

文章编号 1004-924X(2016)增-0446-08

## 光学玻璃微沟槽模压成形仿真与试验研究

周天丰\*, 解加庆, 刘 洋, 梁志强, 王西彬  
(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:**为了实现光学玻璃微沟槽的高精度模压成形制造,通过模压成形有限元仿真与试验,揭示玻璃微沟槽模压成形中材料高温变形规律。首先,将传统黏着摩擦模型与 Wanheim/Bay 摩擦模型相结合,建立了改进的玻璃-模具界面摩擦模型,用于模压成形过程的有限元仿真;其次,建立了玻璃高温粘弹性本构模型,对玻璃微沟槽模压成形过程进行仿真,分析了改进的玻璃-模具界面摩擦模型对成形应力的影响;最后,利用 Ni-P 镀层微沟槽模具开展玻璃微沟槽模压成形试验,制造出了光学玻璃微沟槽结构。结果表明:使用改进的玻璃-模具界面摩擦模型,摩擦界面呈现出明显的界面滑移现象,单元应力达到剪切阈值后呈现抖动上升趋势;与库伦摩擦模型相比,改进的玻璃-模具界面摩擦模型可以更加精确描述高温玻璃界面摩擦特性;试验测量表明微沟槽高度方向成形误差为  $0.275\mu\text{m}$ 。

**关键词:**微沟槽;模压成形;界面摩擦;粘弹性;光学玻璃;镀层模具

**中图分类号:**TH128 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0446

### Simulation and experimental study on the molding process for microgrooves on optical glass

ZHOU Tian-feng, XIE Jia-qing, LIU Yang, LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhoutf@bit.edu.cn

**Abstract:** In order to manufacture high precision optical glass microgrooves, the finite element simulation and experiment on glass molding process are carried out to reveal the glass deformation behavior at high temperature during microgroove molding. Firstly, a modified glass-mold interface friction model is established by combining the general adhesive friction model with the Wanheim/Bay friction model, and the modified model is applied to the finite element calculation. Secondly, the high temperature viscoelastic constitutive model of glass is established, the glass microgroove molding process is simulated, and the influence of the improved glass-mold interface friction model on the forming stress is analyzed. Finally, the microgrooves are fabricated by using Ni-P plating mold. The results present that a distinct interface slip phenomenon appeared when the modified glass-mold interface friction model is applied in simulation. The element stress curve shows jitter rising trend after reaching the shear threshold value. Compared with the Coulomb friction model, the modified model can describe the

收稿日期:2016-05-10;修订日期:2016-06-07.

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973 计划”资助项目(No. 2015CB059900);国家自然科学基金资助项目(No. 51375050);霍英东教育基金青年教师资助项目(No. 151052)

interface friction characteristics of high temperature glass more accurately. The height direction replication error of glass microgrooves formed by molding process is  $0.275\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** Microgrooves; Glass molding process; Interfacial friction; Viscoelasticity; Optical glass; Plating mold

## 1 引言

光学玻璃微沟槽阵列是指一系列微米或亚微米级的微细沟槽的组合,在光电系统中具有减少光的反射,提高光信号传输率的功能,利用微沟槽的波导效应,可以有效控制光的能量分布,提高光能利用率,是现代光学工程中重要的光学元器件<sup>[1]</sup>。例如,表面覆盖有微沟槽薄膜或微结构薄膜的镜片被用来制造高速高分辨率相机<sup>[2]</sup>;三角形表面微沟槽有利于提高太阳能接受器件的使用效率和半导体激光器件的出光效率<sup>[3]</sup>。光学玻璃微沟槽制造通常是利用微切削、MEMS 刻蚀等工艺方法在光学玻璃表面上加工出特征尺寸在纳米/微米级的微沟槽形状。

