

# 基于非接触式热压印技术的微透镜阵列制作

王迎春, 谢 丹, 张鸿海\*

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了降低热压印工艺制作微透镜阵列对模具的要求, 提出了非接触式热压印工艺制作微透镜阵列, 采用了自主研制的纳米压印样机与光刻工艺制作的通孔式不锈钢模具在 PMMA 表面压印出微透镜阵列, 并分析了压印过程中温度、压力、时间等参数对微透镜阵列表面形貌的影响。研究表明, 利用非接触式热压印工艺可以制作表面形貌好、位置精度高的微透镜阵列, 压印时最佳压印温度为 140 °C ~ 180 °C, 最佳脱模温度为 80 °C, 最佳压力为 1 500 Pa ~ 3 500 Pa, 且采用通孔式模具不需要真空, 降低了对环境的要求。

**关键词:** 微透镜阵列; 非接触式; 光刻; 通孔式

中图分类号: TH741.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)11-0013-04

## Manufacture of microlens arrays based on contactless embossing

WANG Ying-chun, XIE Dan, ZHANG Hong-hai

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to reduce the requirement of the molding tool used by hot embossing for fabricating microlens arrays, the method of fabricating microlens arrays by contactless embossing was proposed. An independently developed nanoimprint machine and a stainless molding tool manufactured by photolithography with through-holes were used to fabricate microlens arrays on PMMA sheet. Influences of the temperature, the applied pressure and the embossing time on the focus of the microlenses were analyzed. The experimental results show that microlens arrays with good surface features and high position precision can be fabricated by contactless embossing. The optimum imprint temperature is 140°C to 180°C, the optimum temperature for demoulding is 80°C, and the best applied pressure is 1 500 Pa to 3 500 Pa. Meanwhile, vacuum support is unnecessary when using the molding tool with through-holes, which can reduce the requirement of the environment.

**Key words:** microlens arrays; contactless embossing; photolithography; through-holes

## 0 引 言

近年来随着微光学的发展, 微光学器件在许多领域应用中扮演着越来越重要的角色, 微透镜阵列作为重要的光学元件, 其中的作用功不可没。其所应用的领域包括光学传感、光通信<sup>[1]</sup>、光互连、光纤耦合<sup>[2]</sup>等方面。微透镜和微透镜阵列的制作方法有很多, 包括采用非复制性工艺的感光树脂材料热回流技术<sup>[3]</sup>, 采用复制性工艺的接触式热压成形技术<sup>[4]</sup>以及微滴喷射技术<sup>[5]</sup>等。其中热回流技术虽然制作成本低、工艺

简单, 但可选用的透镜材料有限, 工艺参数难以控制。接触式热压印技术工艺参数易控制, 且可大批量重复生产, 但对模板精度要求极高, 脱模困难, 模具不易清洗, 模板制作工艺复杂、成本高。采用微滴喷射技术可以制作双面微透镜阵列, 但透镜的一致性不好, 定位困难, 无法一次大量制作, 生产效率低。

德国 Jens Schuize<sup>[6]</sup>等人采用非接触式热压印技术制作微透镜阵列, 使用 LIGA (德文 Lithographie, Galvanoformung 和 Abformung 即光刻、电铸和注塑的缩写) 技术制作出了具有平行盲孔阵列的模具, 利用该模具

收稿日期: 2010-07-21

作者简介: 王迎春(1985-), 男, 湖北枣阳人, 硕士研究生, 主要从事精密加工、检测与 MEMS 封装技术方面的研究。E-mail: y. wang24@126.com

通信联系人: 张鸿海, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: honghaizhang@tom.com

在聚合物材料上压印出微透镜阵列。采用非接触式热压印技术制作微透镜阵列,微透镜表面不受模具表面质量的影响,而利用 LIGA 技术制作的模板精度很高,其包括 X 光深度同步辐射光刻、电铸制模和注模复制 3 个工艺步骤,制作的工艺复杂,成本高。

本研究采用光刻<sup>[7]</sup>的方式制作模具,工艺简单,成本低,且满足非接触热压印的要求。此外,为了避免压印过程中气泡造成的影响,采用盲孔式模具制作微透镜阵列必须在真空环境下进行。本研究采用了通孔式模具进行非接触式热压印,不需要真空环境,同时也消除了热压印过程中气泡对透镜表面形成过程的影响。

