

面向薄壁件的激光熔覆修复工艺参数优化研究

张富祯, 孙文磊, 王恪典, 张冠

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: **目的** 减少薄壁零件激光熔覆修复时基板的变形量, 提高成形质量。**方法** 在前期单道单因素试验的基础上, 通过三因素三水平正交试验在 2 mm 厚的 45 钢上熔覆 FeI 合金粉末, 分析了激光功率、扫描速度和送粉率对薄板变形行为的影响, 并根据因素效应图分析基体变形量随各因素水平的变化, 找出出现这种变化的原因。通过正交试验的极差分析提出了基体变形的公式, 根据公式确定各因素对基体变形影响的主次关系, 并根据变形结果, 最终找到使基板变形最小的最优工艺参数。通过光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和显微硬度计, 研究最优工艺参数下熔覆层的显微组织和硬度, 并对在最优工艺参数下熔覆的试件进行成形质量评价。**结果** 影响基板变形的因素主次顺序依次为: 激光功率、扫描速度和送粉率。基板变形量最小且冶金结合良好的最佳工艺参数为: 激光功率 600 W, 扫描速度 12 mm/s, 送粉率 1.2 r/min。此工艺下所得熔覆层的最高硬度达到 348HV, 约是基体硬度的 1.6 倍。**结论** 该工艺参数可以有效减少基体的变形且激光熔覆成形质量良好, 基体表面得到显著强化。

关键词: 激光熔覆; 参数优化; 正交试验; 基板变形; 显微组织

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0168-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.022

Optimization of Laser Cladding Repair Process Parameters for Thin-wall Parts

ZHANG Fu-zhen, SUN Wen-lei, WANG Ke-dian, ZHANG Guan

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the deformation of the substrate during laser cladding repair of thin-wall parts, and improve the forming quality. On the basis of previous single channel and single factor test, FeI alloy powder was cladded on 2 mm thick 45 steel by three factors and three level orthogonal test, and the influences of laser power, scanning speed and powder feeding rate on the deformation behavior of sheet metal were analyzed. According to the factor effect diagram, the changes of the substrate deformation along with the factors level were also investigated and the corresponding reason was found out. The formula of the deformation of the substrate was put forward by the extreme analysis of the orthogonal test. According to the formula, the main and secondary relation of the influence on the substrate deformation caused by the factors was determined, and the optimum process parameters to minimize the substrate deformation were finally found out according to the deformation

收稿日期: 2018-07-11; 修订日期: 2018-09-03

Received: 2018-07-11; Revised: 2018-09-03

基金项目: 新疆维吾尔自治区高技术研究发展项目 (201513102)

Fund: The Xinjiang Uygur Autonomous Region High Tech Research and Development Project (201513102)

作者简介: 张富祯 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为薄壁零件表面激光熔覆修复。

Biography: ZHANG Fu-zhen (1990—), Male, Master, Research focus: laser cladding repair on the surface of thin wall parts.

通讯作者: 王恪典 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为特种加工技术及装备。邮箱: kdwang@xjtu.edu.cn

Corresponding author: WANG Ke-dian (1967—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: special processing technology and equipment.
E-mail: kdwang@xjtu.edu.cn

results. The microstructure and hardness of the cladding layer under the optimal process parameters were studied by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and microhardness tester, and the molding quality of the cladding layer under the optimal process parameters was evaluated. The factors affecting the substrate deformation were laser power, scanning speed and powder feeding rate in order. The optimal process parameters to minimize the substrate deformation and realize good metallurgical bonding were 600 W laser power, 12 mm/s scanning speed and 1.2 r/min powder feeding rate. The maximum hardness of the cladding layer under such process was 348HV (about 1.6 times of the substrate hardness). The process parameters can effectively reduce the substrate deformation, ensure the good laser cladding quality and strengthen the substrate surface significantly.