玻璃微沟槽模压制造是指在高温下施加一定的压力将模具表面的微沟槽形状复制到受热软化的玻璃表面上,经退火冷却固化,在光学玻璃材料表面加工出微沟槽<sup>[4]</sup>。该方法与传统微切削、MEMS 刻蚀等加工技术相比,具有成形精度高、效率高、一致性好和加工成本低等优点,适合大批量生产制造,被认为是光学微沟槽制造最有效的方法之一,具有较高的研究与应用价值<sup>[5]</sup>。国内外学者对微沟槽模压成形进行了研究,Yasunori Saotome 研究了模压温度、模具微沟槽形状对微沟槽填充率的影响<sup>[6]</sup>;Ryuichi Kobayashi 利用仿真和试验研究了微沟槽尺寸对成形结果的影响,并加工出了微沟槽阵列<sup>[7]</sup>;Zhou T 将 Ni-P 镀层作为模具材料,通过精密切削加工出了微沟槽模具,并利用该模具加工出了微沟槽<sup>[8]</sup>。Zhou T 通过有限元仿真与试验相结合的方法,研究了玻璃-模具界面摩擦对成形玻璃内应力的影响,并分析了内应力与模具寿命的相关性<sup>[9]</sup>。本文将传统黏着摩擦模型与 Wanheim/Bay 摩擦模型相结合,建立了改进的玻璃-模具界面摩擦模型;建立了玻璃高温粘弹性本构模型,对玻璃微沟槽模压成形过程进行仿真,并分析了改进的玻璃-模具界面摩

擦模型对成形应力的影响;利用 Ni-P 镀层微沟槽模具开展玻璃微沟槽模压成形试验,制造出了光学玻璃微沟槽结构。结果证明使用改进的玻璃-模具界面摩擦模型可以更精确描述微沟槽成形界面摩擦特性,玻璃模压成形可以实现光学玻璃微沟槽的高精度模压成形制造。

## 2 光学玻璃微沟槽模压成形方法

成形模具包括上模、下模和内外套筒,通过调节套筒高度可以控制模具压下的距离。完整的模压成形过程分为加热保温、高温加压、减压退火以及冷却脱模阶段,如图 1 所示。(1)将玻璃预形体放入模具模芯中,通过自动进给装置运至模压机成形室进行加热,成形室通入氮气防止玻璃和模具的氧化;(2)玻璃预形体在成形室内被加热到高于软化温度  $30\sim 40^\circ\text{C}$  时,上下模具闭合,玻璃预形体被压缩,保持一定时间使微纳结构填充完全;(3)在上模上继续维持一个较小的载荷,缓慢降低模具温度至  $200^\circ\text{C}$  左右。(4)模具退出成形室,冷却至室温后将玻璃成形件取出。

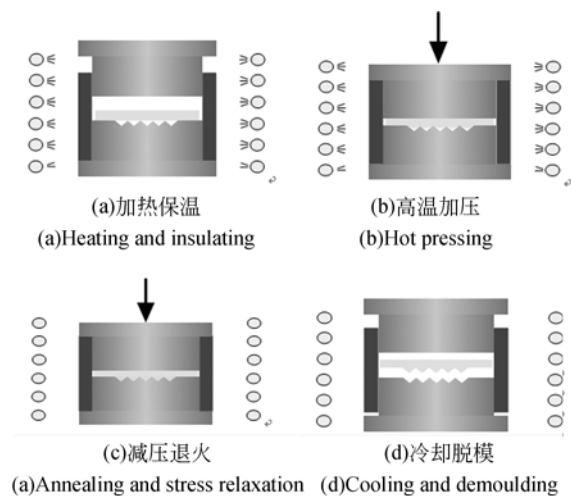


图 1 微沟槽模压成形过程

Fig. 1 Glass molding process for microgrooves

模压过程中玻璃预形体与模具微沟槽结构表

面的摩擦对玻璃的填充影响很大,传统库伦摩擦不考虑界面应力对界面摩擦系数的影响,因此,需要对玻璃-模具界面摩擦进行重新建模;其次,玻璃受热软化后,材料呈现粘弹性的力学特性,需要构建高温玻璃材料粘弹性本构模型;最后,在模压成形有限元计算中,玻璃材料属于大变形,计算过程中容易出错,需要选择合理的仿真算法。基于以上分析,本文采用流固耦合算法(CEL),将改进的玻璃-模具界面摩擦模型引入到有限元计算中,建立玻璃高温粘弹性本构模型,对微沟槽高温模压成形过程进行模拟;在此基础上,利用 Ni-P 镀层微沟槽模具,进行了玻璃微沟槽模压成形试验,获得了玻璃微沟槽结构,并对微沟槽进行了测量。

