

文章编号: 1001-3806(2010)04-0447-05

层间扫描策略对 SLM 直接成型金属零件质量的影响

王迪, 杨永强*, 黄延录, 吴伟辉, 孙婷婷, 何兴容
(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 为了通过选区激光熔化技术直接快速成型高致密度及高表面质量零件, 采用正交试验对 316L 不锈钢粉末进行了光纤激光选区熔化成型研究, 分析了正交实验中存在的扫描线间搭接缺陷及零件外边凸起缺陷, 随后“层间错开”扫描策略因为更好的扫描线间润湿效果及成型效率而被应用于实验中, 进行扫描线间搭接情况及层间熔接情况显微镜观察。层间层内扫描线具有良好的冶金结合, 孔隙率大大减少, 获得了高致密化的成型效果; 使用优化的工艺参量与扫描策略成型具有空间曲面的个性化手术模板, 硬度与致密度分别达 $HV_{0.3}$ 250 和 95.8%。结果表明, 层间扫描策略对选区激光熔化技术直接成型金属零件成型效果良好。

关键词: 激光技术; 激光加工; 选区激光熔化; 致密度; 层间扫描

中图分类号: TN249; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.005

Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process

WANG Di, YANG Yong-qiang, HUANG Yan-lu, WU Wei-hui, SUN Ting-ting, HE Xing-rong

(School of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to manufacture high density parts with high quality surface by means of selective laser melting technique, orthogonal test method was applied to investigate fiber laser selective laser melting of 316L stainless steel powder. Defects among scan lines and protuberance of outside frame of samples were found in the experiments, which were great impediments for part quality improvement. Then, “inter-layer stagger” scan strategy was applied for its better wetting ability and fabrication efficiency. Bonding quality among scan lines and layers was analyzed by means of micro-observing and fewer holes were found and better metallurgical bonding and higher density were achieved. Finally, optimized process parameters and “inter-layer stagger” scan strategy were applied to manufacture customized orthopedics model, its micro-hardness and relative density were $HV_{0.3}$ 250 and 95.8% respectively. Results show that inter-layer scan strategy has fine effect on the quality of direct fabrication metal parts in selective laser melting process.

Key words: laser technique; laser processing; selective laser melting; relative density; inter-layer scan

引言

随着叠层制造技术的进步, 快速成型的研究热点转到快速直接制造上, 包括功能零件、注塑模具的直接制造^[1]。目前, 直接成型金属零件的快速成型方法主要包括激光立体成型^[2]、选择性激光烧结^[3]与选区激光熔化技术(selective laser melting, SLM)^[4]。激光立体成型技术使用的是大功率激光器, 由于激光光斑较大, 虽然

可以得到冶金结合金属零件, 但其尺寸精度和表面光洁度不好。选择性激光烧结(selected laser sintering SLS)工艺的成型材料为低熔点金属粉末或树脂包裹金属粉末, 尽管 SLS 方法可以把低熔点的金属粉末制成 3 维实体, 但其强度和硬度不能满足模具或金属构件的使用要求。SLM 技术理论上可得到密度接近 100% 与高精度(小于 0.1mm)金属零件。SLM 技术因其能够成型任意复杂几何形状的零件, 使得其在成型具有复杂曲面、小批量生产零件方面具有很大的优势, 如个性化医学植入体^[5]、定制化义齿^[6]、模具的内嵌件^[7]的直接制造。

光纤激光器具有转换效率高、性能可靠、寿命长、光束模式接近基模等优点, 由于激光光束质量很好, 激光束能被聚集成极细微的光束, 并且其输出波长短, 极易被金属材料吸收。因而光纤激光器在精密金属零件的选区激光熔化快速成型中有着极为明显的优势。

基金项目: 2007 粤港关键领域突破中标项目(广州市专项)资助项目(007Z1-D6091); 广东省教育部产学研结合项目资助项目(2007A090302004)

作者简介: 王迪(1984-), 男, 博士研究生, 从事激光加工与激光快速成型的研究。

* 通讯联系人。E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-07-28

实验中使用 200W 光纤激光 SLM 设备,在正交试验初步优化工艺参量,分析实验过程中扫描线之间的搭接缺陷及外边凸起缺陷的形成原因,应用层间错开扫描策略成型高致密度金属零件,最后以成型具有复杂曲面的个性化手术模板为实例验证实验结果。

