

宽带激光内送粉熔覆工艺研究

雷定中¹ 石世宏^{1*} 傅戈雁¹ 贾帅¹ 石拓²

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 215021

摘要 激光宽带熔覆技术广泛应用于大型工件表面的强化、修复和改性, 较少的搭接次数使其更容易获得表面质量较好的熔覆层和较高的熔覆效率。针对现有激光宽带熔覆中光外送粉不精准、金属粉末受热不均匀和光粉同轴耦合精度不高等问题, 本文提出了一种光内送粉激光宽带熔覆工艺及方法, 实现了在宽带激光束内部均匀、准确地垂直于熔池表面送粉。在水平和30°斜壁上分别进行单道堆积熔覆实验。结果表明, 重力对斜壁熔池影响不明显, 两组实验均获得了熔层高度较为均匀的直壁墙。对熔层组织分析可知, 二次重熔区组织较为粗大, 非搭接区组织由较多的树枝晶组成, 二者显微硬度波动值约为90HV_{0.5}, 熔层组织整体较为均匀、致密。

关键词 激光技术; 宽带激光熔覆; 光内送粉; 数值模拟; 斜壁堆积

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1103001

Research of Hollow Broadband Laser Cladding Method

Lei Dingzhong¹ Shi Shihong^{1*} Fu Geyan¹ Jia Shuai¹ Shi Tuo²

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

²Suzhou Tianhong Laser Co., LTD, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Broadband laser cladding technology is widely used in the reinforcement, repair and modification of large surface, and less lap times make it easier to get better quality and the higher efficiency. In order to solve the problems of uneven heating of metal powder and low coaxial coupling accuracy in the current broadband laser cladding, an inside-laser powder feeding broadband laser cladding method has been designed, which can realize uniform powder feeding and exactly perpendicular to the surface of molten pool inside the laser. Two cladding accumulation experiments have been done on the horizontal and 30° inclined walls, and both of them achieve straight wall with uniform height of melt layer. The results show that molten pool is not sensitive to gravity. The microstructure analysis of molten layer shows that the microstructure in secondary remelting zone is relatively coarse, and the microstructure in non-overlapping zone is composed of more dendrites. The microhardness fluctuation of them is about 90HV_{0.5}. The microstructure of the cladding layer is relatively uniform and densification.

Key words laser technique; broadband laser cladding; inside-laser powder feeding; numerical simulation; forming on the inclined wall

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 350.3390; 220.4880; 120.4610

1 引言

激光宽带熔覆主要包括宽带光斑变换、宽带粉末整形和宽斑光粉耦合等几项技术, 其中难度最大且最关键的当属宽斑光粉耦合技术^[1-4]。国内外现有激光宽带熔覆装置均采用光外送粉喷头^[5-7], 送粉喷头位于宽带激光束的单侧或双侧, 熔覆时粉斑和光斑需聚焦于同一平面方可实现激光送粉熔覆。其粉末的会聚和调节比较困难, 光束、粉末和基面的任一方误差都将影响光粉耦合的精度, 结果造成熔层厚度的波动。

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61475107, 50975187)

作者简介: 雷定中(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光特种加工方面的研究。E-mail: LeiDZ870924@163.com

导师简介: 石世宏(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与激光快速制造方面的研究。

E-mail: Shishihong@suda.edu.cn(通信联系人)

本文提出一种光内送粉激光宽带熔覆工艺及方法^[8-12],在激光束内部进行送粉。宽带粉束居中,光束对称分布于粉束两侧,光斑沿熔覆扫描方向分布,可满足来回双向激光宽带熔覆。单个送粉喷头垂直于熔池送粉,粉束始终被激光束包裹,无需调节粉束与激光束的聚焦平面,可以很好地满足对变离焦量加工的要求。

