

透镜阵列模压加压过程型腔充型率的有限元仿真

卢景红 徐敏 张浩

复旦大学光科学与工程系 超精密光学制造工程研究中心, 上海 200433

摘要 采用有限元方法模拟了玻璃透镜阵列模压的加压过程。采用5个单元的广义Maxwell模型和Tool-Narayanawamy转移方程分别描述高温下玻璃的粘弹性特性和热流变特性。重点分析了玻璃透镜阵列不同位置的模具型腔充型率以及模压温度和模压速度对透镜阵列型腔编号为4的充型率的影响。结果表明,靠近模具边缘的型腔充型率比靠近模具中间的低,模压温度越高充型率越大,模压速度越大充型率越大。

关键词 光学制造;透镜阵列;有限元法;充型率;粘弹性;模压成型

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.022303

Study on Cavity Filling Ratio of Lens Array in the Process of Compression Molding Pressing Using Finite Element Simulation

Lu Jinghong Xu Min Zhang Hao

Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Finite element method is used to simulate the process of the pressing in compression molding of glass lens array. Five-element general Maxwell model and Tool-Narayanawamy shift function are incorporated into the finite element method to describe the viscoelastic property and the heat flow characteristic of glass at high temperature, respectively. The filling ratios of mold cavity of glass lens array in different locations and the effect of temperature and molding velocity on cavity filling ratios in lens array are emphatically analyzed. The simulation result shows that cavity filling ratios are lower at the edge of the mold than that in the middle of the mold, and the higher temperature and molding speed will lead to higher cavity filling ratios.

Key words optical fabrication; lens array; finite element method; filling ratio; viscoelasticity; compression molding

OCIS codes 230.4000; 230.3990; 230.3120; 220.4610

1 引言

应用于精密光学的光学元件的尺寸日渐缩小,给精密加工提出了越来越大的挑战。传统上,对于高精度大尺寸的玻璃光学元件,通常采用磨削和抛光工艺来进行加工。然而对于小尺寸以及周期性结构的光学元件(如衍射光学元件和透镜阵列等)传统的加工方法十分费时,生产效率大大降低^[1]。对于大规模生产周期性结构的光学玻璃透镜阵列来说,模压成型方法是比较有前景的技术。此方法是通过模压高温下软化的玻璃,成型并复制模芯的面型,再经过冷却和脱模而成为目标产品。此方法不需要进一步的机械加工,因而与传统的玻璃材料去除方法相比,模压成型工艺可以显著提高生产效率^[2-4]。本文对高温下的玻璃透镜阵列模压成型工艺进行了有限元仿真,得出了不同条件下的充型率,可为实际生产中模压成型参数的选择提供参考。

收稿日期: 2013-08-25;收到修改稿日期: 2013-10-28;网络出版日期: 2014-01-21

基金项目: 国家863计划(2012AA040406)、复旦大学研究生创新基金(EZH6281304/001/033)

作者简介: 卢景红(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学制造方面的研究。E-mail: 11210720014@fudan.edu.cn

导师简介: 徐敏(1959—),男,研究员,主要从事光学设计、先进光学制造与光电测量等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn

2 玻璃透镜模压成型方法

完整的模压过程分为4个阶段:加热保温、加压、退火冷却以及脱模,如图1所示。1)将玻璃预制件放入下模模芯中,成型室通入氮气,防止高温下玻璃预制件和模具被氧化;2)玻璃预制件和模具通过红外装置加热到模压温度并保温一定时间,以使玻璃预制件和模具的温度一致;3)上下模缓缓闭合,玻璃预制件被压缩;维持一个相对较小的载荷,慢慢冷却已成型的镜片并使其内应力得以释放,即退火;4)迅速冷却玻璃镜片至室温,并开模取出成品。经过这4个步骤,透镜表面精确复制了模芯的面型^[5-9]。

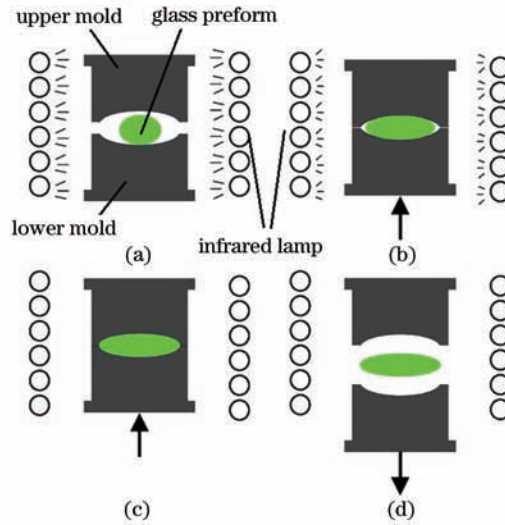


图1 典型的模压步骤

Fig.1 Typical steps of compression molding

模压温度和模压速度是模压工艺重要的成型参数,很大程度上影响着玻璃镜片的成型速率。模压过程中的玻璃预制件充型率对监控整个模压过程十分重要,因此,获得精确玻璃预制件的充型率非常重要。本文采用有限元方法(FEM)对透镜阵列模压成型过程进行模拟,旨在研究玻璃的高温成型机理以及模压温度和模压速度对透镜阵列充型率的影响,进而达到参数优化和指导实际工业生产的目的。

