

文章编号:1004-4213(2010)11-2020-5

# 微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟\*

尹韶辉,王玉方,朱科军,霍建杰,陈逢军,余剑武,王宇

(湖南大学 国家高效磨削工程技术中心 微纳制造研究所,长沙 410082)

**摘要:**利用非线性有限元软件 MSC. Marc,建立了微小非球面玻璃透镜超精密模压的有限元模型,并进行了微小非球面玻璃透镜模压数值模拟分析.通过对比模拟出的不同加工参量下的成型透镜和模具的残余应力分布结果,得出最优的超精密模压成型的模压速率和模压温度范围,并解释了模压速率和模压温度影响微小非球面玻璃透镜成型质量的原因.模拟可以对实际的大批量生产微小非球面玻璃透镜提供有力的帮助.

**关键词:**玻璃模压成型;微小非球面玻璃透镜;广义麦克斯韦模型;有限元分析

**中图分类号:**TH164

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103911.2020

## 0 引言

随着市场对低成本、高准确度的微小非球面光学玻璃透镜需求量的急剧增长,传统的加工方法已经不能适应市场的需要.采用模压成型的方法大批量生产微小非球面玻璃透镜是一种发展前景广阔的制造方法<sup>[1]</sup>.与传统的加工方法相比,能大幅度的降低生产成本,特别适合大批量生产.采用玻璃模压成型工艺与传统的去除材料的透镜加工工艺相比,大大提高了加工质量的稳定性,降低了生产成本.但是,将这项技术应用于大规模玻璃透镜模压成型的生产仍有很多技术方面的困难.目前还没有完全掌握玻璃-模具之间的热传导规律和高温时玻璃的热力学性能.这些技术方面的问题可以归纳为三点:1)模压成型加工参量的选择和优化;2)模具非球面形状的预测和设计;3)透镜在退火过程中的热收缩变形规律.在这三点中,必须首先解决模压成型过程中加工参量的选择和优化这个问题.

近年来,随着数值仿真能力和计算机技术的进步,可以利用有限元软件,采用有限元法(Finite Element Method, FEM)来模拟和检查玻璃透镜模压过程中那些在实际试验中很难或者不可能测量的加工参量.更深入地了解整个模压过程进行成型性能预测,有限元法可以解决模压过程中的一些技术难题.本文采用 MSC. Marc 有限元分析软件<sup>[2]</sup>,对微小非球面玻璃透镜的模压过程进行了模拟分析,得出了最优的加工参量.通过模拟分析得出的热应

力和模压之后的应力、应变的分布情况,也对提高模具的使用寿命有一定的帮助.

## 1 模压成型加工方法

### 1.1 模压成型的基本过程

典型的非球面光学玻璃透镜的模型成型过程可以分为:加热、加压、退火、冷却并脱模四个过程(如图1).首先,通过模压成型机(如图2)上的红外线加热装置,将玻璃毛坯和模具一起加热到玻璃的模压温度,紧接着模压成型机的上下模具合模,加热后的玻璃毛坯被压缩并复制了模具模腔的形状,然后保存压力一定的时间,以一定的冷却速率进行退火,最后,成型的玻璃透镜被迅速的冷却到环境温度并脱模,完成模压.在整个模压成型加工过程中,氮气被充入到模压机中,用来保护透镜和模具.