2 光内送粉激光宽带熔覆喷头研制

2.1 熔覆喷头原理

本文采用如图1所示的光路反射整形方案。其中,分光棱镜10包括对称设置的第一分光平面和第二分光平面,第一分光平面和第二分光平面将实心矩形激光束1反射为两个近矩形激光束2。聚焦镜包括第一聚焦镜21和第二聚焦镜22,第一聚焦镜21和第二聚焦镜22的聚焦镜面设置向内凹陷,分别接受第一分光平面和第二分光平面反射的两个近矩形激光束,产生两束聚焦激光束3,聚焦形成位于同一水平面上的第一聚焦光斑41和第二聚焦光斑42,第一聚焦光斑和第二聚焦光斑中间形成有中空送粉通道43。多条细粉管成排组成光内送粉管道80,在保护气的作用下熔覆粉末从粉管的入粉口81送入,从粉管的出粉口82送出,熔覆粉末呈一排送入双线形中空光斑的中间,在激光束内部进行送粉熔覆,从而实现光束包裹粉束。

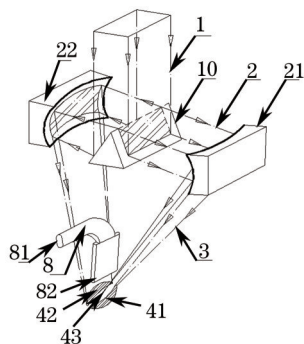


图1 宽带激光内送粉喷头原理

Fig.1 Schematic of inside-laser powder feeding broadband laser cladding nozzle

如图2所示这种光内送粉方式具有以下特点:1)聚、离焦耦合不变性,粉束相对光束居中,光束全程包裹粉束,因此无论在焦点位置还是在离焦位置[图2(b)中截面1到截面4],光束、粉末皆可共轴精确耦合,且因粉末浓度基本不变而保证了送料流量基本恒定;2)粉末利用率较高,聚焦后的光斑为双线形光斑,可以在激光束内部采用单个送粉喷嘴,并且垂直于熔池送粉,有利于熔池捕获运动的粉末,提高了金属粉末的利用率;3)光内送粉喷头垂直于熔池表面送料,粉束在下落过程中不会过早地与光束发生干涉,光束反射损失小,较小的粉束发散,可减少熔道表面未熔粘附颗粒量,提高熔覆层表面质量,降低多层堆积熔覆时造成熔覆层内部缺陷几率,进而提高成形件质量。

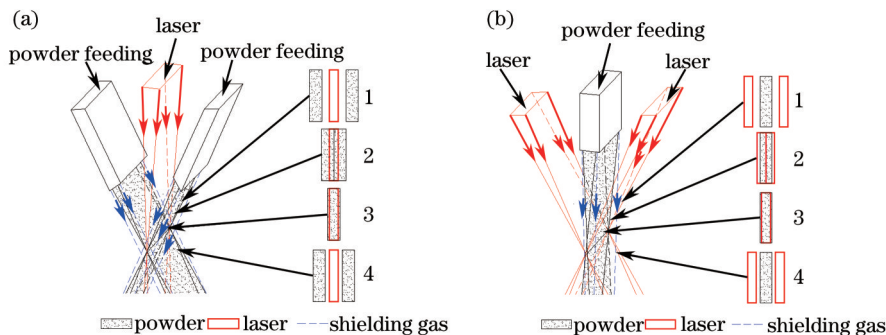


图2 光粉耦合示意图。(a)光外送粉;(b)光内送粉

Fig.2 Coupling of laser and powder. (a) Outside-laser powder feeding; (b) inside-laser powder feeding

2.2 熔覆喷头研制

根据上述研究分析,选用材料Cu235来加工分光棱镜和聚焦面镜,经热处理定型后,对镜组受光表面进行镀金,以增加镜面对激光的反射率。研制所得分光、聚焦面镜如图3(a)所示,光内送粉激光宽带熔覆喷头

如图 3(b)所示。

图 3(c)所示为熔覆喷头底部,①和③所示矩形区域为激光束出射口,半导体激光器发出的实心矩形光斑,经过本文研制的分光面镜和聚焦面镜后,形成左右对称的两束矩形激光束,分别通过①和③所示出口辐照待熔覆基板,在基板上形成双线形聚焦光斑。图中②所示为送粉喷头,其内部矩形口为粉末流道,外部回形口为准直气、保护气流道。图中④所示为熔覆喷头的冷却装置,内部设有冷却水路,对喷嘴部分进行冷却。

