

文章编号:1671-6833(2011)02-0037-05

## 热熔回流工艺参数对微球形结构高度影响的仿真研究

蒋炳炎<sup>1</sup>, 李代兵<sup>1</sup>, 陈磊<sup>1</sup>, Stefan KIRCHBERG<sup>2</sup>

(1. 中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 克劳斯塔尔工业大学 聚合物材料和塑料工程研究所, 德国 克劳斯塔尔-采勒费尔德市, 38678)

**摘 要:** 应用 Marc 软件仿真光刻胶熔融变形过程, 研究热熔回流工艺参数对尺寸规格  $D \times h$  为  $\Phi 500 \mu\text{m} \times 66 \mu\text{m}$  的微圆柱光刻胶熔融后微球形结构高度的影响。对仿真结果进行正交实验法分析, 得出最佳工艺参数组合; 对仿真结果进行单因素实验法分析, 研究不同工艺参数对微球形结构高度的影响规律。结果表明, 最佳工艺参数组合: 加热速率  $1^\circ\text{C}/\text{s}$ , 加热温度  $110^\circ\text{C}$ , 保温时间  $45 \text{ min}$ ; 工艺参数对微球形结构高度的影响顺序为: 保温时间 > 加热速率 > 加热温度。

**关键词:** 热熔回流; 工艺参数; 微球形结构; Marc 仿真

**中图分类号:** TN405

**文献标志码:** A

### 0 引言

微透镜阵列在光学连接、探测器、平板显示器、生物医药测试等方面已经取得广泛的应用。其主要制造方法有等离子体交换技术、热熔回流技术、化学气相沉淀技术、热压成型技术和微注射成型技术<sup>[1]</sup>等。微注射成型技术以其低成本、高效率、高自动化程度等优势成为微透镜阵列的主要制造技术。

微细加工技术是实现注射模具微模芯制造的关键技术, 正受到越来越多研究者的关注<sup>[2]</sup>。LIGA(X射线光刻)技术是X射线深层光刻、微电铸和微复制工艺的完美结合<sup>[3]</sup>。由于X射线的昂贵费用, UV-LIGA(深紫外线光刻)技术、Laser-LIGA(激光光刻)技术、DEM(深度刻蚀)技术、IB-LIGA(离子束光刻)技术应运而生<sup>[4-7]</sup>。受到加工原理的局限性, 上述准 LIGA 技术只能加工具有垂直侧壁微结构的微模芯。为了满足注射制品对微模芯结构形状多样化的需求, 开发出一种能够加工球面或弧面结构微模芯的微细加工技术迫在眉睫。

热熔回流技术是由 D. P. Zoran 等人<sup>[8]</sup>在 1988 年提出加热微圆柱光刻胶制作微球形结构

零件的新方法。王亚军等人<sup>[9]</sup>在硅基底上喷涂一层金属 Cr 薄膜, 有两方面作用: 作为黏着层, 保证光刻胶和硅基底的结合力; 刻蚀形成金属圆柱底座, 熔融过程中保持底部直径不变。R. F. SHYU 等人<sup>[10]</sup>实验研究了热熔回流工艺参数对熔融微球形结构底面直径的影响规律。C. K. CHUNG 等人<sup>[11]</sup>采用平板和烤箱两种加热方式得到微球形结构, 发现平板加热方式得到的微球形结构高度大于烤箱加热得到的微球形结构高度。

目前, 国内外研究者采用实验试错法得到所需高度值的微球形结构。由于光刻胶种类、光刻胶热物理性质以及实验条件的相异性, 借鉴前人成果经常得不到理想的结果, 准确控制微球形结构形貌有很大难度。光刻胶熔融计算机仿真方面, 国内外学者还没有开展相关工作。模型优化、边界条件和初始条件加载和光刻胶热物理性质描述等方面具有一定的挑战性。

