

# 硫系阵列光学元件可模压性的仿真与分析

王蕾, 薛常喜\*, 贾孟, 刘悦, 李闯, 兰喜瑞, 王伦, 吴百融

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为了预测微透镜阵列玻璃模压成型过程中微结构的加工工艺参数, 利用高级非线性有限元软件 MSC.Marc 进行微透镜阵列的有限元建模; 将不同微结构宽度的阵列光学元件进行分组, 利用有限元模型分别计算每组硫系阵列光学元件的微结构高度对等效米塞斯应力的影响, 得到微结构宽度相同、高度不同的硫系玻璃微透镜阵列结构对模压成型后等效米塞斯应力的影响, 对微结构宽度相同、高度不同的阵列光学元件的最大等效米塞斯应力进行数据拟合处理, 得出各组等效米塞斯应力的趋势, 获得适合模压的硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  阵列光学元件的微结构高度与宽度之比。仿真结果表明: 微结构高度越小, 等效米塞斯应力越小; 硫系玻璃微透镜阵列的等效米塞斯应力由中心到边缘逐渐增大, 边缘处的等效米塞斯应力最大; 当微结构高度与宽度之比大于 0.322 时, 模压产生的等效米塞斯应力大幅增加。

**关键词** 光学制造; 玻璃模压工艺; 微透镜阵列; 有限元分析; 硫系玻璃

中图分类号 O439; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202201

## Simulation and Analysis of Moldability of Chalcogenide Array Optical Elements

Wang Lei, Xue Changxi\*, Jia Meng, Liu Yue, Li Chuang, Lan Xirui, Wang Lun, Wu Bairong

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

**Abstract** In order to predict the microstructure process parameters of the microlens array glass during molding, a finite element analysis model of the microlens array is established using the advanced nonlinear finite element software MSC.Marc in this study. The array optical elements with different microstructural widths are divided into several groups. The influence of the microstructural height of each group of the chalcogenide array optical elements on the equivalent von Mises stress is calculated by the finite element analysis model; subsequently, we obtain the influences of chalcogenide glass microlens array structures with the same microstructural width and different microstructural heights on the equivalent von Mises stress after the molding. The maximum equivalent von Mises stress of array optical elements with the same microstructural width and different microstructural heights is fitted, and the trend of equivalent von Mises stress is analyzed to obtain the ratio of the microstructural height to the width of the chalcogenide glass  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  array optical elements suitable for molding. The simulation results show that the lower the microstructural height is, the lower the equivalent von Mises stress is. The equivalent von Mises stress of the chalcogenide glass microlens array increases gradually from the center to the edge and is the highest at the edge. When the ratio of the microstructural height to the width is greater than 0.322, the equivalent von Mises stress generated by the molding increases greatly.

**Key words** optical fabrication; glass molding process; microlens array; finite element analysis; chalcogenide glass

**OCIS codes** 220.4610; 160.2750; 220.1250

收稿日期: 2019-03-16; 修回日期: 2019-04-17; 录用日期: 2019-04-25

基金项目: 吉林省重点科技研发计划(20180201030GX)

\* E-mail: xc272479@sina.com

# 1 引言

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非晶体材料<sup>[1-2]</sup>。硫系玻璃具有色差系数较小、光谱透过率较大、折射率温度系数较小、软化点低、易成型等特点,且价格低廉,加工简单,可用于精密模压成型。Arai 等<sup>[3]</sup>对光学玻璃的热黏弹性及模压成型进行了研究,发现玻璃化转变温度的时间足够剩余冷却步骤,从玻璃化转变温度降低到室温可以在较短时间内完成。Jain 等<sup>[4]</sup>对玻璃透镜成型过程中的黏弹性应力松弛进行了数值仿真模拟,为后续研究提供了更有参考价值的建模参数。在光学系统中使用微透镜阵列具有可校正系统像差、改善成像质量、扩大视场、简化系统等优点<sup>[5]</sup>。由于单个微透镜的尺寸较小,因此在模压过程中难以预测面形精度。本文采用有限元仿真软件 MSC.Marc<sup>[6-8]</sup>对微结构宽度相同、高度不同的硫系玻璃微透镜阵列的模压过程进行建模仿真,分别观察模压时相同微结构宽度、不同微结构高度的硫系玻璃元件的等效米塞斯应力分布,并进行多组研究,将得到的各组等效米塞斯应力数据进行处理,得到微结构高度与宽度的比值。