图 3(d)所示为熔覆系统图,熔覆喷头通过连接装置安装于 Dilas 3 kW 半导体激光器出光口上,用于接收半导体激光器发射的矩形激光束,半导体激光器在 Kuka 机器人的夹持下进行宽带熔覆。

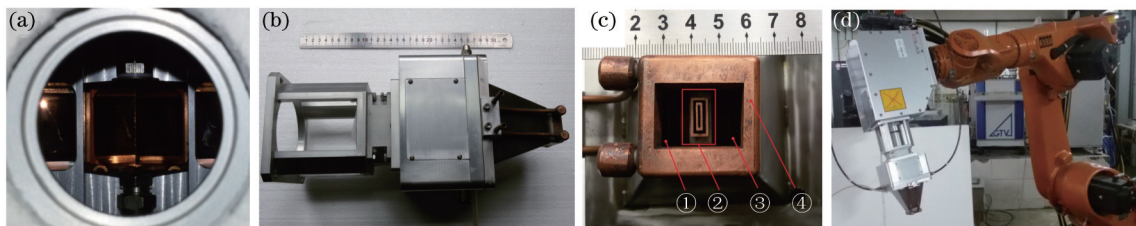


图 3 宽带激光熔覆装置。(a) 光学镜片;(b) 熔覆喷头;(c) 喷头下端面;(d) 熔覆系统

Fig.3 Broadband laser cladding device. (a) Optical lens; (b) laser cladding nozzle; (c) bottom of nozzle; (d) cladding system

2.3 聚焦光斑光能分析

采用 TracePro 软件中光束轨迹追踪分析功能和辐照度分析模块,对光内送粉激光宽带熔覆喷头所形成的光路进行仿真分析,研究其聚焦光斑光通量 W 分布情况^[3]。在 TracePro 软件建立镜面三维数学模型如图 4(a)所示。分光棱镜和聚光面镜的底平面均置于 XZ 坐标平面上,平行于 XZ 坐标平面且在 Y 轴坐标为 40 mm 的位置处设置一矩形光斑,定义发光功率为 1 kW,光斑沿 Y 轴负方向垂直辐照,光斑尺寸为 22 mm×13 mm,且沿 X 轴方向光斑大小为 13 mm。定义分光面镜和聚焦面镜对激光的吸收率为 1%,待熔覆基材表面对激光的吸收率为 80%,计算结果如图 4(b)~(d)所示。

