

DOI: 10.7652/xjtuxb201304002

微透镜阵列热压印应力与脱模温度研究

王伊卿¹, 张庆¹, 甘代伟², 匡新斌¹, 丁玉成¹, 陈烽³, 刘红忠¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西国防工业技术学院数控工程学院, 710302, 西安;

3. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了批量制造微透镜阵列,研究了热压印制造无缝隙六边形微透镜阵列工艺中的压印力和脱模温度。采用有限元方法,计算了无缝隙六边形微透镜阵列聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)压印过程中的应力变化,分析了模具与 PMMA 之间的黏附力影响因素。研究表明:随着脱模温度的降低,PMMA 法向应力逐渐降低,并存在最低应力;PMMA 与模具间黏附力随 PMMA 内的法向应力降低而减弱;当脱模温度降低到 20℃ 时,微透镜阵列高度保真度达到了 94.7%,大规模消除了压印缺陷。

关键词: 热压印;微透镜阵列;应力;黏附力

中图分类号: TN305.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)04-0006-05

A Research on Stress and Demolding Temperature During Hot Embossing Process of Microlens Array

WANG Yiqing¹, ZHANG Qing¹, GAN Daiwei², KUANG Xinbin¹, DING Yucheng¹,
CHEN Feng³, LIU Hongzhong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. NC Engineering Department, College of Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710302, China;

3. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The embossing stress and demolding temperature in the manufacturing process of the gapless hexagonal microlens array by hot embossing process are studied for large-scale manufacturing. The stress change of polymethylmethacrylate(PMMA) in the gapless hexagonal microlens array embossing process is simulated by finite element method. Influencing factors of adhesion strength between mold and PMMA are analyzed. The analysis results show that the normal stress decreases and reaches the lowest level at last when the demolding temperature reduces. The adhesion strength declines as the demolding temperature decreases. When the demolding temperature drops to 20℃, the height fidelity of embossing specimen reaches 94.7%, and embossing defects are eliminated in a large scale.

Keywords: hot embossing; microlens array; stress; adhesion strength

微透镜阵列具有校准、聚焦、扩焦照明以及成像等功能,广泛使用于 LED、OLED 光学器件^[1]以及人工复眼等领域^[2-3]。目前,微透镜阵列的制造方法

有光刻胶热熔法^[4]、激光直写法^[5]、三维光刻法^[6]、飞秒激光加工法等^[7],但是要实现微透镜阵列的批量制造,一般需要通过热压印复制工艺。热压印的

收稿日期: 2012-08-20。 作者简介: 王伊卿(1964—),男,博士,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975221);国家“863 计划”资助项目(2009AA04Z305)。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0828.007.html>

缺陷主要产生在脱模阶段,包括结构断裂、尺寸变化等,缺陷的形成主要与材料在脱模时的强度属性和应力有关^[7]。

本文采用有限元方法模拟微透镜阵列材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)压印中的内应力变化,通过选择较低的脱模温度,减弱 PMMA 与母模的黏附,消除热压印缺陷。最终选用抛光石英玻璃(10 mm×10 mm×1 mm,大恒新纪元科技股份有限公司, GCL-1202)通过飞秒激光加工制造微透镜阵列模板,选用光学 PMMA 作为微透镜阵列压印制造材料,热压印制造高填充因子的微透镜阵列,采用实验与有限元方法,验证脱模温度对微透镜阵列精度的影响。

1 热压印复制微透镜阵列有限元模拟

微透镜阵列热压印流程包括:①将压印聚合物材料加热到压印温度,控制压印温度在玻璃化温度 T_g 以上、在黏流温度 T_i 以下;②在恒定压印力作用下使微透镜阵列模板与压印聚合物材料保持接触,在这个阶段内温度保持恒定;③在恒定压印力作用下,将压印聚合物材料和模板冷却至脱模温度,分离模板和压印聚合物材料,得到聚合物材料微透镜阵列^[8]。

1.1 PMMA 材料的黏弹性模型

由于 PMMA 材料具有较低的玻璃化温度、较高的强度以及较好的光学性能,因此选择 PMMA 作为热压印材料。当 PMMA 加热到玻璃化温度以上时,其力学行为呈现黏弹性材料特征^[9]。黏弹性材料的弹性模量随时间的变化关系可以通过 Maxwell 模型进行描述。由于聚合物分子链和链段的复杂性,单一的 Maxwell 模型无法准确描述聚合物的松弛特性,因此需要将 n 个 Maxwell 模型并联,每个 Maxwell 模型的弹性模量为 $E_1 \sim E_n$,组成广义 Maxwell 模型,如图 1 所示。

