

光粉交互对同轴送粉增材制造能量传输的影响

杨义成^{1,2,3}, 黄瑞生¹, 方乃文¹, 费大奎¹, 黄彩艳¹, 杜兵²

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028; 2. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京, 100044;
3. 北京科技大学, 材料先进焊接与连接技术研究室, 北京, 100083)

摘要: 激光同轴送粉增材制造涉及复杂的光粉交互作用, 也是决定粉末物化状态和激光能量有效利用的关键。因此, 借助背景增强瞬态影像捕捉技术和图像处理技术, 以时间序列上粉末粒子亮区面积的实时值与平均值变化规律为依据, 分析光粉交互作用过程及其对用于熔化基体剩余激光能量的影响。结果表明, 送粉速率和光粉作用距离是影响有效熔化基体能量的关键因素; 送粉速率不变时, 载气流量增加提高了粉末颗粒的飞行速度, 但是对有效熔化基体的能量影响很小; 粉末粒径较小时, 光粉交互作用过程越激烈, 有效熔化基体的能量随之下降。总体而言, 粉末颗粒飞行速度不变时, 光粉作用过程中亮区面积的大小和有效熔化基体能量呈正相关。

关键词: 增材制造; 同轴送粉; 光粉交互相互; 能量损失

中图分类号: TG 456, TG 665

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200226002

0 序言

激光同轴送粉增材制造技术, 以其独特的技术特点在大型关键复杂金属构件直接制造成形领域中具有不可替代的优势^[1-3]。在工艺执行过程中, 高度对称的环形喷嘴将气体和粉末颗粒组成的气固两相流均匀送出, 在喷嘴下方形成锥形的粉末束流, 其焦点位置处粉末颗粒的浓度分布呈现典型的高斯分布特征^[4-5]。同时, 激光束沿着环形喷嘴的中心区域传输, 其中心轴和锥形粉末束流的中心轴重合。在粉末颗粒汇聚的焦点位置正上方一定距离内, 粉末颗粒开始进入激光辐照区域, 处于激光辐照下的粉末颗粒会发生相应的变化。相关研究表明, 在激光辐照下的粉末颗粒由于激光功率密度和光粉相互作用时间的差异会使粉末颗粒处于不同的物化状态^[6-7]。哈尔滨焊接研究院有限公司的相关人员以激光为桥梁, 在定量化表征粉末束流特性的基础上, 系统地分析了激光、粉末颗粒和熔池的交互作用, 对激光同轴送粉增材制造的全过程进行了系统性表征^[8]。这说明粉末束流和激光束相互作用后, 有一部分激光能量会被粉末吸收, 一部分能

量会因散射直接损失掉, 剩余的激光能量会到达工件表面, 用于熔化基体^[9]。激光辐照下的基体和粉末颗粒一起熔化形成液态熔池, 激光向前移动, 液态熔池凝固形成沉积层。因此, 对液态熔池的有效控制是激光同轴送粉增材制造中控形过程的关键。而液态熔池的大小、形状, 除了与激光能量密度的分布特征有直接关系外^[10], 有效到达工件表面用于熔化基体的能量也是一个重要影响因素^[11]。但是, 目前关于激光和粉末颗粒相互作用后, 真正剩余多少能量用于熔化基体的研究鲜有报道。这是由于光粉交互作用过程涉及复杂的多场的耦合, 工艺参数变化对物理过程影响较为复杂, 很难建立准确的模型进行理论计算。因此, 文中以光粉交互作用过程损失能量和剩余能量为研究目的, 通过物理试验, 系统分析不同工艺参数对光粉交互作用过程中损失激光能量的影响规律, 为下一步工艺参数优化提供依据, 也为光粉相互作用过程中理论模型的建立和完善提供一定的数据支撑。

1 试验条件及方法

1.1 试验材料及设备

试验用粉末颗粒为气雾化法制备的 316 L 不锈钢球形粉末。其原始粒度介于 45 ~ 100 μm 之间, 利用 200 目的筛网将一部分原始粉末颗粒分成粒度

收稿日期: 2020-02-26

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2018ZX04044001); 黑龙江省自然科学基金项目 (ZD2019E006); 黑龙江省能源装备先进焊接技术创新团队资金支持 (201910312)。

分别为 $45 \sim 75 \mu\text{m}$ 和 $75 \sim 100 \mu\text{m}$. 试验过程中用到的激光器为德国 IPG 公司生产的型号为 YLS-6000 的光纤激光器. 送粉器为德国 GTV 公司生产的双料斗载气式送粉器, 型号为 MF-PF2/2. 送粉熔覆头为德国 Fraunhofer 公司生产的高精度同轴环形喷嘴, 型号为 COAX-40-S/F. 粉末束流的理论焦点位置为 6.8 mm .

