

# 微型塑料件激光融化成型数值模拟和实验

谭文胜<sup>1,2</sup> 周建忠<sup>1</sup> 朱炜立<sup>1</sup> 黄 舒<sup>1</sup> 孟宪凯<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

<sup>2</sup>常州信息职业技术学院, 江苏 常州 213164

**摘要** 为了满足微型塑料件(PMC)的高效率和高质量成型加工,提出了基于CO<sub>2</sub>激光定位辐照的微型塑料件融化成型方法。采用有限元软件Comsol数值模拟激光辐照过程中的试样温度变化,研究试样二维和三维瞬态温度场及其分布特征,分析激光参数对温度变化的影响,探讨工艺参数对成型质量影响规律。数值模拟和实验结果表明,选择适当激光参数可以满足试样温度在整体融化范围,温度越高则成型精度越好,成型压力远低于传统的注塑和热压成型;采用定位辐照融化方式可以获得复制精度较好的成型件,表明微型塑料件的激光融化成型具有可行性和有效性。

**关键词** 激光技术; 微型塑料件; 融化成型; 微结构; 复制精度

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0103004

## Simulation and Experiment of Laser Melting-Forming for Polymer Micro Component (PMC)

Tan Wensheng<sup>1,2</sup> Zhou Jianzhong<sup>1</sup> Zhu Weili<sup>1</sup> Huang Shu<sup>1</sup> Men Xiankai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup>Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

**Abstract** In order to realize molding process of polymer micro component (PMC) with high efficiency and high precision, the molding method of PMC is presented based on CO<sub>2</sub> laser positioning irradiation. The software Comsol is used in the numerical analysis of the temperature of samples, two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) transient temperature field and distribution of samples are researched, and the influence of laser parameters on temperature variation is analyzed. The effects of processing parameters on replication quality are investigated via the development of test device and experiment. The results show that the appropriate laser parameters can meet the overall sample melting, and the higher the temperature, the better the molding precision; molding pressure is much lower than these of traditional injection molding and thermoforming. It is demonstrated that the proposed process is a feasible and effective way to laser melting-molding PMC.

**Key words** laser technique; polymer micro component; melting-molding; microstructure; replication precision

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

聚合物微型件(PMC)是指基体尺度为毫米,局部具有微米尺度结构的高精度塑料成型件,如聚合物微齿轮、微流控芯片和微透镜等,相比于金属、硅和玻璃等微型元件,PMC原材料便容易成型加工,在微机电系统和微分析系统具有重要的应用和研究价值<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51175236)、江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11\_0545)、江苏省“333工程”项目、江苏省常州市科技计划应用基础研究项目(CJ20140003)

作者简介: 谭文胜(1968—),男,博士研究生,副教授,主要从事材料成型加工与激光加工技术等方面的研究。

E-mail: tws.163@163.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

近年来,PMC成型方法主要有热压成型、微注塑、激光直写刻蚀等,热压成型具有成型精度高、工艺简单等优点<sup>[3-4]</sup>,但热压成型生产效率不高,虽然微注塑生产效率高,然而成型模具和注塑设备结构复杂、成型质量控制困难、生产成本较高<sup>[5]</sup>。激光直写刻蚀方法可以分为冷刻蚀和热刻蚀,冷刻蚀是激光对聚合物基体进行光化学降解蚀刻,例如准分子激光刻蚀聚合物微结构<sup>[6]</sup>,准分子激光适合微量刻蚀,较大体积或面积刻蚀加工时间长且成本高。热刻蚀是利用激光热效应进行热分解烧蚀,加工效应较高,Mohammed等<sup>[7-8]</sup>研究了CO<sub>2</sub>激光直写烧蚀聚合物微通道,采用激光功率为10~60 W,扫描速度为80~400 mm/s,烧蚀成形的微通道横截面尺度为数十至数百微米,但是,烧蚀过程中微通道表面容易黏附残留冷凝料<sup>[9-10]</sup>,微通道形状和尺寸精度较低。目前,利用激光热效应,除进行刻蚀聚合物微结构特征外,还有聚合物材料表面改性、切割和焊接等<sup>[11-12]</sup>,但PMC激光融化成型的研究与应用较为缺乏。

