

PMMA 微结构件激光融化成型实验

谭文胜^{1,2} 周建忠¹ 黄 舒¹ 朱炜立¹ 孟宪凯¹

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)
(² 常州信息职业技术学院, 江苏 常州 213164)

摘要 为了满足聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微结构件的高效率和高质量成型加工,提出了激光融化成型新方法,设计和研制实验装置,采用 CO₂ 激光扫描辐照方式进行融化成型实验,依据热物理和能量守恒原理,理论计算和模拟分析试样在激光扫描过程中的温度场变化,并通过正交实验设计和实验,分析工艺参数对微结构复制精度的影响。结果表明:熔体温度是影响成型质量的主要因素,温度高则成型精度高;工艺参数对微结构复制精度的影响程度分别是:激光功率对提高复制精度起决定性作用,其次是扫描时间和模具温度,最后是成型压力。采用优化后的工艺参数进行实验,获得较好的微结构复制精度,表明了 PMMA 微结构件的激光融化成型具有可行性。

关键词 激光技术;CO₂ 激光;融化成型;微结构件;复制精度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703009

Experiment of Laser Melting-Forming for PMMA Microstructure Parts

Tan Wensheng^{1,2} Zhou Jianzhong¹ Huang Shu¹ Zhu Weili¹ Men Xiankai¹

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract In order to realize molding process of polymethyl methacrylate (PMMA) micro-structured parts with high efficiency and high precision, a new molding method is presented with laser melting. This paper develops fabrication and experiment devices, and carry out the experiment of laser melting-molding on PMMA microstructures by CO₂ laser scanning. According to thermal physics and energy conservation the temperature variation of samples is analyzed with the method of numerical analysis and simulation, and the effects of the various processing parameters on replication quality are investigated via orthogonal experiment. The results show that the temperature of the melt is the main factor affecting the quality of the molding, where high temperature leads to a good molding precision. Laser power is the decisive parameter to influence the replication precision of the micro-structure; scanning time and mould temperature are the secondary factors; molding pressure is the least important among them. At last, the molding process of PMMA microstructure with good replication precision is obtained by optimized process. It is demonstrated that the proposed process is a feasible and effective way to laser melting-molding PMMA micro-structured parts.

Key words laser technique; CO₂ laser; melting-molding; micro-structured parts; replication precision

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引 言

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微结构件是指基体为毫米尺度,并具有微米尺度结构特征的高精度塑料件,如 PMMA 微流控芯片、导光板和细胞培养

皿等,PMMA 微结构件在电子信息、精密仪器、生命与医药工程等领域具有广阔的应用前景^[1-2],由于其原材料便宜、透光性好、物理化学性能稳定,PMMA 微结构件的成型加工已成为国内外研究热

收稿日期: 2014-01-08; **收到修改稿日期**: 2014-02-24

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)、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金资助项目(GZ201205)、江苏省“333 工程”项目

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研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

点^[3-4]。目前,PMMA 微结构件主要有热压成型、微注塑、激光刻蚀、原位成型等加工方法,热压成型具有成型精度高、工艺简单等优点^[5],但热压成型的成型周期长、生产效率不高,微注塑生产效率较高,然而,微注塑的成型模具和注塑设备结构复杂、生产成本较高^[6]。

近年来,由于激光具有能量集中、可控性、柔性化等特性,激光刻蚀方法已有大量文献资料报道,激光刻蚀方法可以分为冷刻蚀和热刻蚀,冷刻蚀是利用光子能量较高的激光对基体进行光化学降解,冷刻蚀适合于纳米至微米尺度刻蚀,如光盘的微结构准分子激光刻蚀^[7],对于加工面积或体积较大的微结构特征,准分子激光刻蚀时间长且成本高;热刻蚀是利用激光的光热效应进行热分解烧蚀, Mohammed 等^[8-10]研究了 PMMA 基体的微结构通道 CO₂ 激光烧蚀,这是采用激光直写烧蚀的方式,一次扫描烧蚀成形的微结构通道截面尺寸可达数十至数百微米,烧蚀效率高,但烧蚀过程中微结构通道壁面容易黏附残留冷凝料^[9-10],并且微结构通道形状和尺寸精度控制较为困难。原位成型是指 LIGA,这种方法涉及光刻、电铸和复制等复杂的制作过程,如聚二甲基硅氧烷(PDMS)和 PMMA 微流控芯片的原位成型^[11-12]。