## 2 硫系玻璃模压微透镜阵列成型加工方法

### 2.1 精密光学玻璃模压成型过程

精密光学玻璃模压可以分为加热保温、高温加压、减压退火、冷却脱模 4 个过程。首先,将玻璃预形体放到下模具的模芯中;封闭石英玻璃成型室,将其抽成真空并且充入氮气(N<sub>2</sub>),以防止玻璃材料和模具氧化;启动成型室外围的红外装置,红外线透过石英壁将模具和玻璃预形体加热到预定的模压温度,保持该温度并均匀加热一段时间,使硫系玻璃材料和模具温度均匀一致。然后,固定上模不动,下模上升,压缩硫系玻璃预形体,并保持一定时间,使阵列结构填充完全。之后,在上模保持较小载荷的情况下,以较低的降温速率将模具和微阵列透镜的温度降低到玻璃退火点以下的某个合适的温度,将成型的玻璃微透镜阵列进行退火处理,以有效消除微透镜阵列元件的残余内应力。最后,快速充入液氮,冷却至室温,脱模,将硫系玻璃阵列成型件取出。

### 2.2 黏弹性理论

在室温环境下玻璃材料呈现弹性,此时玻璃以固体的形式存在。将玻璃材料进行加热升温,当温

度高于其转变温度  $T_g$  但低于屈服温度  $T_s$  时,玻璃呈现黏弹态,此时既存在固体玻璃,也存在液体玻璃,玻璃的黏度降低。黏弹性是材料对应力或应变的时间依赖性响应。在恒定的载荷下,玻璃应变由瞬时应变(弹性效应)和作为时间函数的连续应变(黏性效应)组成。在恒定的载荷下,这种随时间变化的变形称为蠕变。当施加恒定应变时,应力随着时间的延长而松弛,这种现象称为应力松弛<sup>[9]</sup>。

设计弹簧和缓冲器的力学模型,对黏弹性变形的蠕变和应力松弛进行物理解释,从而得到相应的公式。在各种力学模型中,Maxwell 模型、Kelvin 模型和 Burgers 模型是 3 种经典的力学模型,是一系列弹簧和缓冲器相结合的力学模型<sup>[10]</sup>。Maxwell 模型是一个双元素模型,由线性弹簧元件和线性黏性缓冲元件组成,该模型可以很好地适用于应力松弛,但不适合模拟蠕变,如图 1(a)所示,其中  $G$  为应力, $\eta$  为阻尼器的黏性参量;Kelvin 模型由弹簧元件和缓冲器元件并联组成,该模型无法描述蠕变过程中应力随时间的变化,如图 1(b)所示;Burgers 模型由 Maxwell 和 Kelvin 模型串联组成,可以完美地模拟蠕变,也可以用来模拟应力松弛,但是使用该模型时,在应力松弛开始时总会发生偏差,如图 1(c)所示,其中  $G_1$ 、 $G_2$  为应力, $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为阻尼器的黏性参量。广义 Maxwell 模型能更好地描述玻璃在高温下黏弹性变形中的蠕变和应力松弛。与 Maxwell 模型、Kelvin 模型和 Burgers 模型 3 种简单的力学模型相比,广义 Maxwell 模型是最佳模型。

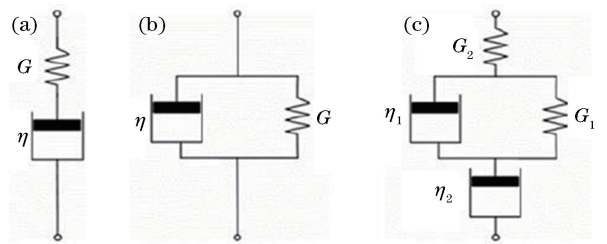


图 1 3 种简单的力学模型。(a) Maxwell 模型;  
(b) Kelvin 模型;(c) Burgers 模型

Fig. 1 Three simple mechanical models. (a) Maxwell model; (b) Kelvin model; (c) Burgers model

在模压温度下,硫系玻璃 Ge<sub>23</sub>Se<sub>67</sub>Sb<sub>10</sub> 出现黏弹性变形<sup>[11]</sup>。研究表明,广义 Maxwell 模型最适宜解释玻璃在模压温度下加压阶段的变形规律<sup>[12]</sup>。本文采用如图 2 所示的广义 Maxwell 模型,其中: $E_i$  为弹性模量, $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\eta_i$  为阻尼器的黏性参量。

