

激光光内送粉线形悬垂分支结构直接成形

贾 帅 傅戈雁 方琴琴 石世宏 姜付兵

苏州大学机电工程学院激光制造技术研究所, 江苏 苏州 215021

摘要 基于光内送粉技术和KUKA机器人,采用间歇式光加载、单点直接堆积成形方法,通过切向分层方法得到了 0° ~ 60° 连续变姿态悬垂和多角度分支线形结构。通过ANSYS瞬态热力学仿真分析不同激光加载时间下熔池温度变化趋势,并通过试验验证得出最优加载时间。检测结果表明:成形的线形结构尺寸精度较好,截面尺寸均匀,最大相对误差为1.6%,表面粗糙度可达 $1.98\sim 2.47\ \mu\text{m}$;对成形件不同倾角处进行微观组织观察表明,其组织均匀致密,无明显缺陷。

关键词 激光技术;线形结构;间歇式光加载;光内送粉;变姿态成形;Z轴提升量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303008

Laser Cladding for Direct Forming of Cantilevered Slender Structure Part Based on Inside Laser Powder Feeding

Jia Shuai Fu Geyan Fang Qinqin Shi Shihong Jiang Fubing

Institute of Laser Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract The part with an incline angle changing from 0° to 60° and the part with multi-angle are formed by normal direction slices. They are generated by the single point deposition and the intermittent processing based on inside laser powder feeding technology and KUKA robot. The optimized loading time is got from the ANSYS thermo dynamics simulation and corresponding experiments. The experimental results indicate that the forming slender structure part has a high precision and uniform section size. The biggest relative error is 1.6% and the surface roughness is $1.98\sim 2.47\ \mu\text{m}$. The microstructures of the part at different incline angles are similar without apparent defect.

Key words laser technique; slender structure; intermittent laser loaded; in-side laser powder feeding; variable attitude forming; Z axis lifting capacity

OCIS codes 220.4610; 140.3390; 160.3900

1 引 言

线形零件具有纵横比较大、截面尺寸与光斑直径相当,且常包含大倾角结构等特征。其中,一些工业类零件如弹簧等单体零件,和航空航天等复杂零部件中的部分结构,均可归类为线形零件^[1]。传统机加工模式首先利用棒材或板材去除材料加工获得近似形状,然后经过后续的特殊机加工和处理来得到所需形状。因此,线形零件的制造需要一些特殊机加工设备,单件小批量的生产更是昂贵耗时。Dwivedi等^[1]利用激光直接成形方法得到一些线形结构零件,但由于送粉方法的限制,其最大偏转角较小,且所得零件表面比较粗糙。

目前较为成熟的金属激光直接快速成形工艺有激光选区熔化/烧结(SLM/SLS)技术、激光金属沉积(LMD)技术^[2-3]。其中,SLS技术采用粉床预置粉末法分层烧结实体成形;LMD技术则采用同步送粉熔覆成形方式。这两种技术均采用水平切片分层制造方法,成形倾斜结构时,表面阶梯效应将不可避免。相比于SLS技术,

收稿日期: 2015-09-16; 收到修改稿日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475107,11172191)、江苏省重点研发项目(BE2015067)

作者简介: 贾 帅(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。E-mail: 18862190270@163.com

导师简介: 傅戈雁(1959—),女,教授,博士生导师,主要从事激光熔覆快速成形方面的研究。

E-mail: fugeyan@suda.edu.cn(通信联系人)

LMD方法能获得更为致密的熔覆组织,然而现有LMD一般为多束粉末向光斑汇聚送粉(光外送粉),粉末指向性差。为保证光粉正确耦合,喷头倾角不能变动太大,因此不适宜成形大倾角线形结构。

本文基于中空激光光内送粉技术^[4-5],利用KUKA机器人进行了多个角度的线形结构直接成形研究。区别于其他光外送粉激光熔覆^[6-8],光内送粉技术为单束粉末从环形激光内部送进,具有较好的粉末集束性和指向性。借助KUKA机械臂可实现空间多姿态移动^[9-10],实现了变角度大倾角线形结构的自由成形。