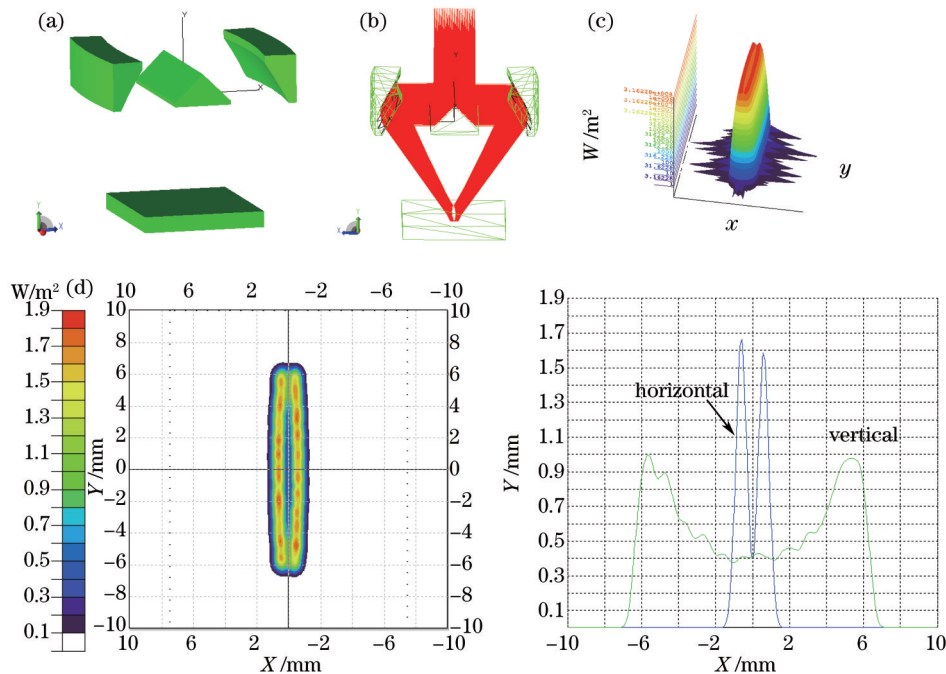


图 4 计算结果。(a) 计算模型;(b) 光束轨迹;(c) 聚焦光斑光通量值;(d) 基板表面光通量值

Fig.4 Calculation results. (a) Calculation model; (b) laser beam path; (c) focusing light flux values; (d) substrate surface flux values

观察图 4(b)可知,聚焦所得光斑形状可以实现在激光束内部安装送粉喷嘴;如图 4(c)所示,聚焦所得光斑为中空的双线形光斑,聚焦光斑的光通量均匀分布,即基板所接收的聚焦光斑光能呈均匀的平顶分布;由图 4(d)可知,仿真计算所得光斑形貌较好地满足了光内送粉熔覆的要求,水平剖面方向可见光斑的光通量呈“双峰”状,而且“双峰”较为狭长,激光能量分布较为集中,所设计的聚焦镜面具有较好的聚光效果;由于中

空光斑内部存在间隙,光斑呈月牙形分布,中间距离较两端远,导致沿垂直剖面方向光斑的光通量呈较平缓的“双峰”状。

3 堆积熔覆实验

3.1 光粉耦合实验

采用GTV PF2/2M型送粉器进行送粉实验,送粉转速为6.0 r/min,载气压力为 $P_1=0.300$ MPa,载气流量为 $Q_1=4.0$ L/min,设定准直气载气量 $Q_2=12.9$ L/min,准直气压力 $P_2=0.307$ MPa。采用粒度为100~200目(74~149 μm)的Fe313合金粉末,进行送粉和光粉耦合实验,实验结果如图5、6所示^[14-16]。

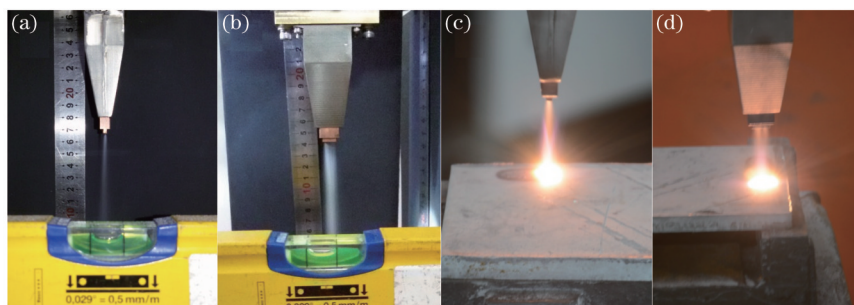


图5 水平基板实验。(a) 粉末侧面;(b) 粉末正面;(c) 光粉耦合侧面;(d) 光粉耦合正面

Fig.5 Experiment on horizontal wall. (a) Powder beam profile; (b) powder beam main view; (c) cladding profile; (d) cladding main view

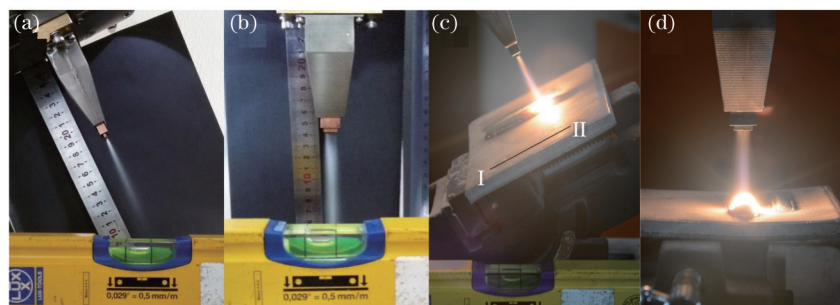


图6 倾斜基板实验。(a) 粉末侧面;(b) 粉末正面;(c) 光粉耦合侧面;(d) 光粉耦合正面

Fig.6 Experiment on inclined wall. (a) Powder beam profile; (b) powder beam main view; (c) cladding profile; (d) cladding main view