广义 Maxwell 模型中的应力为

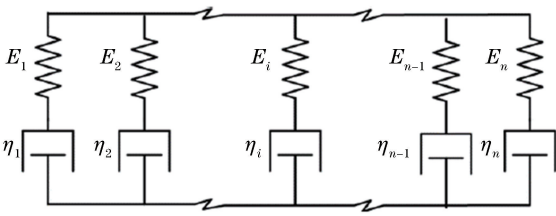


图2 广义Maxwell模型

Fig. 2 Generalized Maxwell model

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

式中： $t$  为当前时间； $\tau$  为过去时间； $\varepsilon$  为应变； $G(t - \tau)$  为应力松弛函数。应力松弛函数的值会随着时间而发生改变，且满足

$$G(t) = G_0 \sum_{i=1}^n \omega_i \exp\left(-\frac{t}{t_{ri}}\right), \quad (2)$$

式中： $\omega_i$  为相对模量； $G_0$  为  $t_0$  时刻的应力值； $t_{ri}$  为松弛时间（描述时间对温度变化的影响，由  $E_i/\eta_i$  得出）。使用的  $A(T)$  位移方程为 Tool-Narayanaswamy(TN)位移方程，即

$$\ln[A(T)] = \frac{H}{R} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right), \quad (3)$$

式中： $A(T)$  为不同温度时的位移因子； $T$  为温度； $T_r$  为参考温度； $H$  为玻璃的活化能； $R$  为理想气体常数。

### 2.3 玻璃的断裂力学性能

玻璃的脆性、表面微裂纹、内部不均匀区及缺陷等因素会造成应力集中，导致表面微裂纹急剧扩展。实验研究表明，光学显微镜无法分辨  $1 \text{ mm}^2$  玻璃表面上深度约为  $5 \mu\text{m}$  的 300 个微裂纹。

玻璃所能承受的最大应力可用奥鲁凡(Orowan)假设表示，即

$$\sigma_{th} \cong xE, \quad (4)$$

式中： $\sigma_{th}$  为理论强度； $E$  为弹性模量； $x$  为理论强度与实际强度的比值。

根据文献[13-14]中的实验研究成果可以得出硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的均匀性。硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的显微硬度和理想玻璃的断裂强度一般为材料弹性模量的  $1/10 \sim 1/20$ ，约为  $0.343 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。为了便于仿真硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的可模压性，根据硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的均匀性，得出硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  光学元件能承受的表面应力的最大临界值为  $30.218 \text{ MPa}$ 。

### 3 有限元建模

二维模型图能很好地反映微透镜阵列光学元件

模压成型过程中由参数改变引起的等效米塞斯应力变化，同时可以减少计算量，缩短模拟周期，减轻计算机运算负荷，有效节约时间。使用计算机辅助设计(CAD)画出微透镜阵列的二维模型图，然后将画好的模型导入有限元仿真软件 MSC.Marc 中，该软件具有强大的热分析、结构分析能力。清除二维模型中重复和自由的曲线和集合点，将模型中的二维曲线进行分组，分为上模、下模和玻璃 3 组，对玻璃的二维曲线进行种子点划分。因为本文使用的玻璃模型为长方形，所以采用固定目标长度进行均匀分点。再使用二维平面自动分网四边形网络划分法对网格进行划分，均匀划分的目标长度为  $0.01 \text{ mm}$ ，网格单元总数为 29250。二维几何模型如图 3 所示

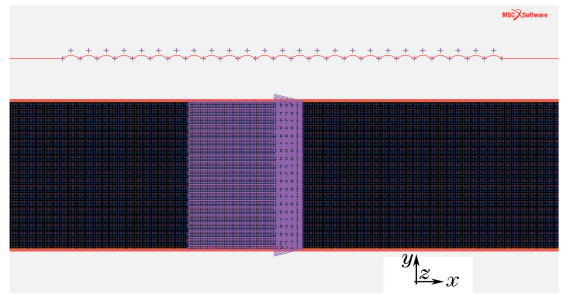


图3 微透镜阵列的二维有限元模型

Fig. 3 Two-dimensional finite element model for microlens array

定义所需要的表格，包括玻璃材料的蠕变关系表格(图 4)、模具位置时间变化表格、线性热膨胀系数变化表格等。

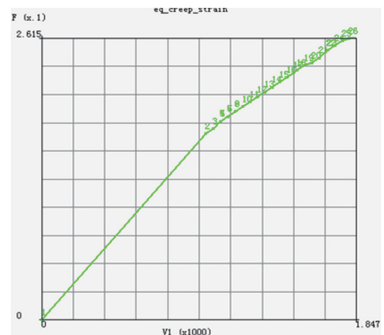


图4 硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的蠕变关系

Fig. 4 Creep relationship of chalcogenide glass  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$