笔者采用面向制造设计和并行设计思想, 创新性采用 Marc 软件仿真加热 AR-N440 光刻胶熔融变形过程, 研究最佳工艺参数组合和单个工艺参数对熔融光刻胶微球形结构高度的影响规律, 为热熔回流实验工艺参数的选定提供理论依据, 进而缩短产品开发周期、节约试制成本。

收稿日期: 2010-10-20; 修订日期: 2010-12-29

基金项目: 国家自然科学基金外国青年学者项目(51050110138)

作者简介: 蒋炳炎(1963-), 男, 湖南长沙人, 中南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究领域为微注射成型理论及应用及超精密加工研究。

## 1 热熔回流 LIGA 技术

在 LIGA 技术工艺流程中添加热熔回流工序,制造具有微球形结构的模芯,工艺流程如图 1 所示.工艺流程可分为 4 步:①溅射金属 Cr 薄膜,喷涂光刻胶,进行 X 射线曝光处理;②对光刻胶进行显影处理,得到微圆柱光刻胶,干法刻蚀掉金属 Cr 薄膜;③平板加热微圆柱光刻胶至玻璃化温度以上,在光刻胶表面张力和分子动能作用下熔融成微球形结构;④在微球形光刻胶上喷涂一层金属薄膜作为种子层进行电铸加工,得到带有微球形结构的模芯.

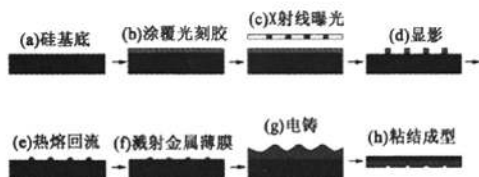


图 1 制作模芯工艺流程图

Fig. 1 Manufacturing mold processing diagram

## 2 理论计算

假设曝光显影后微圆柱光刻胶的底面直径为  $D$ , 高度为  $t$ , 在平板加热器上按照一定加热速率加热到光刻胶玻璃化温度以上, 保温一段时间, 自然冷却至室温, 微球形光刻胶底面直径为  $d$ , 高度为  $h$ , 具体尺寸参数如图 2 所示.

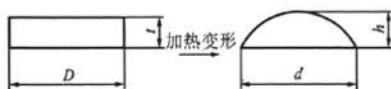


图 2 光刻胶熔融前后形状参数

Fig. 2 The resist profile parameters before and after melting

微圆柱光刻胶的体积  $V_1$  如式(1)所示:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} D^2 t \quad (1)$$

微球形光刻胶的体积  $V_2$  如式(2)所示:

$$V_2 = \pi h^2 \left( \frac{d^2}{8h} + \frac{h}{2} \right) - \frac{\pi}{3} h^3 \quad (2)$$

显影过程中, 部分未曝光光刻胶会溶于显影液中; 加热过程中, 部分光刻胶挥发, 造成了熔融后光刻胶体积减小. 实验验证, 光刻胶体积减少系数  $k$  一般取 0.8<sup>[12]</sup>. 熔融前后光刻胶体积关系  $kV_1 = V_2$ , 因为  $D = d$ , 得到微圆柱光刻胶高度的关系如式(3)所示.

$$t = \frac{hd^2}{2kD^2} + \frac{2h^3}{3kD^2} = \frac{h}{2k} + \frac{2h^3}{3kD^2} \quad (3)$$

设计微透镜阵列微球形结构尺寸为  $d = 500 \mu\text{m}$ ,  $h = 100 \mu\text{m}$ , 得到微圆柱光刻胶结构尺寸为  $D = 500 \mu\text{m}$ ,  $t = 65.833 \mu\text{m} \approx 66 \mu\text{m}$ .