观察图5和6可知,在距离送粉喷嘴20 mm处,可获得在长度和宽度方向会聚性俱佳的均匀矩形粉束,可以实现对13 mm的宽带熔池内部送粉,为光内送粉激光宽带熔覆工艺提供了技术支持。

对比图5和图6,随着倾斜角度的增大,粉末侧面的发散现象并不明显,会聚性均较佳。由于双侧矩形光束包裹粉束,倾斜熔覆时,粉末虽然存在微弱的发散,但是粉末始终处于激光束内部。实验结果表明,本文研制的光内送粉宽带熔覆喷头的光、粉同轴耦合精度较高,可用于宽带激光斜面修复和成形。

3.2 熔覆工艺参数选择

3.2.1 单道熔覆参数

采用激光功率 $P=2.2$ kW,扫描速度 $V=2$ mm/s,送粉速率 $V_s=19.51$ g/min,进行光内送粉激光宽带单道熔覆实验,实验所得单道熔覆层如图7所示。熔覆层表面未粘附过多杂质,较为平整、光洁。分析可知,由于本

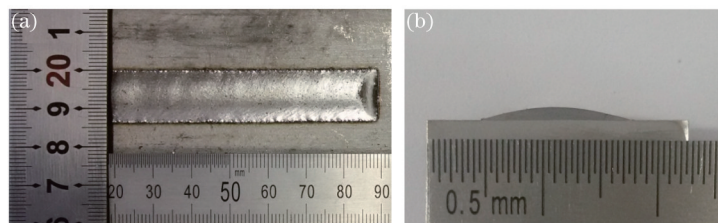


图7 单道熔覆层照片。(a) 熔覆层形貌;(b) 熔覆层截面

Fig.7 Single-channel cladding layer. (a) Cladding layer photos; (b) sectional view of cladding layer

实验采用双线形的聚焦光斑进行宽带熔覆,熔池所接收的光能呈较为均匀的平顶分布,有利于形成较好的熔层。同时,采用光内送粉工艺,使得粉末在下落过程中不会过早与光束发生干涉,激光束反射损失小;较小的粉末发散,可减少熔道表面未熔粘附颗粒量,从而提高了熔覆层表面质量。

3.2.2 提升量的确定

使用 Matlab 软件对单道熔覆层截面照片(图 7b)进行图像处理,得到如图 8(a)所示的单道熔覆层截面函数曲线。通过 Matlab 软件对单道熔层图形进行垂直方向叠加计算,可得图 8(b)所示函数图形。在保证填充区面积相等的情况下,计算熔层高度坐标,可知提升量为 0.8 mm 时较为合适。

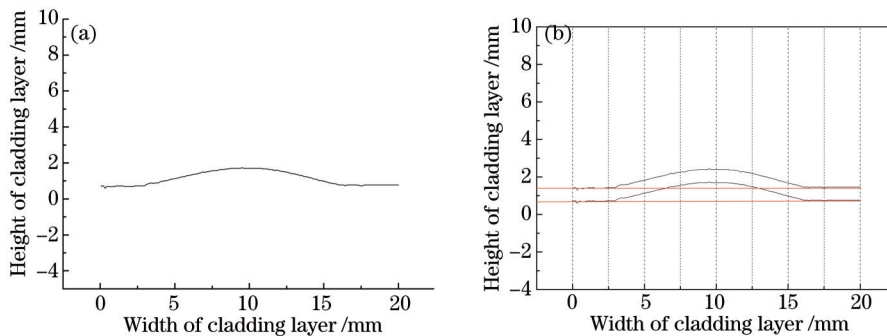


图 8 提升量的计算。(a) 熔覆层截面函数曲线; (b) 提升量函数曲线

Fig.8 Calculation of increase quantity. (a) Curve graph of cladding layer; (b) curve graph of increase quantity

3.3 堆积熔覆实验

采用激光功率 $P=2.2$ KW,扫描速度 $V=2$ mm/s,送粉速率 $V_s=19.51$ g/min,提升量为 0.8 mm 进行单道堆积熔覆实验。水平基板堆积熔覆 25 层所得直壁墙如图 9 所示,30°斜壁表面堆积熔覆 13 层所示直壁墙如图 10 所示。