在激光融化聚合物实验研究基础上<sup>[13]</sup>,提出基于CO<sub>2</sub>激光定位辐照的PMC融化成型方法,采用有限元软件模拟分析PMMA试样在激光融化过程中的温度场,探索激光参数对试样温度变化的影响规律,并通过设计和研制融化成型实验装置,分析工艺参数对成型质量的影响,为研究PMC激光融化成型机制和工艺控制提供参考依据。

## 2 激光融化成型原理

PMC激光融化成型方法,基本原理如图1所示。将聚合物试样填入模具型腔,设定激光功率、光斑直径和辐照时间,随后模具闭合,激光器输出的激光束透过约束层辐照试样表面,试样在低功率激光定位辐照下,温度快速达到玻璃态转变温度以上和热分解温度以下,试样整体融化为熔体并在模板压力作用下流动成型,最后成型件冷却固化并开模取出。

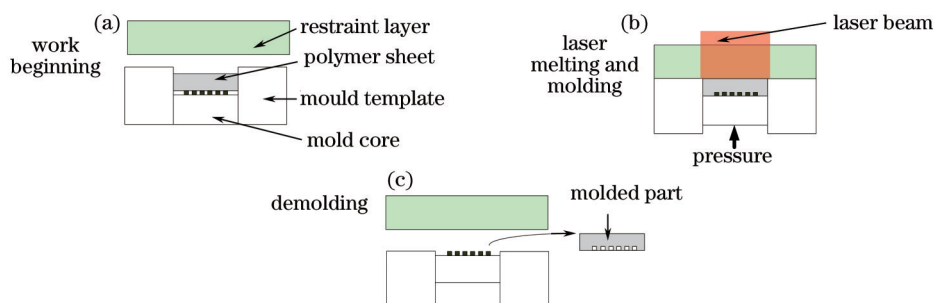


图1 激光融化成型原理图。(a)工作准备;(b)融化成型;(c)开模取件

Fig.1 Schematic of the laser melting molding. (a) Setup; (b) melting and molding; (c) de-molding

## 3 温度场数值模拟

### 3.1 数值模型

CO<sub>2</sub>激光模式是基模TEM<sub>00</sub>,光束的功率密度分布可表示为

$$P_{(x,y)} = \frac{2P_0}{\pi r^2} \exp\left(-2\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right), \quad (1)$$

式中 $P_0$ 为激光功率, $r$ 为光斑半径。根据文献[14],可以作如下假设:

- 1) 激光垂直辐照聚合物材料表面,激光在瞬时被材料吸收并转化为热量,激光可以作为面热源负载;
- 2) 由于试样融化温度较低,在激光加热融化过程中试样的热容、热传导系数和激光吸收系数不受温度变化影响;
- 3) 除部分反射和透射外,聚合物吸收的激光能量全部转化为热能。

激光热量向材料内部传递遵循傅里叶定律,在 $t$ 时刻光斑区域的温度场和热传导方程为

$$T_{(x,y,z,t)} - T_0 = \frac{2\rho P_0 \sqrt{a}}{k\pi^{3/2}} \times \int_0^t \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}[8a(t-t')+r^2]} \exp\left[-2\frac{x^2 + y^2}{8a(t-t') + r^2} - \frac{z^2}{4a(t-t')}\right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(a\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(a\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(a\frac{\partial T}{\partial z}\right) + P_{(x,y)} = \frac{\partial}{\partial t}(c\rho T), \quad (3)$$