## 3 数值模拟

### 3.1 建立几何模型

硅基板、金属 Cr 薄膜和微圆柱 AR-N440 光刻胶的几何模型比较复杂, 为了提高运算效率, 对仿真模型进行简化处理. 假设处于硅基板不同位置的微圆柱 AR-N440 光刻胶受热情况相同, 取单个微圆柱 AR-N440 光刻胶进行仿真分析. 简化几何模型如图 3(a) 所示, 2D 网格化模型如图 3(b) 所示, 熔融变形模型如图 3(c) 所示.

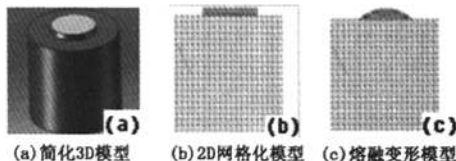


图 3 仿真过程中建立模型图

Fig. 3 models built in the process of simulation

### 3.2 网格划分及初始、边界条件的加载

由图 3(a) 可知, 3D 模型是轴对称结构, 可进一步简化成 2D 模型. 在 Marc 里面建立 2D 模型, 采用 CONVERT 中 DEVISIONS 方法分别对硅基底、金属 Cr 薄膜和微圆柱 AR-N440 光刻胶进行网格划分. 硅基底采用  $20 \times 20$  的长宽尺寸进行网格划分; 金属 Cr 薄膜采用  $10 \times 1$  的长宽尺寸进行网格划分; 微圆柱 AR-N440 光刻胶采用  $10 \times 4$  的长宽尺寸进行网格划分. 共得到 496 个节点, 450 个单元, 划分好网格的二维模型如图 3(b) 所示. 输入硅材料、Cr 材料和 AR-N440 光刻胶材料的热物理性质参数, 其中 AR-N440 光刻胶的热物理性质参数是关于温度参数的变量. 选取 QUAD(4) 和 QUAD(8) 单元进行两次仿真, 得到微球形结构高度的仿真值. 初始条件: 硅基底、金属 Cr 薄膜和 AR-N440 光刻胶的初始温度为  $20^\circ\text{C}$ ; 边界条件: 硅基底底面温度为加载的温度函数, 硅基底侧面、金属 Cr 薄膜、AR-N440 光刻胶和周围大气环境之间通过自然对流方式进行热交换, 设定环境温度值为  $20^\circ\text{C}$ .

### 3.3 仿真结果

进行仿真运算, 微圆柱 AR-N440 光刻胶在加热情况下, 由于熔融光刻胶表面张力作用和光刻

胶分子动能增加,熔融变形成微球形结构.因此,在每组工艺参数下,采用两种不同类型的网格,得到两个高度值.熔融过程中 AR-N440 光刻胶产生大变形,网格会发生畸变,采用 Marc 软件网格自适应功能对网格进行调整,如图 3(c) 所示.

#### 4 仿真结果讨论

为了获得热熔回流工艺参数对微球形结构高度的影响,采用正交实验方法对仿真结果进行分析.选取加热速率、加热温度和保温时间 3 个可控工艺参数作为实验因子,各因子选取 3 个因子水平做仿真分析.根据 AR-N440 光刻胶厂家提供的光刻胶热物理性能参数和前人实验研究经验<sup>[13]</sup>,确定加热过程中各实验因子的水平如表 1 所示.根据实验因子和因子水平作  $L_9(3^3)$  正交表,在各个工艺参数下二次进行模拟,并采用信噪比 SNR 对仿真结果进行直观分析,仿真结果如表 2 所示.工艺参数因子对微球形结构高度的影响用信噪比 SNR 表示,如表 3 所示,影响趋势如图 4 所示.