目前,利用 CO₂ 激光对 PMMA 的光热效应,主要是进行 PMMA 基材的微结构刻蚀、表面改性、切割和焊接等方面的研究^[13-14],但对于微结构激光融化成型研究国内外尚比较缺乏。本文在之前的聚合物 CO₂ 激光融化实验研究基础上^[15],研制激光融化成型装置,采用 CO₂ 激光扫描辐照方法,进行 PMMA 基材的微结构融化成型实验,通过理论分析和实验研究,分析工艺因数对成型质量的影响,为研究 PMMA 微结构件的激光融化成型新方法提供参考。

2 激光融化成型原理

提出的 PMMA 微结构激光融化成型,是指在低功率 CO₂ 激光扫描辐照下,PMMA 吸收激光能量,温度快速升至玻璃态转变温度以上和热分解温度以下,融化的熔体在模具中直接挤压成型。基本原理如图 1 所示,将 PMMA 坯料填入成型模具型腔,通过激光设备的软件控制系统,设定激光扫描路径和扫描速度,激光器工作方式采用连续式扫描,激光器输出的激光束透过约束层辐照试样表面,试样温度快速升高直至整体融化为熔体,随后熔体在模板挤压作用下流动并充填成型。

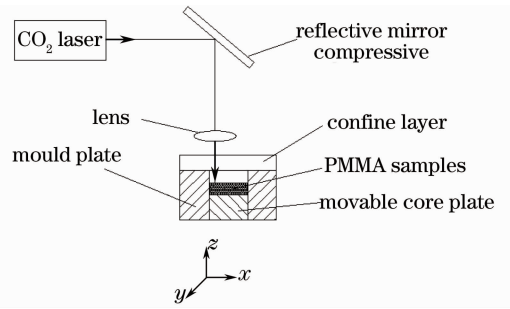


图 1 激光融化成型原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser melting molding

3 实 验

3.1 实验装置及实验材料

实验装置由激光设备和成型模具组成,如图 2 所示,其中,激光设备为输出连续型 CO₂ 激光的商用激光切割机(CLS2000),激光波长 10.64 μm,激光功率 0~50 W,光束通过透镜调整焦距,可得到直径为 0.15~20 mm、能量高斯分布的光斑。成型模具主要由约束层、成型模板、动型芯、温控仪、升降和压力控制机构等组成,约束层采用 ZnSe 窗口玻璃,ZnSe 玻璃材料的 CO₂ 激光透射率达 99% 以上,可作为约束层,但 ZnSe 玻璃为硬脆性材料不易加工微结构特征;动型芯为模具钢,动型芯表面具有成型加工需要的微结构特征,动型芯采用电火花精密加工。

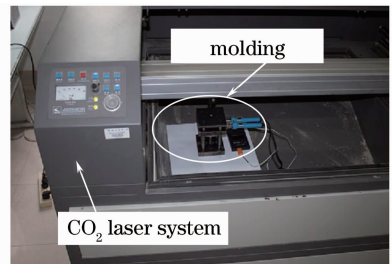


图 2 激光融化成型实验图

Fig. 2 Experimental picture of laser melting molding

成型件尺寸和微结构特征设计如图 3 所示,微结构设计为 9 个连续波纹结构,每个波纹结构为:宽 620 μm、高 160 μm。实验试样采用 PMMA 坯料,试样坯料采用激光切割加工,长宽高尺寸为 14.8 mm×9.8 mm×1 mm。PMMA 熔体温度范围大约为 140 °C~270 °C,模塑工艺性能好,成型件容易脱模,PMMA 材料的基本物理性参数:CO₂ 激光吸收系数 92%、导热系数 0.19 W/(m·k)、热比容 1420 J/(kg·K)、密度 1190 kg/m³、玻璃化转变温度 105 °C、流动温度 140 °C、热分解温度高于 270 °C、烧蚀温度高于 340 °C。

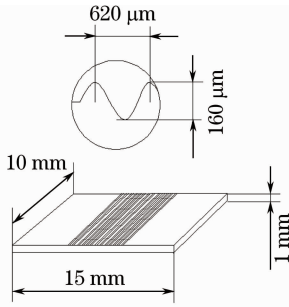


图 3 成型件及其微结构设计图

Fig. 3 Design charts of the molded part and microstructure

采用日本基恩士数码显微系统(VHX-1000)测试动型芯和成型件的显微形貌和波形尺寸。按成型件设计尺寸进行精密电火花加工动型芯,获得的动型芯微结构如图 4 所示,其中图 4(a)为成型模具的模板和动型芯照片,微结构截面尺寸如图 4(b)所示,在第五个波纹的测试位置(测试线上)测得微结构宽 621.3 μm、高 163.3 μm,动型芯微结构与成型件设计尺寸有偏差,这是动型芯电火花加工形成的误差。

