

飞秒激光加工对熔覆层侧壁粗糙度的影响

李睿^{1,2}, 杨小君¹, 赵卫¹, 贺斌¹, 李明¹, 赵华龙¹, 朱文字¹, 王宁¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对熔覆成型件表面粗糙的难题, 提出了在成形过程中对熔覆层侧壁进行飞秒激光精密加工的方法, 重点研究了精密加工过程中飞秒激光的能量密度、能量分布、光斑重叠率对熔覆层侧壁粗糙度的影响规律, 结果表明: 当焦平面处飞秒激光的能量为高斯分布, 加工得到的熔覆层侧壁表面粗糙度 $R_a < 3 \mu\text{m}$ 时, 激光能量密度介于 $0.12 \sim 0.34 \text{ J/cm}^2$ 之间; 当能量为平顶分布并且加工后熔覆层侧壁表面粗糙度 $R_a < 3 \mu\text{m}$ 时, 最佳能量密度范围为 $0.13 \sim 0.66 \text{ J/cm}^2$; 同等参数条件下, 平顶能量分布激光加工得到覆层侧壁粗糙度小于能量高斯分布时的粗糙度数值。熔覆层侧壁粗糙度随光斑重叠率的增加先减小后增大, 实验获得的最佳重叠率范围为 $78\% \sim 85\%$ 。

关键词: 飞秒激光微加工; 激光熔覆成型; 熔覆层; 粗糙度

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3244-06

Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls

Li Rui^{1,2}, Yang Xiaojun¹, Zhao Wei¹, He Bin¹, Li Ming¹, Zhao Hualong¹, Zhu Wenyu¹, Wang Ning¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to enhance the surface finish of Laser Direct Deposition of metallic components, a method that applies femtosecond laser to fabricate the cladding layer was proposed in this paper. The effects of the energy density, distribution, and the overlapping ratio of the laser on the sidewall quality of the cladding layer were studied in experiment. The experiment results show that the roughness of the achieved cladding side-wall layer can be smaller than $3 \mu\text{m}$ once the energy density in the region is $0.12 \sim 0.34 \text{ J/cm}^2$ for the Gaussian-shape laser or $0.13 \sim 0.66 \text{ J/cm}^2$ for the rectangle-shape laser. And the cladding sidewall layer fabricated by Gaussian-shape laser possessed more excellent surface quality than the product fabricated by rectangle-shape laser with same parameters. The roughness of the cladding sidewall layer decreases and then increases with the increase of the laser overlapping ratio, and the optimal region of overlapping-ratio is $78\% \sim 85\%$.

Key words: femtosecond laser micromachining; laser cladding forming; cladding layer; roughness

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ12007504)

作者简介: 李睿(1987-), 男, 硕士生, 主要从事激光微加工方面的研究。Email: lirui@opt.ac.cn

导师简介: 杨小君(1978-), 男, 研究员, 博士, 主要从事超快光学、超快激光方面的研究。Email: laser_ceo@opt.cn

0 引言

激光熔覆成形是目前快速制造领域的一个热点,该技术具有材料利用率高、加工周期短、能够实现复杂内腔及曲面结构件整体制造等特点。然而利用该技术一次成形制造得到的零件表面粗糙,不仅会使成形件的强度、耐磨性和抗腐蚀性变差,还会影响到零件的直接使用。在以前激光熔覆成形制造的研究中许多方法用来解决成型件表面粗糙度的问题,Pupo 等^[1]通过对成型件表面形貌分析,采用大间距层间错开的扫描方式获得了表面质量较好的样件。Brinksmeier 等^[2]研究了层定位与成型件表面精度之间的关系,还证明了后续机械加工处理对于提升成形件表面质量的作用。Yasa 等^[3]研究了激光重熔对成形件表面粗糙度的影响,并提出将选区激光熔化和表面重熔相结合的方法。Dadbakhsh 等^[4]通过实验得到了激光能量密度对表面形貌的影响规律。Mumtaz 和 Hopkinson^[5]研究了激光功率、扫面速率对成形件上表面及侧表面的影响,并获得较优的工艺参数组合。然而这些研究及后续的机械方法得到的复杂零件内腔表面粗糙度很难达到直接使用的标准。