### 3 光学玻璃微沟槽模压成形仿真

#### 3.1 玻璃-模具界面摩擦特性建模

在微沟槽成形过程中,玻璃与模具的界面摩擦是影响微沟槽填充的重要因素。区别于金属材料,高温玻璃呈现明显迟滞力学特性,反映在玻璃-模具界面接触作用上,即表现为受应力影响较大,当应力变大时,玻璃与模具表面的接触面积会随之增大,如图 2 所示。

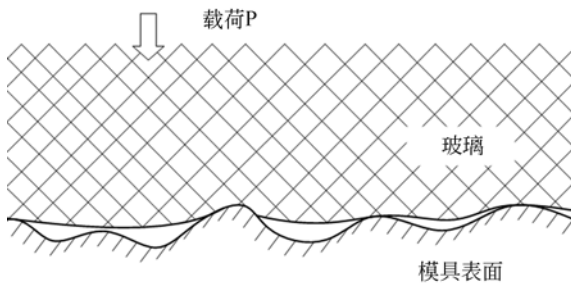


图 2 玻璃-模具界面摩擦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interface friction between glass and mold

根据通用黏着摩擦理论,界面的摩擦源于两个表面的部分黏着。纯净的表面之间形成黏着点的剪切强度大致等于工件的剪切强度  $k$ ,若工件相对于模具运动,则剪断这些点所需的应力,即接触面的摩擦应力  $\tau$  为<sup>[10]</sup>:

$$\tau = \frac{A_r k}{A_0}, \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为实际接触比( $A_r/A_0$ )。

污染膜的剪切强度  $m_c$  决定了整个接触面的

摩擦情况, $\tau$ 可表示为  $k$  的  $m_c$  分量,因此有:

$$\tau = \alpha m_c k, \quad (2)$$

式中: $m_c$ 为剪切膜强度系数, $0 \leq m_c \leq 1$ 。

当  $p/\sigma_0 \geq p^*/\sigma_0$  时,

$$\frac{\tau}{k} = \frac{\tau^*}{k} + \left[ m_c - \frac{\tau^*}{k} \right] \left[ 1 - \exp \frac{-(p/\sigma_0 - p^*/\sigma_0) \tau^*/k}{(m_c - \tau^*/k) p^*/\sigma_0} \right], \quad (3)$$

当  $p/\sigma_0 \leq p^*/\sigma_0$  时,

$$\frac{\tau}{k} = \frac{\tau^*}{k} \frac{p/\sigma_0}{p^*/\sigma_0}, \quad (4)$$

$p$ 为接触面上的压力, $\sigma_0$ 为材料屈服应力,控制参量  $\tau^*$  和  $p^*$  被定义为:

$$\begin{cases} \frac{\tau^*}{k} = 1 - \sqrt{1 - m_c} \\ \frac{p^*}{\sigma_0} = \frac{1 + \frac{\pi}{2} + \arccos(m_c) + \sqrt{1 - m_c^2}}{\sqrt{3}(1 + \sqrt{1 - m_c^2})} \end{cases}, \quad (5)$$

由第四强度理论:

$$k = 0.577 \sigma, \quad (6)$$

而黏弹性材料屈服强度与储能模量关系可表示为:

$$\sigma = 0.1 E, \quad (7)$$

将 Wanheim/Bay 摩擦模型代入式(7),可得接触比  $\alpha$  与接触面上的压应力  $p$  以及材料的初始屈服应力  $\sigma_0$  之间的关系:

当  $p/\sigma_0 \geq p^*/\sigma_0$  时,

$$\alpha = \left\{ \frac{\tau^*}{k} + \left[ m_c - \frac{\tau^*}{k} \right] \left[ 1 - \exp \frac{-(p/\sigma_0 - p^*/\sigma_0) \tau^*}{\left[ \frac{m_c - \tau^*/k}{\delta_0} \right] p^*} \right] \right\} \frac{1}{m_c}, \quad (8)$$

当  $p/\sigma_0 \leq p^*/\sigma_0$  时,

$$\alpha = \frac{\tau^*}{k} \frac{p/\sigma_0}{p^*/\sigma_0} \frac{1}{m_c}, \quad (9)$$

得到摩擦系数  $\mu$ :

$$\mu = \alpha m_c. \quad (10)$$

同样,需要设置剪切截断应力,即当成形过程中剪切应力达到该值时,不管接触切应力多大都将发生滑移。因玻璃-模具界面非真空,取  $m_c = 0.2$ ,得到摩擦系数与成形压力的关系曲线如图 3 所示。

