

基于光内送粉技术的激光加工机器人曲面熔覆 试验研究

姜付兵¹ 石世宏¹ 石 拓² 傅戈雁¹ 朱刚贤¹

¹苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

²苏州天弘激光股份有限公司, 江苏 苏州 215122

摘要 现有激光表面熔覆技术大多只能在水平或小角度倾斜基面上进行,基于“光束中空、光内送粉”技术,解决了喷头空间倾斜送粉过程中粉末汇聚性差的难题,通过控制激光机器人夹持送粉喷头做大角度连续变姿态运动,喷头轴线方向始终与曲面法向重合,实现了在大角度倾斜曲面上激光熔覆均匀涂层。分析了曲面熔池受力情况、不同倾角曲面熔池形状以及扫描路径对熔道成形的影响,通过控制准直气速度使熔道宽度保持稳定,并对不同倾角处曲面熔覆形貌及组织性能进行了详细分析。结果表明,各倾角处曲面熔覆层厚度均匀,截面组织致密,无明显裂纹和气孔,曲面熔覆层与基体结合良好。为实现金属零部件复杂空间曲面修复提供了新方法。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 光内送粉; 机器人; 曲面; 熔覆层形貌; 组织

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0803003

Experimental Research on Curved Surface Cladding Based on Robotic Technology and Inside-Laser Powder Feeding Technology

Jiang Fubing¹ Shi Shihong¹ Shi Tuo² Fu Geyan¹ Zhu Gangxian¹

¹School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

²Tianhong Laser Technology Corporation, Suzhou, Jiangsu 215122, China

Abstract Laser cladding technology is based on horizontal or small-angle reference plane at present. The poor powder converging characteristic when the nozzle is inclined is solved by adopting the technology of “hollow laser beam and internal powder feeding”. The variable postures moving of nozzle with larger inclined angle are realized by controlling laser processing robot. The axis direction of powder feeding nozzle is always coincident with curved surface normal direction. The uniform coating on the curved surface with large inclined angle are accomplished. The forces of molten pool on the curved surface are analyzed. The influences of different inclined angles on molten pool size and scanning path on cladding layer are also analyzed. The width of cladding layer keep stable by controlling the collimating gas rate, and the morphology and performance of curved surface cladding layer with different inclined angles are investigated detailedly. The results show that the thickness of cladding layer is uniform, the section microstructure is dense without obvious cracks and pores and the cladding layer is combined well with substrate. A new method for repairing complex metal parts is provided.

Key words laser technique; laser cladding; inside-laser powder feeding; robot; curved surface; cladding morphology; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2015-02-03; 收到修改稿日期: 2015-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475107,11172191)、江苏省科技支撑计划重点项目(BE2012068)、江苏省自然科学基金(BK2012183)

作者简介: 姜付兵(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆再制造方面的研究。E-mail: jfb203843@163.com

导师简介: 石世宏(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail: shishihong@suda.edu.cn(通讯联系人)

1 引 言

同步送粉法金属零构件任意空间曲面激光熔覆修复技术是激光再制造领域的一个重要研究方向^[1-3]。现有的多粉束倾斜同轴送粉技术在连续变姿态过程中的粉束汇聚平稳性较差,故激光熔覆送粉喷头在大角度(大于30°)范围做空间运动进行曲面熔覆十分困难。目前国内外关于曲面熔覆研究的相关报道较少,与之相关的变姿态/方向激光熔覆包括印度激光材料加工中心 Paul 等^[4]在立面上对套筒外表面进行激光熔覆的试验研究,并探讨了立面熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响规律;德国弗劳恩霍夫材料和光束技术研究所 Nowotny 等^[5]采用基于机器人的三维成形系统,实现了小角度范围内的激光熔覆;天津工业大学杨洗陈等^[6]进行了变角度激光三维直接制造和再制造研究,研制了多种光外多路送粉喷头,并对火车内燃机气门杆进行了激光熔覆再制造;清华大学何金江等^[7]研制了垂直送粉喷嘴和垂直送粉强化系统,实现了缸体缸套内外侧面的强化与修复。