式中  $c$  为材料比热,  $\rho$  为材料密度,  $k$  为热传导系数,  $a$  为激光吸收系数。

### 3.2 有限元分析模型

采用有限元软件 Comsol 分析激光定位辐照过程中的聚合物温度变化。首先建立有限元模型,试样为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)圆形板料(直径为 4 mm,厚为 1 mm),假设直径略小于模具型腔,可以认为试样仅是底面与模板接触,模板尺寸为 45 mm×45 mm×3 mm,建立的模型由板料和模板组成,如图 2 所示,输入如表 1 所示的 PMMA 和模具钢物理系数。PMMA 的 CO<sub>2</sub>激光吸收系数为 92%,熔体流动温度范围大约为 140 °C~270 °C。

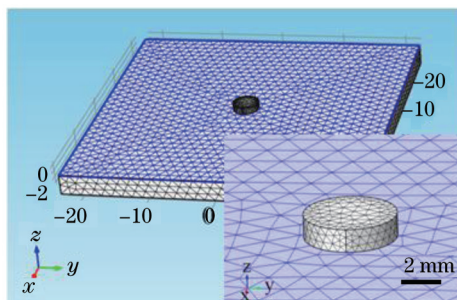


图 2 有限元分析模型

Fig.2 Finite element analysis model

表 1 PMMA 和模具钢的各项系数

Table 1 Parameters of PMMA and steel mold

	PMMA sample	Steel mold
Thermal conductivity /[(W)/(m·K)]	0.19	44.44
Thermal capacity /[J/(kg·K)]	1420	498
Density /(kg/m <sup>3</sup> )	1190	7850
Glass transition temperature $T_g$ /°C	105	
Flow temperature /°C	140	
Degradation temperature /°C	270	

### 3.3 模拟结果与分析

在激光功率为 0.8 W、光斑直径为 10 mm 和室温为 20 °C 条件下,得到如图 3 所示的最高温度与最低温度变化曲线。由图 3 可以看出,最高温度与最低温度均呈线性上升,在激光辐照开始阶段,最高温度升幅较大而最低温度升幅较小,这是因为 PMMA 的热容和导热系数较低,试样吸收激光能量后,热量集中在表面层,传递到达底面的热量较少,导致表面温度快速上升;随着辐照时间增加,最高温度与最低温度升幅趋于接近。

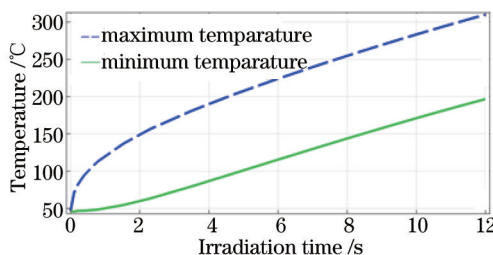


图 3 最低温度与最高温度曲线

Fig.3 Minimum temperature and maximum temperature curves

在上述激光参数条件下,试样三维瞬态温度变化如图 4 所示。由图 4 可知,辐照时间为 5.2、7.5 和 10.0 s 时,试样最高温度和最低温度分别为 202.25 °C 和 104.11 °C、236.84 °C 和 156.85 °C、270.46 °C 和 176.32 °C,可见,激光辐照为 5.2 s 时试样整体温度基本上超过玻璃态转变温度;辐照时间在 7.5~10 s 范围内,最高温度和最低温度均已达到流体温度,即试样整体达到流体状态。分析结果可知,选择适当的激光参数,试样可以整