1 试验设备、材料与方法

1.1 实验基本原理及设备

SLM 原理是利用 3 维造型软件设计出零件模型,保存为 STL 格式,通过专用软件对其切片分层,得到各截面的轮廓数据,由轮廓数据生成填充扫描路径,设备将按照这些填充扫描线,控制激光束选区熔化金属粉末,逐层堆叠成金属零件。实验设备使用华南理工大学与广州瑞通激光科技有限公司联合开发的 Dimet-

al-280 SLM 快速成型设备,设备主要参量指标如下:激光器是波长为 1075nm 的 SPI 200W 连续式光纤激光器,最大成型尺寸($L \times W \times H$)是 280mm \times 280mm \times 300mm,激光扫描方式是振镜扫描后 $f-\theta$ 透镜聚焦,光束质量因子 $M^2 \leq 1.1$,激光聚焦光斑直径为 70 μm ,铺粉厚度为 10 μm ~ 100 μm ,保护气氛为氩气或氮气。

1.2 实验选用材料

选用 500 目 316L 不锈钢粉末,其为含钼不锈钢种,由于钢中含钼,总体性能优良。该钢最大含碳的质量分数为 0.0003,可用于需要耐腐蚀性的用途中,具有良好的耐氯化物侵蚀的性能,316 不锈钢具有耐海洋和侵蚀性工业大气的侵蚀的特性及良好的耐高温性能。表 1 为 316L 不锈钢粉末化学成分、粒度分布及松装密度。

Table 1 Chemical composition and property of 316L stainless steel powder

chemical composition(mass fraction)										grain size distribution(mass fraction)				apparent density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
C	Cr	Ni	Mo	Si	Fe	Mn	P	S	O	0 μm ~ 5.18 μm	5.18 μm ~ 15.15 μm	15.15 μm ~ 30.8 μm	mean diameter	4.04
0.0003	0.1753	0.1206	0.0216	0.0086	balance	0.0038	0.0002	0.0001	0.0013	0.10	0.40	0.40	0.1711	

1.3 试验过程

影响选区激光熔化成型效果的因素^[8]很多,主要有激光参量(激光能量、光束质量、光斑直径)、机械运动参量(铺粉辊的平动与转动速度、铺粉层厚等)、扫描参量(扫描速率、扫描间距、扫描策略等)、粉末特性(粉末成分、粉末粒度分布、形状等)等。粉末物理特性相关参量为常量;光纤激光器激光模式为高斯模,光束质量为常量;另外,铺粉辊的平动与转动速度调节范围比较大,调节此参量的目的是为了得到紧实、较薄、平整的铺粉层,实验中选用调试好的铺粉辊运动参量。

激光在聚焦平面扫描熔化金属粉末,为了制定有效的正交试验,首先进行单道扫描线的成型试验,在扫描速率 200mm/s、激光功率 $P = 150\text{W}$ 、铺粉厚度 50 μm 情况下,获得了连续、光滑的单道扫描线,在金相显微镜下测量扫描线线宽范围为 120 μm ~ 150 μm 。为了消除激光在基板不同位置扫描照射带来的功率密度不等问题,每个实验独立实施,零件成型在基板的中心位置。实验中基板选用 10cm \times 10cm \times 1cm 的 A3 钢板,试样致密度用排水法测量,表 2 为正交实验水平表。

Table 2 Levels of orthogonal experiment

	scan speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	scan space/mm	laser power /W	layer thickness /mm
level 1	80	0.04	80	0.03
level 2	160	0.06	110	0.04
level 3	320	0.08	140	0.05
level 4	480	0.10	170	0.06
level 5	640	0.12	200	0.07

2 试验结果及讨论

2.1 正交实验结果及缺陷分析

正交实验结果分析得到较优化的成型参量范围为:扫描速率 80mm/s ~ 160mm/s,扫描间距 0.06mm ~ 0.08mm,激光功率 140W,层厚 0.03mm,测量样品致密度值在 65% ~ 88%。经分析,扫描速率对致密度的影响最为显著,随着扫描速率的下降致密度提高大,原因是扫描速率较小,激光停留在粉末表面的时间相对延长,使得熔化的粉末有充足的时间与周围的粉体发生热交换,填充固相间的孔隙,提高样品相对密度。激光束在粉末上停留的时间太久,周围粉末容易被吸附到熔池内,当激光束移动到下一个位置时粉末量不足,形成凹坑^[9]。