KEY WORDS: laser cladding; parameter optimization; orthogonal test; substrate

激光熔覆技术是指在高能激光束的作用下,使合金粉末熔凝在基体表面,达到良好冶金结合的表面强化技术^[1-4]。如今,激光熔覆技术已广泛用于零件的表面强化和破损零件的修复,但对于激光熔覆修复薄壁型零件变形行为的研究却鲜有报道^[5-8]。薄壁型零件是一种常见的特征形式,如航空发动机叶片、机匣、燃烧室等都属于薄壁型零件。在服役过程中,这些零件由于磨损或腐蚀而容易导致报废^[9]。虽然激光熔覆技术较其他技术而言造成的工件变形较小,但对于壁厚较小的薄壁型零件,在进行激光熔覆表面修复时,如何使变形量得到精确的控制,仍然是一项富有挑战性的工作。高士友等^[10]研究了激光沉积直薄壁件时的基体变形情况,测量了沉积时基板的变形和温度,并探讨了基板的变形机理,但并未通过实验的方法得到优化的工艺参数。罗明贤等^[11-12]采用数值模拟的方法,研究激光熔覆应力/位移场的分布,发现熔覆层及其周围区域产生了塑性变形,而剩余区域仅发生刚性位移,并且模拟了激光扫描速度对基板变形行为的影响,但并未通过实验的方法验证模拟结果的准确性。本文用正交试验的方法结合因素效应图研究了激光功率、扫描速度和送粉率对基体变形的影响,由正交试验的极差值提出基体变形公式,并根据基体变形公式确定各因素对基体变形影响的主次关系。此

外,根据实验结果分析变形产生的原因,找到既符合基体变形量小,又能够使熔覆层冶金结合良好的最佳工艺参数,并对最佳工艺参数熔覆的试件进行成形质量分析。

1 实验条件和方法

1.1 实验设备

本实验所使用的设备有:YSL-2000 的 IPJ 光纤激光器(最大输出功率为 2000 W)、NHL-V 型三坐标测量机、蔡司高级金相显微镜、GSM-6700F 场发射扫描电镜和 HV-1000 型数字显微硬度计。

1.2 试验材料

熔覆的基体材料为 45 钢,基体试样的尺寸为 100 mm×80 mm×2 mm。熔覆粉末为 Fe1 粉末。Fe1 粉末和 45 钢主要化学成分如表 1、2 所示。实验前用砂纸将 45 钢表面的锈迹和污染物去除干净,再用无水乙醇或者丙酮清洗钢板表面,并将其表面烘干,防止表面杂质和锈迹对实验结果产生干扰^[13]。对 Fe1 粉末进行隔绝空气干燥处理,防止粉末因为受潮导致熔覆层产生气孔等缺陷。熔覆时用氮气作保护气体。

表 1 45 钢主要化学成分
Tab.1 Main chemical composition of 45 steel

wt. %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
0.004~0.005	0.002~0.004	0.005~0.008	≤0.003	≤0.003	≤0.003

表 2 Fe1 的主要化学成分
Tab.2 Main chemical composition of Fe1

wt. %					
C	Si	Cr	Ni	Mo	Tb
0.025~0.037	0.004~0.006	0.065~0.110	0.033~0.054	0.008~0.012	0.019~0.025

1.3 试验方法

设计正交试验,选取的因素为激光功率、扫描速度、送粉率,试验探究的结果为熔覆层厚度方向的变

形量。每个因素水平的选择都是基于前期单因素水平的基础设计的。本实验采用三因素三水平的正交试验方法,具体正交实验方案如表 3 和表 4 所示。

表 3 因素水平设计表
Tab.3 Factor level design table

Level	Factor		
	Laser power A/W	Scanning speed B/(mm·s ⁻¹)	Feeding rate C/(r·min ⁻¹)
1	600	8	0.8
2	800	10	1.0
3	1000	12	1.2

表 4 正交试验方案表
Tab.4 Orthogonal test scheme table

Samples	Factor A	Factor B	Factor C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

由于薄壁件在熔覆过程中易出现角变形、弯曲变形和扭曲变形等多种交叉的变形,像传统的测量厚板变形的方 法(如弯曲角测量法)等不适合薄壁件变形的测量。因此,为了测量激光熔覆完成后基体的变形量,在 45 钢熔覆面的另一面画上网格,测量所画网格节点的坐标,基体上画的网格节点分布如图 1 所示^[14]。