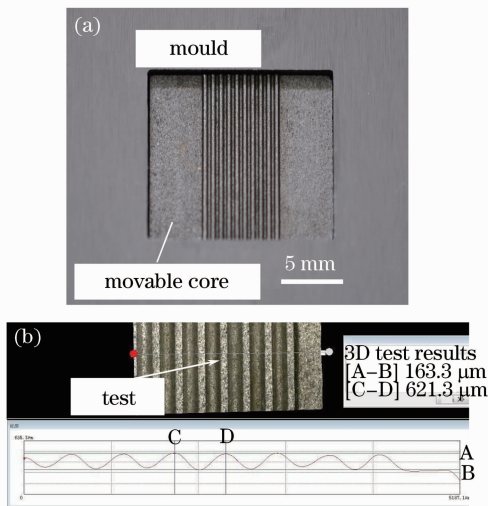


图 4 (a)模板和(b)微结构形貌

Fig. 4 Topography of (a) mould and (b) microstructure

3.2 融化成型实验

首先确定激光参数,参考之前的激光融化聚合物实验,选择和调整激光参数为:功率 1.5~2.5 W、光斑直径 10 mm、扫描速度 10 mm/s,光斑中心与试样表面中心线重合,光斑在试样表面长度方向的中心线上往返扫描。扫描融化过程中发现,功率 1.5 W 时,光斑往返扫描 9 s,试样整体达到软化状态,往返扫描 15~20 s,试样整体融化为熔体,超过 20 s 试样出现热分解气化,这与前期的激光融化聚合物实验结果基本相符合。

融化成型实验过程中,保持光斑和扫描速度不变,采用不同的功率和扫描时间,进行激光融化试样,当试样融化后,加载成型压力 50~150 N 并保压 30 s,待试样温度下降转变为固态后,开模取出成型件,由于试样在模具中直接融化成型,挤压时间忽略不计,整个成型加工周期小于 60 s,图 5 为成型件照片。

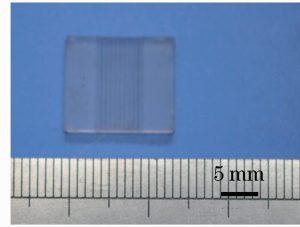


图 5 成型件图

Fig. 5 Picture of molded part

在模具温度 70 °C、成型压力 150 N、激光功率 2.0 W、扫描时间分别为 10、15、20 s 的条件下,得到了如图 6 所示的成型件微结构形貌显微图,在同一测试位置(中间第五个波纹):图 6(a)宽度 595.5 μm、高度 84.3 μm,图 6(b)宽度 636.1 μm、高

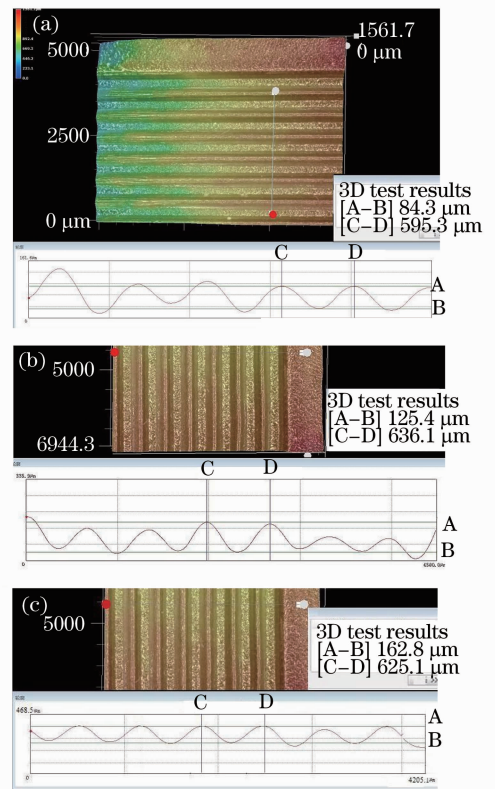


图 6 成型件微结构形貌图。(a) 扫描时间 10 s;

(b) 扫描时间 15 s; (c) 扫描时间 20 s

Fig. 6 Topography of the molded part microstructures.