2 试验原理及设备材料

2.1 变姿态熔覆原理

传统激光熔覆加工采用水平分层方法,如图1(a)所示,利用熔池张力分层错位得到倾斜结构^[7-11]。此方法的成形件具有明显的阶梯效应;并且对于大倾角结构,因层间错位过多,使堆积无法进行。但采用光头变姿态方法加工,如图1(b)所示,通过沿生长方向进行分层^[12],即分层方向始终垂直于表面法线方向,则上下层无错位,不仅可以实现大倾角结构的自由成形,还可以从理论上消除阶梯效应。

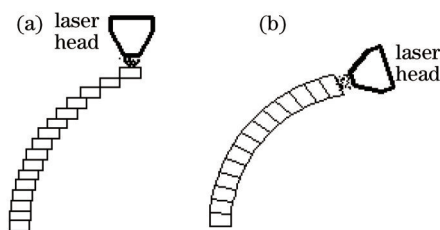


图1 两种加工方式对比。(a)水平分层堆积;(b)切向分层堆积

Fig.1 Comparison of two cladding deposition methods. (a) Deposition of horizontal slices; (b) deposition of normal direction slices

2.2 光内送粉原理

图2为中空激光内送粉原理图。单根粉管置于中空环形激光内部,垂直于熔覆层表面送粉。外层环形准直气对粉末进行汇聚,粉末挺直细小,具有良好的集束性和指向性^[12-13]。由图3可看出光头在不同倾角时粉末的汇聚效果,在15~20 mm长度范围内均可保持良好的汇聚性。光内送粉可保证光头变姿态熔覆过程中光粉的精确耦合,从而保证堆积成形的顺利进行。

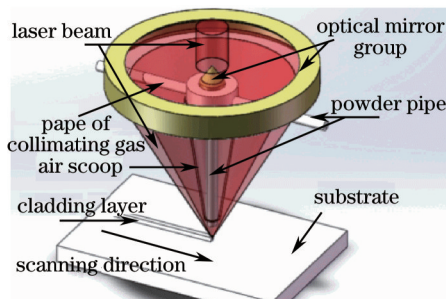


图2 光内送粉原理图

Fig.2 Schematic of inside-laser powder feeding

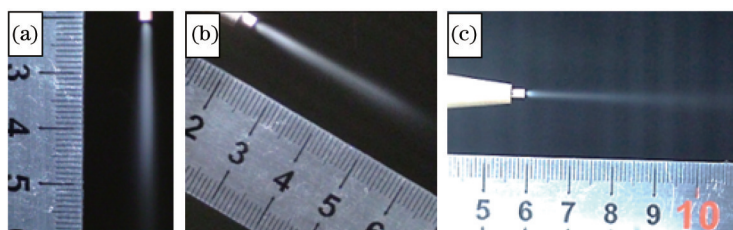


图3 不同角度送粉照片。(a) 0°;(b) 40°;(c) 90°

Fig.3 Results of powder feeding at different angles. (a) 0°; (b) 40°; (c) 90°

2.3 试验设备及材料

试验采用光内送粉光头,运动控制机械为KUKA机器人。采用IPG公司YLS-2000-TR光纤激光器和

GTVPF2/2送粉器。载气、准直气与保护气体均为氮气。成形粉末材料为Fe313, 粒度在45~74 μm, 化学成分为0.1C, 2.5~3.5Si, 13~17Cr, 0.5~1.5 B(质量分数, %), 余Fe。基体材料为304不锈钢。

2.4 试验方法

采用连续变姿态间隙光加载单点熔覆堆积成形法, 即熔覆过程扫描速度为零, 固定光头位置不变, 连续送粉间歇开光, 每次开关光之间留有足够熔池凝固时间, 并沿分层方向提升光头, 从而得到悬垂及多角度分支线形结构件。为获得连续变姿态单点熔覆堆积间歇光加载时间, 进行熔池温度场仿真。对不同光加载时间下熔池温度进行仿真分析, 以获得最佳光加载区间。设计了连续变姿态弧状线形模型如图4(a)所示。底端为高度25 mm的竖直结构, 上部为半径60 mm、圆心角60°的圆弧, 结构件截面为与光斑直径相等的圆。加工成形的连续变姿态成形悬垂线形结构如图4(b)所示。