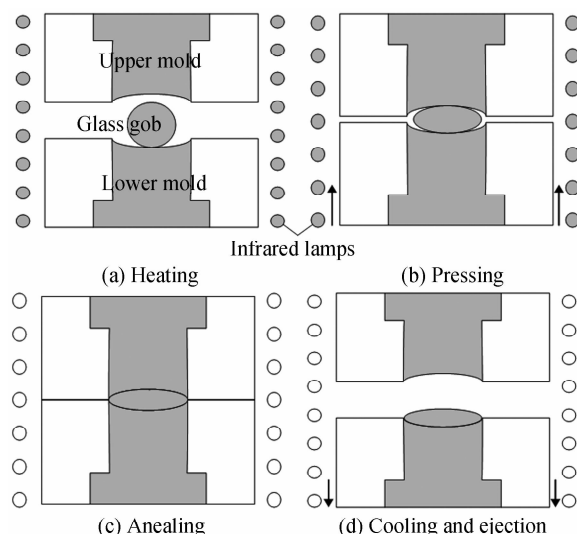


图1 模压成型过程  
Fig.1 The GMP process

\* 国家科技支撑计划(2007BAF29B03)资助

Tel:0731-88829817

Email:wyf8522@163.com

收稿日期:2010-05-13

修回日期:2010-06-04

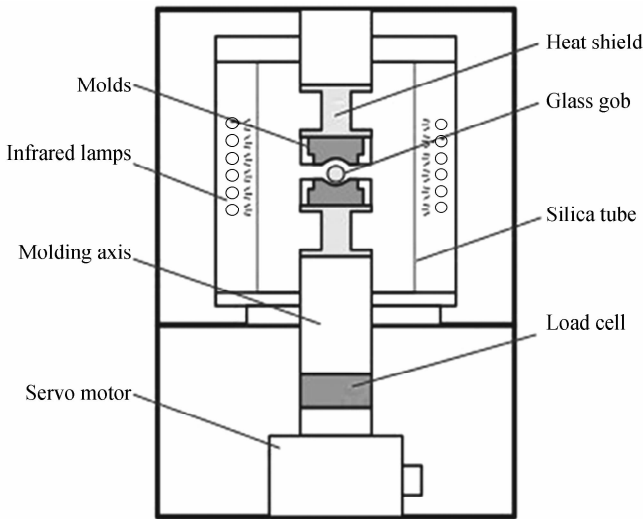


图2 超精密玻璃模压成型机

Fig. 2 The ultraprecision glass molding machine

## 1.2 粘弹性理论

材料的粘弹性特性是材料对于应力和应变随着时间变化的响应。玻璃属于粘弹性材料。在模压温度范围内,玻璃的变形属于粘弹性变形。在恒定的应力下,玻璃的应变由瞬时应变(弹性应变)和时变应变(粘性应变)组成。玻璃这种在恒定应力作用下的时变变形称为蠕变现象;相反,保持恒定的应变不变,应力会随时间而发生松弛现象,这种现象被称为应力松弛。蠕变和应力松弛分别是玻璃在模压成型过程中压缩阶段和退火阶段两种主要的变形特征。

为了更好地研究粘弹性变形,人们设计出了各种带有弹簧和阻尼器的力学模型。弹簧代表弹性特性,阻尼器代表粘性特性。实验研究表明广义麦克斯韦模型(如图3)最能解释玻璃在模压温度下压缩阶段所发生的变形规律<sup>[3]</sup>。图3中 $E$ 代表弹性模量, $\eta$ 代表阻尼器的粘性参量。

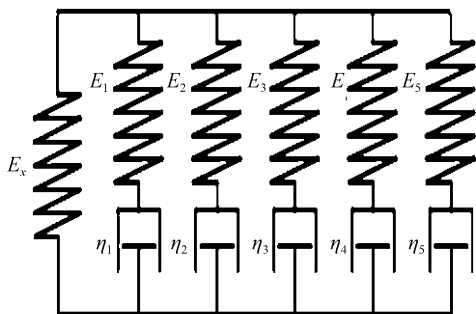


图3 广义麦克斯韦模型

Fig. 3 General Maxwell model

该模型中应力的变化可以用式(1)表示

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

式中 $G(t-\tau)$ 为应力松弛函数,其值随时间发生变化。应力松弛函数可以用 Prony Series 式(2)表示

$$G(t) = G_0 \sum_{i=1}^n \omega_i e^{-t/t_{ri}} \quad (2)$$

式中 $\omega_i$ 为相对模量; $t_{ri}$ 为松弛时间,可由 $\eta_i/E_i$ 得出,用来描述时间对温度变化的影响。

转变函数 $A(T)$ 可以用式(3)表示

$$\ln(A(T)) = H/R[(1/T_{ref}) - (1/T)] \quad (3)$$

式中 $T_{ref}$ 为参考温度, $H$ 为玻璃的活化能, $R$ 为理想气体常量。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 有限元数值分析的基本设置