#### 3.2 材料参数及有限元本构模型

仿真与试验中采用的玻璃型号 D-ZK2N

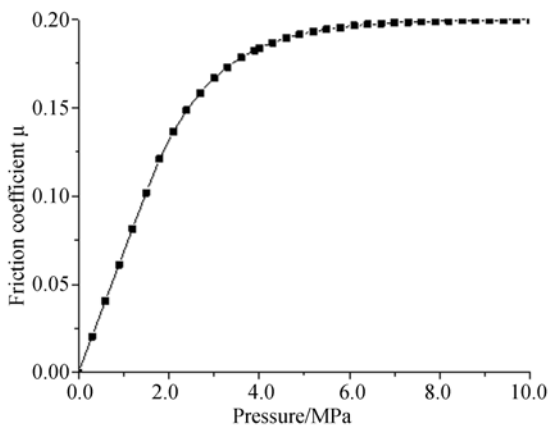


图 3 摩擦系数与压力关系曲线

Fig. 3 Relationship between friction coefficient and pressure

(NHG Co., Ltd),该玻璃软化温度较低,适合玻璃模压成形,其热机械性质如表 1 所示。

表 1 D-ZK2N 玻璃热机械性能

Tab. 1 Thermo-mechanical properties of glassD-ZK2N

属性	数值
转变温度 $T_g$ (°C)	495
屈服温度 $A_i$ (°C)	548
热膨胀系数 $\alpha$ ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	7.2 (20~120°C) 9.2 (100~300°C)
传导率 $k$ (W/(m×K))	1.126
弹性模量 $E$ ( $\times 10^9$ N/m <sup>2</sup> )	83.63
泊松比 $\nu$	0.251

为了描述玻璃在高温下的粘弹性变形特性,构建了 5 对弹簧和粘壶单元组合的广义 Maxwell 模型,如图 4 所示。其中,  $G_\infty$ 、 $G_i$  和  $\eta_i$  分别代表各单元的储能模量和黏度。

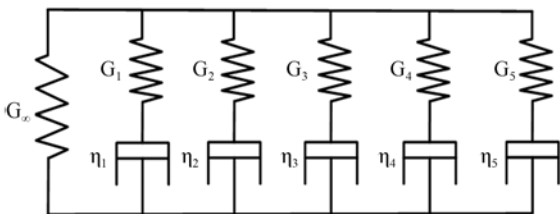


图 4 广义 Maxwell 本构模型

Fig. 4 Generalized Maxwell constitutive model

弹簧用来描述高温玻璃材料的弹性固体特征,粘壶用来描述随时间变化的粘性流体特性,因

此,与时间相关的应力应变响应可以描述为<sup>[11]</sup>:

$$\sigma = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{de}{d\tau} d\tau, \quad (9)$$

式中:  $t$  为当前时间,  $\tau$  为过去的时间,  $G(t-\tau)$  可以用 Prony 级数来描述:

$$G(t-\tau) = G_0 \left[ \alpha_\infty + \sum_{i=1}^n \alpha_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right], \quad (10)$$

式中:  $\tau_i$  为松弛时间,  $\alpha_i$  为权重因子,  $n$  为广义 Maxwell 模型单元个数  $G_0$  为单元初始模量。得到的 Prony 级数参数如表 2 所示。

表 2 拟合得到的 Prony 级数参数

Tab. 2 Fitted parameters of Prony series

$\alpha_i$	$\tau_i$
0.884	0.884
0.095 7	0.095 7
0.008 6	0.008 6
0.005 8	0.005 8
0.005 8	0.005 8

### 3.3 玻璃微沟槽模压成形仿真

由于三维微沟槽结构包含尖锐棱角,玻璃材料在填充过程中就要产生大变形,传统拉格朗日(Lagrange)算法容易产生畸变造成不能继续计算,而欧拉(Euler)算法又存在成形边界模糊不清影响计算精度的问题,因此考虑采用流固耦合(CEL)算法进行计算。所谓流固耦合算法,是指对于存在大变形的材料使用 Euler 算法,而对于模具等不易变形的材料,使用 Lagrange 算法,这样既能保证玻璃材料的大变形又不会因为边界不清影响计算精度。采用三维计算的模型较为耗费计算机资源,因此拟采用二维建模的方式对微细结构进行仿真。此外,实际预形体相对微结构是非常大的,如果按照原尺寸建模,将会消耗大量计算资源,因此只建立部分有限元模型,其中玻璃和模具设置为左右边界对称,玻璃顶端设置固定约束,建立的二维仿真模型如图 5 所示。