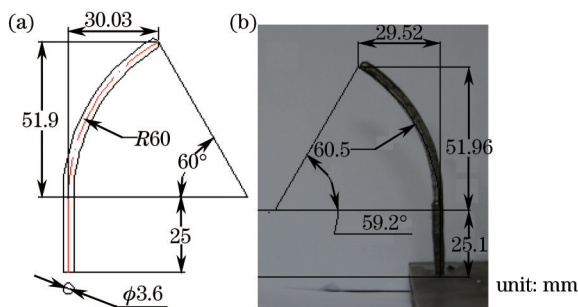


图4 (a) 设计尺寸与(b)测量的成形尺寸对比

Fig.4 Comparison of size in (a) designed and (b) formed part

3 熔池温度仿真分析

激光加载时间对熔池的形成和液体金属流动性的影响至关重要。特别是在线性结构成形过程中, 需严格控制间歇光加载时间, 以保证试验顺利进行。加载时间过短, 熔池尺寸减小、流动性较差, 反之熔池温度过高, 熔池流淌不易控制。为得到熔池温度变化趋势, 采用单一变量法对不同激光加载时间进行仿真分析。其他参数不变则加载时间越长, 熔池能量越高, 反之越低。分别对激光加载0.2、0.4、0.6 s进行20层仿真。为简化计算参照文献[13]对边界条件进行假设, 采用Solid70三维热实体单元类型, 建立柱形模型如图5(a)所示, 网格划分采用六面体网格如图6(b)所示。生死单元法模拟实时送粉情况, 加载以热流密度的形式给出^[14], 每个载荷步加载完成以后, 关闭激光器2 s, 其某一温度场云图如图5(c)所示。

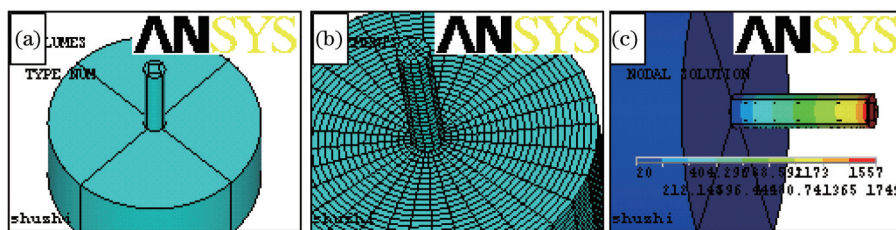


图5 ANSYS仿真。(a) 实体模型; (b) 网格划分; (c) 温度场云图

Fig.5 ANSYS simulation. (a) Entity model; (b) meshing; (c) temperature distribution

图6为不同光加载时间下加载步之后的熔覆层温度和冷却2 s之后的熔覆层温度变化曲线。随光加载时间增加, 节点温度变化梯度逐渐增大, 且加载时间越长温度变化梯度稳定越慢。

图7为光加载结束后节点温度和冷却2 s后节点温度变化曲线。从图7(a)可以看出: 1) 随着载荷步增加, 熔池温度持续上升趋近某一平衡温度; 2) 加载时间越长, 熔池温度越高。加载时间越短, 温度趋于稳定值越快; 3) 加载初始阶段节点温度低于Fe基合金熔点, 且加载时间越短, 温度低于熔点的节点数越多。故加载时间过短可能引起初始熔覆层尺寸达不到建模尺寸。从图7(b)可以看出, 加载时间越长, 冷却结束后节点温度越高。随载荷步增加, 熔池会一直处于熔化状态而无法成形。即连续变姿态单点熔覆堆积成形法存在最佳的光加载时间区间。