现有技术研究均是针对较小倾斜角度变姿态/方向或稳定立面(90°)单方向进行激光熔覆^[8-9]。在实际工程中,特别对于不便搬运和装夹的大型工程设备^[3],以上熔覆技术难以满足生产要求。本文基于中空激光光内送粉技术,采用本课题组研制的“光内送粉”喷头^[10],用激光机器人夹持该喷头实现了大角度连续变姿态运动,对复杂曲面进行大面积激光熔覆。本文还从熔覆层形貌、金相组织和显微硬度等方面对试验结果进行详细分析,该工艺为实现金属零部件空间修复提供了一种新的方法。

2 试 验

2.1 中空激光光内送粉喷头

文献[10]设计了中空激光光内单粉管同轴送粉喷头,如图1所示,通过光学变换将圆形实心激光变成环锥形中空激光,单根粉管置于中空激光内部,并垂直于成形表面送粉。相比光外多粉束倾斜送粉方式而言,单粉管垂直送粉方式的光、粉、气一体同轴,粉束具有指向性好、无干涉等优点。外层环状准直气对于单根粉束还具有明显的会聚效果,粉束达到细、小、挺、直,能适应空间曲面变角度熔覆要求。

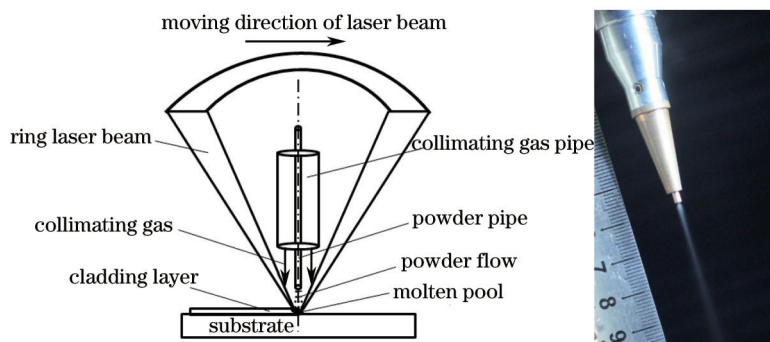


图1 光内同轴送粉喷头示意图及送粉效果图

Fig.1 Schematic of the inside-beam coaxial powder feeding nozzle and powder feeding picture

2.2 试验条件

试验装置由2 kW 光纤激光器、6轴 Kuka 机器人、光内同轴送粉喷头、送粉器及辅助装置组成,试验装置

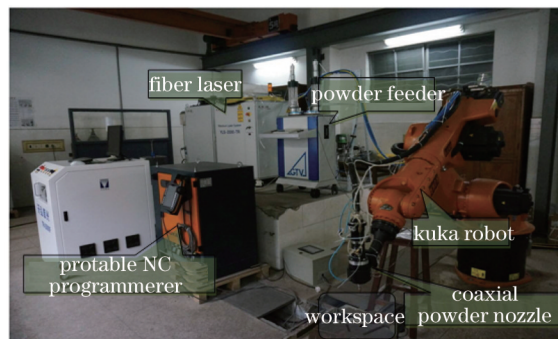


图2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup

如图2所示。

实验用金属粉末为 Fe313, 粉末粒度为 45~74 μm , 其化学成分(质量分数, %)为 0.1C, 2.5~3.5Si, 13~17Cr, 0.5~1.5B, 余量为 Fe; 基体截面设计成两段直线与两段圆弧相连如图3所示, 宽度为 60 mm, 形成待修复曲面。基体材料为 42CrMoV 高强度合金钢, 其化学成分(质量分数, %)为: 0.38~0.45C, 0.8~1.1Cr, 0.25~0.55Mo, 0.15~0.25V, 余量为 Fe。