定义材料属性。由于模具的强度非常大，硬度非常高，因此将模具状态设置为理想状态，将模具定义为刚体，玻璃材料则定义为有限刚度的标准材料。然后编辑玻璃材料属性卡，输入玻璃材料的质量密度、杨氏模量、泊松比等材料参数，如表 1<sup>[15]</sup> 所示。打开黏弹性选项卡，输入玻璃的Prony级数，再定义



表1 硫系玻璃  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$  的材料参数<sup>[15]</sup>Table 1 Material parameters of chalcogenide glass  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$ <sup>[15]</sup>

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

玻璃的热流变特性;打开热膨胀选项卡,输入玻璃的热膨胀系数,添加选择对象单元,将玻璃材料的定义应用于玻璃单元。

定义接触体。玻璃为变形体,模具为刚体,因此,此时定义的接触关系为变形体刚体。设置接触表,然后定义边界条件。在玻璃模压过程中,上模保持固定,下模向上运动,因此给上、下模设置位移约束。本文仿真模拟的是加压过程,此过程中温度恒定,因此设置一个固定的温度条件。将设定的模压温度作用于硫系玻璃材料的单元格。模具在建模时设定为刚性物体,没有发生变形。由于玻璃预形体在与模具处于相同的温度下被模压,因此在该模拟中没有考虑热传递。

由于模压后,玻璃单元可能会发生畸变等,因此对模压后的网格进行重新划分,划分方法为二维平面自动分网四边形网络划分法。然后对该仿真模型进行热分析和结构分析,新建分析工况特性选项卡,激活载荷,勾选需要设置的边界条件,激活接触,选择存在的接触表,打开求解控制,选择迭代方法,设置工况时间,选择蠕变应变/应力,打开其参数输入卡,选择自适应步长和蠕变判据。

最后,新建一个分析任务,确定需要的分析工况,定义初始载荷,在接触控制中选择接触方法、滑

移模型及摩擦类型,设定硫系玻璃材料与模具表面之间的摩擦力为恒定剪切摩擦力,摩擦因数约为0.1,此时摩擦力关系式为

$$f_s = m\zeta, \quad (5)$$

式中: $f_s$  为剪切摩擦力; $m$  为剪切摩擦因数; $\zeta$  为剪切屈服应力。

在分析任务结果中选择所需要的单元张量,检查无误后,根据需要选择控制样式,保存模型,提交运行,得到仿真结果。

## 4 仿真结果与分析

分别建立微结构宽度为 100, 200, 300, 400, 500  $\mu\text{m}$  时的硫系玻璃阵列光学元件仿真模型。在模压温度、模压速度和摩擦因数相同的情况下,使用 MSC.Marc 软件进行高级非线性有限元仿真模拟,分别分析在微结构宽度相同的情况下,不同微结构高度对加压成型过程中等效米塞斯应力的影响。使用的硫系玻璃样本为  $\text{Ge}_{23}\text{Se}_{67}\text{Sb}_{10}$ , 设定模压温度为  $340^{\circ}\text{C}$ , 摩擦因数为 0.1, 模压速率为  $0.05 \text{ mm/s}$ 。以微结构宽度为  $300 \mu\text{m}$  的微阵列光学元件为例,不同微结构高度时微透镜阵列的等效米塞斯应力分布如图 5 所示。