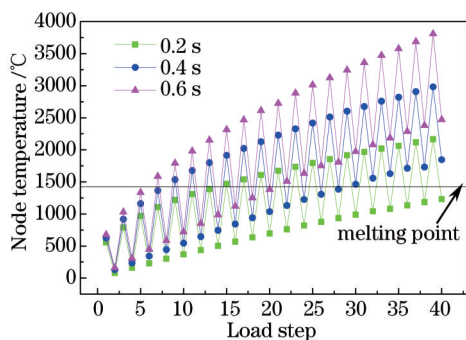


图6 节点温度曲线

Fig.6 Node temperature curve

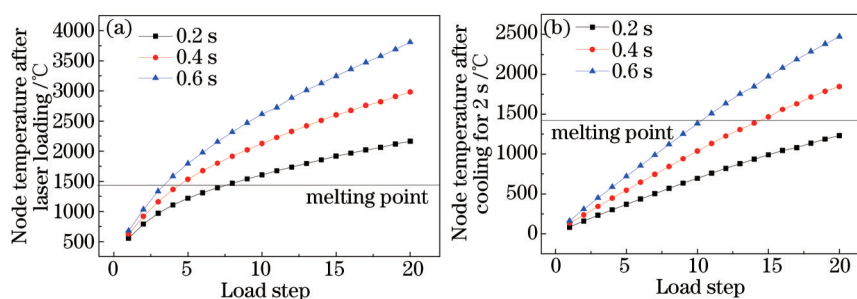


图7 (a) 激光加载和(b) 冷却后的节点温度

Fig.7 Node temperature after (a) laser loading and (b) cooling

4 试验

4.1 加载时间试验验证

选择激光功率800 W,对不同激光加载时间仿真验证结果如图8所示。图8(a)为激光加载0.2 s,尺寸由下向上逐渐增加趋于稳定;图8(b)为激光加载0.4 s,始端尺寸变化有较大改善;图8(c)为激光加载0.6 s,由于温度过高熔池来不及凝固而无法成形。试验结果和仿真结果完全吻合,激光加载0.2 s熔池能量较低而达不到建模尺寸,加载0.6 s熔池能量过高,需相对增加熔池散热时间。

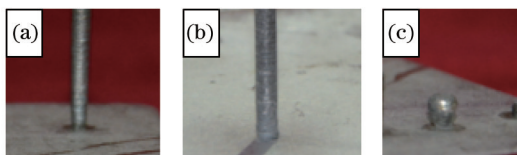


图8 不同激光加载时间下实物图。(a) 0.2 s; (b) 0.4 s; (c) 0.6 s

Fig.8 Processed results with different laser loading time. (a) 0.2 s; (b) 0.4 s; (c) 0.6 s

4.2 成形试验

成形试验选用KUKA机器人进行运动控制。激光加载过程光头位置固定不变,激光加载间隙光头沿提升



图9 堆积成形过程中的零件

Fig.9 Part in deposition process

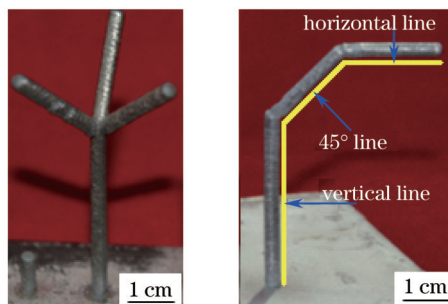


图10 堆积成形零件

Fig.10 Formed part by deposition

方向以 4 mm/s 速度运动,之后停顿 2 s 加载激光。由于间歇光加载单点熔覆堆积成形法,每个加载步之间熔池具有足够的凝固时间,保证了成形试验的顺利进行。弧状悬垂线形结构成形过程如图 9 所示,成形件表面光滑、尺寸均匀,无火花飞溅、熔池流淌等现象。图 10 为堆积成形的多角度线形分支结构件和 90°线形分支结构件。

5 检测结果

5.1 表面粗糙度和尺寸精度分析

选择取样长度为 2.5 mm,利用便携式 TR200 粗糙度仪测得圆弧段 10°~20°、30°~40°、50°~60°的表面粗糙度为 2.374、2.473、1.985 μm。其粗糙度等级达到 8 级,相当于一般铣床、车床的加工表面。对连续变姿态线形的成形件进行宏观尺寸测量[图 4(b)]。与 CAD 建模尺寸[图 4(a)]进行对比,其尺寸及角度误差如表 1 所示。