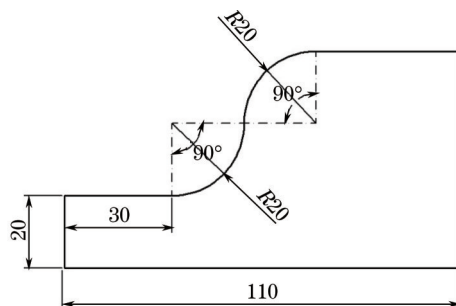


图3 基材横截面尺寸(mm)

Fig.3 Dimension of substrate cross-section (mm)

2.3 试验方法

试验前, 将金属粉末进行烘干以增强粉末流动性, 基材经过砂纸打磨后用乙醇丙酮清洗去除油脂和污渍。试验过程中, 充分利用激光加工机器人高柔性的特点, 将基材放置于水平工作台上, 通过 Kuka 机器人自带的高级编程软件 Orange Edit 进行编程, 控制机器人手臂使其带动送粉喷头行走如图4所示的路径轨迹(其中实线为开光部分, 虚线为关光部分, 锥形框为喷头), 并在运动过程中始终保持喷头轴线沿曲面法线方向, 确保光束和粉束均能垂直曲面进行加工。

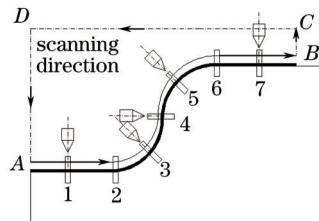


图4 扫描路径示意图

Fig.4 Schematic diagram of scanning path

2.4 试验过程

曲面熔覆过程中, 由重力引起的熔池流淌与滴落以及熔池形貌的改变成为进一步开展研究的难题^[4-5]。试验曲线段熔覆过程中, 曲面熔池受力分析如图5所示, 将熔池作为一个整体主要受到重力 G 、粘性应力 f_{τ} [等效为集中力 $F(\tau)$, 简称为粘性力]、支持力 N 和准直气对熔池表面产生的压力 F (简称为气载压力), 重力作用会改变熔池内部的对流状态, 促使熔池沿斜面向下流淌, 造成熔池凝固形貌始终偏向重力方向一侧, 即产生下垂现象, 而粘性力和熔池表层受到的表面张力将阻碍熔池流淌, 减轻熔池下垂趋势, 且熔池越饱满重力对熔池流淌影响越大, 熔池下垂越明显。因此为避免熔池过于饱满, 试验中送粉量选取送粉器能均匀送粉的最小值, 为 8 g/min。离焦量的选取取决于多角度倾斜送粉时粉末的汇聚长度, 经送粉试验得出送粉喷头在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内送粉时最小汇聚长度为 10 mm, 换算得出此时的离焦量为 -5 mm, 光斑直径为 2.7 mm。采用此送粉量和离焦量, 变功率和扫描速度在平面上进行多次单道预试验, 发现当激光功率为 1200 W, 扫描速度为 6 mm/s 时熔道形貌较好^[11]。

曲面熔覆过程中为避免扫描路径对熔覆层形貌和组织生长产生影响, 确保熔覆层组织生长的一致性, 试验采用有效行程和空行程交替出现的单向连续变姿态扫描方式, 成形熔道下垂现象及单道熔覆层示意图如图5所示, 熔覆过程中液态熔池内部对流会使熔道表面趋于平整, 与平面单道熔覆形貌无明显差别。曲面单道熔覆过程中出现直线段和弧线段熔道宽度不一致的现象如图6所示, 主要是由于弧线段熔池受重力影

响内部对流异于直线段。通过上述熔池受力分析可知,气载压力会对熔池表面产生压迫作用,该压力可部分抵消熔池受重力作用引起的流淌和下垂,使熔池宽度相对稳定,故采用控制准直气速度的方法,改变熔池表面所受的气载压力,使熔池表面受压并趋于平稳,熔道宽度保持稳定。试验中,当准直气速度为 4 m/s 时熔道宽度稳定性最好如图 6 所示。基于上述单道优化参数,并选用搭接率为 30%^[11-12]进行多道搭接试验,共搭接 36 道,曲面熔覆过程中喷头几种典型倾角如图 7 所示,试验优化工艺参数如表 1 所示。