体融化为流体而不发生热分解, 这为试样融化成型的激光参数选择提供了参考依据。

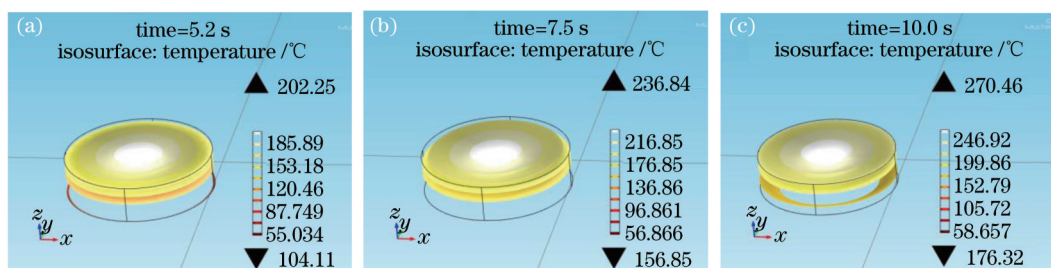


图4 试样三维温度场。(a) 辐照时间 5.2 s; (b) 辐照时间 7.5 s; (c) 辐照时间 10 s

Fig.4 Three-dimensional temperature field of sample. (a) Irradiation time of 5.2 s; (b) irradiation time of 7.5 s; (c) irradiation time of 10 s

在试样不同厚度平面上, 激光辐照 7.5 s 时试样二维温度分布如图 5 所示。其中, 图 5(a) 为高度 0.01 mm 的试样底部平面温度分布, 最高温度为 200.61 °C, 最低温度为 161.43 °C; 图 5(b) 为试样高度 0.99 mm 处接近上表面的剖平面温度分布, 最高温度为 226.35 °C, 最低温度为 178.33 °C。由温度分布可以看出, 最高温度在试样中心位置, 最低温度分布在试样圆周边缘处, 分析认为, 由于光束能量模式是基模, 因而, 光斑中心区域温度高, 边缘部位温度低, 温度分布与光束能量高斯型特征相符合。

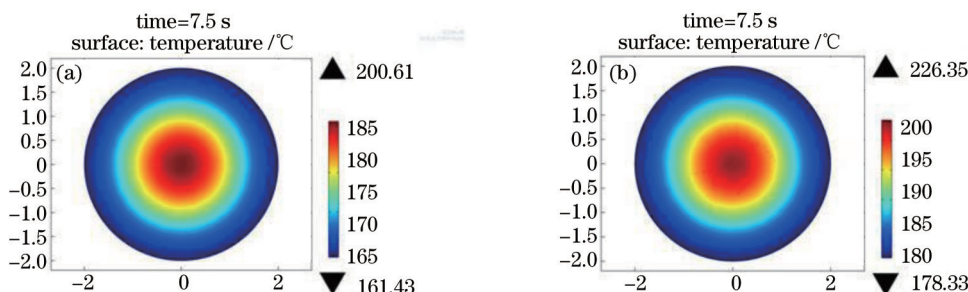


图5 试样不同厚度平面上的温度分布。(a) 高度 0.01 mm; (b) 高度 0.99 mm

Fig.5 Temperature distribution of sample on a different thickness planes. (a) Height of 0.01 mm; (b) height of 0.99 mm

在激光功率为 0.8 W 和室温为 20 °C 条件下, 图 6 所示为光斑直径分别为 8 mm 和 6 mm 的试样温度变化曲线。比较图 3 和图 6 可知, 光斑直径越小, 辐照在试样表面的激光功率密度越大, 而由于试样的热容和热传导系数比较小, 热量传递到试样内部和边缘部位速度较慢, 因而, 光斑直径小, 最高温度升幅快, 最高温度与最低温度之差增大。

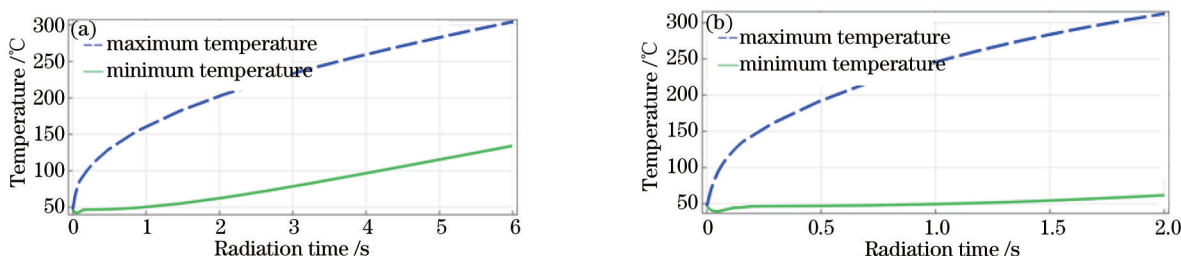


图6 不同光斑直径的试样温度曲线。(a) 光斑直径 8 mm; (b) 光斑直径 6 mm

Fig.6 Sample temperature curve with different spot diameters. (a) Spot diameter of 8 mm; (b) spot diameter of 6 mm