1.2 试验分析方法

图 1 为试验设备布置示意图, 为了深入分析光粉作用过程, 采用背影增效的拍摄方法, 即将背景光源和高速摄像机置于粉末束流的两侧, 让粉末颗粒呈现出黑色, 提高光粉交互作用后发亮状态粉末颗粒的对比度. 高速摄像机的拍摄帧数为 $10\,000 \text{ fps}$, 曝光时间为 100 ns .

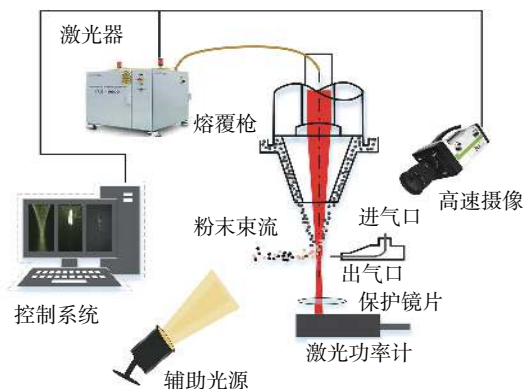


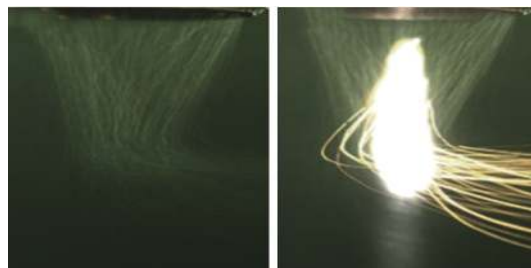
图 1 试验用设备布置示意图

Fig. 1 Schematic of equipment used for measuring the attenuation between laser and powders

如图 1 所示, 将一把特制的“空气刀”固定在三维可调的机构上, 置于喷嘴下端的某一高度位置, 利用其狭缝约束形成的薄层高速流动气流, 将粉末束流“拦腰截断”。“空气刀”进气口的气体为经过过滤的压缩空气或氩气, 压力设为 $0.6 \sim 1.0 \text{ MPa}$. 通过改变“空气刀”的高度位置, 即可实现对不同位置处流经该区域粉末颗粒运动轨迹的调整。“空气刀”喷出的高速气流对作用位置以上粉末束流内的粒子运动特性几乎不产生影响, 其实际效果如图 2 所示. 空气刀的作用位置可根据实际需要进行上下调节. 实际测量时, 将激光功率计置于喷嘴正下端一定距离处. 同时, 为了防止意外下落物对功率计造成损伤, 影响其测量精度, 在其上方放置一块高透光率的玻璃. 在保证激光发射功率、发射时间、空间位置参数都不变的情况下, 无粉末流出时的功率记为 P_0 , 添加粉末发生光粉交互作用后剩余的激

光功率记为 P_2 , 则光粉交互作用过程中损失掉的激光能量 P_1 可以用式 (1) 表示, 即

$$P_1 = P_0 - P_2 \quad (1)$$



(a) 原始粉末束流 (b) 激光辐照后粉末束流

图 2 “空气刀”对粉末束流状态的影响

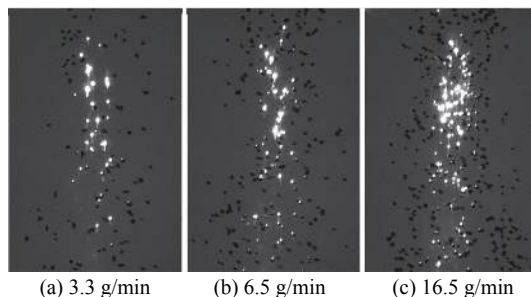
Fig. 2 Effect of the air knives on the powder flow state. (a) original powder stream; (b) powder stream irradiated by laser beam

为提高试验数据的可靠性, 每一组工艺参数的数据均测试 3 次, 取其平均值作为该工艺参数的有效数据, 依次分析主要工艺参数对光粉交互作用后损失能量或剩余能量的影响.