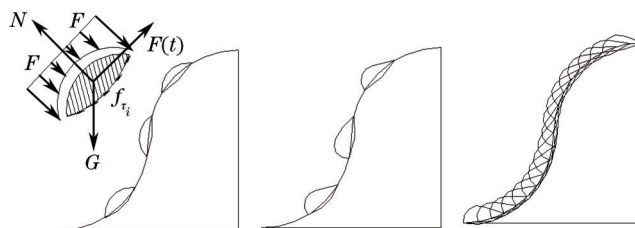


图 5 曲面熔池受力分析及不同倾角处熔池形貌

Fig.5 Force analysis of molten pool on curved surface and morphology of molten pool with different inclined angles



图 6 不同准直气速度下曲面单道宽度

Fig.6 Width of single channel with different collimating gas speeds



图 7 送粉喷头各倾斜角度熔覆

Fig.7 Laser cladding with different powder feeding head inclined angles

表 1 激光熔覆实验工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Laser power /W	Powder mass flow rate /(g/min)	Laser defocusing distance /mm	Scanning speed / (mm/s)	Collimating gas speed /(m/s)	Overlap rate /%
1200	8	-5	6	4	30

试验后将成形试样在如图 4 所示 7 个位置处沿垂直于扫描方向线切割,将横截面打磨抛光腐蚀处理后,在 LEICA DM IRM 型光学显微镜下测量熔覆层宽度 w 、厚度 h 和表面粗糙度 R_a ,运用 Everone MH-5 型显微硬度计测量熔覆层横截面上选取点的显微硬度,并在 HITACHI S-4700 型冷场发射扫描电镜(SEM)下观察其组织形态。

3 结果与分析

3.1 熔覆层形貌与厚度分析

成形熔覆层如图 8 所示,熔覆层表面光亮,无粘粉现象,在光镜下经多次测量得到 7 个试样熔覆层宽度平均值 \bar{w} 为 56.8 mm,与设计成形宽度 55 mm 相比,误差较小;厚度变化如图 9 所示,熔覆层厚度变化较小,基本稳定在 0.68 mm 左右,由于机器人经过拐点 4 时转轴转向发生突变,造成时长约 0.1 s 的停顿,扫描速度降低,因此厚度较大,熔覆层表面粗糙度 R_a 为 0.06 mm,熔覆层展平面积 S 约为 16540 mm²。熔覆层整体形貌较好,成形质量较高。

3.2 熔覆层金相组织分析

对上述 7 个试样的横截面金相组织分别拍摄 SEM 照片,每个试样选取 5 个单道位置进行拍摄,分别为第 1、10、19、28 和 36 道,选取其中第 4 个试样(拐点处)的顶端金相组织 SEM 照片如图 10(a)至图 10(e)所示,选取 7 个试样的第 19 单道的顶端金相组织 SEM 照片依次如图 11(a), 11(b), 11(c), 10(c), 11(d), 11(e)和 11(f)所示,结合