激光加工为非接触式加工,光束易于聚焦,便于自动控制,能够完成复杂形面的加工。在诸多类型的激光器中,连续及长脉冲激光热扩散明显,加工精度有限。纳秒及皮秒激光脉宽较长,易产生重熔现象。飞秒激光脉冲宽度极短并且峰值功率极高,能够极大地减小激光与材料作用过程中的热效应现象,加工得到的材料表面光滑^[6]。因此,飞秒激光加工是解决熔覆成型零件表面粗糙度问题最理想的手段之一。

文中提出了一种通过飞秒激光精修技术提高熔覆层表面质量的方法,研究了飞秒激光能量密度、能量分布、光斑重叠率对熔覆层侧壁粗糙度的影响规律,为通过飞秒激光精密加工技术提高激光熔覆成形零件表面质量提供了基础。

1 飞秒激光与金属作用的理论分析

飞秒激光作用金属材料的过程中,主要依靠光子、电子、原子以及晶格之间的热传递完成。该热传递过程可以用下面的一维双温扩散方程来表述^[7]。

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - g(T_e - T_i) + S \quad (1)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) \quad (2)$$

$$Q(z) = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \quad (3)$$

$$S = I(t)Aa \exp(-az) \quad (4)$$

式中: $Q(z)$ 为热流量; z 为材料表面到内部某处的距离; $I(t)$ 为激光强度; a 为材料的吸收系数; A 为材料的表面透射率; k_e 为电子的热导率; g 表示电子与晶格的耦合参数; C_i 与 C_e 分别为晶格与电子的比热容; T_i 和 T_e 分别表示晶格系统和电子的特征温度。

当电子在单位温度的残留能量小于费米能量时,电子的比热容可用公式(5)表示,非平衡态的电子比热容可以用公式(6)表示,其中 C_e' 视作常量, $k_0(T_i)$ 为金属材料在平衡态下的比热容。

$$C_e = C_e' T_e \quad (5)$$

$$k_e = \frac{k_0(T_i)}{T_i} T_e \quad (6)$$

同时定义 τ_e , τ_i , τ_L 三个与时间相关的参量,其分别表示电子的冷却时间,晶格的加热时间,以及激光脉冲的持续时间。 τ_e 和 τ_i 的定义式如下:

$$\tau_e = \frac{C_e}{g} \quad (7)$$

$$\tau_i = \frac{C_i}{g} \quad (8)$$

在飞秒激光加工过程中,激光脉冲的持续时间 τ_L 远小于电子的冷却时间 τ_e ,即 $C_e T_e / t \gg gT$,所以晶格与电子之间的耦合可以忽略。令 $I_a = I(t)A$,则公式(1)可简化为公式(9):

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = I_a \exp(-az) \quad (9)$$

如果忽略电子的热导率,就可以得到激光脉冲结束时电子的温度。

$$T_e(\tau_L) \approx \sqrt{\frac{2F_a a}{C_e'}} \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \quad (10)$$

式中: $T_e(\tau_L) \gg T_0$, $F_a = I_a \tau_L$ 表示金属吸收激光的能量。 $\delta = 2/a$ 表示趋肤深度。

当激光脉冲作用结束之后 $S=0$,电子的初始温度由公式(10)决定,晶格的温度 $T_i = T_0$ 。此时,电子将能量传递给晶格,同时自身快速冷却。由于冷却时间非常短,因此公式(2)可以改写为 $T_i \approx T_e(\tau_L) t / \tau_i$,晶格的温度则取决于电子的平均冷却时间 $\tau_e^a = C_e' T_e(\tau_L) / 2g$,

从而可以得到晶格温度为:

$$T_i \approx T_e'(\tau_L) \frac{C_e'}{2C_i} \approx \frac{F_a a}{C_i} \exp(-az) \quad (11)$$

当 $C_i T_i < \rho \Omega$ 时, 金属就会以等离子体的形式快速蒸发。其中 ρ 是金属的密度, Ω 为单位体积蒸发能量。由公式(11)可以得到金属蒸发应满足的条件, 其中 $F_{th} = \rho \Omega / a$, 表示飞秒激光能够蒸发金属的能量密度阈值。

$$F_a \geq F_{th} \exp(az) \quad (12)$$

当激光能量密度 F_a 大于金属蒸发的能量密度阈值 F_{th} 时, 电子与晶格之间迅速完成热传递导致局部材料迅速升温气化。由于飞秒激光的脉冲持续时间 τ_L 非常短, 极大地缩短了热扩散的时间, 减小了热效应, 因而提高了材料表面光洁度^[8]。