2 试验结果与分析

2.1 送粉速率对剩余激光能量的影响

不同送粉速率下, 激光辐照下粉末颗粒的状态如图 3 所示. 可以看出, 送粉速率增加, 粉末颗粒在空间分布的密度提高, 出现在激光传输路径上的概率也会随之提升. 粉末颗粒被激光辐照时间和辐照功率密度的不同, 光粉交互作用的程度也不相同: 部分粉末颗粒在激光功率密度较弱的区域只是处于高温状态; 而当粉末颗粒位于功率密度较高区域时, 其表面会瞬间汽化, 形成金属蒸气. 这种辐照程度的不同会使空间中的粉末颗粒处于不同的物化



(a) 3.3 g/min (b) 6.5 g/min (c) 16.5 g/min

图 3 送粉速率对光粉作用过程的影响

Fig. 3 Effect of powder feed rate on the interaction between laser and powders. (a) 3.3 g/min; (b) 6.5 g/min; (c) 16.5 g/min

状态,而亮度信息的差异就是光粉作用过程中程度差异的直接证据.利用 MATLAB 图像处理技术对时间序列上的 1000 帧光粉交互作用瞬态影像做二值化处理,提取同一视场内亮度高于一定阈值的区域进行统计分析获得每一帧图像亮区的总面积,其波动程度及其均值变化规律如图 4 所示.可以看出,在一定长度的时间范围内,每一帧高亮状态的面积均处于波动状态,这意味着一定的时间间隔 Δt 内,其过程存在一定的不稳定性,这和粉末束流本质上是一种离散的气固两相流有直接关系.但是,横向对比分析可以看出,送粉速率较高时每一帧亮度面积大部分均高于送粉速率较低时每一帧的亮度面积,这又说明该工艺自身虽然具有一定的波动性,但是从宏观上看该工艺也存在一定的稳定性.因此,该工艺目前难以运用于批量化生产之中.

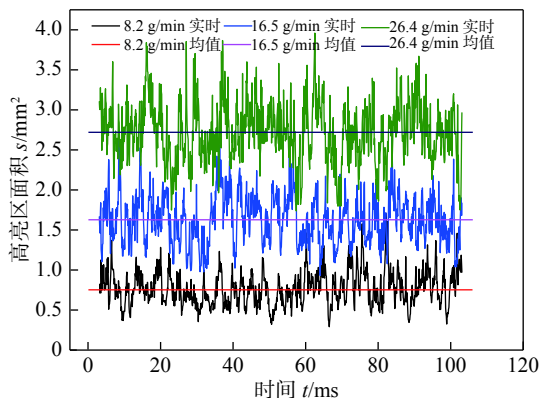


图 4 送粉速率对亮度面积的影响

Fig. 4 Effect of the powder feed rate on the bright areas

保持“空气刀”进气口压力、高度均不变,当无粉末送出时,功率计测量的输出功率均为 960 W,依据式 (1) 计算激光和粉末作用后剩余的激光能量,其结果如图 5 所示.可以看出,随着送粉速度的提高,光粉交互作用后损失的激光能量逐渐增加.当送粉速率提高到 32.5 g/min 时,传输过程中损失的激光能量接近 330 W,占有有效输出能量 34%.这说明光粉作用过程中对激光能量的损失效应不容忽视.

2.2 光粉作用距离对剩余能量的影响

光粉作用距离指的是改变“空气刀”作用于粉末束流上的位置,以粉末束流喷嘴末端为起始点,测量喷嘴末端到“空气刀”作用位置处之间的距离为 l ,剩余激光能量随 l 的变化规律如图 6 所示.可以看出随着光粉交互作用距离的增加,损失的激光能量也在不断上升.这说明光粉交互作用的距离也是影响光粉交互作用后剩余激光能量的因素之一.