图 7 所示为光斑直径分别为 6 mm 和 8 mm 时, 试样在辐照时间为 1.63 s 和 5.05 s 的三维瞬态温度场, 从图 7(a) 可知, 光斑直径为 6 mm, 试样最高温度达到 270.42 °C 时, 最低温度只有 58.617 °C, 表明了在不发生热分解前提下, 试样不能够整体融化; 从图 7(b) 可知, 光斑直径为 8 mm, 最高温度达到 270.05 °C 时, 最低温度为 129.08 °C, 即表示试样可以整体融化为高弹态, 但达不到整体流体状态。由上述模拟数据可见, 激光功率不变, 光斑直径增大, 则材料融化过程中熔体温差小且温度分布相对均匀, 即低功率密度激光辐照可以得到温度较高和分布相对均匀的试样熔体。

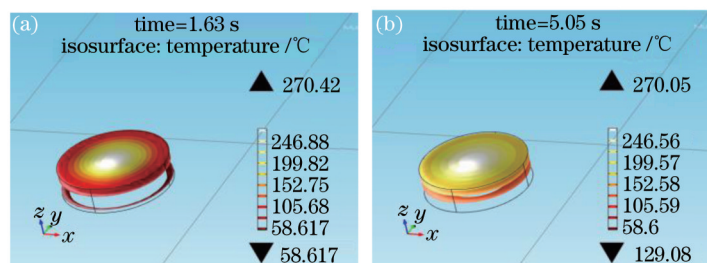


图7 不同光斑直径的试样温度场。(a) 光斑直径6 mm; (b) 光斑直径8 mm

Fig.7 Sample temperature field with different spot diameters. (a) Spot diameter of 8 mm; (b) spot diameter of 6 mm

## 4 实 验

### 4.1 实验材料及实验装置

实验试样为直径3.9 mm、厚1 mm的PMMA圆形件,成型件及其微结构特征设计如图8所示,微结构特征设计为宽620 μm、高250 μm的5个连续波纹结构。实验装置由激光设备和模具组成,如图9所示。激光设备为商用激光切割机,输出连续型CO<sub>2</sub>激光,波长为10.64 μm,功率为0~50 W,通过调整焦距,光斑直径为0.15~20 mm。模具主要由约束层、模板、型芯等机构组成,其中,模具型芯表面微结构特征采用电火花精密加工。