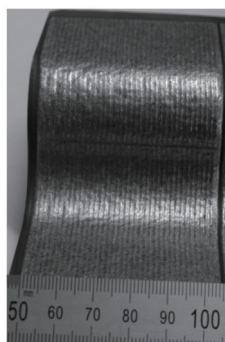


图8 熔覆层实物图

Fig.8 Picture of cladding layer

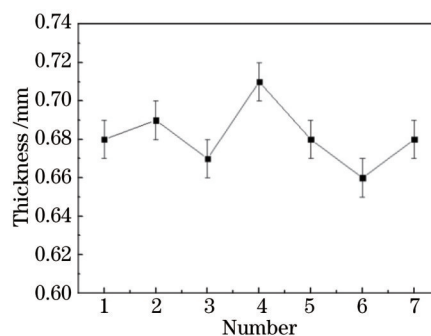


图9 熔覆层厚度

Fig.9 Thickness of cladding layer

区金相组织SEM照片如图12(a)至图12(g)所示。

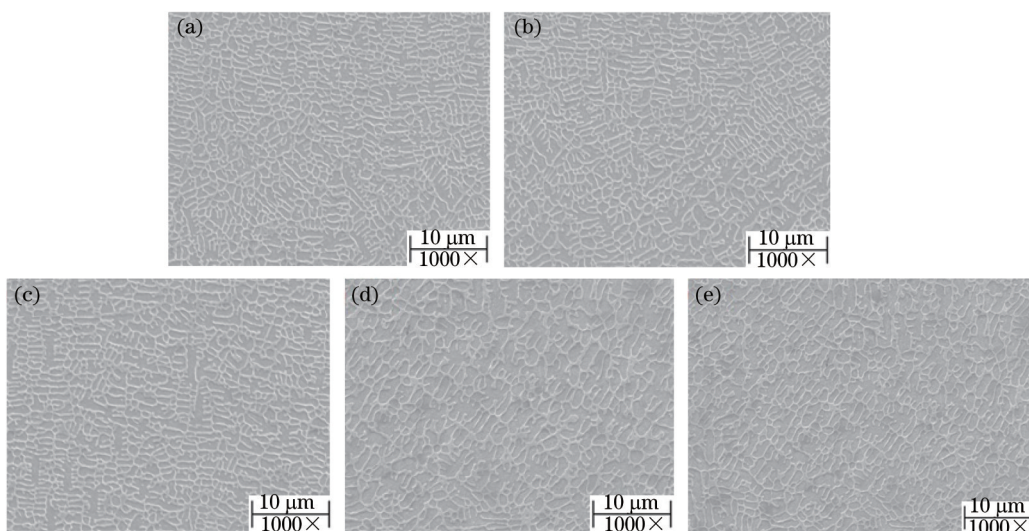


图10 不同道次熔覆层顶端金相组织SEM照片

Fig.10 Top microstructures of cladding layers of different channels

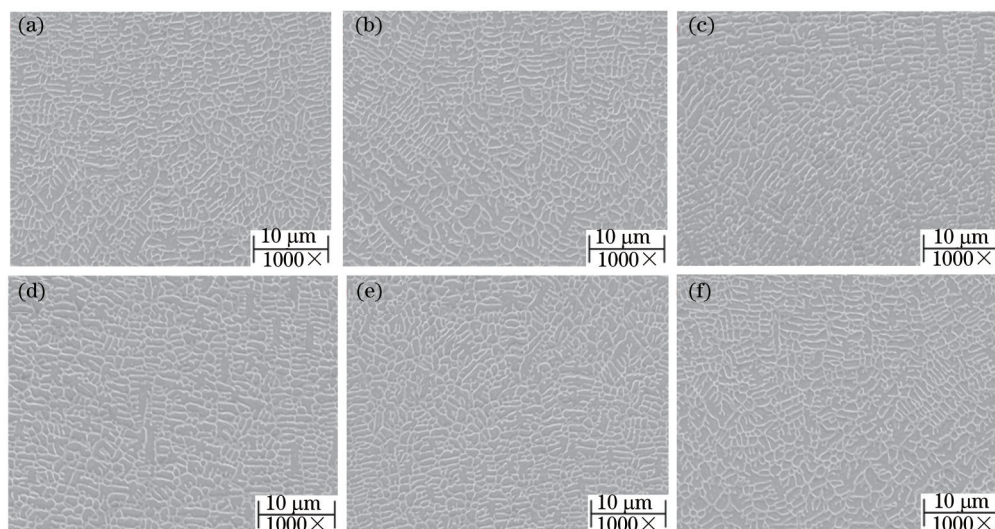


图11 不同位置熔覆层顶端金相组织SEM照片

Fig.11 Top microstructures of cladding layers of different positions

由图10和图11可看出,曲面熔覆层顶端组织均为细小等轴树枝晶,组织均匀、致密,无明显裂纹和气孔。图10反映出随着熔覆道次的增加,曲面熔覆层顶部等轴树枝晶大小受熔池过冷度的影响先由细逐渐变粗,后基本保持不变。图10(c)及图11反映出曲线段熔覆层顶端等轴树枝晶略大于直线段,且拐点处晶粒最

