

PMMA 激光融化三维瞬态温度场数值模拟

谭文胜^{1,2} 周建忠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 为了预测和控制激光融化成型过程的聚合物温度变化, 基于热传递和能量守恒原理, 建立 CO₂ 激光扫描辐照聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 有限元分析模型, 模拟低功率 CO₂ 激光扫描辐照的 PMMA 试样融化过程, 分析激光功率、扫描时间、扫描速度和光斑直径等激光参数对试样三维瞬态温度场影响, 研究激光参数和试样温度变化之间的内在关系。模拟结果表明, 试样最高温度呈波浪式增长, 最低温度呈近似线性增长, 随扫描时间增加温度差增大; 选择适当激光参数, 试样基体能够控制在软化或融化温度范围, 模拟结果与激光融化成型实验相符合, 为聚合物激光融化机制及其成型工艺研究提供了参考依据。

关键词 激光技术; CO₂ 激光; 扫描辐照; PMMA; 融化温度; 数值模拟

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s103001

Numerical Simulation of Three-Dimensional Transient Temperature Field for Laser Melting PMMA

Tan Wensheng^{1,2} Zhou Jianzhong¹

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 predict and control the polymer temperature field of laser melting molding process, the finite element analysis model of CO₂ laser scanning irradiation polymethylmethacrylate (PMMA) is built based on the principles of heat transfer and energy balance. Numerical simulation of the laser melting process of the sample is carried out at low power CO₂ laser scanning irradiation, the effects of laser parameters such as laser power, scanning time, scanning speed and spot diameter on samples three-dimensional transient temperature field are investigated, and the intrinsic relationship between laser parameters and sample temperature is analyzed. Simulation results show that the highest temperature of the sample wavyly increases and the minimum temperature linearly increases, the temperature difference increases with scanning time increasing, and the sample substrate can be controlled at softening temperature or melting range to select appropriate parameters of the laser. The simulation results are in good agreement with the experimental research of the laser melting and molding, which can provide a reference to study the mechanism of polymer laser melting and molding process embodiments.

Key words laser technique; CO₂ laser; scanning irradiation; PMMA; melting temperature; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 因其具有原材料便宜、透光性好、物理化学性能稳定等优点, PMMA 微型件如微流控芯片、导光板和微透镜等在微分析系统和微机电系统中具有重要的经济和学术研究价值^[1-2], PMMA 微型件及其激光加工技术已成为国内外研究热点。

目前, PMMA 微型件加工方法主要是热压成型、微注塑和激光刻蚀等, 热压成型具有成型精度高、工艺简单等优点^[3], 但是热压成型的聚合物融化和生产效率不高; 微注塑虽然融化和生产效率较高, 然而微注塑

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-02-12

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 (1011110008)、江苏省第四期“333 工程”资助项目、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: zhouljz@ujs.edu.cn

成型模具和成型设备结构复杂、成型质量控制困难^[4]。近年来,利用激光光热效应,在 PMMA 微型件激光刻蚀和切割加工方面,国内外研究工作者作了大量的理论和实验研究工作,例如,Romoli 等^[5-6]研究 CO₂ 激光烧蚀 PMMA,成功应用于 PMMA 微流控芯片的微通道烧蚀;傅建中等^[7-8]理论和数值模拟分析了 PMMA 微通道激光烧蚀过程,建立了 3 维瞬态烧蚀模型,并给出了动态烧蚀界面和温度场随时间和空间的变化关系;谢小柱等^[9]研究了 PMMA 材料的 CO₂ 激光气化切割前沿动态变化,分析了光斑位置、激光功率和切割速度对切割前沿和深度的影响,然而,激光烧蚀和切割是材料快速热分解气化过程,这与 PMMA 材料的激光融化有质的区别,目前为止,PMMA 激光融化过程及其温度场研究尚比较缺乏。