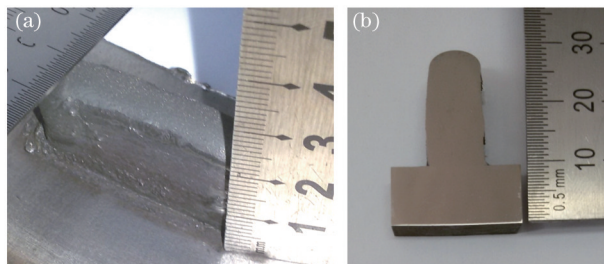


图 9 水平基板熔覆实验。(a) 熔层形貌; (b) 熔层截面

Fig.9 Cladding experiments on horizontal wall. (a) Cladding layer photos; (b) sectional view of cladding layer

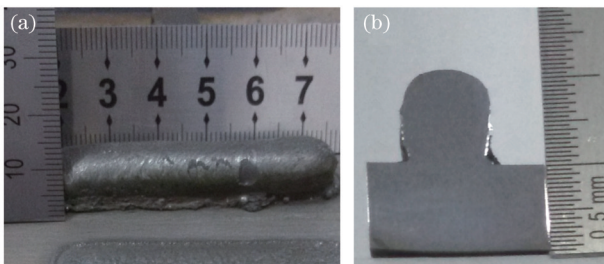


图 10 倾斜基板熔覆实验。(a) 熔层形貌; (b) 熔层截面

Fig.10 Cladding experiments on inclined wall. (a) Cladding layer photos; (b) sectional view of cladding layer

4 实验结果分析

4.1 熔覆层截面金相组织分析

为了深入了解堆积所得单道直壁墙的性能,现对熔覆层搭接区和非搭接区拍摄金相照片,结果如图 11 和图 12 所示。

观察图 11 和 12 搭接区组织照片可知,两者搭接区组织较为相近,由表层向基体依次划分为①~④四个区

域。其中,④为第一道熔覆层靠近基体的结合区,靠近基体的组织主要由柱状晶组成,硬度较低;远离基体的组织由沿垂直于熔道壁生长的树枝晶组成,硬度偏高。图中③所示区域为第一道熔覆层的次表层,在搭接熔覆过程中未被第二道熔池熔化,保留了熔覆层次表层组织较为细小的特征。图中②所示区域为搭接的重熔区,第一道熔覆层的表层被第二道熔池熔化、再结晶。由于第一道熔覆时已将基体的温度升高,再次熔覆时,熔池与基体的温差减小,致使搭接区的组织由等轴晶、柱状晶和少量树枝晶组成,组织整体较为粗大。图中①所示区域为远离搭接区的第二道熔覆层的中间层区域,受二次搭接的影响较小,组织整体比较细小。

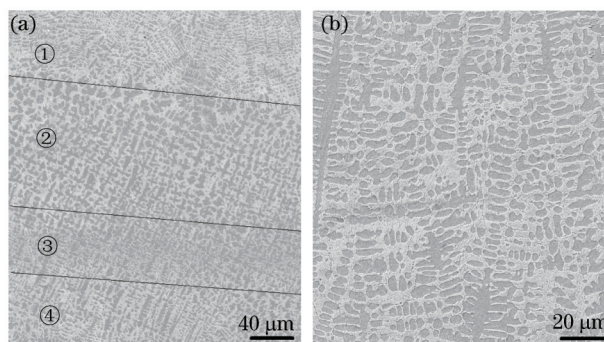


图 11 水平基板熔层金相照片。(a) 搭接区; (b) 非搭接区

Fig.11 Metallographic photos of cladding layer which on the horizontal wall. (a) Overlapping zone; (b) non-overlapping zone