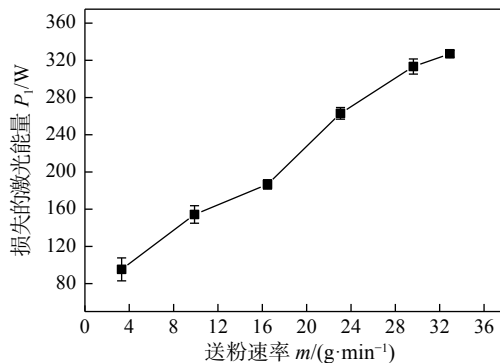


图 5 送粉速率对损失激光能量的影响

Fig. 5 Effect of the powder feed rate on the loss of laser power

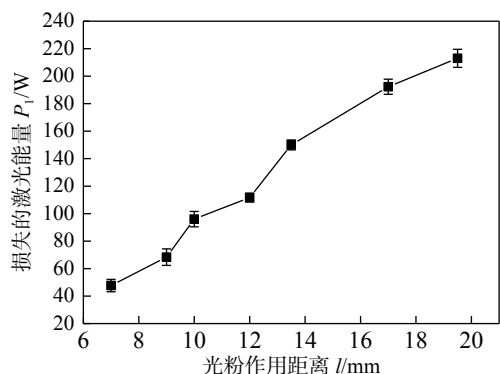


图 6 光粉作用距离对损失激光能量的影响

Fig. 6 Effect of the distance between laser and powders on the loss of laser power

2.3 载气流量对光粉作用过程的影响

载气流量在工艺执行过程中的主要作用是输送粉末颗粒,一般载气流量越大,粉末颗粒在空间的飞行速度越快.载气流量变化,光粉作用过程如图 7 所示,可以看出随着载气流量增加,粉末颗粒的空间密度会显著下降.这是因为提高粉末颗粒飞行速度后,粉末颗粒在某一区域内停留的时间有所减少.同样,对一段时间内 1000 帧光粉交互作用过程中的图像进行分析,可以获得一段时间内不同载气流量对光粉交互作用过程中亮区面积的影响规律,如图 8 所示.可以看出,其瞬时状态的变化规律和送粉率变化后的规律基本一致,同一载气流量,一段时间内每一帧亮区的面积均存在不同程度的波动,而不同载气流量之间,亮区面积相差的很少,这也从另一方面说明了该工艺方法在实施过程中的稳定性相对较好.虽然气流量变化后每一帧亮区的面积在不断变化,且气流量不同亮区面积的均值差异很大,但是在实际测量中,功率计接收到的激光功率值并未发生大的变化.如图 9 所示,光粉交互作用后损失的激光功率 P_l 均在 128 W 左右.这

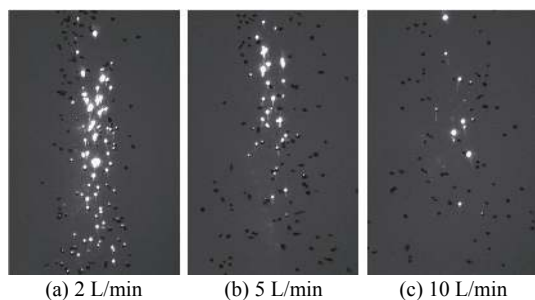


图 7 载气流量对光粉作用过程的影响

Fig. 7 Effect of carrier gas flow rate on the interaction between laser and powders. (a) 2 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min