有限元模拟分析采用商业非线性有限元软件 MSC. Marc,它能模拟机械设计和加工应用中静态、动态和复杂耦合的物理问题。采用本软件可以较为精确地模拟光学玻璃模压成型过程中粘弹性的应力/应变变化过程,从而得出最优的加工参量。有限元模型模具的材料采用 WC(碳化物),微小非球面光学玻璃毛坯采用的材料是 BK7,WC 和 BK7 的热力学特性和机械特性见表1和表2<sup>[4]</sup>。模压成型有限元模型采用中心对称的二维有限元模型(如图4),网格采用四边形单元,广义麦克斯韦模型用来模拟玻璃在模压过程中的变形规律。上模和下模设为弹性体。模压过程中的玻璃属于粘弹性材料,故设为粘弹性体。摩擦以及玻璃-模具间的热交换不忽略,作为边界条件输入到模型中。

表1 BK7 玻璃的热力学性能

Table 1 Thermomechanical properties of glass BK7

Property	Value
Module of elasticity $E/(\times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	820
Module of rigidity $G/(\times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	106.7
Poisson's ratio $\nu$	0.206
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 510
Thermal expansion $\alpha/(\times 10^{-6} \cdot \text{C}^{-1})$	7.1
Thermal conductivity $k/(\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$	1.114
Transition temperature $T_g/(\text{C})$	557
Yielding temperature $A_i/(\text{C})$	625
Softening point SP/(\text{C})	718
Material type	Viscoelastic body

表2 WC 玻璃的热力学性能

Table 2 Thermomechanical properties of mold WC

Property	Value
Module of elasticity $E/(\times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	570
Poisson's ratio $\nu$	0.22
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	14 650
Thermal expansion $\alpha/(\times 10^{-6} \cdot \text{C}^{-1})$	4.9
Thermal conductivity $k/(\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$	63
Material type	Elastic body

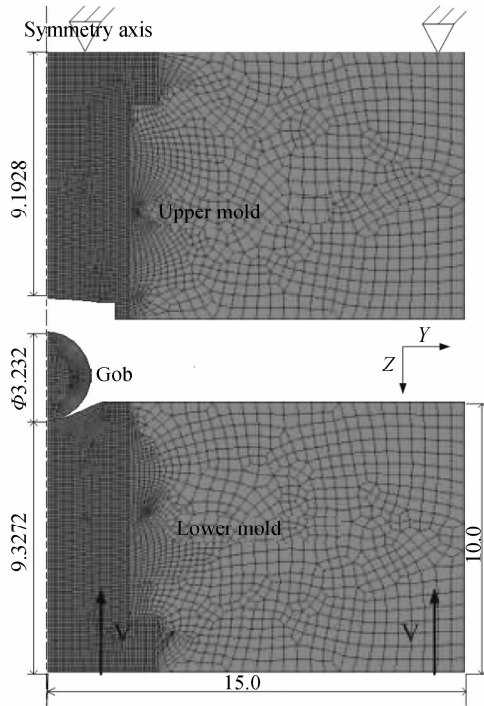


图4 二维轴对称GMP有限元模型

Fig. 4 2D axisymmetric simulation model of GMP

## 2.2 有限元数值分析的基本方程和边界条件

玻璃在模压温度下的变形特性遵循广义麦克斯韦力学模型, 应力  $\sigma(t)$  的变化用式(1)表示.

热边界条件用式(4)、(5)来定义

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = h_{int} (T - T_c) \quad (4)$$

$$-k_2 \frac{\partial T}{\partial n} = h_{i\infty} (T - T_\infty) \quad (5)$$

式中  $k_1$  为玻璃的热传递系数,  $k_2$  为模具的热传递系数;  $T_c$  为模具和透镜的接触面温度,  $n$  为接触面的单位法向量,  $h_{int}$  为透镜模具间的接触面的热传递系数, 值为  $2800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ ,  $h_{i\infty}$  为透镜和环境的对流热传递系数, 值为  $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ ,  $T_\infty$  为透镜与环境接触面的温度. 式(4)为模具和玻璃毛坯的热边界条件, 式(5)为玻璃毛坯、模具和环境的边界条件.