为了满足聚合物微型件的高效率和高质量成型加工,利用 CO₂ 激光对聚合物光热效应显著以及激光能量场可控性好的特点,在之前本课题组在激光融化理论研究基础上,提出了基于激光融化技术的聚合物微型件成型方法,并针对 PMMA 微型件的 CO₂ 激光融化成型进行了初步的理论和实验研究^[10-12],计算推导了基体材料温度和激光参数的关系表达式,分析了工艺参数对成型质量的影响,但是,对于基体融化过程的温度变化和控制尚缺乏系统分析。本文采用有限元软件 Comsol 对 PMMA 试样的激光融化过程进行数值模拟,探索基体试样在激光融化过程中的温度变化规律,为研究激光融化成型及其工艺参数选择提供参考依据。

2 理论模型

光热作用及材料融化过程可描述为:在低功率 CO₂ 激光扫描辐照时,绝大部分激光能量在瞬时转化为材料热能,随着辐照时间增加,材料表面温度迅速升高,除少量热辐射和热对流散失外,热量从辐照区域向材料内部传递扩散,材料形态相应由玻璃态-高弹态-粘流态转变。为了更好地计算和分析材料融化过程,采用如图 1 所示的激光融化模型,根据文献^[13]资料,可以作如下假设:1)激光垂直辐照材料表面,聚合物材料为各向同性;2)聚合物材料的密度、比热、热传导系数和激光吸收系数不受温度变化影响;3)吸收的激光能量全部转化为热量。

CO₂ 激光模式是基模,能量分布呈高斯型,光斑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。

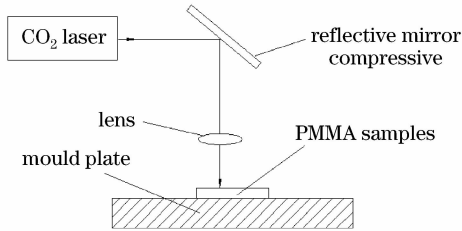


图 1 激光融化试样原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser melting samples

热量传递遵循傅里叶定律,当光束沿 x 轴向以速度 v 扫描辐照试样时,光斑区域的温度场和热传导表达式^[13]

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

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

式中, c 为比热, ρ 为密度, k 为热传导系数, a 为激光吸收系数,由(1)、(2)和(3)式及初始条件($t = 0, T = T_0$, T_0 为环境温度),可以求解得出 t 时刻的材料温度分布情况。

3 数值模拟

3.1 有限元模型

设定试样尺寸为 15 mm × 10 mm × 1 mm,试样在融化前只是底面与模具接触,而其他面不接触模具,采

用有限元软件 Comsol 建立的分析模型如图 2 所示,输入如表 1 所示的 PMMA 和模具钢物理系数,其中,PMMA 材料的玻璃态转变温度、流体温度和热分解温度分别为:105 °C、140 °C、270 °C。

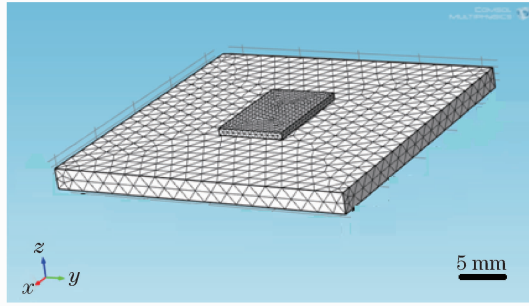


图 2 有限元分析模型

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 ³)	1190	7850
Glass transition temperature T _g / °C	105	
Flow temperature / °C	140	
Degradation temperature / °C	270	
Laser absorption coefficient	0.92	
Heat radiation coefficient	0.8	

3.2 加载和模拟

激光对试样进行扫描辐照时,可以将其视为面热源载荷,由于激光能量分布为高斯型,为了保证试样吸收足够的激光能量,设定光斑中心在试样中心线 x 轴向坐标(-7.5, 7.5)之间往复扫描。参考之前的激光融化成型实验,设定激光参数及初始条件:激光功率 3.5~2.0 W、扫描速度 10~30 mm/s、光斑直径 10~20 mm和室温 20 °C。