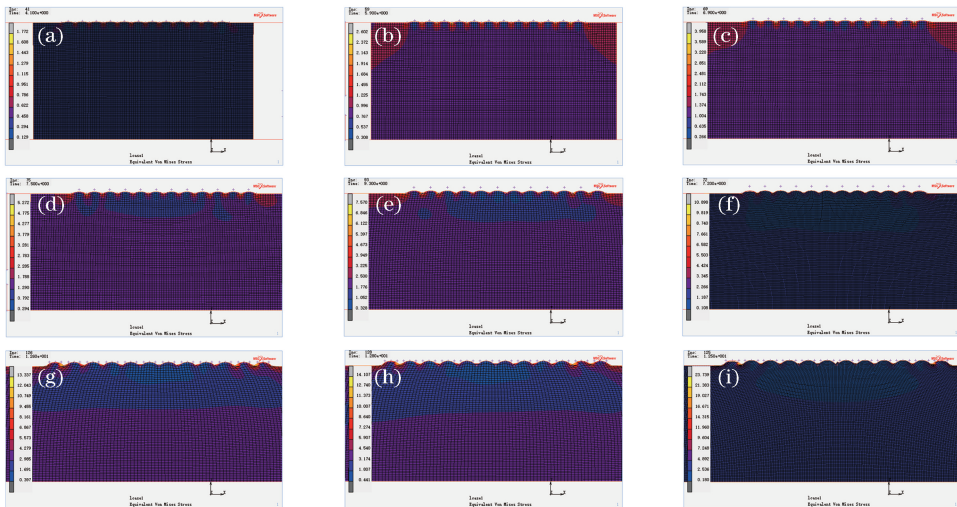


图5 微结构宽度为  $300 \mu\text{m}$  时不同微结构高度下的等效米塞斯应力分布。(a)  $15 \mu\text{m}$ ; (b)  $20 \mu\text{m}$ ; (c)  $30 \mu\text{m}$ ; (d)  $40 \mu\text{m}$ ; (e)  $50 \mu\text{m}$ ; (f)  $60 \mu\text{m}$ ; (g)  $70 \mu\text{m}$ ; (h)  $80 \mu\text{m}$ ; (i)  $90 \mu\text{m}$

Fig. 5 Distributions of equivalent von Mises stress with different microstructural heights when microstructural width is  $300 \mu\text{m}$ . (a)  $15 \mu\text{m}$ ; (b)  $20 \mu\text{m}$ ; (c)  $30 \mu\text{m}$ ; (d)  $40 \mu\text{m}$ ; (e)  $50 \mu\text{m}$ ; (f)  $60 \mu\text{m}$ ; (g)  $70 \mu\text{m}$ ; (h)  $80 \mu\text{m}$ ; (i)  $90 \mu\text{m}$



在有限元软件结果文件中,提取加压成型过程中硫系玻璃阵列光学元件的最大等效米塞斯应力,再利用 MATLAB 软件拟合数据,得到等效米塞斯应力随微结构高度的变化趋势,如图 6 所示。通过计算拟合曲线得出在微结构高度为  $96.621 \mu\text{m}$  时,应力达到最大临界值,此时微结构高度与宽度之比为 0.322。

同理可以得出,微结构宽度为 100, 200, 400,  $500 \mu\text{m}$  时不同微结构高度下的等效米塞斯应力的变化趋势,如图 7 所示。分别计算拟合曲线可以得出在最大应力临界值时,微结构高度分别为 38.269, 68.341, 145.332,  $172.907 \mu\text{m}$ , 此时微结构高度与宽度之比分别为 0.382、0.342、0.363、0.346。

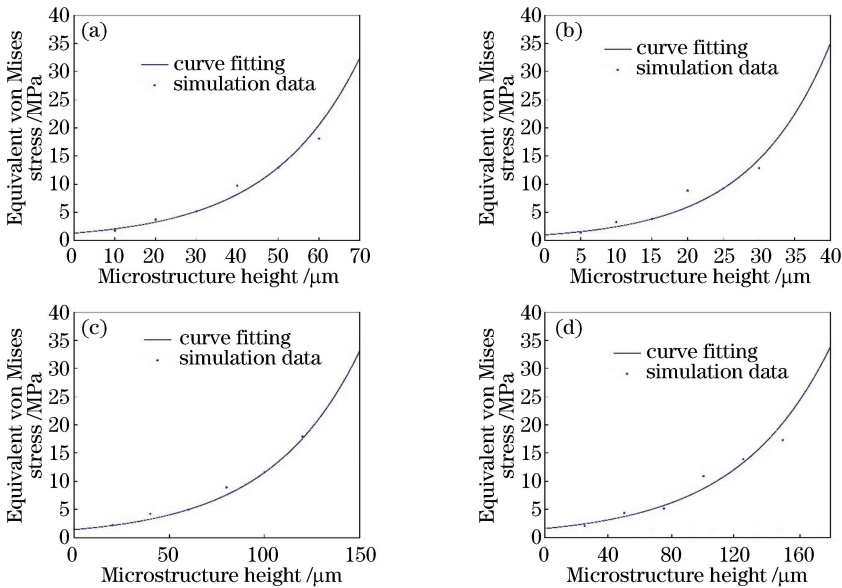


图 7 不同微结构宽度时的等效米塞斯应力变化。(a)  $100 \mu\text{m}$ ; (b)  $200 \mu\text{m}$ ; (c)  $400 \mu\text{m}$ ; (d)  $500 \mu\text{m}$