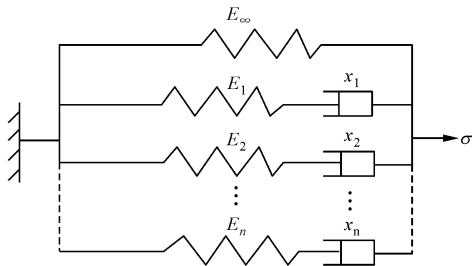


图1 广义 Maxwell 黏弹性模型

广义 Maxwell 黏弹性模型的时间松弛函数可以表示为^[10]

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t/\lambda_i) \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为广义 Maxwell 黏弹性模型的弹性模量; E_{∞} 为无穷时刻的弹性模量; n 为 Maxwell 单元个数; E 为弹性模量; λ_i 为松弛时间,可以通过下式计算

$$\lambda_i = \eta_i / E_i \quad (2)$$

其中 η_i 为黏度。

PMMA 黏弹性特性与温度的关系可以通过简单热流变行为描述^[11],可采用 Williams-Landel-Ferry (WLF)方程来描述黏弹性特性曲线随温度的偏移^[12]

$$\left. \begin{aligned} E_T(t) &= E_{T_g}(t/a_T) \\ \lg a_T &= -\frac{C_1(T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: a_T 为温度偏移函数; T_g 为 PMMA 玻璃化温度; C_1 、 C_2 为玻璃化温度 T_g 处的材料常数。

在本文的有限元计算中,采用 10 单元 Maxwell 模型来描述 PMMA 的黏弹性^[13],PMMA 材料的弹性模量与温度、时间的关系如图 2 所示。

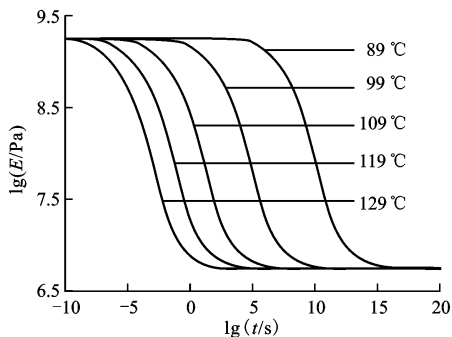


图2 PMMA 材料的弹性模量曲线

1.2 PMMA 内应力有限元分析

采用有限元软件 Abaqus/Standard 计算压印过程中 PMMA 的法向内应力。选取微透镜阵列中的 1 个单元,六边形微透镜外径为 $30 \mu\text{m}$,透镜高度为 $5 \mu\text{m}$,单元模型如图 3 所示。微透镜阵列模具材料的热膨胀系数与 PMMA 相差几十倍,可将模具设置为刚体。限制模板除压印方向外的另外 2 个方向上的位移自由度以及 3 个转动自由度,以防止出现刚体位移,限制 PMMA 侧面的节点在面法向的位移以及底面在压印方向的位移。在模具上表面施加一定的压力。假定 PMMA 和模具温度始终保持一致,冷却过程中冷却速度为 $1^\circ\text{C}/\text{s}$ 。

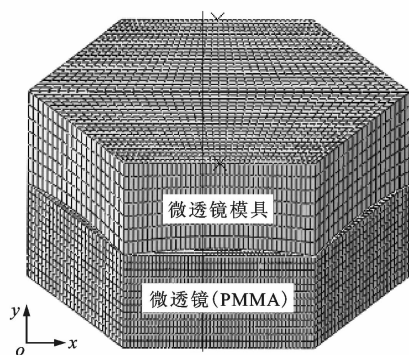


图3 六边形微透镜模型

分别选取压印力 P 为 1.9 MPa、2.4 MPa 和 3.8 MPa, 保压时间 t_p 为 120 s, 压印温度 T_p 为 130 °C, PMMA 的法向应力变化结果如图 4 所示。