试验成型样品的致密度值最高达到 88%,不能满足 SLM 工艺致密度近乎 100% 的要求,原因与每一层成型表面的粗糙、凹凸不平有很大关系。图 1 拍摄的是试验中典型的扫描线间结合情况。图 1a 中 P/v 值(激光功率与扫描速率比值)为 1,单道扫描线成型具有很好的方向性,扫描线连续光滑,但扫描线间被下一层铺粉填入粉末,说明扫描线之间存在“凹谷”,“凹谷”形成原因是液态熔池扫描线很容易吸入周围的粉末,导致下一道扫描线没有足够的粉末形成熔池。图 1b 中 P/v 值为 2.5,扫描线之间呈现完全熔化或者过熔状态,表面存在较大的孔隙,使

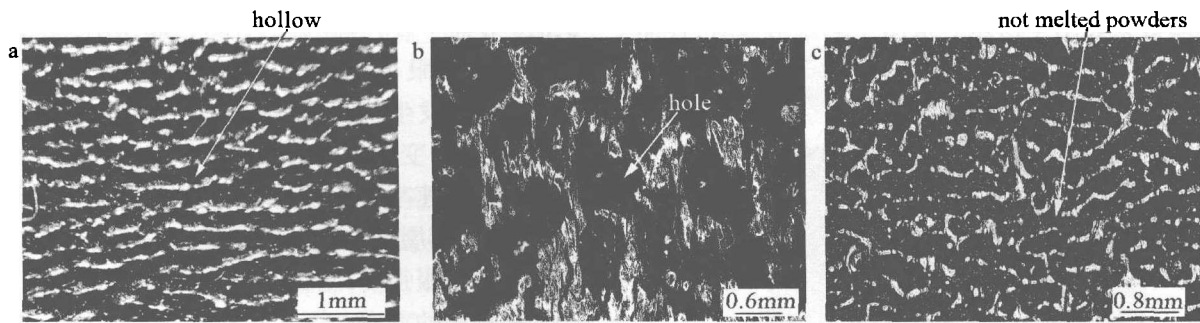


Fig. 1 Typical profiles among scan lines in orthogonal experiments

得表面凹凸不平, 孔隙存在原因是粉末完全熔化后吸入周边粉末, 激光功率高, 将前一道扫描线部分重熔以填充后一道扫描线, 粉末熔化后体积收缩也是重要原因。图 1c 中 P/v 值约为 0.2, 观察到扫描线之间存在未熔化的粉末, 扫描线之间呈现分离状态, 原因解释为激光能量呈现高斯分布, 激光照射到粉末上后, 只有在离光斑中心一定距离拥有足够能量的范围内将粉末瞬间熔化, 因扫描速率太快, 激光很快的移动到下一各位置, 熔化金属没有足够时间铺展及润湿前一道扫描线。

图 2 为试验中观察到样品外轮廓线堆积明显高于

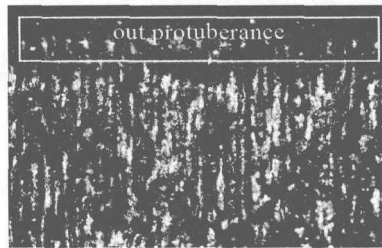


Fig. 2 Protuberant default of outside frame

内部扫描线, 被称作“外边凸起”缺陷, 它的存在不仅导致成型过程中零件与铺粉滚的碰撞, 也导致最终零件尺寸误差的变大。分析其形成原因, 主要与激光的开关光延迟有很大关系, 激光开始扫描的时候, 由于扫描延迟, 速率从零提高到成型速率, 扫描线端部因扫描速率太小, 激光停留长, 熔池不能很快凝固, 使得其有

