

且硫系玻璃具有较大的脆性,需要在较低的等效应力下成型,因此在选择模压速率时,需要综合考虑效率和成型质量。

## 5 结 论

仿真模拟了硫系玻璃模压过程中,模压温度、摩擦系数及模压速率等对模压成型质量的影响。仿真结果表明,模压温度越低,摩擦系数越大,模压速率越高,则玻璃的等效应力越大。仿真数据中等效应力对硫系玻璃模压的单位温度、单位摩擦系数及单位模压

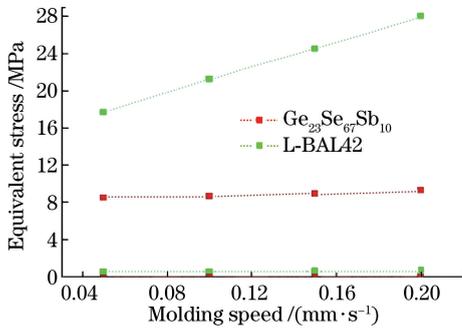


图9 不同模压速率下的等效应力变化

Fig. 9 Equivalent stress changes under different molding rates

速率的平均变化率分别为  $-0.0095 \text{ MPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ 、 $0.008 \text{ MPa}$ 及  $5.22 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}$ 。与对照材料 L-BAL42 相比,硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的等效应力对模压温度、摩擦系数及模压速率变化的响应较小。在三个工艺参数中,模压速率对硫系玻璃模压的等效应力影响最大,因此通过降低模压速率,可以较好地减小硫系玻璃模压的内应力。与传统可见光玻璃相比,硫系玻璃具有较低的软化温度和较大的脆性,模压硫系玻璃需要较低的模压温度、光滑的模芯表面以及较低的模压速率,以保证成型质量。在实验前利用仿真数据对模压工艺参数进行优化,可以有效提高实验效率,降低模压成本。

### 参 考 文 献

- [1] Wang X H, Xue J Q, Tao H Z, *et al.* Researching and developing on sulphureous series glass material [J]. Development Guide to Building Materials, 2003 (2): 28-31.  
王小虎, 薛建强, 陶海征, 等. 硫系玻璃材料的研究进展[J]. 建材发展导向, 2003(2): 28-31.
- [2] Shu C L, Tian A L, Hang L X, *et al.* Modern optics manufacturing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 317-322.  
舒朝濂, 田爱玲, 杭凌侠, 等. 现代光学制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 317-322.
- [3] Zhou T F, Zhou Q, Xie J Q, *et al.* Surface defect analysis on formed chalcogenide glass  $\text{Ge}_{22}\text{Se}_{58}\text{As}_{20}$  lenses after the molding process[J]. Applied Optics, 2017, 56(30): 8394-8402.
- [4] Yin S H, Jin S, Zhu K J, *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.
- [5] Ni J J, Fan Y F, Chen W H. Simulation study of molding of aspherical optical glass lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 032201.  
倪佳佳, 范玉峰, 陈文华. 非球面光学玻璃透镜的模压仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (3):032201.
- [6] Fu X H, Jiang H Y, Zhang J, *et al.* Preparation of short and medium wave infrared anti-reflective coating based on chalcogenide glass [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0903002.  
付秀华, 姜洪妍, 张静, 等. 基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0903002.
- [7] Zhou T F, Yan J W, Masuda J, *et al.* Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves [J]. Precision Engineering, 2011, 35(2): 214-220.
- [8] 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.
- [9] Zhou T F, Yan J W, Kuriyagawa T. Evaluating the viscoelastic properties of glass above transition temperature for numerical modeling of lens molding process [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6624: 662403.
- [10] Zhang Y T. Theory of thermo-viscoelasticity [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002: 1-15.  
张义同. 热黏弹性理论 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002: 1-15.
- [11] Guo D Z, Ren R B. Mechanics of layered viscoelastic systems [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001: 24-34.  
郭大智, 任瑞波. 层状黏弹性体系力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 24-34.
- [12] Jian Z Y, Zheng C, Chang F E, *et al.* Effect of composition on characteristic temperature and properties of  $\text{Ge}_x\text{Se}_{90-x}\text{Sb}_{10}$  glass [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2009, 29 (1): 52-55.  
坚增运, 郑超, 常芳娥, 等. 成分对  $\text{Ge}_x\text{Se}_{90-x}\text{Sb}_{10}$  玻璃特征温度及性能的影响 [J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(1): 52-55.
- [13] Dai S X, Chen H G, Li M Z, *et al.* Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 847-

852.  
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847-852.
- [14] Luo S J, Huang F Y, Zhan D J, *et al.* Development of chalcogenide glasses for infrared thermal imaging system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 9-13.  
骆守俊, 黄富元, 詹道教, 等. 硫系玻璃在红外成像系统应用进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 9-13.
- [15] Xue G Q. Research on homogeneity and molding process of chalcogenide glasses[D]. Shannxi: Xi'an Technology University, 2016.  
薛改勤. 硫系玻璃的均匀性及模压工艺研究[D]. 陕西: 西安工业大学, 2016.
- [16] Li C H, Wang L, Gan Y L, *et al.* Structural analysis of  $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$  chalcogenide glass thin-films by Raman spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 023101.  
李宸汉, 王丽, 甘渝林, 等.  $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$  硫系玻璃薄膜拉曼光谱分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 023101.
- [17] Qian G Q, Tang G W, Qian Q, *et al.* Study on mid-infrared spectral properties of  $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fluorogermanate glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0616002.  
钱国权, 唐国武, 钱奇, 等.  $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺杂氟锗酸盐玻璃中红外光谱性质研究[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0616002.