粗,主要由于曲线段熔覆过程中,熔池受重力作用产生倒流,熔池相对光斑滞后,因后方已成形熔覆层温度较高造成熔池寿命略微增长,晶粒尺寸略微变粗,机器人在拐点处停顿造成熔池吸收能量进一步增加,故拐点处晶粒最粗。由图12可看出,不同倾角熔覆层与基体结合良好。曲面熔覆层底部典型柱状晶生长方向始终垂直基材表面沿基材外延生长,熔池散热方向沿基材厚度方向向下。

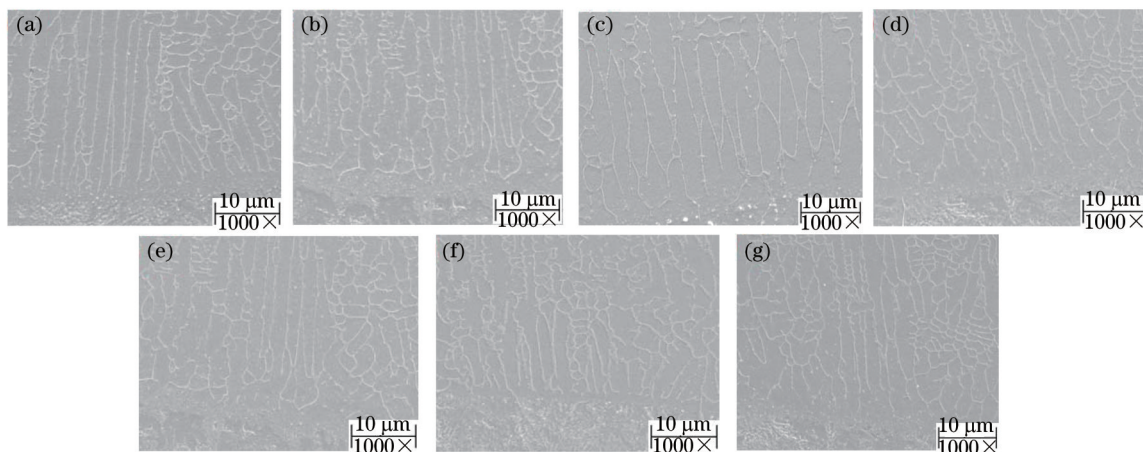


图12 不同位置熔覆层结合区金相组织SEM照片

Fig.12 Bonding zone microstructures of cladding layers of different positions

3.3 熔覆层显微硬度分析

运用显微硬度计对上述7个试样的横截面分别进行显微硬度测量,每个试样距离熔覆层顶端同一高度处取11个点,分别为1、2(第1道中间和第1与第2道搭接区),3、4(第10道中间和第10与第11道搭接区),5、6(第19道中间和第19与第20道搭接区),7、8(第28道中间和第28与第29道搭接区),9、10、11(第35道中间、第35与第36道搭接区、第36道中间),测得显微硬度(HV0.2)如图13所示。

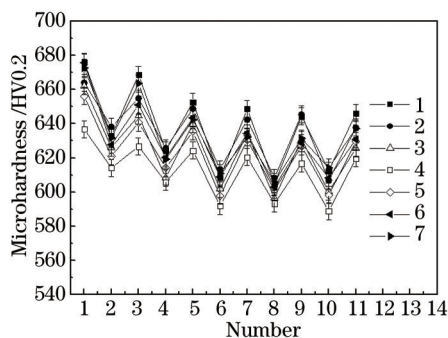


图13 熔覆层显微硬度分析

Fig.13 Microhardness of cladding layer

曲面多道搭接熔覆截面上同一高度处显微硬度维持在640(HV0.2)左右且呈波浪状,明显高于基材硬度350(HV0.2)。搭接重熔区经历二次加热熔化和冷却凝固结晶,故硬度有所降低^[13];比较同一曲线上波峰和波谷可发现,硬度随着熔覆道次的增加先降低后保持稳定,与晶粒尺寸变化规律相符。不同试样同一道次之间比较可得,扫描路径直线段(1、2、6、7)硬度高于弧线段(3、4、5),且弧线拐点(4)处硬度最低。由于扫描过程中熔池受重力作用产生倒流现象^[4],熔池相对于光斑滞后,因后方熔覆层温度较高,熔池寿命略微增长,晶粒尺寸略微变粗,因此弧线段硬度将降低,另外由于拐点4处有停顿,熔池吸收激光能量增加,熔池凝固时间延长,晶粒变粗,故拐点处硬度最低。