球化的倾向; 同时, 扫描线的开始点与终点比其它地方更多接触到金属粉末, 由于熔池对金属粉末的吸入作用, 进一步使得开始点与终点处熔池宽度、熔池高度变大。外边凸起会在多层熔化成型过程中累加, 当高于铺粉厚度, 造成铺粉辊与零件碰撞, 影响铺粉精度及造成成型过程中断。激光的开关光延时参量需要通过实验确定, 本实验中开关光延时设定 400ms 时获得良好效果。

2.2 层间错开扫描策略研究

为减小上述扫描线间的搭接缺陷、外边凸起缺陷, 使用“层间错开”扫描策略, 其主要思想是第 $N + 1$ 层扫描线在第 N 层扫描线之间的“凹谷”处扫描, 如图 3 所示。图 3a 为正交实验中所使用扫描策略, 第 $N + 1$ 层扫描线在 N 层扫描线的顶部熔合, 熔化金属液主要润湿在 N 层的顶部, 造成两侧铺粉厚度增加, 熔化金属不能充分润湿两侧, 容易产生孔隙与结合不牢等缺陷。图 3b 和图 3c 分别为层间错开扫描策略的搭接示意图, 当 N 层扫描完后重新铺粉, $N + 1$ 层扫描线偏移第 N 层扫描线间距一半距离, 使扫描线恰好落在 N 层扫描线“凹谷”处。从图 3b 看出, $N + 1$ 层扫描线与 N 层有 2 处 ~ 3 处润湿点, 使得金属液容易铺展, 当扫描速率较低的情况下, 金属液具有足够的时间在重力作用下填充入“凹谷”, 封闭孔隙, 提高零件致密性。

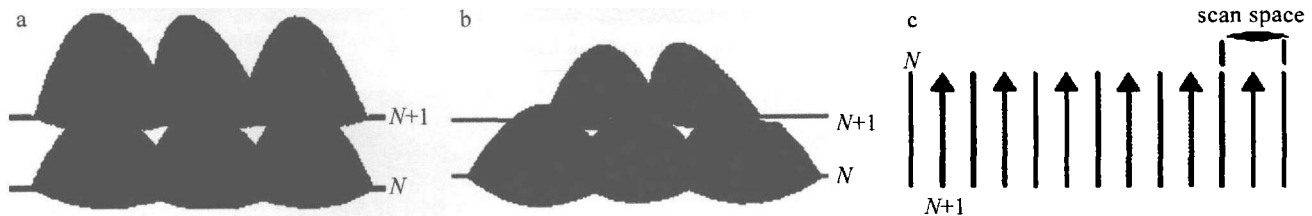


Fig. 3 Schematic diagram of normal and “inter-layer stagger” scan strategy

使用“层间错开”扫描策略进行试验, 成型参数为: 铺粉厚度 $30\mu\text{m}$, 激光功率 140W, 离焦量为 0, 扫描速率与扫描线间距列于表 3 中, 试样添加支撑, 以防止被铺粉辊推走, 并方便样品从基板取下分析。

Table 3 Experimental design using “inter-layer stagger” scan strategy

number	scan speed/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	scan space/mm
a	160	0.08
b	160	0.12
c	160	0.16
d	80	0.20
e	80	0.24

实验效果如图4所示。从图4宏观形貌看,样品

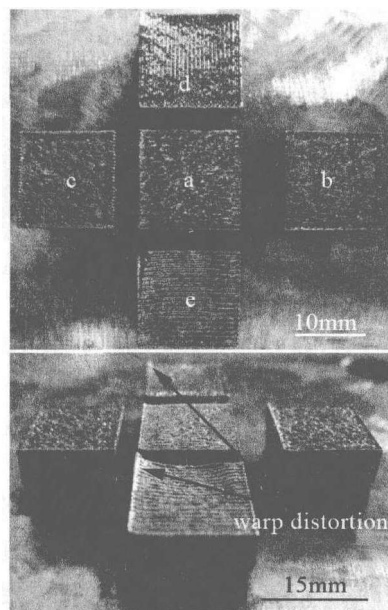


Fig. 4 Samples fabricated by "inter-layer stagger" scan strategy

a,b,c 表面平整,有轻微的外边凸起缺陷,无翘曲,扫描线间隙肉眼不能辨别;d,e 样品扫描速率下降到80mm/s,都发生严重的翘曲变形,两样品底部脱离了下面的支撑,变形的方向都是沿着激光扫描方向,说明翘曲变形对速率很敏感,原因为速率的下降使热输入量增加,层间层内的温度梯度变大,内应力增加,当超过材料的屈服强度,翘曲变形发生,且变形方向是沿着激光扫描线的方向。图5为图4中样品a,b,c,d,e在显微镜下拍摄的扫描线之间搭接效果。