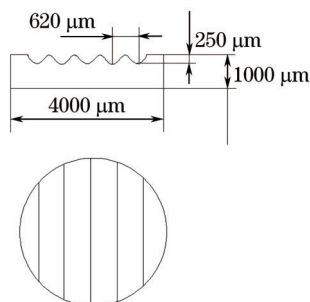


图8 成型件及其微结构特征设计图

Fig.8 Design charts of the part and microstructures

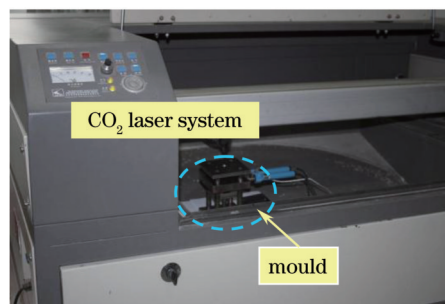


图9 激光融化成型试验图

Fig.9 Experimental picture of laser melting molding

图10(a)为型芯照片,型芯微结构三维形貌如图10(b)所示,在中间波纹横截面上测得波纹宽(C-D)为620.7 μm、高(A-B)为251.2 μm。

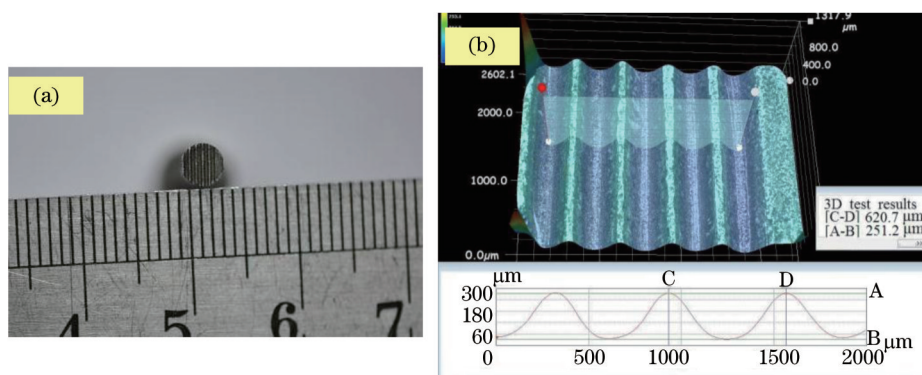


图10 型芯及其微结构形貌。(a) 型芯; (b) 微结构

Fig.10 Topography of the mold core and microstructures. (a) Mold core; (b) microstructure

### 4.2 实验过程及结果分析

依据上述软件模拟分析结果,选择激光功率为0.8 W、光斑直径为10 mm和激光辐照时间为5.5~10 s,以及室温为20 ℃和模具成型压力为50~300 N等工艺参数进行实验,得到的成型件如图11所示。

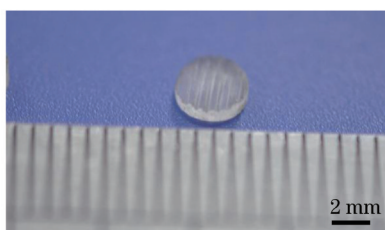


图 11 成型件图

Fig.11 Picture of part

在成型压力为 100 N、辐照时间分别为 5.5、6.5、7.5 s 条件下,测试的成型件微结构三维形貌和横截面尺寸如图 12 中所示。中间波纹测试结果分别为:图 12(a):宽 660.5  $\mu\text{m}$ 、高 232.7  $\mu\text{m}$ ,图 12(b):宽 618.6  $\mu\text{m}$ 、高 250.0  $\mu\text{m}$ ;图 12(c):宽 619.5  $\mu\text{m}$ 、高 250.3  $\mu\text{m}$ 。从图 12(a)中可以看出,由于辐照时间较短,试样基体温度较低,导致成型件的微结构尺寸偏差大且形状复制不完整,波纹的轮廓外形差异较大;而图 12(b)和(c)中,由于辐照时间较长,微结构形状复制较为一致,且成型精度较高。图 12(c)与图 10(b)比较,成型件微结构尺寸偏差为宽(C-D)1.2  $\mu\text{m}$ 、高(A-B)0.9  $\mu\text{m}$ 。