表 1 热熔回流工艺参数及参数水平			
Tab. 1 Parameters and their levels of thermal reflow processing			
序号	A B C		
	加热速率/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/ min
1	0.5	110	30
2	1.0	120	45
3	1.5	130	60

表 2 正交实验表及仿真结果						
Tab. 2 Orthogonal experiment table and simulation results						
序号	控制因子			球形微结构高度 $h/\mu\text{m}$		SNR
	A	B	C	$h_1$	$h_2$	
1	1	1	1	106.7	104.5	14.871 8
2	1	2	2	97.5	96.1	19.694 0
3	1	3	3	92.6	91.6	12.030 1
4	2	1	2	101.2	99.2	29.829 7
5	2	2	3	95.3	92.5	14.070 5
6	2	3	1	101.9	99.9	27.423 2
7	3	1	3	96.7	93.7	15.970 5
8	3	2	1	106.2	102.2	16.647 4
9	3	3	2	100.0	97.6	25.406 1

由表 3 和图 4 分析可知:①各工艺参数对熔融后微球形结构高度的影响主次顺序为:保温时间>加热速率>加热温度.②最佳工艺参数组合为 A2B1C2,即加热速率  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,加热温度  $110^{\circ}\text{C}$ ,

保温时间 45 min.

表 3 工艺参数对 SNR 的影响			
Tab. 3 Effect of processing parameters on SNR			
影响因子	A	B	C
$K_1$	46.595 9	64.859 4	58.942 4
$K_2$	71.323 4	50.411 9	74.929 8
$K_3$	58.024 0	60.672 0	42.071 1
$K_1/3$	15.532 0	21.619 8	19.647 5
$K_2/3$	23.774 5	16.804 0	24.976 6
$K_3/3$	19.341 3	20.224 0	14.023 7
S	8.242 5	4.815 8	10.952 9
R	2	3	1

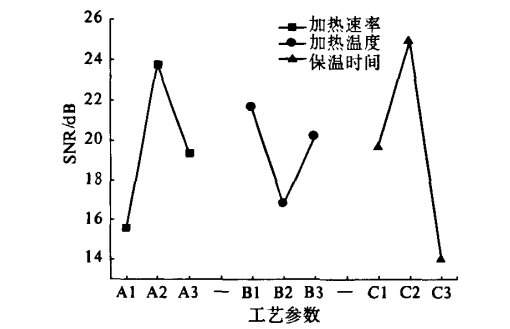


图 4 工艺参数对微球形结构高度的影响  
Fig. 4 Effect of processing parameters on the height of micro-spherical structure

为了获得单个工艺参数对微球形结构高度的具体影响规律,笔者以正交实验得出的最佳工艺参数组合 A2B1C2 (加热速率  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、加热温度  $110^{\circ}\text{C}$ 、保温时间 45 min) 为参考,逐一改变单个工艺参数数值,考察各工艺参数对熔融微球形结构高度的影响规律,单因素仿真研究方案如表 4 所示.选取加热温度为最佳加热温度  $110^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为最佳保温时间 45 min,另外分别选取加热速率为 0.5、1.0、1.5、2.0  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,分别得到熔融微球形结构的高度值,进而得到加热速率对熔融微球形结构高度值的影响规律,如图 5 所示.其余同理,分别得到关于加热温度和保温时间对熔融微球形结构高度值的影响曲线,分别如图 6 和图 7 所示.

表 4 单因素仿真工艺参数及参数水平				
Tab. 4 Single factor simulation processing parameters and their levels				
工艺参数	参数水平			
加热速率/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.5	1.0	1.5	2.0
加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	110	120	130	140
保温时间/min	30	45	60	75

从图 5 曲线可以发现,加热速率较低时,微球形结构高度值较小,随着加热速率的增加,微球形结构高度值逐渐增加.其原因是,在相同的加热温度和保温时间条件下,加热速率越慢,整个加热熔融过程时间长,被挥发掉 AR-N440 光刻胶越多,则微球形结构高度值越小.设计微球形结构高度值为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,从图 5 可以发现,最佳加热速率是  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,此时微球形结构高度值为  $100.2\text{ }\mu\text{m}$ .