在功率为 3.5 W、光斑直径为 20 mm 和扫描速度为 10 mm/s 条件下,得到如图 3 所示的试样最低温度与最高温度变化曲线。由图 3(a)可以看出,扫描 0.5 s 时试样最高温度已快速升到玻璃化转变温度以上,而最低温度上升不明显,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。由图 3(b)可以看出,随着扫描时间增加,最高温度与最低温度均增加,但温度差加大;扫描 15 s 时试样最高温度已达到热分解温度,最低温度大约上升至玻璃态转变温度,最低温度呈近似线性上升,且上升幅度低于最高温度;激光每间隔 3 s 往复扫描一次,因而最高温度呈波浪式上升,这与激光扫描方式以及试样尺寸大小相符合。

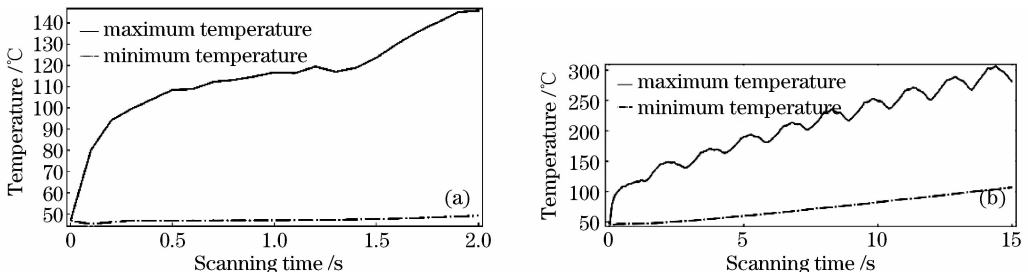


图 3 试样的最低温度和最高温度曲线。(a)扫描时间为 2 s;(b)扫描时间为 15 s

Fig.3 Minimum and maximum temperature curves of the sample. (a) Scanning time is 2 s; (b) scanning time is 15 s

在上述条件下,图 4 为试样 3 维温度场随时间变化情况,从图 4 中可知,扫描时间为 1.2、2.0、13.8 s 时,

试样最高温度和最低温度分别为:113.98 °C 和 50.383 °C、140.81 °C 和 51.795 °C、271.56 °C 和 105.98 °C, 13.8 s 时最高温度已由室温-玻璃态转变温度-流体温度-热分解温度快速上升,而最低温度增加相对较慢,最低温度仅达到玻璃态转变温度。扫描 13.8 s 时试样 2 维温度分布如图 5 所示,从图 5 中可知,在不同高度的上表面、中间面和底面 3 个平面上,最低温度均约为 106 °C,且分布在平面的 4 个边角处,而最高温度差别较大,分别为 269.87 °C、233.47 °C、219.01 °C,分析认为,由于光斑能量为高斯分布,热量传递遵循傅里叶定律,因而,光斑中心区域温度最高,边缘部位温度最低,试样温度分布符合高斯型特征。并且,可以认为,在此激光参数条件下试样能够控制在玻璃态转变温度和流体温度之间,即基片可以整体软化而不热分解气化,但不能够全部融化为流体。