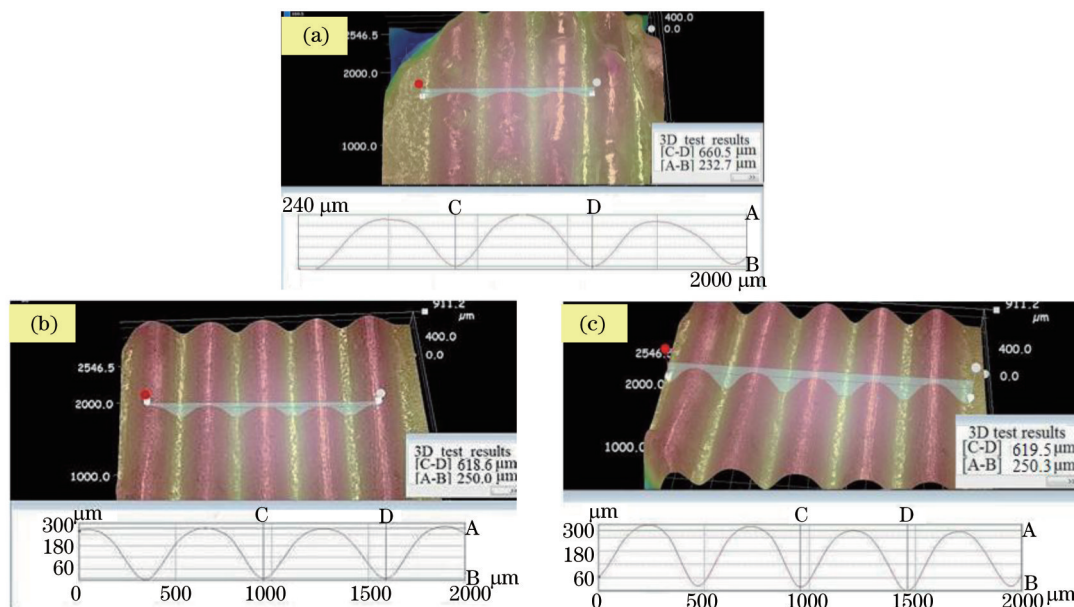


图 12 成型件微结构截面图。(a) 辐照时间 5.5 s; (b) 辐照时间 6 s; (c) 辐照时间 7.5 s

Fig.12 Cross-section of the part microstructure. (a) Irradiation time of 5.5 s; (b) irradiation time of 6.5 s; (c) irradiation time of 7.5 s

在上述激光功率、光斑直径和成型压力条件下,图 13 给出了成型件微结构尺寸偏差随激光辐照时间的变化关系图,可见,试样温度是影响成型质量的关键因素,激光辐照时间长,试样温度高,成型精度高,控制激光参数可以得到微结构复制精度较高的成型件。

另外,在激光功率为 0.8 W、光斑直径为 10 mm、激光辐照时间为 7.5 s 和室温为 20  $^{\circ}\text{C}$  条件下,图 14 给出

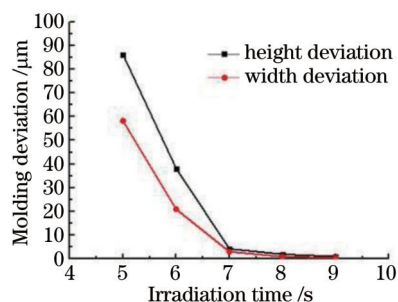


图 13 激光辐照时间对成型误差的影响

Fig.13 Effects of irradiation time on the molding accuracy

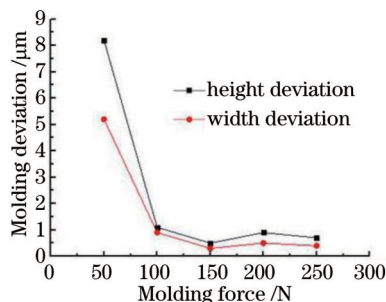


图 14 成型压力对成型误差的影响

Fig.14 Effects of molding force on the molding accuracy

了微结构尺寸偏差随成型压力变化情况,从图 14 可知,压力在 100 N 以上,微结构尺寸偏差可以低于  $1\ \mu\text{m}$ ,且尺寸偏差随成型压力增大有降低趋势。

从图 13 和图 14 可以看出,成型质量主要受试样温度影响,分析认为,试样温度低会导致试样熔体与模具接触面的冷凝层增厚,阻碍熔体流动,使得试样成型精度降低;模具挤压过程中,由于试样熔体只是在模具型腔内的微量流动,熔体流动的剪切速率极小,因而,熔体流动不需要高速高压的成型条件,成型压力可以远低于微注塑和热压成型,但是,成型压力增大相应地成型件内应力增大,较大的应力释放会导致成型件回弹变形增大,因而,成型误差不是随成型压力增大而单调下降的。