表 1 成形件尺寸误差

Table 1 Error of formed part

Features	Design size	Absolute error	Relative error /%
Bottom height	25 mm	0.1 mm	0.4
Arc height	51.9 mm	0.06 mm	0.12
Arc width	30.03 mm	-0.51 mm	-1.6
Radius	60 mm	0.5 mm	0.83
Incline angle	60°	-0.8°	-1.3

由表 1 和图 4 可知,各尺寸均有一定误差。主要误差出现在圆弧宽度和圆弧角度大小处。分析原因为光头连续变姿态过程中,随姿态转角增加,单层层高沿法向生长不足所致。

如图 4(a)设计成形件截面尺寸为 φ3.6 mm。实验检测在开始的 0~6 mm 处测量尺寸小于设计尺寸。结合图 7(a)分析原因由于激光功率固定,开始时基板处于室温,温度较低,高温熔层的热量迅速向基板传递而散失,使得熔池温度降低尺寸减小而达不到设计尺寸。对成形件每间隔 5 mm 取一点(圆弧部分按弧长近似测量),绘制截面尺寸随高度变化曲线图如图 11 所示,除起始段其他各处截面尺寸均近似设计尺寸。

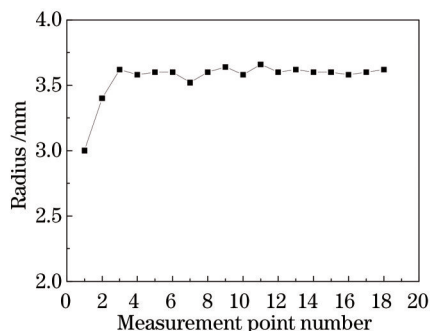


图 11 成形件截面尺寸

Fig.11 Section size of formed part

5.2 组织分析

分别取悬垂结构在基板结合处、30°~40°、50°~60°处三个截面,采用 S-4700 冷场发射扫描电镜观察微观组织。图 12(a)为与基板结合面处的微观组织图,其组织致密生长。基板结合处熔池快速凝固为集中分布细

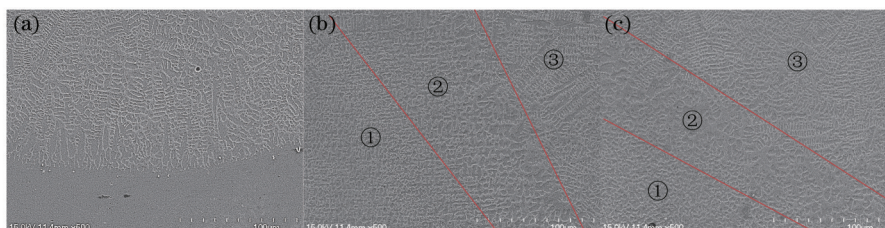


图 12 线形结构微观组织。(a) 基板;(b) 30°~40°和(c) 50°~60°弧段结合处

Fig.12 Microstructure of slender structure. (a) Substrate; (b) 30°~40° and (c) 50°~60° segmental arc junction

小的平面晶层,形成光滑白亮带。白亮带上方温度梯度减小,形核率降低,则形成垂直于基体的粗大柱状晶。随熔覆层距离基体表面位置增加,熔覆层向两侧散热加快形成枝状晶。在单层顶部时,各方向散热均匀,晶粒生长失去方向性,形成紊乱的致密组织^[15-16]。图12(b)、(c)为两圆弧段组织,可分为三个区域:1)区为前层次表面未重熔区,组织分布集中为细小等轴晶;2)区为前层表层重熔区,表层细小组织破坏,散热缓慢形成略大胞晶;3)区为各层中间区域,向基体散热同时向两侧散热形成枝状晶。三个区域组织均致密均匀。

6 结 论

基于中空激光送粉技术,提出线形悬垂分支结构直接成形新工艺。对线形分枝结构进行切向分层,利用间歇光加载工艺得到 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 连续变姿态悬垂结构和多角度线形分支结构。

对熔覆过程进行ANSYS动态热力学仿真,根据仿真结果输出熔池温度随时间的变化趋势。发现功率一定的情况下,加载时间过长会导致熔池不凝固而无法进行试验。加载时间过短会导致粉末欠熔而达不到熔覆尺寸,结合试验验证仿真结果确定最佳激光间歇光加载时间为0.4 s。