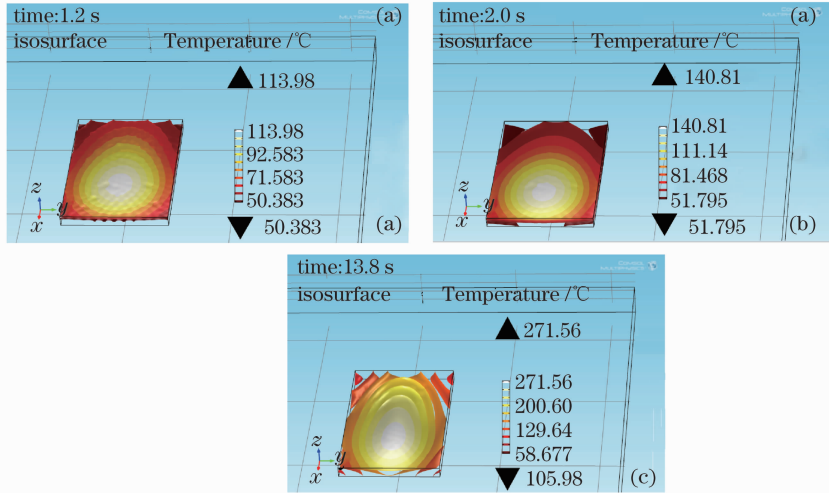


图 4 试样 3 维温度场. (a)扫描时间为 1.2 s; (b)扫描时间为 2.0 s; (c)扫描时间为 13.8 s

Fig. 4 Three-dimensional temperature fields of sample. (a) Scanning time is 1.2 s;

(b) scanning time is 2.0 s; (c) scanning time is 13.8 s

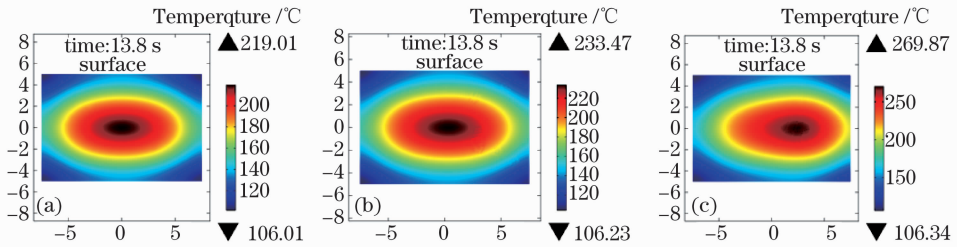


图 5 不同高度平面上的温度分布. (a)高度为 1 μm; (b)高度为 500 μm; (c)高度为 999 μm

Fig. 5 Temperature distributions on different heights plane. (a) Height is 1 μm;

(b) height is 500 μm; (c) height is 999 μm

3.3 激光参数对温度场影响

3.3.1 扫描速度

图 6 为在激光功率 3.5 W 和光斑直径 20 mm 条件下,扫描速度分别为 20 mm/s 和 30 mm/s 的试样温度变化曲线,比较图 3(b)、图 6(a)和图 6(b),可以看出,3 种扫描速度的试样最高温度和最低温度上升幅度比较接近,区别在于最高温度的波形周期随扫描速度增加而缩短,这与光束在试样表面往复扫描相符合。图 7 为试样 3 维温度场,其中,图 7 (a)~(c)和(d)~(f)分别为扫描速度 20 mm/s 和 30 mm/s 的 3 维温度分布及其变化过程,与图 4 相比较,可以发现,在扫描时间为 1.2、2.0、13.8 s 时,试样最高温度和最低温度均相差不大,由此可见,扫描速度对试样的 3 维温度场影响不大,只是对试样的最高温度变化周期有影响。

3.3.2 激光功率

在光斑直径 20 mm、扫描速度 10 mm/s 条件下,图 8 为不同激光功率的 3 维温度场。在图 8 中(a)和 (b)、(c)、(d)分别为功率 2.5 W 和 2.2 W 的试样温度分布和变化情况,从图中可见,扫描 17.8 s 时试样整体温度均在玻璃态转变温度以上,而扫描 21.5 s 和 26 s 时试样最高温度分别都已超过热分解温度。可见,功