剪切摩擦模型用来模拟玻璃和模具之间的摩擦情况用式(6)表示

$$\tau = m \times k \quad (6)$$

式中  $\tau$  为玻璃-模具接触面的剪切强度 (MPa),  $k$  为玻璃的剪切屈服应力 (MPa),  $m$  为剪切系数 ( $0 \leq m \leq 1$ ), 在此次模拟中因为玻璃和模具之间为粘性接触, 故本文中  $m$  取 1.0.

## 3 有限元数值分析结果

超精密模压成型微小非球面玻璃透镜需要考虑

的两个重要的加工参量为: 模压速率和模压温度. 为了研究这两个加工参量对透镜最终成型质量的影响, 本文通过保持一个加工参量不变, 变化另一个加工参量的方法进行了数值模拟分析, 并通过对比分析结果, 模拟出最优的加工参量范围.

### 3.1 相同模压温度、不同模压速率下的仿真结果

玻璃的最适宜模压的粘度范围为  $10^8 \sim 10^{10} \text{ (dPa} \cdot \text{s)}$ , BK7 玻璃在  $670 \text{ C}$  附近的粘度就在此粘度范围之内 (如图 5). 所以, 此模拟模压温度取为  $670 \text{ C}$ , 模拟在  $0.01, 0.05, 0.1 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$  三个不同的模压速率下完成.

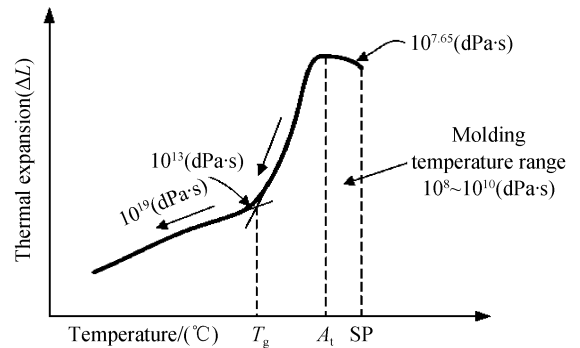


图5 BK7 玻璃的热膨胀曲线

Fig. 5 Thermal expansion curve of glass BK7

从模拟结果 (图 6~7) 可以看出, 成型后的透镜和模具的残余应力的大小和分布都和模压速率有关. 模压速率越小, 最大残余应力越小, 分布越趋于合理; 而较大的模压速率则导致最大残余应力增大, 且分布范围加大. 最小残余应力随模压速率的变化不大且很小保持在  $0.001 \text{ MPa}$  以下. 产生这种现象的原因是: 模压速率增大, 导致透镜成型时间减小, 透镜没有足够的时间来松弛残余应力, 而较低的速率, 成型时间较长, 松弛残余应力的时间也较长, 从而残余应力较小且分布合理. 但是, 较小的模压速率, 降低了模压效率. 因此, 必须综合效率和成型效果, 选择最合理的模压速率参量.

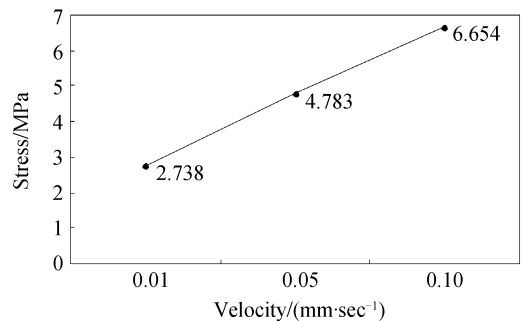


图6 恒定模压温度, 不同速率下的最大残余应力的变化  
Fig. 6 The maximum residual stress change at different pressing velocities and the same molding temperature