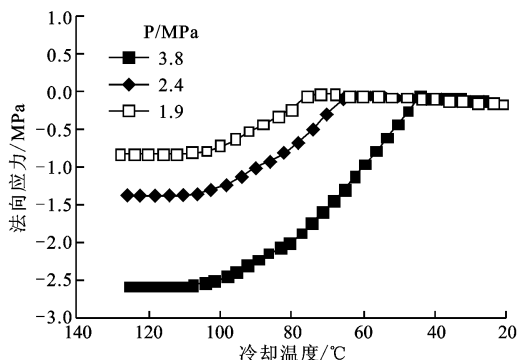


图4 冷却过程中PMMA的法向应力变化结果

从图4中可以看到:在不同的压印力作用下,随着冷却温度的降低,PMMA中法向应力逐渐降低,最终降低至最低应力值后,基本保持法向应力不变。

1.3 PMMA与模板脱模温度确定

本次研究中,微透镜阵列在脱模时,透镜的高度尺寸相对于透镜外径尺寸较小,模具沿PMMA表面滑移距离短,表面摩擦力的影响基本可以忽略,PMMA脱模质量主要与界面间黏附力相关。

微透镜阵列的热压印成型工艺中,脱模温度是微透镜阵列质量最重要的影响因素^[14]。

Dirckx等人采用热压印方法制造光栅图案,得到了PMMA材料压印光栅图案脱模时,界面黏附能的计算公式^[14]

$$G_{\text{DMA}} = G_0 - E_p(1 - \nu_p)(\alpha_p - \alpha_m)\Delta T^3 t_p \quad (4)$$

式中: ν_p 为PMMA泊松比; α_p 为PMMA热膨胀系数; α_m 为模板热膨胀系数; ΔT 为热压印/脱模温度差; t_p 为PMMA热压印温度; G_0 为PMMA临界强度。

图5为式(4)的计算结果,可以看出,随着热压印/脱模温度差的增加,即脱模温度的降低,黏附能

逐渐降低。

PMMA微透镜与模板之间黏附的本质是分子间作用力^[15]。PMMA与模板界面的黏附能力直接由界面分子间的距离决定,而界面分子间距离与PMMA内法向应力有关,PMMA内法向应力越大,说明PMMA与模板表面结合紧密,界面分子间距离越近,界面黏附能力越大。因此,PMMA与模板的黏附力可以采用PMMA内法向应力表征。

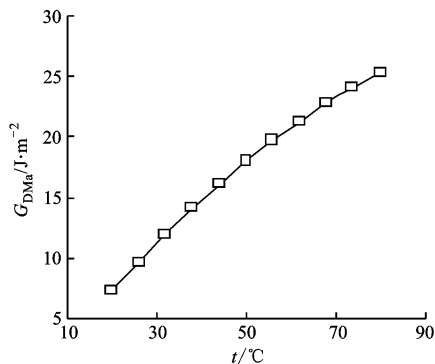


图5 PMMA表面黏附能随温度的变化结果

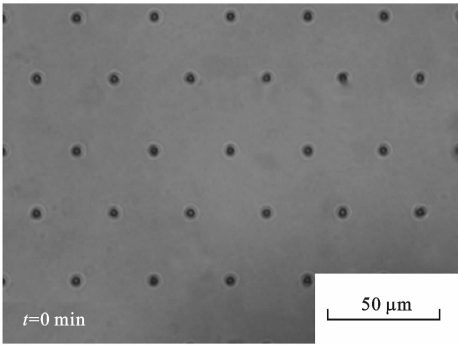
在微透镜阵列的脱模过程中,PMMA与模板之间的黏附作用将阻止脱模,导致PMMA微透镜产生结构断裂或者拉长等缺陷^[16-17]。为降低界面间的黏附力,可以采用气相沉积法,在模板表面镀膜,减弱界面的黏附力。但是,多次热压印过程中的交变应力,易造成镀膜剥落,甚至过早引起模板的失效^[16-17]。