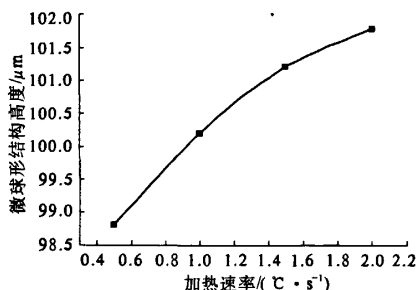


图 5 加热速率对微球形结构高度的影响

Fig. 5 Effect of hating rate on the height of micro-spherical height structure

从图 6 曲线可以发现,加热温度较低时,微球形结构高度值较大,随着加热温度的增加,微球形结构高度值逐渐减小.其原因是,在相同的加热速率和保温时间条件下,由于 AR-N440 光刻胶的热物理特性,在玻璃化温度以上,温度越高,AR-N440 光刻胶挥发速率越快,微球形结构高度值越小.设计微球形结构高度值为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,从图 6 可以发现,最佳加热温度是  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时微球形结构高度值为  $100.2\text{ }\mu\text{m}$ .

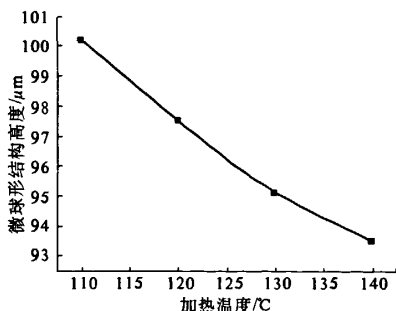


图 6 加热温度对微球形结构高度的影响

Fig. 6 Effect of hating temperature on the height of micro-spherical structure

从图 7 曲线可以看出,保温时间较短时,微球形结构高度值越大,随着保温时间的增加,微球形结构高度值逐渐减小.其原因是,在相同的加热速率和加热温度下,保温时间越长,被挥发掉的 AR-

N440 光刻胶越多,则微球形结构高度值越小.由加热速率不同引起的时间差异比较短,由此可以解释保温时间对微球形结构高度值的影响比加热速率大.设计微球形结构高度值为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,从图 7 可以发现,最佳保温时间是  $45\text{ min}$ ,此时微球形结构高度值为  $100.2\text{ }\mu\text{m}$ .

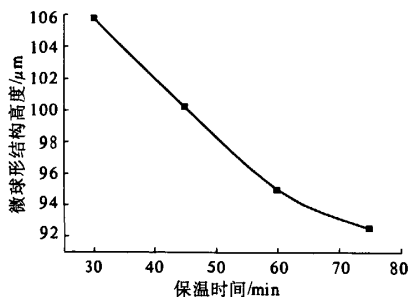


图 7 保温时间对微球形高度的影响

Fig. 7 Effect of holding time on the height of micro-spherical structure

台湾中兴大学许永顺等人<sup>[13]</sup>加热 AZ4620 型光刻胶到  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  并保温  $10\text{ min}$ ,圆柱光刻胶熔融成微球形形貌.哈佛大学 HongKai Wu 等人<sup>[14]</sup>在平板加热器上加热 Shipley1818 型光刻胶到  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  并保温  $30\text{ min}$ ,得到微球形形貌.相对于本文的仿真结果:最佳工艺参数组合为加热速率  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,加热温度  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温时间  $45\text{ min}$ ,和上述研究者的实验结果存在一定的差异.其主要原因是光刻胶种类和加热参数不同引起,同时微小差异也证明了仿真结果的可信性,能够对实验参数选取起到指导性作用.

## 5 结论

通过 Marc 仿真软件,分析微圆柱 AR-N440 光刻胶加热熔融成微球形结构的变形过程,得到微球形结构的高度值.

(1)通过正交实验法,得到最佳工艺参数组合为:加热速率  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,加热温度  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温时间  $45\text{ min}$ .工艺参数对微球形结构高度值的影响主次顺序依次为:保温时间 > 加热速率 > 加热温度.