从图5中看出,a 样品扫描线之间结合紧密,有明显的扫描线填充效果。b,c 样品扫描线较好地结合,有少许的孔隙和少量未完全熔化的金属粉末夹杂在扫描线之间。d,e 样品扫描线之间已经结合不牢或者分离。利用排水法测量 a,b,c 3 个样品致密度,分别达96.1%,94.4%,92.8%,而 d,e 样品因严重的翘曲变形,没有测量。

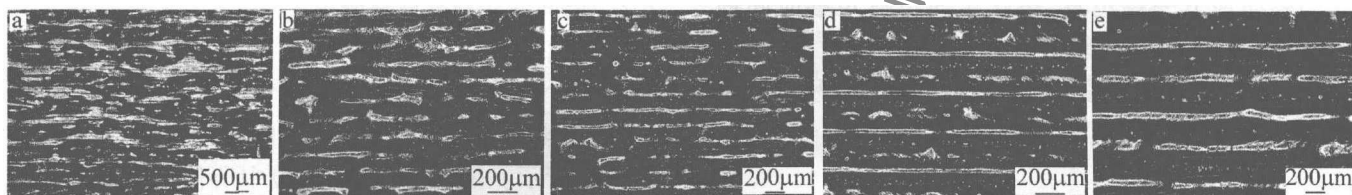


Fig. 5 Surface profiles when using "inter-layer stagger" scan strategy

图6为图4中a样品横截面与纵截面在显微镜下观察的扫描线之间搭接效果、层与层之间熔接情况。从图6a中看出,扫描线搭接牢固,很少的孔洞(图中箭头表示),原因是熔化金属液收缩与粉末中的杂质造

成,从图6b中看出,层间结合紧密,无缺陷,图6c为层间搭接情况进一步放大图,能够清晰地看到层与层之间的熔合线,为明显的冶金结合。

“层间错开”扫描策略实验能够获得96%的致密

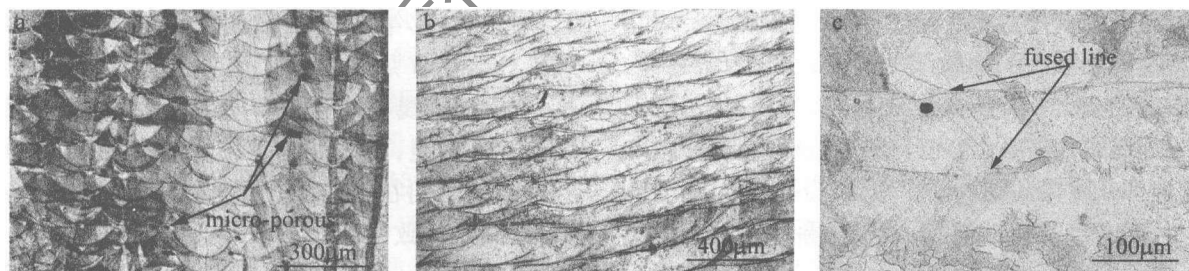


Fig. 6 Micro-observation sample a of scan lines and inter-layers

度,高于正交试验中致密度最高值88.1%,扫描线间搭接紧密,层间冶金结合。也发现低速扫描时零件发生翘曲变形,所以,成型过程中扫描速率要适当,不能超出一定范围而引起零件变形。

2.3 个性化手术模板成型

最后成型具有空间自由曲面手术模板验证实验结果:激光功率140W,扫描速率160mm/s,层厚0.03mm,扫描间距0.08mm,使用层间错开扫描策略。为了保证首层与基板的牢固结合,激光功率设为180W,模板成型效果见图7,无表面缺陷与外边凸起