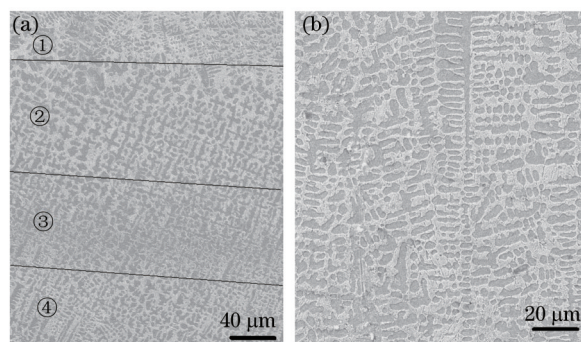


图 12 倾斜基板熔层金相照片。(a) 搭接区; (b) 非搭接区

Fig.12 Metallographic photos of cladding layer which on inclined wall. (a) Overlapping zone; (b) non-overlapping zone

4.2 熔覆层宏观形貌分析

1) 水平基板单道直壁墙显微硬度分析

水平基板单道直壁墙共堆积了 25 层,从与基材相熔合的底层开始,使用 MH-5 型显微硬度仪,载荷为 500 g,加载时间为 15 s,依次检测 10 层熔覆层。每层从搭接区至次表层,检测 4 个位置,依次标号为 1~40。每一检测点附近检测 3 次,取其平均值绘制成图 13 所示硬度趋势图。

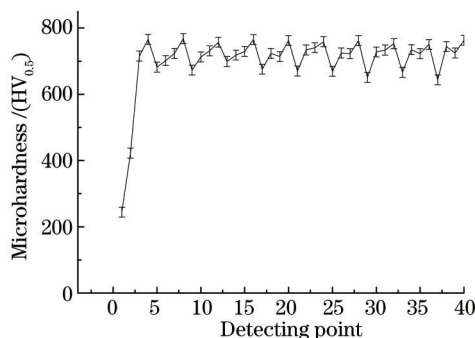


图 13 熔层显微硬度

Fig.13 Microhardness of cladding wall

通过显微硬度检测可知,整个直壁墙垂直方向硬度值呈周期性波动,总体较为均匀。其中基材硬度较低约为 230HV_{0.05};由于搭接区组织存在二次重熔,硬度值较低,而且随着搭接次数的增加,基体温度升高,二

次重熔区组织硬度越低;熔层次表层冷却速度较快,硬度值较高;重熔区与次表层显微硬度波动值约为90HV_{0.5},熔层整体硬度较为均匀。

2) 斜壁基板熔层高度检测

为了研究基板倾斜时重力对熔覆层高度的影响,按照图6(c)中从I至II方向,对熔层高度进行检测,绘制成图14所示熔层高度趋势图。观察图14所示熔层高度趋势,熔覆层整体高度比较均匀,波动较小。受到重力的影响,靠近熔池起始端[图6(c)中I点],熔层高于理论值,熔池末端[图6(c)中II点]熔层高度低于理论值。随着熔覆的进行,基板温度升高,熔池凝固时间变长,熔池受重力影响变的明显,熔池末端熔层高度低于理论值较熔池起始端多。

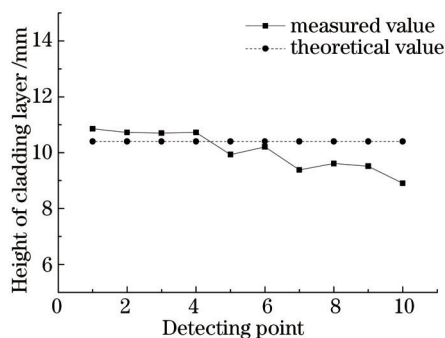


图14 熔层高度趋势图

Fig.14 Distribution of the cladding wall height

5 结 论

1) 提出了一种宽带粉末居中、光束位于粉末两侧的光内送粉激光宽带熔覆工艺及方法,设计了光内送粉激光宽带熔覆喷头方案,实现了在激光束内部均匀、垂直地向熔池表面送粉熔覆的工艺。

2) 采用研制的光内送粉激光宽带熔覆喷头,在水平基面和30°斜面上分别堆积熔覆,均获得了高度均匀的直壁墙,重力对斜壁熔池影响不明显。通过熔覆层组织分析、显微硬度的检测可知,搭接区组织较非搭接区粗大、硬度低,非搭接区组织主要由较小的树枝晶组成,熔覆层组织整体较为均匀。