Fig. 7 Variation of equivalent von Mises stress with different microstructural width. (a)  $100 \mu\text{m}$ ; (b)  $200 \mu\text{m}$ ; (c)  $400 \mu\text{m}$ ; (d)  $500 \mu\text{m}$

## 5 结 论

在模压温度、模压速率、摩擦因数相同的情况下,呈黏弹性状态的硫系玻璃的流动性相同。当微结构高度较小时,硫系玻璃材料比较容易填充微结构,说明此时硫系玻璃填充微结构阵列的阻力较小;随着微结构高度增大,等效米塞斯应力越来越大,填充效果越来越差,说明此时填充微结构阵列的阻力越来越大。在同一微结构高度下,边缘位置的阻力大于中心位置,会出现边缘位置应力集中、填充较差的情况,因此当边缘位置子透镜填充效果达到最佳时,处于阵列中间位置的子透镜也会达到最佳效果。由于硫系玻璃的脆性较大,因此当微结构高度过大

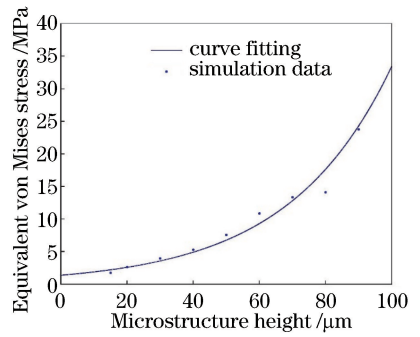


图 6 微结构宽度为  $300 \mu\text{m}$  时不同微结构高度下的等效米塞斯应力变化

Fig. 6 Variation of equivalent von Mises stress with different microstructural heights when microstructural width is  $300 \mu\text{m}$

时,内部应力较大,易导致元件破损。根据拟合的最小结果可知,当微结构高度与宽度之比大于 0.322 时,硫系玻璃光学元件表面会因内应力过大而发生破裂。在实验前,可以参考仿真数据优化工艺参数,从而降低加工难度,有效提高实验效率。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Arai M, Kato Y, Kodera T. Characterization of the thermo-viscoelastic property of glass and numerical simulation of the press molding of glass lens [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2009, 32(12): 1235-1255.
- [4] Jain A, Yi A Y. Numerical modeling of viscoelastic stress relaxation during glass lens forming process [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(3): 530-535.
- [5] Klocke F, Bulla B. Advances in optical manufacturing technologies at Fraunhofer IPT[C] // 4th Conference on Advanced Optics Manufacturing and Testing Technologies, Chengdu, China. [S.l.: s.n.], 2008: 136-141.
- [6] 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, 143.  
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, 143.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lan S H, Lee H J, Lee S H, *et al.* Experimental and numerical study on the viscoelastic property of polycarbonate near glass transition temperature for micro thermal imprint process [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3879-3884.
- [10] Hosoe S, Masaki Y. High-speed glass-molding method to mass produce precise optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 115-120
- [11] Liu X R, Xue C X. Optimization of molding process parameters of chalcogenide glass based on finite element simulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082203.  
刘学儒, 薛常喜. 基于有限元仿真的硫系玻璃模压工艺参数优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082203.
- [12] 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.
- [13] Cheng H, Xu J F, Chang F G, *et al.* Study on the uniformity of Ge-Se-Sb chalcogenide glass [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2016, 36(12): 989-995.  
成虎, 许军锋, 常芳娥, 等. Ge-Se-Sb 硫系玻璃均匀性分析[J]. *西安工业大学学报*, 2016, 36(12): 989-995.
- [14] Jian Z Y, Zheng C, Chang F E, *et al.* Effect of composition on characteristic temperature and properties of  $\text{Ge}_x\text{Se}_{90-x}\text{Sb}_{10}$  glasses [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2009, 29(1): 52-55, 61.  
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, 61.
- [15] Xue G Q. Research on homogeneity and molding process of chalcogenide glasses [D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2016.  
薛改勤. 硫系玻璃的均匀性及模压工艺研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.