成形过程中模具以一定速度向上运动,成形速度为 1  $\mu\text{m/s}$ ,分别进行了两次仿真,比较使用库伦摩擦模型与改进的玻璃-模具界面摩擦模型的差别,其中库伦摩擦模型中摩擦系数设置为 0.1。图 6 所示为模压时间 10 s 后得到的玻璃微沟槽应力分布图,可以看到,应用与改进的玻璃-模具界面摩擦模型后,材料成形最大应力较库伦

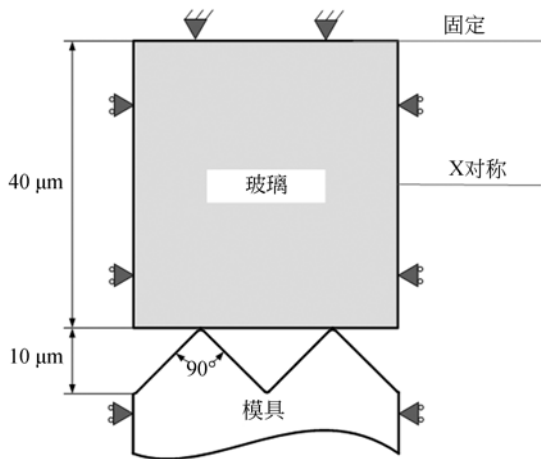


图 5 建立的有限元几何模型

Fig. 5 Established finite element model

摩擦模型应力要小,玻璃材料内部存在较大的剪切流动应力。

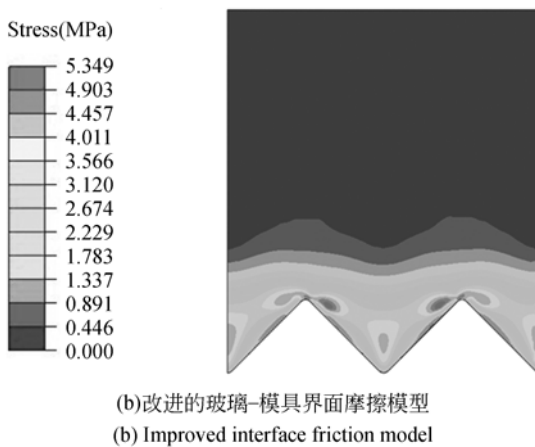
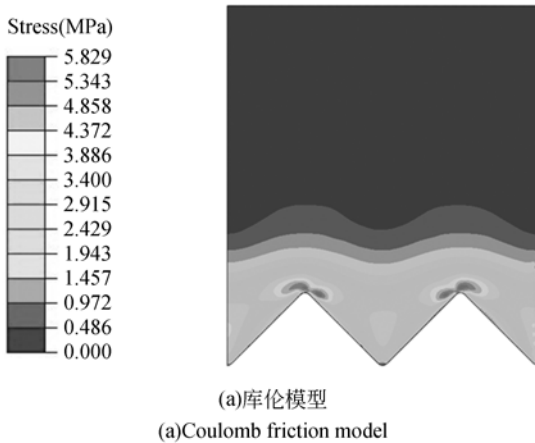


图 6 玻璃微沟槽应力分布图

Fig. 6 Von Mises stress distribution of glass micro-grooves

提取成形玻璃微沟槽底部单元应力数据,如图 7 所示。在成形初始阶段,采用两种摩擦模型的应力计算结果相同,随着模压成形进行,应力逐渐增加,当应力达到 1.36 MPa 时,采用改进的玻璃-模具界面摩擦模型的仿真数据呈现抖动增加,并低于采用库伦摩擦模型的应力值,表明玻璃-模具界面由于剪切截断应力作用,不断出现黏接与分离的作用,与高温玻璃迟滞力学特性更加吻合。改进后的玻璃-模具界面摩擦模型更能提现模压过程中玻璃材料的应力应变特点,对应单元应力达到剪切阈值后呈现抖动上升趋势;与库伦摩擦模型得到的应力相比,改进的玻璃-模具界面摩擦模型可以更加精确描述高温玻璃界面摩擦特性。