3) 堆积熔覆实验表明本文研制的光内送粉激光宽带熔覆喷头在平面、斜面的堆积成形方面都具有较好效果,为空间立体成形、修复提供了一种新的工艺和装置。

参 考 文 献

- Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
黄卫东, 林 鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- Liu Shuang, Kong Fanrong, Shi Shihong, *et al.*. Study of a hollow laser beam for cladding, 2014, 73(1-4): 147-159.
- Zhan Huanxiao, Wang Yong, Li Chaowen, *et al.*. Computational and experimental study of a melt-hardened zone on a roller modified by wide-band laser treatment[J]. Optics and Laser Technology, 2009, 41(3): 251-257.
- Santhanakrishnan S, Kong F, Kovacevic R. An experimentally based thermo-kinetic hardening model for high power direct diode laser cladding[J]. Mater Process Technol, 2011, 211(7): 1247-1259.
- Badkar D S, Pandey K S, Buvanashakaran G. Application of the central composite design in optimization of laser transformation hardening parameters of commercially pure titanium using Nd: YAG laser[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1-4): 169-192.
- Luo Jiangtao, Guo Hong, Liang Erjun, *et al.*. Wide-band laser cladding of Ni-based alloy[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(10): 957-959.
雒江涛, 郭 洪, 梁二军, 等. 镍基合金的宽带激光熔覆[J]. 中国激光, 2001, 28(10): 957-959.
- Yang Jiaoxi, Zuo Tiechuan, Xu Wenqing, *et al.*. The fabrication of high-speed wire rolls by wide-strip laser cladding cemented carbide[J]. Applied Laser, 2006, 26(6): 369-371.
杨胶溪, 左铁钊, 徐文清, 等. 宽带激光熔覆制造高速线材硬质合金辊环术[J]. 应用激光, 2006, 26(6): 369-371.

- 8 Li Yuanyuan, Liu Jichang. Effects of the gas flow and the defocusing distance from laser beam focus on powder feed laser cladding [C]. SPIE, 2010, 7843: 78431s
- 9 Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.*. Research on the coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0403003.
王 维, 才 磊, 杨 光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0403003.
- 10 Shi Shihong, Fu Geyang, Wang Anjun, *et al.*. Forming the inside-laser coaxial powder feeding laser cladding and the inside-laser coaxial powder feeding nozzle[P]. Chinese Patent: 200610116413. 2010-07-21.
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[P]. 中国专利: 200610116413, 2010-07-21.
- 11 Shi Shihong, Fu Geyang, Lei DingZhong. A hollow laser beam for broadband laser cladding method and device[P]. Chinese Patent: 201310300229.2, 2013-07-18.
石世宏, 傅戈雁, 雷定中. 一种矩形激光光斑聚焦的实现方法及装置[P]. 中国专利: 201310300229.2, 2013-07-18.
- 12 Liu Shuang, Kovacevic Radovan. Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5-8): 867-878.
- 13 Zhao Lihua, Dai Chaoqing. Design and research of light source's condenser structure based on Zemax and Tracepro software[J]. Experimental Technology and Management, 2013, (11): 90-92.
赵丽华, 戴朝卿. 基于 Zemax 和 Tracepro 软件光源聚光结构设计与研究[J]. 实验技术与管理, 2013, (11): 90-92.
- 14 Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. Influence of deposited layer's structure on flow field of coaxial powder feeding nozzle [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1636-1642.
朱刚贤, 李涤尘, 张安峰, 等. 沉积层结构对同轴送粉喷嘴粉末流场的影响规律[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1636-1642.
- 15 Hu XiaoDong, Zhu LiQiang, Yao JianHua. Design of lateral powder nozzle for broad beam laser cladding[J]. Light Industry Machinery, 2014, 32(3): 10-12.
胡晓冬, 祝立强, 姚建华. 激光宽带熔覆侧向送粉喷嘴设计[J]. 轻工机械, 2014, 32(3): 10-12.
- 16 Li Chaowen, Wang Yong, Zhan Huanxiao, *et al.*. Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in wide-band laser surface melting processing[J]. Materials and Design, 2010, 31(7): 3366-3373.

目编辑: 宋梅梅