3 粘弹性模型和蠕变特性

玻璃材料的性质受温度影响明显。在室温下,玻璃呈现弹性固体特性。在软化温度以上,玻璃呈现粘性的牛顿流体特性。但在转换温度 T_g 和软化温度(SP)之间,玻璃呈现出显著的粘弹性,即兼具固体弹性和流体粘性的双重特性。蠕变是指材料受到一个恒定应力的作用,其应变随时间而逐渐增大的一种力学行为。在 t_0 时刻对玻璃施加恒定应力载荷 σ_0 , 其应变对应力的响应表现出粘性和弹性的双重性质,此时应变响应包括3个部分:瞬时弹性应变 ϵ_E 、迟滞弹性应变 ϵ_D 和应变率为 $\sigma_{0/\eta}$ 的粘性应变 ϵ_η ^[10-11], 如图2所示。

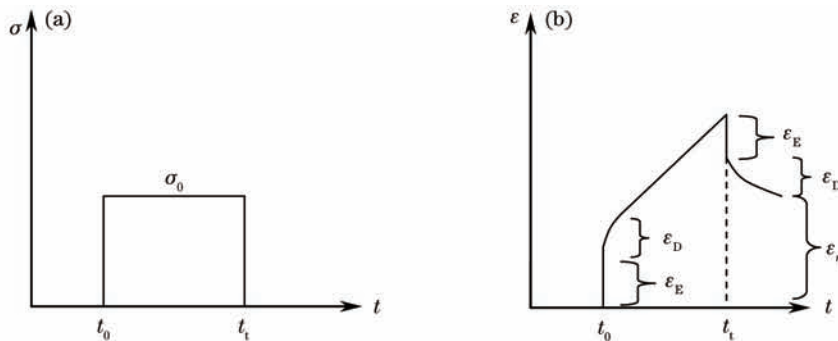


图2 粘弹性玻璃的蠕变曲线。(a)恒定应力载荷;(b)应变响应

Fig.2 Creep curve of viscoelastic glass. (a) Constant stress load; (b) strain response

通常,有4种模型可以用来描述高温玻璃的粘弹性:Maxwell模型, Kelvin模型, Burgers模型和广义Maxwell模型。在这几种模型中,广义Maxwell模型最适合描述玻璃高温下的粘弹性^[12]。本文运用5个弹

簧和粘壶对(单元)的广义 Maxwell 模型来描述粘弹性玻璃的变形行为,如图 3 所示。其中, E_∞ , E_i 和 η_i 分别是各单元的弹性模量和粘度。

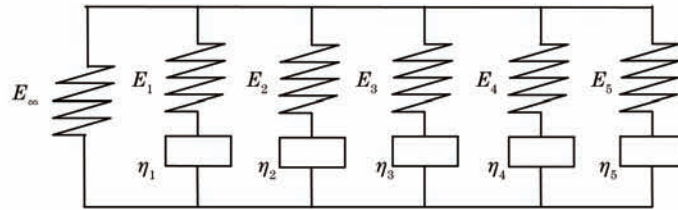


图3 描述玻璃粘弹性的广义 Maxwell 模型

Fig.3 Generalized Maxwell model to describe the viscoelastic property of glass

与时间相关的应力应变响应可以用下式描述:

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

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

$$G(t-\tau) = G_0 \sum_{i=1}^n w_i \exp(-t/t_{ii}) \quad (2)$$

式中 t_{ii} 为松弛时间, w_i 为相应的权重因子, n 为广义 Maxwell 模型的单元个数, G_0 为单元初始的体积模量。其中 w_i 满足

$$w_\infty + \sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (3)$$

粘弹性玻璃的转移方程可以用 Tool-Narayanaswamy (TN) 方程来描述:

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

式中 T_{ref} 为参考温度, H 为指活化能, R 为理想气体常数。

4 玻璃透镜阵列仿真

4.1 有限元模型及材料参数

采用 8 透镜的二维有限元仿真模型,对透镜阵列的模压工艺的加压过程进行仿真,如图 4 所示。

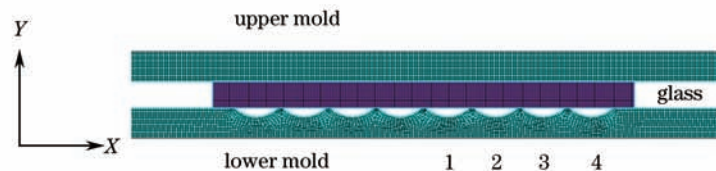


图4 透镜阵列模压仿真的二维有限元图

Fig.4 Schematic of the two-dimensional FEM model for the compression molding of lens arrays