## 5 结 论

提出了 PMC 的激光定位辐照融化成型方法,采用有限元软件建立温度场分析模型,分析了激光辐照下聚合物融化过程的二维、三维瞬态温度场及其分布特征。数值模拟和实验结果表明,熔体温度是成型质量的关键影响因素,熔体温度高则成型精度好,试样在低功率密度激光辐照下,可以得到温度较高和温度分布相对均匀的熔体,并能够得到高精度的 PMC;成型压力远低于微注塑和热压成型,随成型压力增大成型精度提高,但成型压力和成型精度不是单调上升关系。该成型方法不仅成型装置结构简单操作方便,而且能够降低能源消耗和生产成本。

## 参 考 文 献

- 1 Mohammed M I, Desmulliez M P Y. Lab-on-a-chip based immunosensor principles and technologies for the detection of cardiac biomarkers: a review[J]. Lab Chip, 2011, 11(4): 569-595.
- 2 Holger Becker, Claudia Gärtner. Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems[J]. Anal Bioanal Chem, 2008, 390(1): 89-111.
- 3 He Yong, Fu Jianzhong, Chen Zichen. Demolding defects and the design of demolding device in micro hot embossing process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 53-58.  
贺永,傅建中,陈子辰.微热压成型脱模缺陷分析及其脱模装置[J].机械工程学报,2008,44(11):53-58.
- 4 Becker H, Heim U. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures[J]. Sens Actuators A Phys, 2000, 83(1): 130-135.
- 5 Julien Giboz, Thierry Copponnex, Patrice Mélé. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review[J]. J Micromech Microeng, 2007, 17(6): 96-109.
- 6 Costela A, Garciamoreno I, Florido F, *et al.*. Laser ablation of polymeric materials at 157 nm[J]. J Appl Phys, 1995, 77(6): 2343-2350.
- 7 M I Mohammed, E Abraham, M P Y Desmulliez, *et al.*. Rapid laser prototyping of valves for microfluidic autonomous systems[J]. J Micromech Microeng, 2013, 23(3): 035034.
- 8 Qi Heng, Wang Xiansong, Chen Tao, *et al.*. Fabrication and application of PMMA continuous-flow PCR microfluidic chip with CO<sub>2</sub> laser direct-writing ablation micromachining technique[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1239-1245.  
祁恒,王贤松,陈涛,等. PMMA 基连续流式 PCR 微流控芯片的 CO<sub>2</sub> 激光直写加工与应用[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1239-1245.
- 9 J M Li, C Liu, L Y Zhu, *et al.*. The formation and elimination of polymer bulges in CO<sub>2</sub> laser microfabrication[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4814-4821.
- 10 Huawei Li, Yiqiang Fan, D Conchouso, *et al.*. CO<sub>2</sub> laser-induced bump formation and growth on polystyrene for multi-depth soft lithography molds[J]. J Micromech Microeng, 2012, 22(11): 115037.
- 11 Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, *et al.*. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006.  
雷剑波,王镇,王云山,等.激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究[J].中国激光,2013,40(1):0103006.
- 12 Xie Xiaozhu, Li Lijun, Wei Xin, *et al.*. Evaporative front of laser cutting PMMA[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 925-930.  
谢小柱,李力钧,魏昕,等.有机玻璃激光气化切割前沿[J].中国激光,2008,35(6):925-930.
- 13 W S Tan, J Z Zhou, S Huang, *et al.*. Experimental study on laser plasticizing polyamide12[J]. Advanced Materials Research, 2012, 472: 2514-2518.
- 14 Li Junchang. The Calculation of Laser Diffraction and Thermal Acting[M]. Beijing: Science Press, 2008.  
李俊昌.激光的衍射及热作用计算[M].北京:科学出版社,2008.