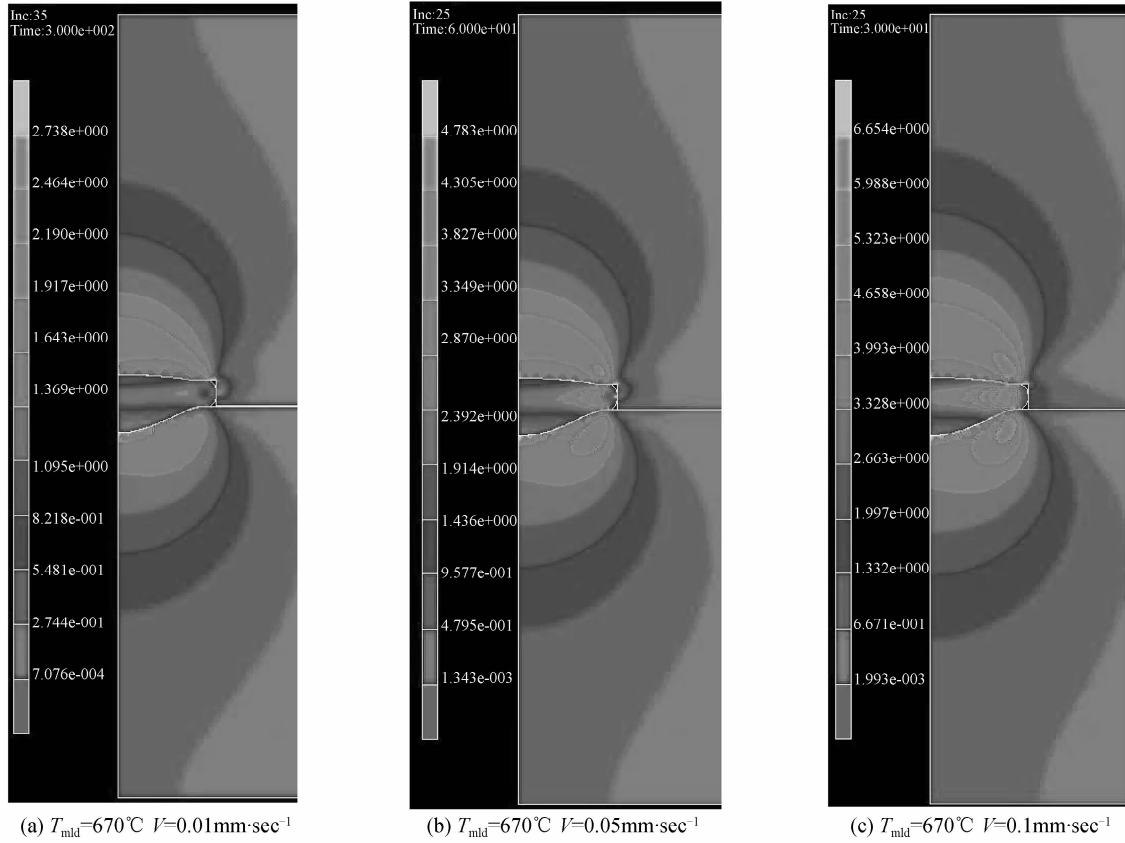


图7 模压温度为 670 °C,模压速率为 0.01、0.05 和 0.1 mm · sec<sup>-1</sup>时的应力分布

Fig.7 Equivalent stress distributions ( $T_{mld}=670\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V=0.01, 0.05, 0.1\text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

### 3.2 相同模压速率、不同模压温度下的仿真结果

保持模压速率不变,根据适宜模压温度的粘度范围,模压温度选择在 660 °C、670 °C 和 680 °C 三个温度下完成,模压速率为 0.05 mm · sec<sup>-1</sup>。

从图 8、9 的仿真结果可以看出,模压温度对透镜和模具的残余应力的影响很大.在 BK-7 玻璃的模压温度范围内,残余应力随着温度的升高而降低.产生这种现象的原因是:当模压温度超过玻璃的转化温度  $T_g$  时,玻璃的粘度随着温度的升高而降低,从而更容易模压成型,导致残余应力随着温度的升高而降低.但是,升高温度会使模压过程中模具和环境的温差加大,较大的温差影响模具的使用寿命<sup>[5]</sup>。

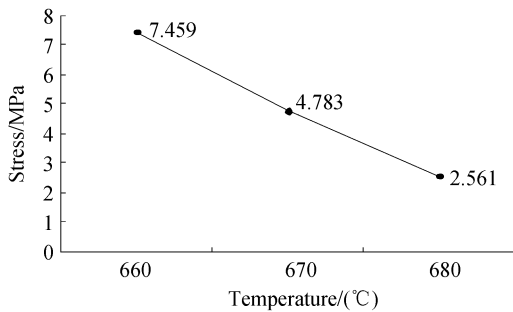


图8 恒定速率,不同模压温度下的最大残余应力的变化  
Fig.8 The maximum residual stress change at different molding temperatures and the same velocity