### 1 实验原理

相对于接触式热压印技术,非接触式热压印的基本观点是在制作微透镜的过程中避免微透镜表面与模具有直接的接触。微透镜制作的过程如图 1 所示,在模具上制作出通孔阵列,孔的大小和位置决定了微透镜的直径和位置。孔阵列可以通过机械<sup>[8]</sup>的方式加工,即 LIGA 工艺、电火花加工<sup>[9]</sup>、光刻等。在制作微透镜过程中,聚合物被加热到玻璃化转变温度之上,然后在模具与聚合物之间施加一定的压力,被软化后的聚合物由所施加压力引起的表面张力形成微透镜。微透镜制作过程中的主要影响参数包括材料的黏度,材料的表面张力,热回流和模具的几何形状。通过控制压印过程中的压力,温度和时间可以调节微透镜的焦距。非接触式热压印工艺的主要优点在于微透镜表面不直接与模具表面接触,降低了对模具的要求。

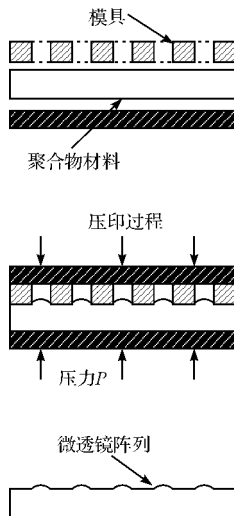


图 1 非接触热压印技术原理图

非接触式热压印制作微透镜阵列可以分为 3 个阶段(如图 2 所示)。

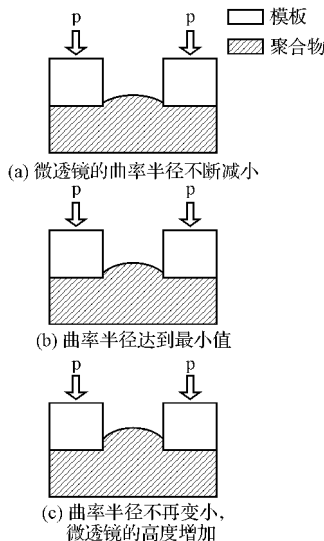


图 2 热压印过程示意图

阶段(a):微透镜的表面轮廓的形成阶段,此时弧的高度远小于弧的曲率半径。利用拉普拉斯第一定律:

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R} \tag{1}$$

式中  $\Delta p$ —压力差; $\gamma$ —表面张力; $R$ —曲率半径。

压印过程中,压力差为定值,弧的曲率半径与材料的表面张力成正比。材料的表面张力是黏度和温度的函数,温度还与模具和基底材料的接触时间有关。

阶段(b):微透镜的曲率半径达到最小值,此时表面张力等于所施加的压力在微透镜表面上各个点上所产生的力。

阶段(c):微透镜的曲率半径不再变化,微透镜的高度增加。微透镜的高度(包括支柱和弧)可以通过方程来计算:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g R} \cos \theta \tag{2}$$

式中  $h$ —总的高度; $\gamma$ —表面张力; $R$ —曲率半径; $\rho$ —压印材料的密度; $g$ —重力加速度; $\theta$ —接触角。

接触角  $\theta$  可以通过几何方程计算:

$$\cos \theta = \left(1 - \frac{h'}{R}\right) \tag{3}$$

式中  $h'$ —弧的高度; $R$ —弧的曲率半径。

### 2 实验与分析

#### 2.1 材料设备

压印材料选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),其主要原因包括:①当温度和压力在较大的范围变化时,PMMA 的收缩率不超过 5%,压印过程中加热或冷却

时图形结构保持良好的-致性;②PMMA 光学性能良好,被证明是制作光学器件理想的聚合物材料。

实验设备采用实验室自行研制的纳米压印样机(如图 3 所示),该样机的主要组成及其技术指标参考文献[10],实验模板采用光刻工艺制作不锈钢模板(如图 4 所示),模板参数:直径为 180  $\mu\text{m}$ ;厚度为 150  $\mu\text{m}$ ;通孔直径为 150  $\mu\text{m}$ ;间距为 80  $\mu\text{m}$ 。

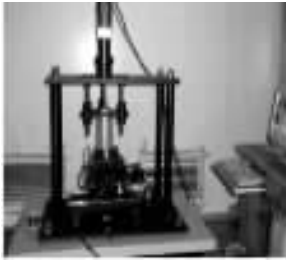


图 3 纳米压印样机

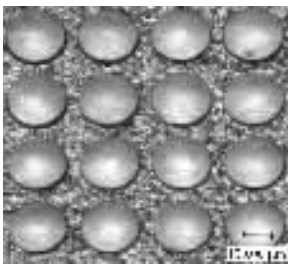


图 4 实验模板

## 2.2 实验过程

实验时,本研究采用厚度为 2 mm 的 PMMA 板,以平板-聚合物-模板的三明治式结构放入实验平台,加热 PMMA 板至其玻璃化转变温度 105  $^{\circ}\text{C}$  以上,接着向该结构施加一定的压力并在此压力下保持一定的时间后停止加热,在室温下冷却至 PMMA 玻璃化转变温度以下将模板与 PMMA 板分离。为了分析实验中温度、压力和时间对微透镜阵列的影响,在其它参数不变的情况下,通过改变其中一个参数进行了多组实验。