4 结 论

基于“光束中空、光内送粉”技术设计的光内同轴送粉喷头实现了光、粉、气一体同轴,空间倾斜送粉过程中外层环状准直气对粉末汇聚效果明显,为实现曲面熔覆奠定基础;通过控制激光机器人夹持送粉喷头

做大角度连续变姿态运动,曲面熔覆过程中始终保持喷头轴线方向与熔覆表面法向重合,确保喷头垂直表面送粉,采用单向连续变姿态扫描方式避免重力引起的曲面熔道下垂对熔道形貌的影响,通过控制准直气的速度,改变熔池表面的气载压力,使熔道宽度保持稳定,最终在大角度倾斜曲面上实现激光熔覆均匀涂层;不同倾角下熔覆层表面皆光亮,厚度均匀,组织均匀、致密,无明显裂纹和气孔,不同倾角处熔覆层与基体结合良好,熔覆层截面显微硬度明显高于基材。但在曲面拐点处扫描速度降低,熔池凝固时间延长,导致熔层硬度略有下降。

参 考 文 献

- 1 Liu Lifeng, Yang Xichen, Wang Fei, *et al.*. Flexible laser remanufacturing system based on robot[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1203003.
刘立峰, 杨洗陈, 王 非, 等. 基于机器人的柔性激光再制造系统[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1203003.
- 2 Yang Xichen, Li Huishan, Liu Yunwu, *et al.*. Laser remanufacturing technology and its industrial application[J]. China Surface Engineering, 2003, 4(4): 43-46.
杨洗陈, 李会山, 刘运武, 等. 激光再制造技术及其工业应用[J]. 中国表面工程, 2003, 4(4): 43-46.
- 3 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan, *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(10): 53-57.
杨洗陈, 李会山, 王云山, 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(10): 53-57.
- 4 Paul C P, Mishra S K, Kumar A, *et al.*. Laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 224: 18-28.
- 5 Nowotny S, Scharek S, Beyer E, *et al.*. Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 344-348.
- 6 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.
- 7 He Jinjiang, Zhong Minlin, Liu Wenjin. Investigation on laser modification with powder feeding for vertical surfaces[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 322-326.
何金江, 钟敏霖, 刘文今. 垂直面送粉激光强化系统与应用研究[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 322-326.
- 8 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.*. Laser cladding forming of round thin walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103006.
王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103006.
- 9 Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial powder feeding technology[J]. Laser and Infrared, 2009, 39(3): 264-266.
郁玲玲, 石世宏, 狄科云. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 264-266.
- 10 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser Forming Manufacturing Process and Nozzle of Inside-Laser Powder Feeding Chinese, 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.
- 11 Tian Meiling. Temperature Field Simulation of Multi-Channel and Multi-Layer stacking and Research of Solid Parts Forming Process Based on Coaxial Inside-Beam Powder Feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2014: 65-72.
田美玲. 光内送粉多道搭接多层堆积实体成形及温度场模拟研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014: 65-72.
- 12 Li Yangliang, Luo Hongmei, Wang Li, *et al.*. Structure and properties of laser cladding with single and overlapping clad tracks on 45 steel[J]. Material & Heat Thermal, 2009, 38(4): 68-70.
李养良, 罗红梅, 王 利, 等. 45钢多道搭接激光熔覆层的组织与性能[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(4): 68-70.
- 13 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 256-291.
黄卫东, 林 鑫, 陈 静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 256-291.

栏目编辑: 张浩佳