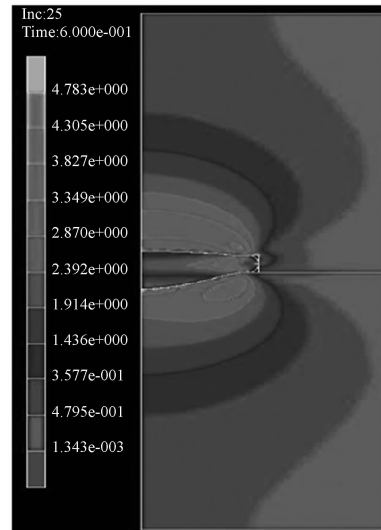


图9 模压温度为 670 °C、模压速率为 0.05 mm · sec<sup>-1</sup>,残余应力分布情况

Fig.9 Equivalent stress distribution ( $T_{mld}=670\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V=0.05\text{ mm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

模压成型模具的加工成本是很高的,所以选择模压温度应综合效果和效益的因素。

## 4 结论

1) 通过分析对比模拟结果,可以看出模压后透镜和模具的最大残余应力随着模压速率的减小而增

大,最大残余应力的分布范围随着模压速率的减小而减小.较小的残余应力值和较窄的分布范围,能显著提高成型透镜的光学成像质量和镜面质量.但是,模压速率过快,导致模压力增大,会影响模具的使用寿命,导致使用寿命降低.综合模压效率、模具的使用寿命、成型效果考虑,可选最优的模压速率为  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ .

2)模压后透镜和模具的残余应力随模压温度的升高而迅速降低,最小应力值变化不大.但是较大的模压温度,会导致模具和环境的温差变大,从而使模具的寿命降低.综合以上因素,可选最优的模压温度可取在  $670 \text{ }^\circ\text{C}$  附近.

#### 参考文献

[1] YIN S H, FAN Y F, ZHU Y J. Progress in nano-precision machining for micro lens mould at Hunan University[C]. The

1st International Conference on Surface and Interface Fabrication Technologies (ICSIF). RIKEN, Japan, 16/7, 2009: 188-195.

[2] 陈火红,尹伟奇,薛小香. MSC. Marc 二次开发指南[M]. 北京:科学出版社,2004.

[3] ZHOU T, YAN J, MASUDA J, *et al.* Numerical and experimental investigation on the transferability of ultraprecision glass molding press for microgrooves[C]. Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2009), November 11-13, 2009, Kitakyushu, Japan, 2009: 1-5.

[4] JAIN A, YI A Y. Numerical simulation of compression molding of aspherical glass lenses [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, **88**(3): 530-535.

[5] JAIN A. Experimental study and numerical analysis of compression molding process for manufacturing precision aspherical glass lenses[D]. The Ohio State University, OH, 2006.

## Numerical Simulation of Ultraprecision Glass Molding for Micro Aspherical Glass Lens

YIN Shao-hui, WANG Yu-fang, ZHU Jun-ke, HUO Jian-jie, CHEN Feng-jun, YU Tian-wu, WANG Yu  
(*Institute of Micro-nano Fabrication, Hunan University, Changsha 410082, China*)

**Abstract:** Finite element model of ultraprecision glass molding press for micro aspherical glass lenses is built by the nonlinear finite element software MSC. Marc. Numerical simulation analysis is carried out. Compared to residual stress of formed lens and mould distribution under the different processing parameters, the optimal molding velocity and the range of molding temperature of ultraprecision glass molding press are obtained. The research results are helpful for the mass production of micro aspherical glass lenses.

**Key words:** Glass molding press; Micro aspherical glass lens; Generalized Maxwell model; Finite Element Analysis (FEA)



**YIN Shao-hui** was born in 1967. He received the Ph. D. degree from Utsunomiya University in 2002. Now he is a professor and Doctoral Supervisor, and his main research interests focus on processing technology of micro/nano manufacturing, ultraprecision machining micromachining, ultrahigh speed machining.