2 实验装置与方法

提高熔覆层侧壁表面精度的实验装置如图 1 所示, 首先光纤激光熔化金属粉末形成熔覆层, 然后飞秒激光烧蚀熔覆层边缘多余部分。飞秒激光加工完

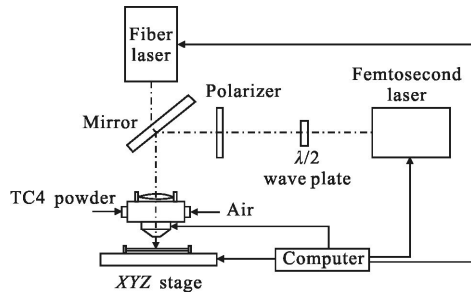


图 1 激光加工实验装置图

Fig.1 Experiment setup of laser fabrication

成后, 光纤激光熔化金属粉末形成新的熔覆层。通过两种激光相互配合, 最终达到提高成型件表面光洁度的目的。其中, 光纤激光熔覆金属粉末的实验参数为: 激光功率为 350 W, 扫描速度为 13 mm/s, 粉末流量为 4 000 L/h, 保护气体为氩气, 气体流量为 1 000 L/h。金属粉末为 TC4 钛合金粉, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成份

Tab.1 Composition of TC4

H	O	N	C	Fe	V	Al	Ti
0.008%	0.13%	0.38%	0.014%	0.098%	4.02%	6.25%	Bal.

飞秒激光加工系统包括: 飞秒激光器、三轴联动数控平台、非球面聚焦镜、聚焦型光束整形镜及其它辅助设备。飞秒激光加工熔覆层的具体参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Tab.2 Experiment parameters

Parameter	Value
Power/W	0.5-7.5
Velocity/mm · s ⁻¹	200-2 400
Spot diameter/μm	60
Frequency/kHz	100

实验后用乙醇超声清洗 15 min, 烘干 3 h 后进行分析测试。用基恩士 HVX-2000 显微镜观察熔覆层侧壁形貌。粗糙度测量采用 TR110 粗糙度测试仪, 取样长度 2.5 mm, 每组实验重复五次并求平均值。

3 实验结果及讨论

3.1 能量密度对侧壁粗糙度的影响

能量密度分别为 0.13 J/cm²、0.39 J/cm²、0.78 J/cm² 的激光加工熔覆层所得到的表面及侧面形貌如图 2 所示。当能量密度为 0.13 J/cm² 时, 从图 2(a)、图 2(b) 中可以看到熔覆层表面光洁, 边缘有微小的毛刺。当能量密度为 0.39 J/cm² 时, 由图 2(c)、图 2(d) 可以看到熔覆层有轻微的重熔现象。当激光能量密度为 0.78 J/cm² 时, 熔覆层烧蚀形貌如图 2(e) 及图 2(f) 所示, 此时熔覆层表面形貌不规则, 重熔现象较为严重。图 3 为熔覆层侧壁粗糙度随能量密度的变化曲线, 其中通过实验得到 TC4 钛合金的烧蚀阈值为 0.12 J/cm²。从图中可以看到随着能量密度的不断增加, 激光加工得到的熔覆层侧壁粗糙度也随之变大。这是由于当能量密度略大于 TC4 钛合金熔覆层的烧蚀阈值 0.12 J/cm² 时, 仅光斑中心区域的材料能够完成电子与晶格之间的能量转换。该区域的材料能够瞬间从固态变为等离子态, 并迅速以喷射的形式脱离加工体, 未发生该过程的物质仍然处于冷却态。加工得到的物质侧壁边缘整齐平滑。当能量密度远大于熔覆层烧蚀阈值时, 由于激光能量为高斯分布, 光斑中心能量密度值远大于烧蚀阈值^[9], 这部分区域的材料从固态转化为等离子态并迅速蒸发。远离光斑中心位置的能量密度虽然小于烧蚀阈值, 但激光能量能够导致材料转化为液态, 同时在激光加工过程

中伴随的气压和光压变化会驱动这部分液体的流动并在物质表面固化成不规则的形状。从图 3 中可以看到能量密度大于 0.12 J/cm^2 并且小于 0.34 J/cm^2 时,得到侧壁表面度 $R_a < 3 \mu\text{m}$ 。传统的激光熔覆得到的零件表面粗糙度 R_a 在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间^[10],因此表面质量得到了较大的改善。