对连续变姿态悬垂件进行了尺寸检测、粗糙度测量和电镜组织观察。结果表明:尺寸精度较高,其最大相对误差为1.6%,成形件截面直径基本保持一致;表面粗糙度可达8级,相当一般铣床、车床的加工表面;内部组织均匀致密,无明显缺陷。

参 考 文 献

- 1 R Dwivedi, S Zekovic, R Kovacevic. A novel approach to fabricate uni-directional and branching slender structures using laser-based direct metal deposition[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(7): 1246-1256.
- 2 D Buchbinder, H Schleifenbaum, S Heidrich, *et al.*. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 271-278.
- 3 Doan Tatkhua, Li Dichen, Lu Bingheng, *et al.*. Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1003002.
Doan Tatkhua, 李涤尘, 卢秉恒, 等. 扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1003002.
- 4 Wu Shaohua, Shi Shihong, Xiao Junyan, *et al.*. Study on characteristics of inner ring laser powder feed molten pool of thin workpiece[J]. *Applied Laser*, 2013, 33(3): 250-253.
吴少华, 石世宏, 肖军艳, 等. 环形激光光内送粉成形薄壁件熔池特征研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(3): 250-253.
- 5 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser forming manufacturing process and nozzle of inside-laser powder feeding: China, 200610116413.1[P]. 2006-09-22.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 中国, 200610116413.1[P]. 2006-09-22.
- 6 P Singh, D Dutta. Multi-direction slicing for layered manufacturing[J]. *Journal of Computing and Information Science and Engineering*, 2001, 1(2): 129-142.
- 7 Li Hongyuan, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. Control of process parameters of reducing solid of revolution with coaxial inside-beam powder feeding accumulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0803012.
李洪远, 石世宏, 傅戈雁, 等. 光内送粉激光熔覆堆积变径回转体工艺参数的控制[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0803012.
- 8 Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe, *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 18-25.
张冬云, 王瑞泽, 赵建哲, 等. 激光直接制造金属零件技术的新进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 18-25.
- 9 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2780-2798.
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2780-2798.
- 10 Zhu Gangxian, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. Research on variable reference plane cladding based on laser processing robot with inside-laser powder feeding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 43(2): 0303010.
朱刚贤, 石世宏, 傅戈雁, 等. 基于激光加工机器人的光内送粉变基面熔覆研究[J]. *中国激光*, 2015, 43(2): 0303010.
- 11 Cai Wei, Fu Geyan, Shi Shihong, *et al.*. Research on thickness control of variable diameter solid with coaxial inside-beam powder feeding laser cladding by defocusing technique[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0703003.
蔡伟, 傅戈雁, 石世宏, 等. 基于离焦技术的光内送粉堆积变径体壁厚控制研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0703003.

- 12 Shi Tuo, Wang Yiqing, Lu Bingheng, *et al.*. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1003003.
石 拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送分粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003003.
- 13 Shi Gaolian. Molten Pool Temperature Field Study of Different Duty Ratio with Hollow-Laser Beam inside Powder Feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2010: 20-40.
石皋莲. 变占空比中空激光内送粉熔覆熔池温度场研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 20-40.
- 14 Lian Tianhong, Wang Shiyu, Guo Zhen, *et al.*. Temperature field analysis of laser medium with rough surface heat conduction[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0614001.
连天虹, 王石语, 过 振, 等. 粗糙热传导表面下激光介质温度场的计算分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0614001.
- 15 Song Jianli, Deng Qilin, Chen Changyuan, *et al.*. Microstructure and properties of metal components by laser cladding rapid forming[J]. Journal of Metal Heat Treatment, 2005, 30(8): 48-51.
宋建丽, 邓琦琳, 陈畅源, 等. 基于激光熔覆的金属零件快速成形组织与性能[J]. 金属热处理, 2005, 30(8): 48-51.
- 16 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin, *et al.*. Microstructure characterization and properties of laser claddingforming 316L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(10): 1441-1444.
宋建丽, 邓琦琳, 胡德金, 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1441-1444.

栏目编辑: 张 雁