从以上分析以及图4中可以看出,随着温度的降低,PMMA的法向应力趋向最低值,这意味着PMMA与模板间的黏附力趋向最低。

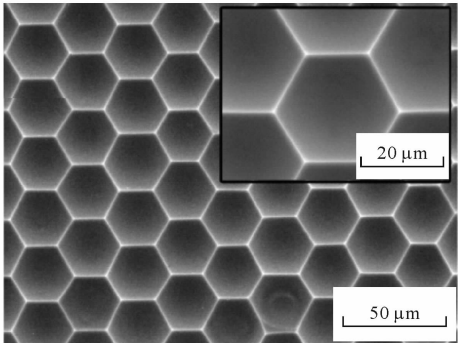
2 微透镜热压印实验

采用飞秒激光加工微透镜阵列模板,制造流程如图6所示^[18]。首先,将飞秒激光光束聚焦完成微透镜阵列点刻蚀(如图6a所示),然后将样品放入质量分数为5%的HF溶液中,并置入超声波清洗机以加快腐蚀速度,刻蚀区域的腐蚀速度明显快于未刻蚀区域,在较短的腐蚀时间内,刻蚀点边缘逐渐向外扩散,形成微透镜结构,随着腐蚀的进行,微透镜的直径逐渐增大直到相邻微透镜相互接触,形成六边形微透镜阵列^[7]。最后,依次将样品放入丙酮、无水酒精和去离子水中清洗掉表面的HF溶液或者杂质,得到微透镜阵列模板(如图6b所示)。

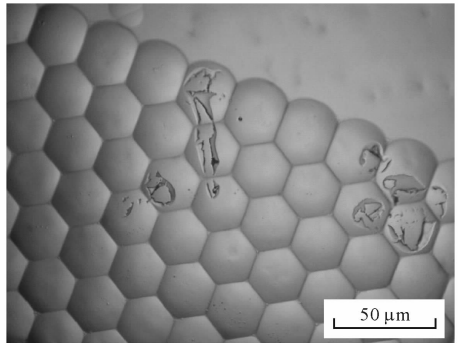
将PMMA加热至130 °C,压印力为1.9 MPa,保压120 s,随后开始冷却,分别在80 °C和20 °C温度下脱模,得到的热压印PMMA微透镜阵列如图7所示。



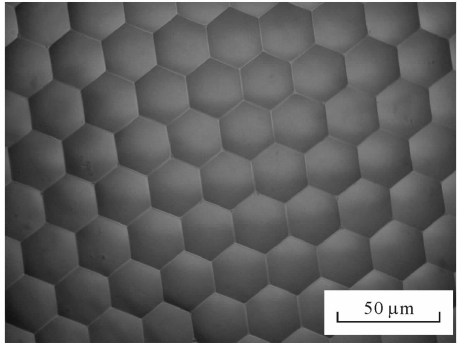
(a)飞秒激光加工的点阵列



(b)通过 HF 腐蚀形成的六边形微透镜阵列
图 6 飞秒激光加工六边形微透镜阵列



(a)80 °C 脱模样品



(b)20 °C 脱模样品

图 7 不同脱模温度下的压印样品

当脱模温度为 80 °C 时,在较高的脱模温度下,PMMA 与模板界面存在较大的黏附力,从图 7a 中看出,PMMA 微透镜表面出现严重的撕裂缺陷。

当脱模温度降低至 20 °C 时,PMMA 内法向应力降低至最低,PMMA 与模板界面的黏附力较低,从图 7b 中看出,PMMA 微透镜表面完整清晰。

分别对 80 °C、60 °C 和 20 °C 温度下脱模得到的微透镜阵列表面进行高度测量,测量结果如图 8 所示。当脱模温度从 80 °C、60 °C 降低到 20 °C 后,对称轴上微透镜高度平均值从 4.326 μm 增加到 4.601 μm,高度保真度从 89% 提高到 94.7%,样品表面质量显著提高,压印样品表面轮廓基本上与模具重合,说明脱模温度较低时压印样品能完好地复制模具的结构。

在较高的温度下脱模,PMMA 与模具之间存在较强的黏附,不仅使得部分微透镜表面层脱离,也会降低模具的表面质量和寿命。随着脱模温度的降低,黏附强度也随之降低,脱模缺陷减少,压印微透镜高度增加,验证了前面的有限元分析结果。

本次热压印制造的微透镜阵列,主要应用在光纤耦合器的制造中,单模光纤耦合器中,微透镜阵列单元数量一般规模为 $2 \times 2^{[19]}$ 。从图 7 中可以看出,用热压印方法复制微透镜阵列,完好的微透镜数量可以达到 60~70 个。因此,本次研究的热压印工艺,可用于光纤耦合器中大规模微透镜阵列的制造。