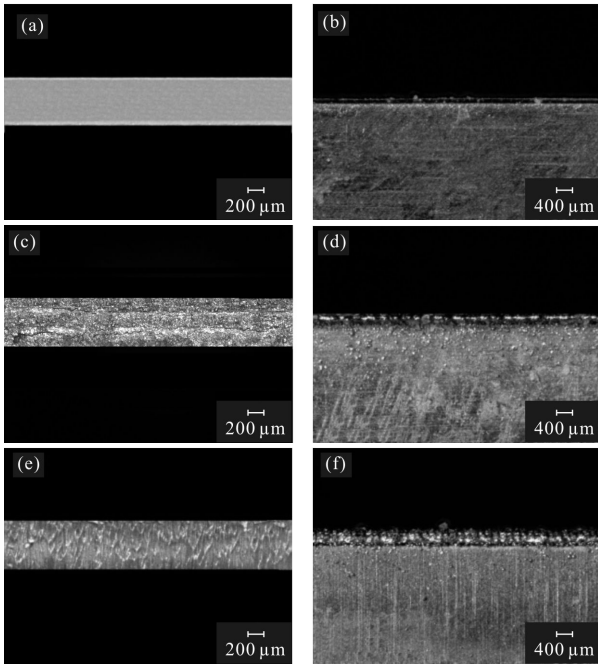


图 2 不同能量密度下烧蚀表面形貌
Fig.2 Morphology of sidewall with different energy density

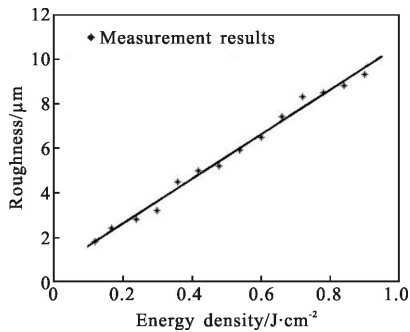


图 3 能量密度与侧壁粗糙度的关系
Fig.3 Relationship between energy density and roughness

3.2 能量分布对侧壁粗糙度的影响

采用不同型号聚焦镜对光束聚焦后光斑能量分布的结果如图 4 所示。图 4(a)为激光通过非球面透镜后测得的光斑能量分布情况,光斑中心能量最强并且能量从中心向边缘呈现高斯递减。图 4(b)为激光通过整形镜后能量的分布,从图中可以看到能量分布呈平顶分布,光斑中心能量与边缘能量一致。

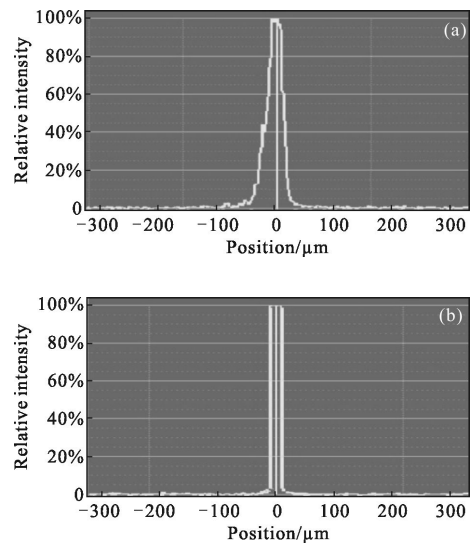


图 4 光斑能量分布
Fig.4 Energy distribution of light spot

图 5 为能量密度为 0.78 J/cm^2 时两种能量分布的激光对熔覆层线性扫描的实验结果。从图中可以看到高斯光束烧蚀的熔覆层区域热效应明显,烧蚀区域边缘有大量的残渣。采用平顶光束得到的烧蚀区域底部平整,烧蚀区域边缘整体光洁程度较高。

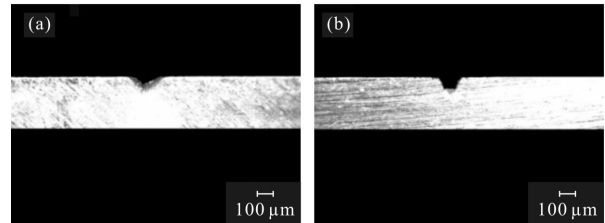


图 5 烧蚀熔覆层形貌对比
Fig.5 Comparison of the morphology of sidewall

图 6 为使用平顶光束得到的能量密度与熔覆层侧壁粗糙度的关系。从图中可以看到,当能量密度介于 $0.13 \sim 0.66 \text{ J/cm}^2$ 之间时,得到侧壁表面度 $R_a < 3 \mu\text{m}$ 。图 6 与图 3 对比可以发现,当光斑能量为平顶分布时,熔覆层侧壁的粗糙度随着激光能量密度的增加逐渐增加,但增加程度远小于同等参数条件下光斑能量为高斯分布时的结果。这是由于激光焦点位置处能量为平顶分布时,光斑中心能量与边缘能量一致,当能量密度大于 0.13 J/cm^2 时,光斑边缘的能量密度也大于烧蚀阈值,因此该区域的材料也能够快速地从固态转化为等离子态并迅速蒸发,不会产生重熔现象。因此能量平顶分布得到的熔覆层侧壁粗糙度小于相同能量密度条件下高斯分布的数值。