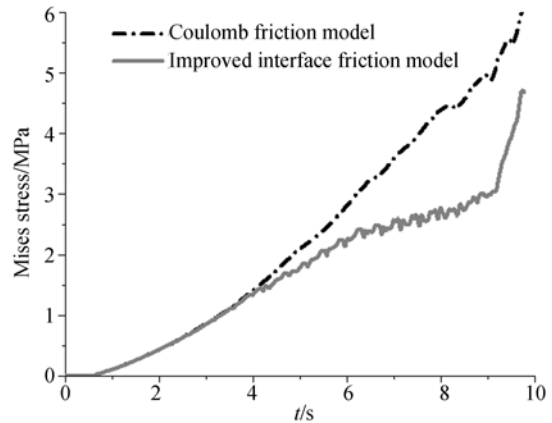


图 7 不同摩擦模型下模压成形应力随时间变化曲线  
Fig. 7 Curve of mises stress versus time under different friction models

### 4 玻璃微沟槽模压成形试验

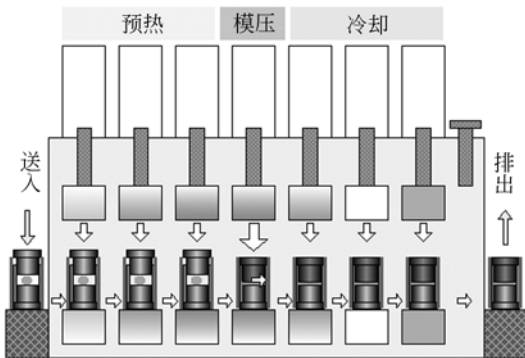
#### 4.1 微沟槽模压成形试验

微沟槽模压成形试验在日本 SYS 公司生产的模压成形机上进行,该模压成形机简图与原理如图 8 所示,设备包含控制柜与模压机主体。模压机主体包含加热、加压及自动输送装置,玻璃或塑料预形体在模压机主体内部经过加热保温、高温加压、减压退火以及冷却脱模,被加工成所需要的形状。模具通过模压腔内的电加热棒加热到预设温度。

图 9 所示为利用单点金刚石超精密微切削技术在 Ni-P 镀层表面加工而成的微沟槽结构模具。磷化镍 Ni-P 镀层具有相对较好的切削性能,适合



(a)设备图片  
(a)Photograph of the machine



(b)设备原理图  
(b)Schematic diagram of the machine

图 8 SYS 玻璃模压成形机  
Fig. 8 SYS glass molding machine

单点金刚石切削,可作为玻璃模压成形模具的理想材料<sup>[8,12]</sup>。作为试验测试用,模具表面只加工了部分微沟槽结构。

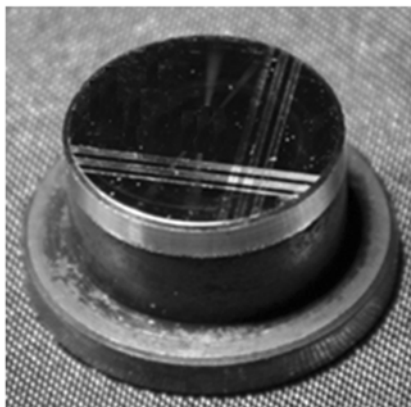


图 9 微沟槽模具  
Fig. 9 Microgroove array mold

图 10 中模压成形试验中采用的预形体为直径 7.8 mm,高 2.8 mm 的圆柱体,其表面粗糙度

为 10 nm。模压温度为 578℃,下压量为 1 mm。

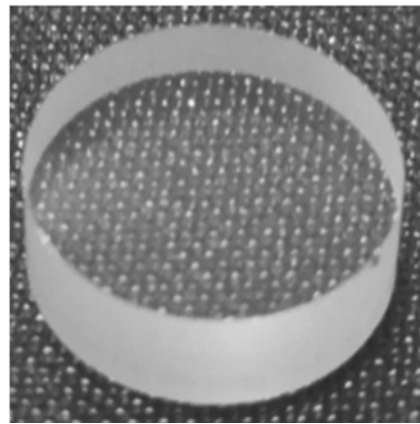


图 10 光学玻璃预形体  
Fig. 10 Optical glass preform

#### 4.2 光学玻璃微沟槽评价

模压得到的玻璃成形件如图 11 所示,对成形表面微沟槽采用 SEM 电镜扫描进行观察,如图 12 所示,图 12(a)为镀层模具微沟槽 SEM 图,12(b)为模压得到的玻璃微沟槽,可以看到模具上的微沟槽结构顶部和底部棱线都较为尖锐,而对应模压出的玻璃微沟槽底部棱线较为尖锐,沟槽顶部出现了一段较为平坦的区域,为了更好的分析模压成形过程的复制精度,需要引入更精确的测量手段测量模具与玻璃上微沟槽的轮廓曲线。