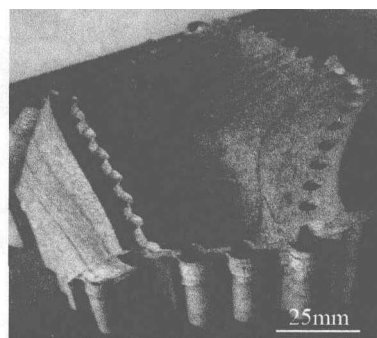


Fig. 7 Customized orthopedics model fabrication

缺陷,无翘曲变形发生,零件取下后测量显微硬度与致

密度值,分别达到 $HV_{0.3}$ 250 与 95.8%。

3 结论

(1)在正交试验基础上初步优化了工艺参量,详细分析了正交试验中存在的孔隙、凹谷及烧结态等扫描线间搭接缺陷,以及外边突起缺陷,这些缺陷的存在阻碍了样品致密度的进一步提高。

(2)使用“层间错开”扫描策略,即下一层扫描线在前一层的两道扫描线之间扫描,拥有更多的基体体积润湿,使得熔化金属液铺展开顺利,观察扫描线间及层间搭接情况,基本克服了正交试验中存在的缺陷,层内及层间扫描线具有明显的冶金结合。

(3)使用扫描速率 160mm/s,激光功率 140W,扫描间距 0.08mm,加工层厚 0.03mm,及“层间错开”扫描策略成型个性化手术导板,致密度达 95.8%,硬度为 $HV_{0.3}$ 250,成型效果良好。

参考文献

- [1] SANTOS E C, SHIOMI M, OSAKADA K, *et al.* Rapid manufacturing of metal components by laser forming[J]. *Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12/13): 1459-1468.
- [2] LIU J Ch, LI L J, YAN C. Discussion on direct manufacturing metallic pattern for sand mold based on laser cladding technology[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 572-576 (in Chinese).
- [3] YADROITSEV I, BERTRAND P, LAGET B, *et al.* Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the international thermonuclear experimental reactor components[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 362(2/3): 189-196.
- [4] WU W H, YANG Y Q, HUANG Y L. Direct manufacturing of Cu-based alloy parts by selective laser melting[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 37-40.
- [5] YADROITSEV I, SHISHKOVSKY I, BERTRAND P, *et al.* Manufacturing of fine-structured 3-D porous filter elements by selective laser melting[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5523-5527.
- [6] The Manufacturingtalk Editorial Team. EOS whitepaper assesses DMLS benefits[EB/OL]. [2009-01-01]. <http://www.manufacturingtalk.com/news/eos/eos175.html>.
- [7] MTT Technologies Group. A world-class generative process developed for direct product realisation: selective laser melting™ (SLM) [EB/OL]. [2009-01-01]. <http://www.mtt-group.com/selective-laser-melting.html>.
- [8] KRUTHA J P, FROYENB K, van VAERENBERGHA J, *et al.* Selective laser melting of iron-based powder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/3): 616-622.
- [9] YADROITSEV I, BERTRAND Ph, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8064-8065.
- [12] HANADA Y, SUGIOKA K, GOMI Y, *et al.* Development of practical system for laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) of micromachining of glass materials[J]. *Appl Phys*, 2004, A79(4): 1001-1003.
- [13] HANADA Y, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA): fundamental and industrial applications[J]. *Proc SPIE*, 2006, 6261: 626111.
- [14] QIN SH J, LI W J. Micromachining of complex channel systems in 3-D quartz substrates using Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Appl Phys*, 2002, A74(6): 773-777.
- [15] FAN Y F. Study on the laser induced plasma in the laser micro machining[D]. Guiyang: Guizhou University, 2006: 34-39 (in Chinese).
- [16] PENG Ch P. Study on laser machining micro channels on quartz[D]. Guiyang: Guizhou University, 2007: 24-25 (in Chinese).
- [17] FAN Y F, QIN Sh J. Optical analysis of the plasma induced by the laser micromachining[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006(6): 64-67 (in Chinese).
- [18] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* Principles of Laser[M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 74-82 (in Chinese).
- [19] HUANG J, REN H, LÜ H B, *et al.* Comparison of damage action of fused silica at different laser wavelength[J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2007, 5(6): 5-8 (in Chinese).
- [20] CHEN D L, FENG C L, QIN Sh J. Study on measuring surface-charges of cells in a quartz microchannel[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 561-564 (in Chinese).

(上接第 435 页)