率为 2.5 W 和 2.2 W 时,在不发生热分解前提下试样可以整体软化,但不能完全融化为流体。

图 8(e)和(f)为功率 2 W 的试样温度分布,30.1 s 时最高温度为 259.81 °C,最低温度为 147.73 °C,表明试样已完全融化为流体,31.6 s 时最高温度才达到热分解温度。可见,在激光 2 W、光斑直径 20 mm、扫描速度 10 mm/s 和扫描时间 30~31.6 s 条件下试样可以控制在流体状态。

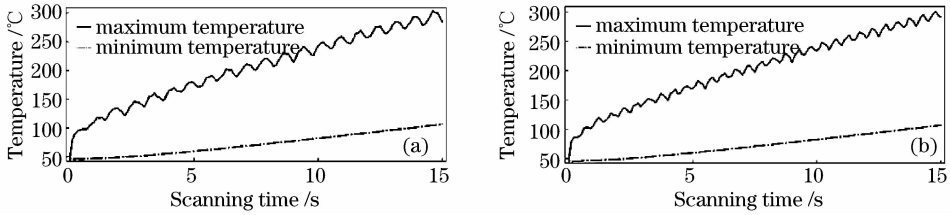


图 6 不同扫描速度的最低温度与最高温度曲线。(a)扫描速度为 20 mm/s;(b)扫描速度为 30 mm/s

Fig. 6 Minimum temperature and maximum temperature curves with different scanning speeds.

(a) Scanning speed is 20 mm/s; (b) scanning speed is 30 mm/s

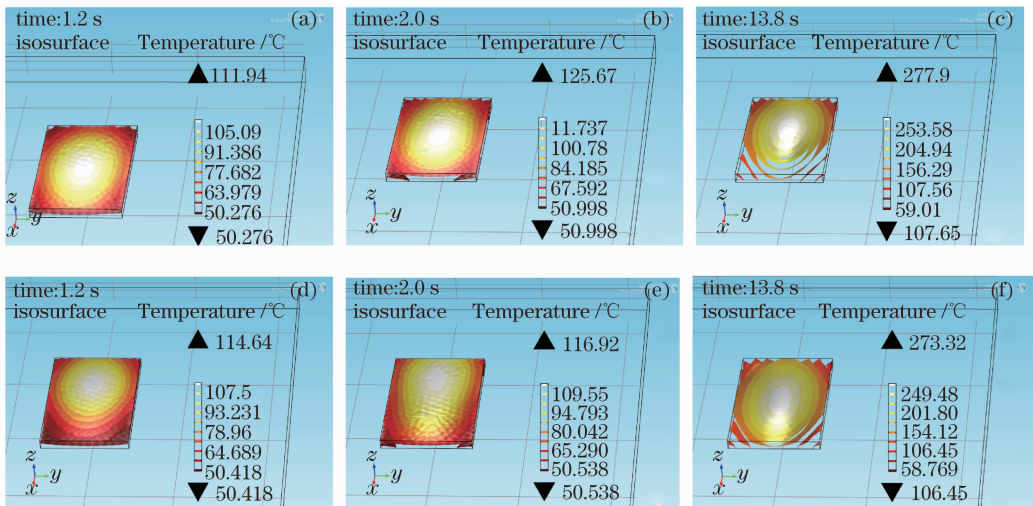


图 7 不同扫描速度的 3 维温度场。(a)~(c)扫描速度为 20 mm/s;(d)~(f)扫描速度为 30 mm/s

Fig. 7 Three-dimensional temperature field with different scanning speeds.