根据研究项目的要求,选择如下的模型参数进行建模:上下模长均为 197 mm,厚均为 7 mm;玻璃预制件长 97 mm,厚度 6 mm;型腔宽 10 mm,深 2 mm,型腔间距 1 mm,如图 4 所示。为了避免应力集中,增加计算的收敛速度,减少计算时间,对型腔尖角进行倒圆角处理。

在模拟过程中上下模具设置为刚性体,模具与玻璃预制件之间的摩擦力设置为 0.1。玻璃预制件被离散成 2328 个平面四边形单元。在模拟中,上模限制所有自由度,下模只有垂直方向的移动自由度。玻璃预制件自由度无限制。

仿真选用的玻璃型号是 L-BAL42,这种玻璃的转变温度较低,可以降低成型成本^[13]。模拟中所需要的材料参数如表 1 和表 2 所示。

4.2 透镜阵列仿真结果及讨论

为了研究玻璃透镜阵列充型机理,首先对 570 °C 的模压工况进行有限元仿真,模压速度设为 0.012 mm/s。

模压进行 90 s 后,观察模具充型情况,如图 5 所示。图中 1、2、3、4 分别与图 4 中的相应数字对应,不同的数字代表与之相对应的不同的模具型腔。由于模型的对称性,故只考虑了模型的一半。

表 1 L-BAL42 玻璃的热机械性质

Table1 Mechanical and thermal properties of L-BAL42 glass

Parameter	Value
Transition temperature /°C	506
Elastic modulus E /(10^8N/m^2)	891
Rigidity modulus G /(10^8N/m^2)	357
Poisson's ratio ν	0.247
Yielding temperature A_i /°C	538
Specific gravity /(kg/m^3)	3050

表 2 应力松弛参数

Table2 Stress relaxation parameters

No.	Weighting factors w_i	Reduced time t_{ri} /s
1	0.238	0.0070
2	0.238	0.0072
3	0.238	0.0075
4	0.238	0.0078
5	0.047	0.0010

从图 5 可知,从型腔 1 到型腔 4,模具型腔的充型率逐渐降低。这是因为在模压过程中,玻璃材料与模具边缘产生了较大的横向摩擦力,造成边缘型腔 4 的充型率最小,而从边缘向中间,摩擦力的影响逐渐减弱,所以从边缘向中间的型腔充型率逐渐增大。

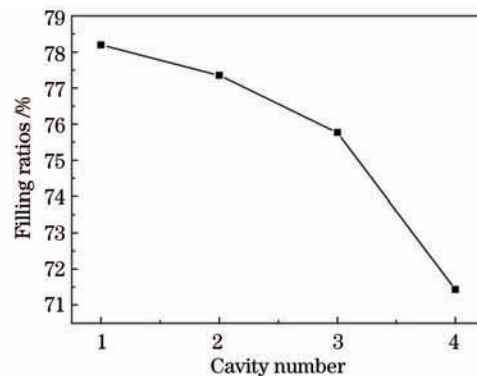


图 5 模具型腔的充型率(模压温度 570 °C,模压速度 0.012 mm/s,模压时间 90 s)

Fig.5 Filling ratios of the mold cavities with molding temperature 570 °C, molding speed 0.012 mm/s and molding time 90 s

由以上分析可知,编号为 4 的型腔充型率最低,即在模压过程中充型速度最慢。因此,后面就只对型腔 4 在不同温度以及不同模压速度下的充型率进行研究。

图 6 给出了模压速度为 0.012 mm/s,模压时间 90 s 时,编号为 4 的型腔的充型率与温度的关系。由图 6 可知,充型率随着模压温度的升高而增大。这是由于玻璃材料的粘弹性所致。温度升高,玻璃材料的粘度降低,使得在同样应力下材料更容易发生变形,在模压过程中也就更易成型。

尽管如此,温度却不能过高。一方面,过高的温度会导致模具和玻璃材料粘连,降低模具的使用寿命,同时造成成型件的表面精度降低,降低成品率。另一方面,从图 6 可以看出,随着温度的增加,型腔充型率的增加趋势在逐渐减缓。因此,需要综合考虑后,再对模压温度做出合理的选择。

图 7 给出了模压温度为 570 °C,模压时间为 90 s 时,编号为 4 的型腔的充型率与模压速度的关系。由图 7 可知,型腔 4 的充型率随着模压速度的增大而升高。这是因为模压速度的增大导致材料和模具间阻碍材料成型的摩擦力的作用时间变小,导致了型腔填充速率的加快,填充率上升。