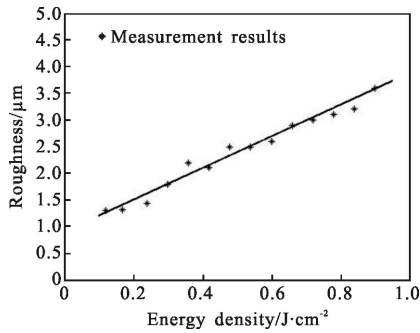


图6 能量密度与侧壁粗糙度的关系

Fig.6 Relationship between energy density and roughness

3.3 光斑重叠率对侧壁粗糙度的影响

光斑重叠率主要与扫描速度、脉冲频率、光斑直径等因素有关,其表达式如下:

$$Q = \left(1 - \frac{V}{f \cdot D}\right) \times 100\% \quad (13)$$

光斑能量平顶分布,能量密度为 0.42 J/cm^2 ,光斑重叠率分别为 95%、80%、65% 时激光加工熔覆层得到的形貌如图 7 所示。由图 7(a)、图 7(b) 可以看到光斑重叠率为 95% 时,熔覆层边缘粗糙,有明显的熔重熔痕迹。当光斑重叠率为 80% 时,由图 7(c)、图 7(d) 可以看到熔覆层侧壁表面光滑,无毛刺及重熔现象。当光斑重叠率为 65% 时,由图 7(e) 及图 7(f) 可以看出熔覆层表面凹凸不平,边缘呈现明显的波纹状。

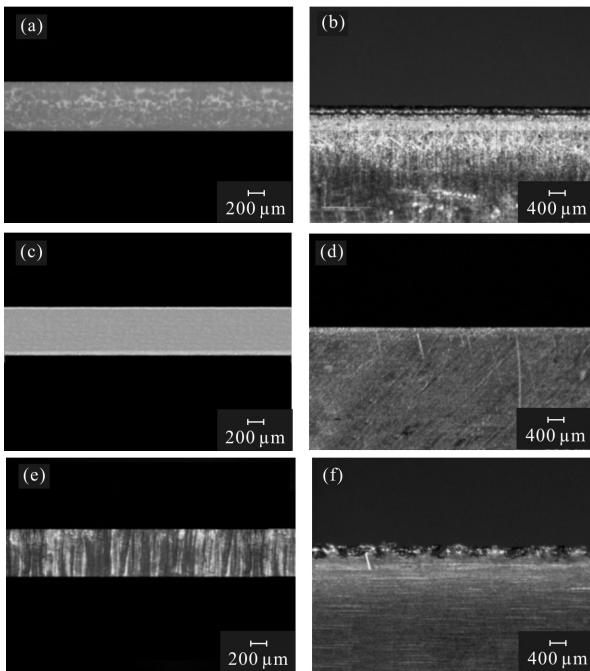


图7 不同功率下烧蚀表面形貌

Fig.7 Morphology of sidewall with different laser power

激光能量分别为高斯分布和平顶分布时光斑重叠率与侧壁粗糙度的关系曲线如图 8 所示。从图中可以看到两种能量分布条件下光斑重叠率与粗糙度的曲线趋势一致,能量平顶分布加工得到的粗糙度小于相同参数条件下高斯分布的数值。当激光的能量密度保持不变时,随着重叠率的增大,熔覆层侧壁粗糙度先减小后增大,最佳光斑重叠率的范围为 78%~85%。