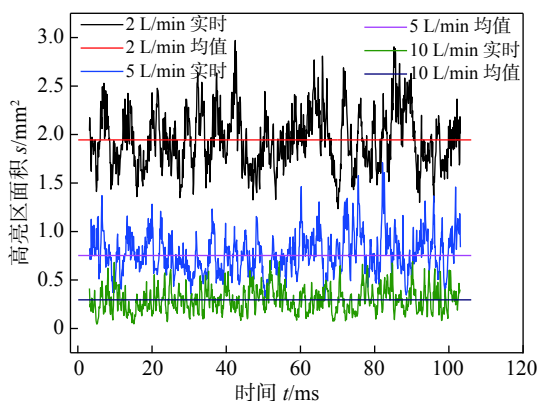


图 8 载气流量对亮度面积的影响

Fig. 8 Effect of the carrier gas flow rate on the bright areas

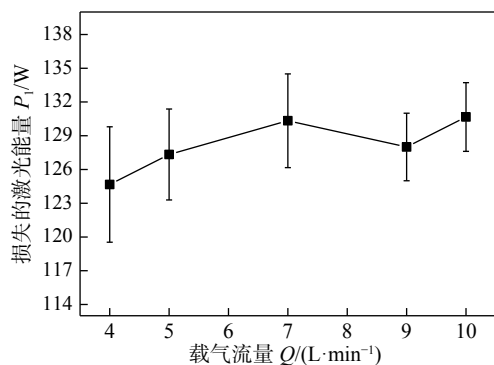


图 9 载气流量对损失激光能量的影响

Fig. 9 Effect of the carrier gas flow rate on the loss of laser power

说明只要单位时间内送出的粉末颗粒数量不发生变化,即使随粉末颗粒飞行速度的提升,光粉交互作用时间减少,也不会对光粉交互作用后用于熔化基体的能量产生大的影响。

2.4 粒径范围对光粉作用过程的影响

粉末粒径也是激光同轴送粉增材制造过程中的一个关键工艺参数,粒径的选择会对最终成形体的质量产生不容忽视的影响。在激光功率、送粉器转速均不改变的情况下,不同粉末粒径范围的光粉

作用过程如图 10 所示。可以看出,粉末粒径范围介于 $45 \sim 75 \mu\text{m}$ 时,粉末颗粒被激光辐照后处于高亮状态的个数要明显高于粒度范围处于 $75 \sim 100 \mu\text{m}$ 和 $45 \sim 100 \mu\text{m}$ 。粉末颗粒的粒径较小,热容量较小,在相同的激光功率密度下,其表面升温 and 汽化的可能性就越大,这是粒径分布范围较小时,亮区面积增加的原因之一。除此之外,送粉器转速不变时,粉末颗粒数量会随着粒径范围的减少而增加。

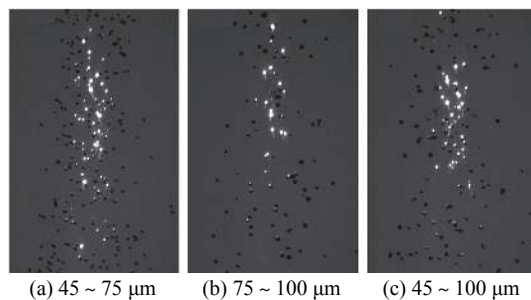


图 10 粉末粒径对光粉作用过程的影响

Fig. 10 Effect of powder size on the interaction between laser and powders. (a) $45 \sim 75 \mu\text{m}$; (b) $75 \sim 100 \mu\text{m}$; (c) $45 \sim 100 \mu\text{m}$

对每一种粒径分布的粉末颗粒与激光交互作用后的一系列照片进行图像处理,即可获得不同粒径分布的粉末束流与激光作用后亮区面积随时间的变化规律,以及亮区面积的均值大小,其结果如图 11 所示。可以看出,粉末颗粒粒径分布与载气和送粉率对实时亮区面积的影响规律不同,三种粒径分布的亮区面积实时值在整个时间历程上重合的较多。但是就均值而言,粒径介于 $45 \sim 75 \mu\text{m}$ 的粉末颗粒与激光发生交互作用后,其亮度均值最大,粉末粒径介于 $75 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的亮度均值最低,亮度均值介于两者之间的粉末粒径分布是 $45 \sim 100 \mu\text{m}$ 。这说明粉末颗粒粒度较小时,有利于粉末颗粒的熔化。

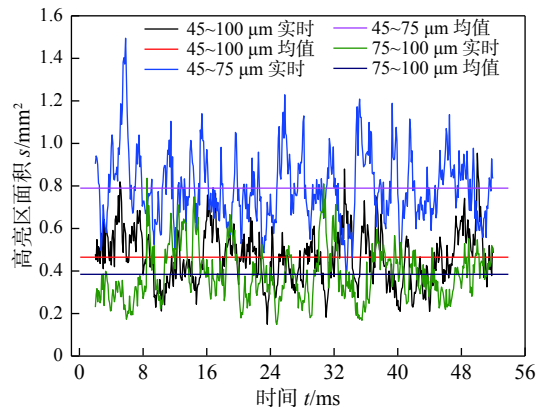


图 11 不同粉末粒径分布对亮度面积的影响

Fig. 11 Effect of powder size on the bright areas

不同粒径分布的粉末颗粒组成的粉末束流对激光作用损失的激光功率的影响如图12所示。可以看出,当转速相同时,粒径介于45~75 μm 的粉末束流与作用过程损失掉的激光能量最多,约为130 W;而粒度介于75~100 μm 的粉末颗粒损失掉的激光能量最少约为100 W。该影响规律与粉末颗粒粒径分布范围对光粉作用过程中亮区面积均值的影响规律一致。