(a) Scanning time 10 s; (b) scanning time 15 s;

(c) scanning time 20 s

度 125.4 μm, 当扫描时间 20 s 时, 熔体由于进一步受热而温度进一步升高, 微结构波纹宽度和高度分别达到 625.1 μm 和 162.8 μm, 与模板微结构尺寸已十分接近, 如图 6(c) 所示。对比图 4 中的模板微结构形状及尺寸, 可见随着激光扫描时间增加, 试样温度升高, 微结构波纹宽度和高度的成型尺寸偏差减少, 成型件微结构形状复制精度提高。

4 成型质量影响因素分析

4.1 温度变化分析

4.1.1 数学模型

在激光融化成型过程中, 试样温度变化是微结构成型的关键, 实验用 CO₂ 激光模式是基模, 能量分布呈高斯型, 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 为激光输出功率, r 为光斑半径, 假设材料性能各向同性, 光束垂直入射试样表面。试样表面吸收激光能量, 热量传递遵循傅里叶定律, 在光束沿 x 轴正向以速度 v 扫描辐照作用下, t 时刻光斑邻近区域的温度场和热传导方程为^[16]

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

$$\exp\left[-2 \frac{(x-vt')^2 + y^2}{8a(t-t') + r^2} - \frac{z^2}{4a(t-t')}\right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) +$$

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

式中 c 材料比热, ρ 材料密度, k 热传导系数, a 激光吸收系数, 由(1)、(2)、(3)式建立方程组, 及初始条件($t=0, T=T_0, T_0$ 为环境温度), 可以求解得出 t 时刻的材料温度场分布情况。

在激光功率、光斑大小和扫描速度确定条件下, 通过控制时间 t , 就可以获得融化成型所需的温度条件。

4.1.2 模拟分析

微结构尺寸偏差的产生, 主要原因是由于激光束为高斯型, 以及热量传递过程中的试样温度为梯度分布。熔体粘性系数受温度影响, 在温度高的区域熔体粘性系数低, 流动摩擦阻力小, 而温度低的区域粘性系数高, 流动摩擦阻力大, 熔体温度大小和分布不均匀会导致流动形变差异, 尺寸偏差现象可结合模拟结果加以分析。

利用 Comsol 有限元软件进行试样扫描融化过程的温度场模拟分析。为了得到理想的模拟结果, 建立有限元模型, 试样的长和宽略小于模具型腔, 可以认为试样在融化前只是底面与模具接触, 而其他面不接触模具, 输入 PMMA 材料和模具钢的

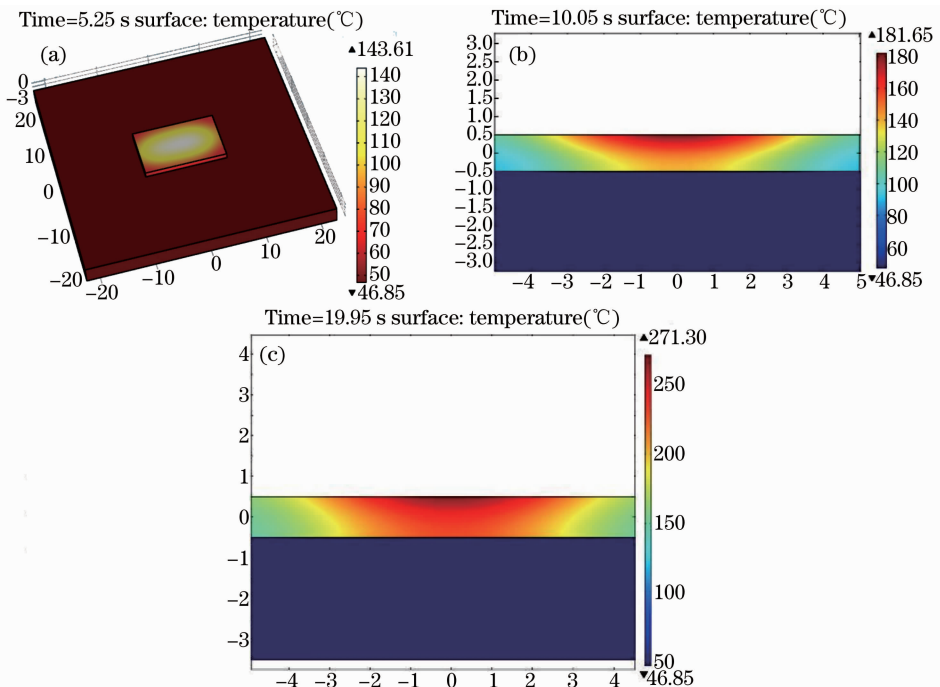


图 7 温度模拟分布图。(a) 扫描时间 5.25 s; (b) 扫描时间 10.05 s; (c) 扫描时间 19.95 s

Fig. 7 Simulation of temperature distribution. (a) Scanning time 5.25 s; (b) scanning time 10.05 s; (c) scanning time 19.95 s