(2)通过单因素实验法,得到工艺参数(加热速率、加热温度和保温时间)对微球形结构高度值的影响规律,影响顺序为:保温时间 > 加热速率 > 加热温度.

(3)定性和定量分析了仿真结果的可信性,为热熔回流实验过程中工艺参数的选定提供理论依据.

## 参考文献:

- [1] JULIEN G, THIERRY C, PATRICE M. Microinjection molding of thermoplastic polymers: Morphological comparison with conventional injection molding[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(2): 168-180.
- [2] 喻永康. 微细加工技术研究现状[J]. 无锡商业职业技术学院学报, 2007, 7(6): 4-7.
- [3] 张永华, 丁桂甫, 彭军, 等. LIGA 相关技术及应用[J]. 传感器技术, 2003, 22(3): 60-65.
- [4] QU Wen-min, WENZEL C, JAHN A, et al. UV-LIGA: A Promising and Low-Cost Variant for Microsystem Technology[J]. Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices, 1999, 19(4): 380-383.
- [5] ABRAHAM M, ARNDLD J, EHRFELD W. Laser-LIGA: a cost-saving process for flexible production of microstructures[J]. Micromachining and Microfabrication Process Technology, 1995, 26(3): 164-173.
- [6] VESTRI C, DEVERNAY F. Improving correlation-based DEMs by image warping and facade correlation[C]//Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000, (1): 438-443.
- [7] CHANG Hyun-kee, KIM Yong-kweon. UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole[J]. Sensors and Actuators, 2000, 84(3): 342-350.
- [8] ZORAN D P, ROBERT A S, NC G A. technique for monolithic fabrication of microlens arrays[J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1281-1284.
- [9] 王亚军, 杨春生, 刘景全, 等. 用于视觉假体的柔性生物微电机阵列的设计和制作[J]. 传感技术学报, 2009, 22(1): 15-19.
- [10] SHYU R F, PAN C T, LIN S C. Parametric study of spherical micro-lens array[J]. Materials Science Forum, 2006, 505/507: 595-600.
- [11] CHUNG C K, HONG Y Z. Fabrication and analysis of the reflowed microlens arrays using JSR THB-130 N photoresist with different heat treatments[J]. Microsyst Technol, 2007, 13(5/6): 523-530.
- [12] 任智斌, 卢振武. 通过缩短显影时间提高微透镜阵列的填充因子与 F 数[J]. 电子·激光, 2005, 16(2): 150-155.
- [13] 许泳顺. 表面张力及重力对光阻热熔成型形貌影响之探讨[D], 台湾国立中兴大学机械工程学系所, 2009.
- [14] WU Hong-kai, TERI W O, GEORGE M W. Reduction photolithography using microlens arrays: applications in gray scale photolithography[J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(14): 3267-3273.

## Simulation Research on Effect of Thermal Reflow Processing Parameters on Height of Micro-spherical Structure

JIANG Bing-yan<sup>1</sup>, LI Dai-bing<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, Stefan KIRCHBERG<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing, School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Polymer Materials and Plastics Engineering, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld 38678, Germany)

**Abstract:** In order to research the influence of thermal reflow processing parameters on the micro-spherical structure's height which is melted by the  $D \times h$  ( $\Phi 500 \mu\text{m} \times 66 \mu\text{m}$ ) micro-cylinder resist, the Marc software was applied to simulate resist melting and deforming processing. The ideal processing parameters combination was obtained by orthogonal experimental method and the single factor experimental method was utilized to study the effect law of different processing parameters on the height of micro-spherical structure. The results showed that the ideal processing parameters combination was  $1^\circ\text{C/s}$  for heating rate,  $110^\circ\text{C}$  for heating temperature and 45min for holding time; the significance of processing parameters on the micro-spherical structure's height can be ordered in holding time > heating rate > heating temperature.

**Key words:** thermal reflow; processing parameter; micro-spherical structure; marc simulation