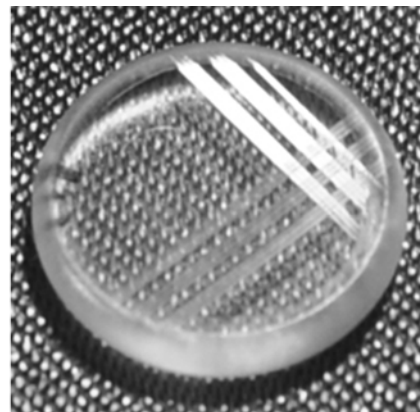
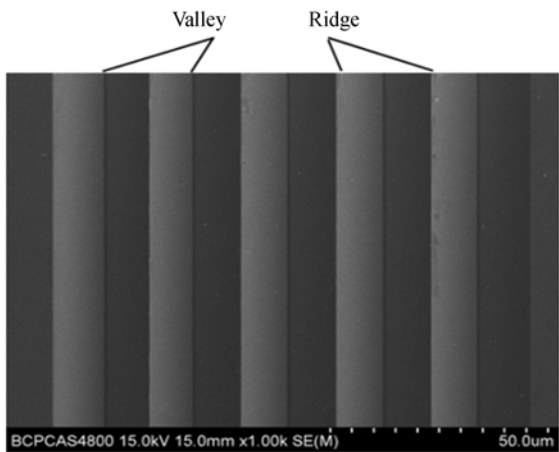


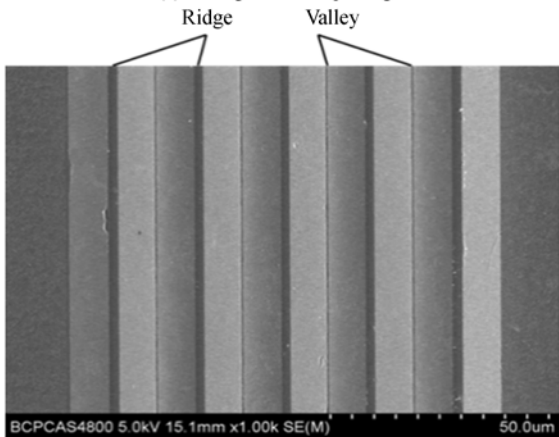
图 11 模压得到的光学玻璃微沟槽  
Fig. 11 Molded microgrooves on optical glass

对模具及成形后的玻璃表面微沟槽采用奥林巴斯 OLS4100 共聚焦显微镜进行观察,得到了模具与玻璃微沟槽轮廓,如图 13 所示。其中,模具表面微沟槽深度为 8.721 μm,宽度为 19.948



(a) 模具微沟槽

(a) Microgrooves on plating mold



(b) 玻璃微沟槽

(b) Microgrooves on optical glass

图 12 微沟槽 SEM 图

Fig. 12 SEM photograph of microgrooves on optical glass

$\mu\text{m}$ , 对应模压得到的玻璃微沟槽高度为  $8.446 \mu\text{m}$ , 宽度为  $19.948 \mu\text{m}$ , 高度成形误差为  $0.275 \mu\text{m}$ , 误差比为  $3.15\%$ 。

#### 参考文献:

- [1] CHEN S W, HSIEH J C, CHOU C T, *et al.*. Experimental investigation and visualization on capillary and boiling limits of micro-grooves made by different processes [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2007, 139(139): 78-87.
- [2] LIU L L, N H, TAY B Y, *et al.*. Preparation and characterization of micro components fabricated by micro powder injection molding [J]. *Materials*