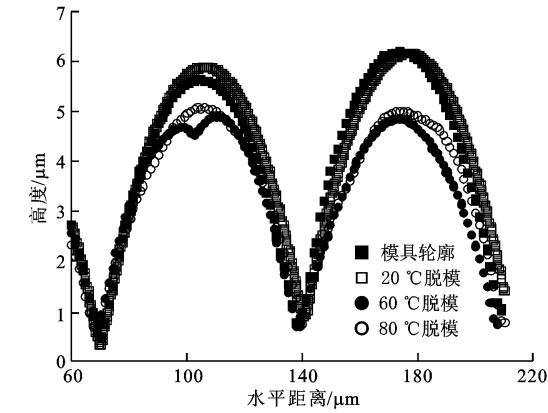


图 8 压印样品与模具微透镜轮廓对比图

3 结 论

本文采用热压印法制造六边形无缝隙 PMMA 微透镜阵列,制造过程中,模具与 PMMA 之间的黏附力造成微透镜阵列的高度变化,甚至被撕裂。因此,本文重点研究热压印过程中模具与 PMMA 的黏附力。将 PMMA 描述为并联 Maxwell 黏弹性热

流变模型,采用有限元方法,计算了无缝隙六边形微透镜阵列 PMMA 压印过程中的应力变化,分析了模具与 PMMA 之间的黏附力影响因素。研究表明:随着脱模温度的降低,PMMA 的法向应力逐渐降低,并趋向于最低应力;PMMA 与模具间的黏附力随 PMMA 内的法向应力降低而减弱;当脱模温度降低到 20 °C 时,微透镜阵列高度保真度达到了 94.7%,大规模消除了压印缺陷。

参考文献:

- [1] STEVENS R, MIYASHITA T. Review of standards for microlenses and microlens arrays [J]. *Imaging Science Journal*, 2010, 58(4): 202-212.
- [2] LIU Hewei, CHEN Feng, YANG Qing, et al. Fabrication of bioinspired omnidirectional and gapless microlens array for wide field-of-view detections [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100 (13): 133701-133703.
- [3] GORDON N T, JONES C L, PURDY D J. Application of microlenses to infrared detector arrays [J]. *Infrared Physics*, 1991, 31(6): 599-604.
- [4] WEI M K, SU I L. Method to evaluate the enhancement of luminance efficiency in planar OLED light emitting devices for microlens array [J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5777-5782.
- [5] PAN C T, SU C H. Fabrication of gapless triangular micro-lens array [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2007, 134(2): 631-640.
- [6] KUANG Dengfeng, ZHANG Xiaoliang, GUI Min, et al. Hexagonal microlens array fabricated by direct laser writing and inductively coupled plasma etching on organic light emitting devices to enhance the outcoupling efficiency [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(5): 974-978.
- [7] GUO Yuhua, LIU Gang, ZHU Xuelin, et al. Analysis of the demolding forces during hot embossing [J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 5(13): 411-415.
- [8] CHEN Feng, LIU Hewei, YANG Qing, et al. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20334-20343.
- [9] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(21): 3114-3116.
- [10] WORGULL M, HECKELE M, HETU J F, et al. Modeling and optimization of the hot embossing process for micro-and nanocomponent fabrication [J]. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2006, 5(1): 1005-1013.
- [11] LAN S, 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.
- [12] MIRKHALAF M, TOR S B, MURUKESHAN V M, et al. Optimization of compression molding of stand-alone microlenses: Simulation and experimental results [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 50(11): 2216-2228.
- [13] KIM N W, KIM K W, SIN H C. Finite element analysis of low temperature thermal nanoimprint lithography using a viscoelastic model [J]. *Microelectron Eng*, 2008, 85(9): 1858-1865.
- [14] DIRCKX M E, HARDT D E. Analysis and characterization of demolding of hot embossed polymer microstructures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(8): 085024.
- [15] 马皓晨. 微机电系统中粘附的表面效应和尺寸效应的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2005.
- [16] JUNG Gunyoung, LI Zhiyong, WU Wei, et al. Vapor-phase self-assembled monolayer for improved mold release in nanoimprint lithography [J]. *Langmuir*, 2005, 21(4): 1158-1161.
- [17] BECK M, GRACZYK M, MAXIMOV I, et al. Improving stamps for 10 nm level wafer scale nanoimprint lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 61/62: 441-448.
- [18] LIU Hewei, CHEN Feng, YANG Qing, et al. Facile and flexible fabrication of gapless microlens arrays using a femtosecond laser microfabrication and replication process [C] // *Proceedings of SPIE8243, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2012: 2430-2436.
- [19] SHUAI Cijun, DUAN Jian, ZHONG Jue. Novel manufacturing method of optical fiber coupler [J]. *Journal of Central South University of Technology: English Edition*, 2006, 13(3): 242-246.

(编辑 刘杨 管咏梅)