(a)、(b)、(c) Scanning speed is 20 mm/s;(d)、(e)、(f) scanning speed is 30 mm/s

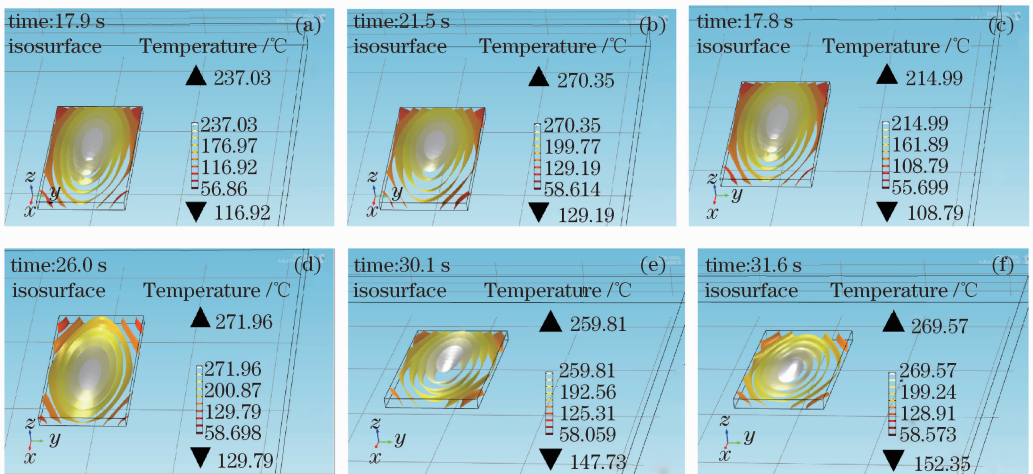


图 8 不同激光功率的 3 维温度场。(a)和(b)功率为 2.5 W;(c)和(d)功率为 2.2 W;(e)和(f)功率为 2.0 W

Fig. 8 Three-dimensional temperature field with different laser powers. (a), (b) power is 2.5 W;

(c), (d) power is 2.2 W; (e), (f) power is 2.0 W

3.3.3 光斑直径

在激光功率为 2 W 和扫描速度 10 mm/s 条件下,光斑直径为 10 mm 的温度曲线和 3 维温度场如图 9 (a)和图 10(a)、(b)所示,可见,扫描 0.5 s 和 7.8 s 时试样最高温度分别已达流体温度和热分解温度,而最低温度升高不明显。图 9(b)和图 10(c)、(d)为光斑直径 15 mm 的温度曲线和温度分布,由图可见,扫描 1.0 s 和 18.5 s 时试样最高温度分别已达玻璃态温度和热分解温度,而最低温度升高较慢,18.5 s 时最低温度达到玻璃态转变温度。图 8(e)、(f)中光斑直径为 20 mm 的试样温度变化,3 种不同光斑直径相比较,可以认为,光斑直径对试样的温度分布影响较大,在功率不变的情况下,光斑直径增大,试样表面获得激光能量分布相对均匀,试样整体容易控制在软化温度或流体温度。

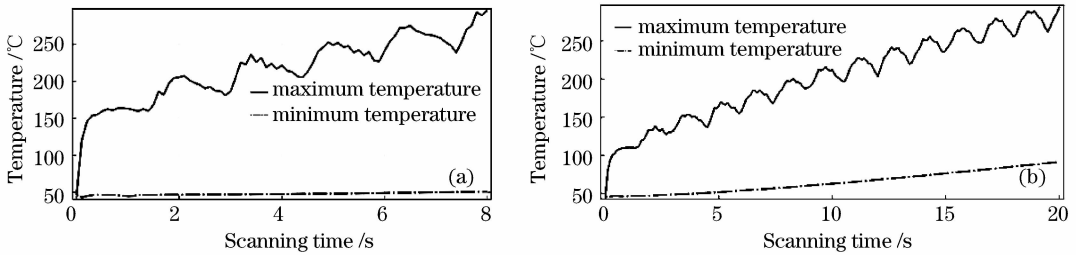


图 9 不同光斑直径的最低温度与最高温度曲线。(a) 光斑直径为 10 mm;(b) 光斑直径为 15 mm

Fig.9 Minimum temperature and maximum temperature curves with different spot diameters.