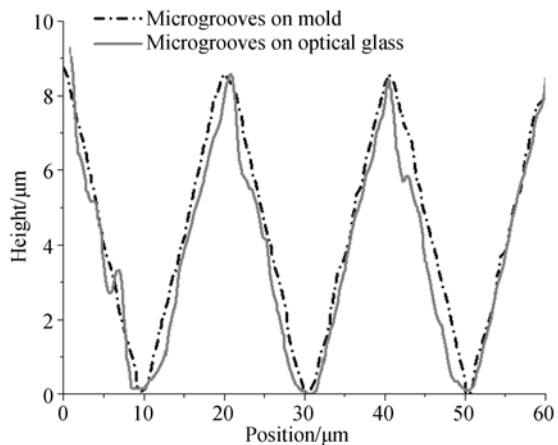


图 13 试验得到的模具与玻璃微沟槽轮廓

Fig. 13 Microgrooves profile of mold and glass after experiment

## 5 结 论

本文建立了改进的玻璃-模具界面摩擦模型以及玻璃高温粘弹性本构模型,并将其应用于微沟槽模压成形仿真,研究了改进的摩擦模型与传统库伦摩擦模型对成形应力的影响,得到了微沟槽成形应力分布规律。利用 Ni-P 镀层模具,进行了微沟槽模压成形试验,得到了模压后的玻璃微沟槽结构,并进行了观察。结果表明:使用改进的玻璃-模具界面摩擦模型时,摩擦界面呈现出明显的界面滑移现象,单元应力达到剪切阈值后呈现抖动上升趋势;与库伦摩擦模型得到的应力相比,改进的玻璃-模具界面摩擦模型可以更加精确描述高温玻璃界面摩擦特性。模压得到的微沟槽高度为  $8.35 \mu\text{m}$ ,相对于模具微沟槽高度,成形高度填充误差  $0.275 \mu\text{m}$ 。

*Characterization*, 2011, 62(6): 615-620.

- [3] HAVA S, AUSLENDER M. Design and analysis of low-reflection grating microstructures for a solar energy absorber [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 61(2): 143-151.
- [4] 尹韶辉, 靳松, 朱科军, 等. 非球面玻璃透镜模压成形的有限元应力分析 [J]. *光电工程*, 2010, 37(10): 111-115.
- YIN SH H, JIN S, ZHU K J. Stress analysis of compression molding of aspherical glass lenses using finite element method [J]. *Opto-Electronic Engi-*

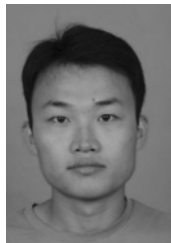
- neering, 2010, 37(10):111-115.
- [5] 蒋炳炎, 申瑞霞, 沈龙江, 等. 注射成型工艺参数对微结构零件复制度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):248-256.  
JIANG B Y, SHEN R X, SHEN L J, *et al.*. Influence of processing parameters in injection molding on replication fidelity of microstructure parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 248-256.
- [6] YASUNORI S, KENICHI I, NARIHITO S. Microformability of optical glasses for precision molding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140(1-3): 379-384.
- [7] YAN J W, TAKASHI O, ZHOU T F, *et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10):4802-4808.
- [8] ZHOU T F, LIANG Z Q, WANG X B, *et al.*. Experiment on Glass Microgroove Molding by Using Polycrystalline Nickel Phosphorus Mold [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 797:483-488.
- [9] 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.
- [10] 雷帆, 温形, 于建明, 等. 基于粘着摩擦理论的塑料微观摩擦特性研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(8):85-88.  
LEI F, WEN T, YU J M, *et al.*. Research on micro-tribological properties of plastic materials based on adhesive friction theory [J]. *China Plastics Industry*. 2012, 40(8):85-88.
- [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] 李加东, 吴一辉, 张平, 等. 掩模电镀镍微结构的镀层均匀性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3):452-458.  
LI J D, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. Thickness uniformity of Ni microstructure deposited by through-mask electroplating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):452-458.

#### 导师简介:



周天丰(1981—),男,湖北省黄梅人,博士后,教授,博士生导师,国家“青年千人”引进人才,2006年于清华大学获得硕士学位,2009年于日本东北大学获得博士学位,主要从事光学器件模压成形工艺、超精密模具制造等方向研究。  
E-mail: zhoutf@bit.edu.cn

#### 作者简介:



解加庆(1988—),男,山东日照人,博士研究生,2011年于中北大学获得硕士学位,主要从事光学材料模压成形工艺、超精密制造研究。E-mail: nhn206@sina.com