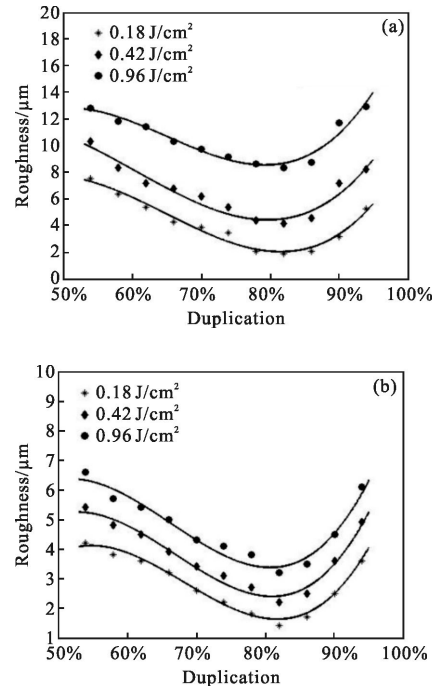


图8 光斑重叠率与侧壁粗糙度的关系

Fig.8 Relationship between duplication and roughness

当光斑重叠率小于 78% 时,相邻脉冲作用在熔覆层上的距离变大。连续脉冲的烧蚀效果不再具有线性,因此增大了熔覆层侧壁的粗糙度。然而当脉冲重叠率大于 85% 时,相邻两个脉冲重叠作用熔覆层区域。这种累积作用会使得激光对材料的热作用变得显著,从而增加了侧壁的粗糙度。因此,当激光的能量密度保持不变时,随着光斑重叠率增加,熔覆层侧壁的粗糙度呈现先减小后增大的趋势。

4 结论

文中提出了通过飞秒激光加工技术减小熔覆层表面粗糙度的方法,结合实验结果分析了加工过程中影响熔覆层粗糙度的主要因素。

(1) 激光能量为高斯分布时,侧壁表面粗糙度随能量密度的增大而增加。能量密度介于 $0.12 \sim$

0.34 J/cm²之间时,得到的表面粗糙度 $R_a < 3 \mu\text{m}$ 。

(2) 激光能量分布对烧蚀侧壁粗糙度影响显著。能量平顶分布得到的熔覆层侧壁粗糙度数值小于相同能量密度条件下高斯分布的粗糙度数值;当光斑为平顶并且激光能量密度介于 0.13~0.66 J/cm² 之间时,加工得到的熔覆层侧壁粗糙度小于 3 μm 。

(3) 侧壁粗糙度随脉冲重叠率的增大先减小后增大,实验获得的最佳光斑重叠率范围为 78%~85%。

参考文献:

- [1] Pupo Y, Delgado J, Sereno L, et al. Scanning space analysis in selective laser melting for CoCrMo powder [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63(1): 370-378.
- [2] Brinksmer E, Levy G, Meyer D, et al. Surface integrity of selective laser melted components [J]. *Manufacturing Technology*, 2013, 59(1): 601-606.
- [3] Yasa E, Kruth J, Deckers J. Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion laser re-melting[J]. *Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 263-268.
- [4] Dadbakhsh S, Hao L, Jerard E, et al. Experimental investigation on selective laser melting behavior and processing windows of in situ reacted Fe₂O₃ powder mixture [J]. *Powder Technology*, 2012, 231(1): 112-121.
- [5] Mumtaz K, Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, 15(2): 96-103.
- [6] Wei Zhiyi, Wang Zhaohua, Han Hainan, et al. Progress on ultrashort and ultraintense laser pulse technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 773-777. (in Chinese)
- [7] 魏志义, 王兆华, 韩海年, 等. 超短及超强脉冲激光研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 773-777.
- [7] Yang Chengjuan, Mei Xuesong, Wan Wenjun, et al. Femtosecond laser ablation on gold chromium film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (1): 63-65. (in Chinese)
- [7] 杨成娟, 梅雪松, 王文君, 等. 金铬薄膜的飞秒激光烧蚀加工[J]. *激光与红外工程*, 2011, 40(1): 63-65.
- [8] Zhao Hualong, Zhou Renkui, Zhao Wei, et al. The design of reflective scanning device for drilling the inverted cone microhole with femtosecond laser pluses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(19): 1-6. (in Chinese)
- [8] 赵华龙, 周仁魁, 赵卫, 等. 飞秒激光倒锥微孔加工的反射式扫描装置设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(19): 1-6.
- [9] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676-680. (in Chinese)
- [9] 田秀琴, 肖思, 陶少华, 等. 飞秒超短脉冲激光对硅太阳能电池损伤阈值研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 676-680.
- [10] Liu Ruicheng, Yang Yongqiang, Wang Di. Research of upper surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 425-430. (in Chinese)
- [10] 刘睿诚, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型金属零件上表面粗糙度的研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(4): 425-430.