(a) Spot diameter is 10 mm;(b) spot diameter is 15 mm

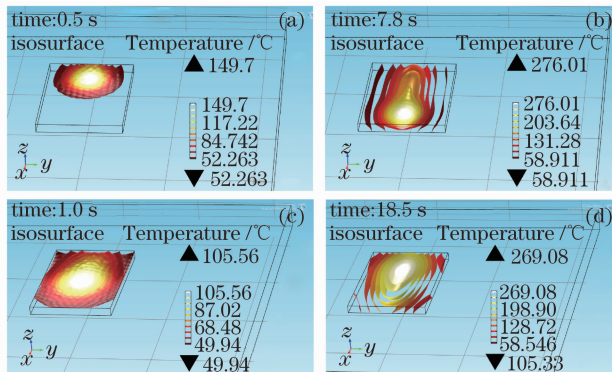


图 10 不同光斑直径的 3 维温度场。(a)、(b)光斑直径为 10 mm;(c)、(d)光斑直径为 15 mm

Fig.10 Three-dimensional temperature fields with different spot diameters.

(a), (b) Spot diameter is 10 mm;(c),(d) spot diameter is 15 mm

4 融化成型实验结果分析

在上述模拟分析基础上,采用激光参数为:功率 2.5 W、光斑直径 20 mm 和扫描速度 10 mm/s 进行 PMMA 微结构件的融化成型实验,实验材料和实验装置以及其他工艺条件与文献[11]相同,采用日本基恩士数码显微系统(VHX-1000)测试成型件微结构尺寸。

图 11 为激光融化成型后的成型件横截面图,扫描时间为 15 s 的成型件微结构截面尺寸如图 11(a)所示,在横截面中间位置(测试线上)微结构尺寸:宽 579.5 μm 、高 74.2 μm ,图 11(b)为扫描时间为 20 s 的横截面微结构尺寸:宽 616.9 μm 、高 149.8 μm 。由图 8 中(a)和(b)模拟的试样 3 维温度分布可知,在上述激光参数和工艺条件下,扫描时间为 15 s 的基体试样温度较低,试样流动变形量较小,成型相对比较困难;而扫描时间为 20 s 时试样温度较高,试样较易流动,成型质量高,实验结果与文献[11]比较一致。

数值模拟结果与激光融化成型实验相比较,两者基本吻合,从而验证了分析模型的可靠性和合理性。

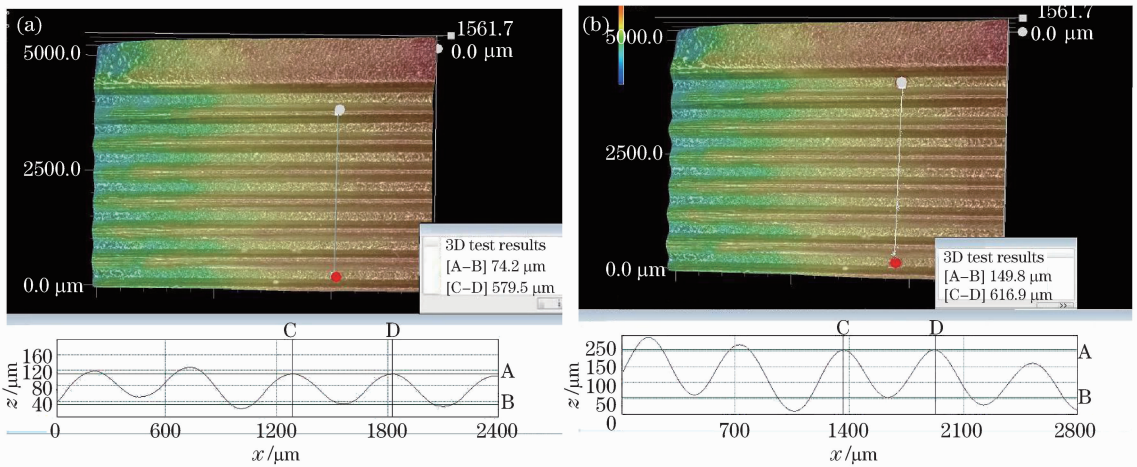


图 11 成型件微结构横截面尺寸. (a)扫描时间为 15 s;(b)扫描时间为 20 s

Fig. 11 Microstructure cross-section dimensions of the molded parts.