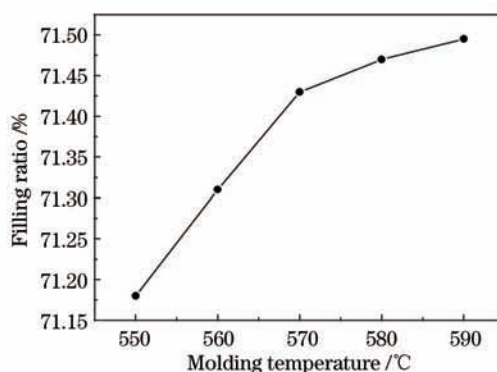


图6 模具型腔的充型率与模压温度的关系(模压速度 0.012 mm/s, 模压时间 90 s, 型腔 4)

Fig.6 Relationship between filling ratio and molding temperature with molding speed 0.012 mm/s and molding time 90 s for the cavity 4

然而,模压速度不宜过快。由图 7 可知,虽然模压速度加快型腔充型率会上升,但并不是正比关系。随着模压速度的加快,充型率的升高趋于缓和。另一方面,过快的模压速度将导致成型阶段透镜阵列内的残余应力增大。因此,需要综合考虑后,选出合适的模压速度。

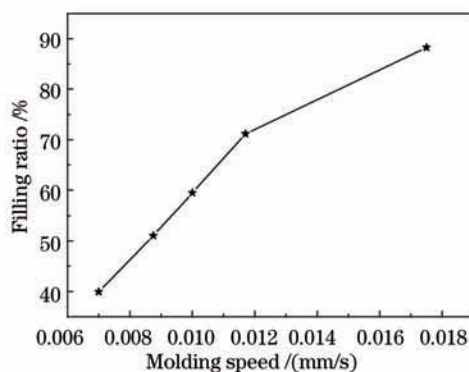


图7 模具型腔的充型率与模压速度的关系(模压温度 570 °C, 模压时间 90 s, 型腔 4)

Fig.7 Relationship between filling ratio and molding speed with molding temperature 570 °C and molding time 90 s for the cavity 4

5 结 论

运用有限元法对高温下的玻璃透镜阵列模压成型工艺进行了仿真,直观地分析了玻璃在高温下的变形情况,得到了透镜阵列的型腔充型率规律。结果表明,靠近模具边缘的型腔充型率比靠近模具中间的低;模压温度越高充型率越大;模压速度越大充型率越大。本文的研究成果可为实际的工业生产中模压成型参数的选择提供一定的理论借鉴。

参 考 文 献

- 1 Fischbacha Kyle D, Georgiadis Kyriakos, Wang Fei, *et al.*. Investigation of the effects of process parameters on the glass-to-mold sticking force during precision glass molding [J]. *Surf Coat Technol*, 2010, 205(2): 312-319.
- 2 Anurag Jain. Experimental Study and Numerical Analysis of Compression Molding Process for Manufacturing Precision Aspherical Glass Lenses [D]. Columbus: The Ohio State University, 2006. 2-11.
- 3 Tsaia Yuchung, Hung Chinghua, Hung Jungchung. Glass material model for the forming stage of the glass molding process [J]. *J Mater Process Technol*, 2008, 201(1): 751-754.
- 4 Sellier M, Breitbach C, Loch H, *et al.*. An iterative algorithm for optimal mould design for the manufacture by compression moulding of high-precision lenses [J]. *J Engineering Manufacture*, 2007, 221(1): 25-33.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Zhon Tianfeng, Yah Jiwang, Masudab Jun, *et al.*. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process [J]. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(9): 4484-4489.
- 8 Jain Anurag, Yi Allen Y. Numerical simulation of compression molding of aspherical glass lens [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 712: 239-244.
- 9 Ni Jiajia, Fan Yufeng, Chen Wenhua. 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.
- 10 Zhang Yitong. *Theory of Thermo-Viscoelasticity* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. 1-20.
- 张义同. 热粘弹性理论[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 1-20.
- 11 Gen Tie, Li Dequn, Zhou Huamin, *et al.*. On the research of numerical simulation technology of glass forming processes [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2006, 4(4): 170-171.
- 耿铁,李德群,周华民,等. 玻璃成形数值模拟技术研究概述[J]. 机械设计与制造, 2006, 4(4): 170-171.
- 12 Zhou Tianfeng, Yan Jiwang, Masuda Jun, *et al.*. Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(2): 214-220.
- 13 Zhang Qingming, Jian Nan. Molded optical elements can be produced in quantity with high precision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1992, 29(6): 17-19.
- 张清明,剑南. 模压光学元件可以高精度大量生产 [J]. 激光与光电子学进展, 1992, 29(6): 17-19.