## 2.3 结果分析

通过非接触式热压印制作微透镜阵列的透镜表面质量不受模板质量的影响,其主要的-影响参数为压印材料的特性,压印工艺的过程参数(压力,温度,时间)。压印材料 PMMA 被证明是性能良好的光学材料,这里笔者主要讨论压印工艺的过程参数。

### 2.3.1 压印温度和脱模温度

压印温度必须高于 PMMA 的玻璃化转变温度 105  $^{\circ}\text{C}$ ,低于 105  $^{\circ}\text{C}$  时 PMMA 处于玻璃态,形变很小且可逆,此时在聚合物表面压不出球形透镜阵列,如图 5 (a)所示;温度在 105  $^{\circ}\text{C}$  和 140  $^{\circ}\text{C}$  之间时,PMMA 处于

高弹态,形变大但可逆;温度处于 140  $^{\circ}\text{C}$  和 180  $^{\circ}\text{C}$  之间时,PMMA 处于黏流态,形变大且不可逆,适合于制作微透镜阵列,如图 5 (d) 所示;温度高于 180  $^{\circ}\text{C}$  时,PMMA 还处于黏流态,但流动性增加,表面张力减小,制作的微透镜周围的轮廓模糊,如图 5 (b) 所示。实验表明最佳的压印温度为 140  $^{\circ}\text{C}$  到 180  $^{\circ}\text{C}$ 。

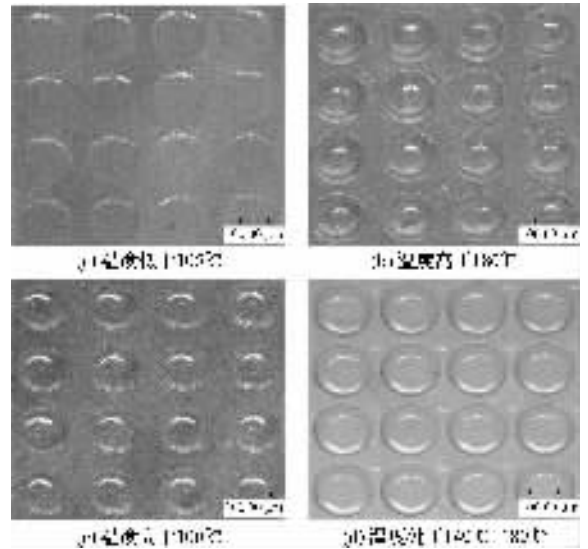


图 5 实验结果图

脱模温度对脱模过程有很大的影响,脱模温度在 100  $^{\circ}\text{C}$  以上时,PMMA 处于黏流态,脱模后透镜表面轮廓会因流动性而偏移,透镜高度会因回弹而降低,如图 5 (c) 所示;脱模温度过低时,脱模困难,易损坏透镜表面。实验表明最佳的脱模温度为 80  $^{\circ}\text{C}$ 。图 5 中的实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

	压力/Pa	时间/s	压印温度/ $^{\circ}\text{C}$	脱模温度/ $^{\circ}\text{C}$
a	2 000	30	100	80
b	2 000	30	200	80
c	2 000	30	160	110
d	2 000	30	160	80

### 2.3.2 压力和时间

压力是影响微透镜焦距的关键因素,根据公式制作的微透镜表面的曲率半径随着压力增大而减小,微透镜的半径一定,从而微透镜的焦距也随着降低。本研究通过不同的压力制作了不同的微透镜阵列,微透镜的焦距随压力的变化情况如图 6 所示,焦距测试方法参考文献[11]。在实验过程中,其它条件不变,压印温度为 160  $^{\circ}\text{C}$ ,脱模温度为 80  $^{\circ}\text{C}$ ,压印时间为 30 s。

压印时间是压印过程的参数,通过原理分析可知,在不同的时刻处于微透镜成形的不同阶段。微透镜焦

距随压印时间的变化情况如图 7 所示。其它条件不变,压印温度为 160 ℃,脱模温度为 80 ℃,压力为 2 500 Pa。0 ~ 20 s 时,随着压印时间的增加,微透镜的曲率半径逐渐减小;20 ~ 40 s 时,微透镜表面张力接近平衡状态,微透镜的焦距变化很小;大于 40 s 时,微透镜表面达到平衡状态,焦距不再变化。