各项系数,设定边界条件和加载条件:起始温度为 20 ℃、激光功率 1.5 W、光斑直径 10 mm、扫描速度 10 mm/s。建立的模型和模拟结果如图 7 所示,其中,图 7(a) 为激光扫描 5.25 s 时试样温度 3D 结果图,试样温度分布大约为 50 ℃~140 ℃,试样各区域温度基本未达到软化温度;随着扫描时间增加,试样温度提高,激光扫描 10.05 s 时,试样横截面上温度分布如图 7(b)所示,试样温度大约为 80 ℃~180 ℃,横截面上有 1/3 以上区域的温度超过 140 ℃,说明试样局部已熔化;激光扫描 19.95 s 时,如图 7(c)所示,试样温度大约为 150 ℃~270 ℃,试样横截面上温度均超过 140 ℃,表明试样已整体熔化。

依据以上模拟的试样温度变化和分布情况,结合上述实验所得的成型件微结构截面形状和尺寸,

可以认为,熔体温度高低影响微结构成型精度,试样温度提高,则成型精度提高,模拟分析获得的数据和上述成型实验结果表现基本一致。

4.2 工艺参数对成型质量的影响

4.2.1 正交实验设计

为便于分析各工艺参数对成型质量的影响,将成型件微结构波形高度与动型芯微结构波形高度的尺寸偏差定义为微结构复制精度。参考上述实验结果,选用 Minitab 软件进行正交实验设计,在光斑和扫描速度为设定的情况下,考虑较为可取的影响因素为激光功率、扫描时间、模具温度和成型压力 4 个因素,每因素取 3 水平,以微结构复制精度为评价指标,各因素与水平见表 1。

表 1 实验影响因素与水平参数

Table 1 Experimental factor and level parameters

Level	Laser power /W	Scanning time /s	Molding force /N	Mould temperature /℃
1	1.5	10	50	50
2	2.0	15	100	60
3	2.5	20	150	70

4.2.2 正交实验和工艺参数优化

由于成型件微结构在纵向波纹方向较长,测试时沿纵向分别选取第五个波纹进行高度尺寸偏差考察,正交实验的安排、数据的记录及计算结果均列于

表 2 中。从主因素响应表 3 中可以看出,4 个因素中,激光功率是影响微结构复制精度的首要决定性因素,扫描时间和模具温度是次要因素,而成型压力相对其他因素影响最低。

表 2 正交实验设计和实验结果

Table 2 Orthogonal experiment design and test results

Number	Laser power /W	Scanning time /s	Molding force /N	Mould temperature /℃	Molding deviation /μm
1	1.5	10	50	50	56.6
2	1.5	15	100	60	21.3
3	1.5	20	150	70	10.7
4	2.0	10	100	70	22.7
5	2.0	15	150	50	6.2
6	2.0	20	50	60	3.1
7	2.5	10	150	60	3.7
8	2.5	15	50	70	1.4
9	2.5	20	100	50	0.2

表 3 主因素响应表

Table 3 Response table of main factor

Level	Laser power /W	Scanning time /s	Molding force /N	Mould temperature /℃
1	1.955	1.898	1.792	1.815
2	1.902	1.771	1.712	1.796
3	1.791	1.657	1.765	1.721
Delta	0.473	0.254	0.051	0.173
Rank	1	2	4	3

选取因素的水平与要求的指标有关,要求的指标即尺寸偏差越小越好,应该取使指标值降低的水平,即各因素中使尺寸偏差最小的水平。所以,把各因素的较好水平组合起来就可以获得较好的工艺条件,即激光功率取水平 3、辐照时间取水平 3、成型压力取水平 2、模具温度取水平 3。在此基础上,实验时再加以适当调整,最佳的工艺参数组合是:激光功率 2.5 W,辐照时间 18 s,成型压力 100 N,模具温度 70 ℃,最终得到的 PMMA 基片微结构截面及尺寸如图 8 所示,图 8 和图 4(b)相比较,成型件和模板的微结构形状基本一致,第五个波纹的微结构尺寸偏差:宽度 1.1 μm、高度 0.3 μm。由此可见,工艺参数优化后,可以获得较好的微结构复制精度。