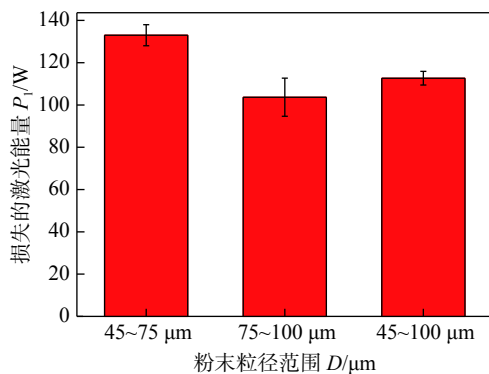


图12 粉末粒度对损失激光能量的影响

Fig. 12 Effect of the powder size on the loss of laser power

3 结论

(1) 送粉速率提高会显著增加粉末颗粒的空间浓度,使光粉交互作用后处于高亮状态的区域增加,损失的激光能量也由3.5 g/min时的100 W提高到32.5 g/min时的330 W。

(2) 激光穿过粉末束流的距离越长,光粉交互作用过程中粉末颗粒吸收的能量就越大,损失的激光能量也就随之增加。

(3) 送粉速率不变时,载气流量增加对光粉交互作用后损失的激光能量影响不大。粉末粒径分布较小的粉末束流,其光粉交互作用过程的剧烈程度大于粒径分布较大的粉末束流。这说明粒径分布会对光粉交互作用程度产生一定的影响,进而改变熔化基体的激光能量大小。

参考文献

[1] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690–2698.
Wang Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2014, 35(10):

2690–2698.

- [2] Lin X, Huang W D. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Scientia Sinica, 2015, 45(9): 1111.
- [3] Arias-González Felipe, del Val, *et al.* Microstructure and crystallographic texture of pure titanium parts generated by laser additive manufacturing[J]. Metals and Materials International, 2018, 24(1): 231–239.
- [4] 杨义成, 王威, 王旭友, 等. 工艺参数对同轴送出粉末流动状态的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 13–17.
Yang Yicheng, Wang Wei, Wang Xuyou, *et al.* The effect of process parameter on powder flow statues in coaxial powder feeding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 13–17.
- [5] Tan H, Zhang F, Wen R, *et al.* Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 391–398.
- [6] 杨义成, 黄瑞生, 孙谦, 等. 激光送粉增材制造光粉交互作用机制分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 68–74.
Yang Yicheng, Huang Ruisheng, Sun Qian, *et al.* Mechanism analysis of interaction between laser and particles in laser additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 68–74.
- [7] Qi H, Mazumder J, Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(2): 024903–024903–11.
- [8] 杨义成. 燃气轮机叶片激光增材修复基础研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2017.
Yang Yicheng. Basic research of repairing of gas turbine blade by laser additive manufacturing technology[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Limited Company, 2017.
- [9] Devesse W, Baere D D, Guillaume P. Modeling of laser beam and powder flow interaction in laser cladding using ray-tracing[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S2): S29208.
- [10] 胡晓冬, 姚建华, 孔凡志, 等. 半导体激光熔覆2Cr13的工艺试验与预测模型[J]. 中国激光, 2010(1): 279–282.
Hu Xiaodong, Yao Jianhua, Kong Fanzhi, *et al.* Experiment and prediction model for 2Cr13 cladding using diode laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010(1): 279–282.
- [11] Kovaleva I, Kovalev O, Zaitsev A V, *et al.* Modeling and numerical study of light-propulsion phenomena of particles acceleration in coaxial laser powder cladding[J]. Physics Procedia, 2014, 56:439–449.

第一作者简介: 杨义成, 1991年出生, 博士研究生; 主要从事激光焊接和激光增材制造相关研究工作; 发表论文16篇; Email: hwiyc@163.com.

通信作者简介: 黄瑞生, 博士, 高级工程师; 主要从事激光焊接和激光增材制造等相关研究工作; 发表论文30余篇; Email: huangrs8@163.com.