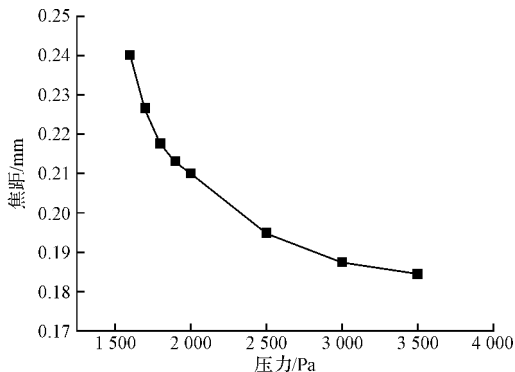


图 6 压力 - 焦距图

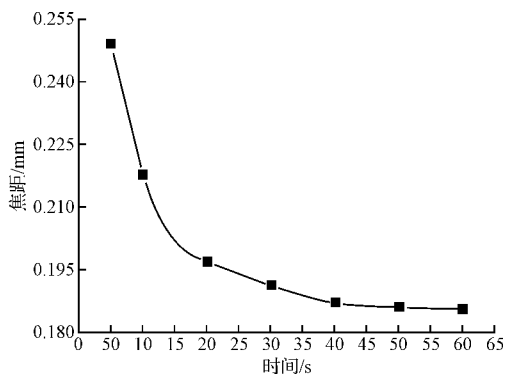


图 7 时间 - 焦距图

### 3 结束语

通过非接触式热压印工艺可以重复制作出微透镜阵列,且微透镜表面形状的质量不受模具质量的影响。使用同一模具,通过调整不同的工艺参数(温度,压力,时间)可以得到半径和位置相同但焦距不同的微透镜阵列,且模具可以重复使用,不会因表面与聚合物材料接触被玷污。因此这种方法可以低成本,高产率的制作同一规格的微透镜阵列,适用于工业化生产。传统的采用盲孔式模具的非接触热压印方法制作微透镜阵列需要在真空环境下进行,试验采用通孔式的模

具可以减少空气对透镜形成过程的影响,提高透镜的质量。实验结果表明压印温度在 140 ℃ ~ 180 ℃,微透镜阵列具有清晰的表面轮廓,便于聚焦;脱模温度为 80 ℃,模具与微透镜阵列表面的粘附力小,便于脱模;微透镜阵列焦距随着压印压力的增大和时间的增加而减小,压力在 1 500 Pa ~ 3 500 Pa 时适合制作微透镜阵列,压力过低时压不出微透镜阵列,压力过高时微透镜阵列的焦距不再变化,而微透镜阵列的高度增加;压印时间大于 40 s,微透镜阵列的焦距不再变化。

### 参考文献 (References) :

- [1] BELLMAN R H, BORRELLI N F, MANN L G, et al. Fabrication and performance of a one-to-one erect imaging microlens array for fax[C]//Proc. SPIE,1991;209 - 217.
- [2] OGATA S, YONEDA M, MAEDA T, et al. Low cost and compact fiber-to-laser coupling with micro Fresnel lens [C]//Proc. SPIE,1991;92 - 96.
- [3] DALY D, STEVENS R F, HUTLEY M C, et al. The manufacture of microlenses by melting photoresist[J]. **J. Meas. Sci. Technol.**,1990(1):759 - 766.
- [4] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Nanoimprint lithography[J]. **J. Vac. Sci. Technol.**, B,1996,14(6):4129 - 4133.
- [5] TIEN C H, HUNG C H, YU T H. Microlens arrays by direct-writing inkjet print for LCD backlighting applications [J]. **J. Display Technol.**,2009(5):147 - 151.
- [6] SCHULZE J, EHRFELD W, MULLER H, et al. Compact self-aligning assemblies with refractive microlens arrays made by contactless embossing[C]//Proc. SPIE,1998;22 - 32.
- [7] MENARD E, MEITL M A, SUN Y. Micro and nanopatterning techniques for organic electronic and optoelectronic systems[J]. **Chem. Rev.**,2007,107(4):1117 - 1160.
- [8] 孙广山. 超精密机械加工技术及其发展动向[J]. **中国机械工程**,1996,7(1):58 - 60.
- [9] LI D, XIA Y. Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel? [J]. **Adv. Mater.**,2004,16(14):1151 - 1170.
- [10] 张鸿海,胡晓峰,范细秋. 纳米压印光刻技术的研究[J]. **华中科技大学学报:自然科学版**,2004,32(12):57 - 59.
- [11] 范细秋,张鸿海,甘志银,等. 一种高效率低成本制作微透镜阵列的方法[J]. **机械科学与技术**,2006,25(9):1053 - 1055.

[编辑:张 翔]