(a) Scanning time is 15 s;(b) scanning time is 20 s

5 结 论

利用有限元软件 Comsol 建立 CO₂ 激光扫描融化 PMMA 基片的分析模型,分析在低功率激光扫描辐照过程中激光参数对基片 2 维和 3 维温度场以及最高温度与最低温度的影响,得到了以下主要结论:

1) 试样最高温度呈波浪式上升,最低温度呈近似线性上升而上升幅度低于最高温度,随扫描时间增加温度差加大;光斑中心区域温度高,边缘部位温度低,温度分布符合高斯型特征。

2) 选择适当激光功率和光斑直径,试样整体能够控制在软化或流体状态。光斑直径为 20 mm,激光功率小于 3.5 W,试样能够完全达到软化状态而不产生热分解;激光功率 2 W,试样可以完全达到流体状态而不产生热分解。

3) 扫描速度对于最高温度的变化周期有影响,而对试样整体融化过程的温度影响较小。

4) 功率不变,光斑直径增大,功率密度分布趋于均匀,试样容易实现整体软化或融化。

模拟分析结果与 PMMA 微结构件激光融化成型实验相比较,两者基本吻合,可见,在一定激光参数范围内,基片试样能够整体软化或融化为流体。

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 B Holger, C Gärtner. Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems[J]. Anal Bioanal Chem, 2008, 390(1): 89-111.
- 3 D R Harry, P K William. Polymer deformation and filling modes during micro embossing[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(12): 1625-1632.
- 4 W Michaeli, A Spennemann, R Gartner. New plastification concepts for micro injection molding[J]. Microsystem Technologies, 2002, 8(1): 55-57.
- 5 Romoli L, Tantussi G, Dini G. Experimental approach to the laser machining of PMMA substrates for the fabrication of microfluidic devices [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(3): 419-427.
- 6 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.
- 7 Fu Jianzhong, Xiang Hengfu, Chen Zichen. Modeling of laser machining polymer microfluidic chip [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 17(9): 1505-1508.
傅建中, 相恒富, 陈子辰. 聚合物微流控芯片激光加工建模研究[J]. 中国机械工程, 2004, 17(9): 1505-1508.
- 8 Xiang Hengfu, Fu Jianzhong, Chen Zichen. Dynamic interface for three-dimensional transient laser ablation polymer microchannels [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(11): 1908-1912.
相恒富, 傅建中, 陈子辰. 三维瞬态激光烧蚀聚合物微流道动态界面研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(11): 1908-1912.
- 9 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. 有机玻璃激光气切割前沿[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 925-930.

- 10 Tan Wensheng, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Research on the forming method for polymer microstructure features by laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(18):65–72.
谭文胜, 周建忠, 黄 舒, 等. 聚合物微结构特征激光融化成型方法研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(18):65–72.
- 11 Tan Wensheng, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Experiment of laser melting-forming for PMMA microstructure parts[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7):0703009.
谭文胜, 周建忠, 黄 舒, 等. PMMA 微结构件激光融化成型实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(7):0703009.
- 12 Tan Wensheng, Zhou Jianzhong, Zhu Weili, *et al.*. Simulation and experiment of laser melting-forming for polymer micro component (PMC)[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1):0103004.
谭文胜, 周建忠, 朱炜立, 等. 微型塑料件激光融化成型数值模拟和实验[J]. *中国激光*, 2015, 42(1):0103004.
- 13 Li Junchang. *The Calculation of Laser Diffraction and Thermal Acting*[M]. Beijing: Science Publisher, 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.

栏目编辑: 王晓琰