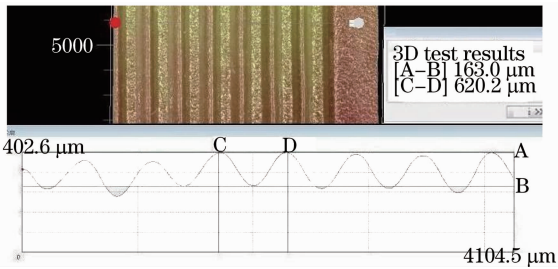


图 8 参数优化后的成型件微结构形貌

Fig. 8 Topography of the molded part microstructure after optimized parameters

5 结 论

提出激光融化成型加工方法,通过研制的成型装置进行激光融化成型实验,得到了 PMMA 基片上形状复杂的微结构特征,与激光刻蚀方法相比,进一步缩短了加工时间,并且,可以根据实验需要,对多尺度、形状复杂、高精度的微结构特征进行成型加工;与传统的热压和注塑成型方法相比,设备简单,操作方便,降低了能源消耗和加工成本。

数值模拟和成型实验表明,熔体温度是影响微结构成型精度的主要原因,如何提高微结构成型精度是激光融化成型的主要技术难点。采用正交实验方法进行实验,结果表明,成型质量受工艺因素影响是:在光斑大小和扫描速度确定条件下,激光功率对复制精度起决定性作用,其次是扫描时间和模具温度,最后是成型压力。优化工艺参数可以获得较好的微结构复制精度,微结构尺寸偏差可以小于 1 μm,验证了 PMMA 微结构件的激光融化成型具有可行性。

为了获得更好的微结构成型精度,需要对激光辐照方式、基体尺寸和冷却收缩变形等影响成型质量的相关因素作进一步分析,这些工作有待于在以

后的研究中继续完善。

参 考 文 献

- 1 M I Mohammed, M P Y Desmulliez. 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 H Becker, C Gärtner. Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems[J]. Anal Bioanal Chem, 2008, 390(1): 89-111.
- 3 Qi Heng, Wang Xiansong, Chen Tao, et al.. Fabrication and application of PMMA continuous-flow PCR microfluidic chip with CO₂ 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 CO₂ 激光直写加工与应用[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1239-1245.
- 4 Y W Chen, H Wang, M Hupert, et al.. Modular microfluidic system fabricated in thermoplastics for the strain-specific detection of bacterial pathogens[J]. Lab Chip, 2012, 12(18): 3348-3355.
- 5 H Becker, U Heim. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures[J]. Sens Actuators A Phys, 2000, 83(1-3): 130-135.
- 6 J Giboz, T Copponnex, P Mélé. Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review[J]. J Micromech Microeng, 2007, 17(6): 96-109.
- 7 A Costela, I Garciamoreno, F Florido, et al.. Laser ablation of polymeric materials at 157 nm[J]. J Appl Phys, 1995, 77(6): 2343-2350.
- 8 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.
- 9 J M Li, C Liu, L Y Zhu, et al.. The formation and elimination of polymer bulges in CO₂ laser microfabrication[J]. J Mater Process Technol, 2009, 209(10): 4814-4821.
- 10 H W Li, Y Q Fan, D Conchouso, et al.. CO₂ laser-induced bump formation and growth on polystyrene for multi-depth soft lithography molds[J]. J Micromech Microeng, 2012, 22(11): 115037.
- 11 Xu Shujie, Duan Yugang, Ding Yucheng, et al.. New method for rapid fabricating masters of PDMS-based microfluidic devices[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 105-110.
徐书洁,段玉岗,丁玉成,等. PDMS 微流控芯片复型模具的新型快速制作方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 105-110.
- 12 M T Koesdjojo, Y H Tennico, J T Rundel, et al.. Two-stage polymer embossing of co-planar microfluidic features for microfluidic devices[J]. Sens Actuators B, 2008, 131(2): 692-697.
- 13 Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, et al.. Experiment study of laser transmission welding of polymethyl methacrylate[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.
- 14 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.
- 15 W S Tan, J Z Zhou, S Huang, et al.. Experimental study on laser plasticizing polyamide12[J]. Advanced Materials Research, 2012, 472-475: 2514-2518.
- 16 Li Junchang. The Calculation of Laser Diffraction and Thermal Acting[M]. Beijing: Science Press, 2008. 344-345.
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 344-345.