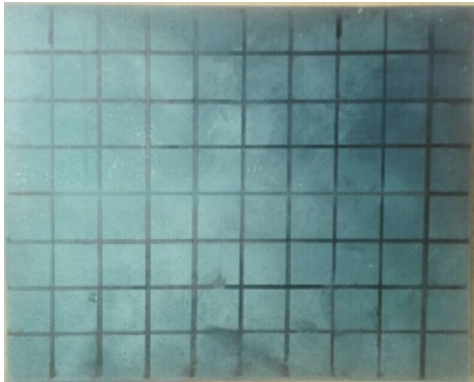


图 1 网格节点图
Fig.1 Grid node diagram

由于试验所用的 45 钢表面光滑平坦,可以将 45 钢表面各点的变形量近似看成零,即其变形为 0.000 mm。因此,其他节点测量的数值与参考平面的差值即可认为是激光熔覆所引起的沿厚度方向的变形量(文献[15]的研究结果认为,在激光熔凝实验中,试样的最大弯曲变量发生在试样厚度方向上,因此本文主要研究在试样厚度方向上的弯曲变形)。

将激光熔覆后的试件固定在专用夹具上,测量激光熔覆后试样背面网格点的坐标值。每块样件共计测量 99 个节点。为对比九组试验基体变形量的大小,将测量数据中较大的 10 个值列出,并求其平均值,如表 5 所示。

九组试验厚度方向的变形均值可用图 2 表示,从图中可以清晰地看出,第 7 组试验沿厚度方向变形最大,第 3 组试验变形最小。

表 5 厚度方向的变形数据
Tab.5 Deformation data in the direction of thickness

Measuring point numeber	mm								
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
1	0.563	0.528	0.451	0.776	0.780	0.745	1.001	0.928	0.904
2	0.577	0.552	0.457	0.809	0.791	0.757	1.042	0.934	0.914
3	0.596	0.568	0.465	0.827	0.794	0.783	1.044	0.940	0.915
4	0.603	0.584	0.468	0.836	0.799	0.786	1.048	0.948	0.929
5	0.641	0.605	0.499	0.848	0.802	0.797	1.060	0.955	0.943
6	0.643	0.611	0.510	0.851	0.827	0.806	1.065	0.963	0.945
7	0.689	0.635	0.523	0.857	0.834	0.809	1.081	0.977	0.958
8	0.706	0.670	0.545	0.886	0.839	0.827	1.089	0.981	0.965
9	0.717	0.682	0.563	0.908	0.841	0.828	1.091	0.996	0.974
10	0.745	0.695	0.569	0.932	0.853	0.841	1.109	0.998	0.983
Average	0.648	0.613	0.503	0.853	0.816	0.798	1.063	0.962	0.943

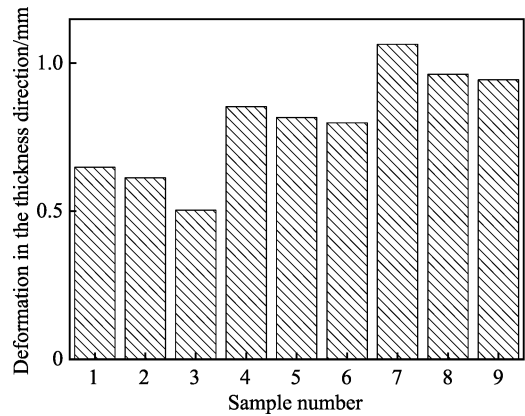


图 2 变形均值对比图
Fig.2 Contrast diagram of average deformation

2 结果与讨论

2.1 熔覆形貌

按照正交试验表中的方案进行试验，所得九组实验结果的宏观形貌如图 3 所示。从图中可以看出，九组试验熔覆层表面光亮且平整，无表面裂纹，基本无未熔化粉末，熔覆效果良好。

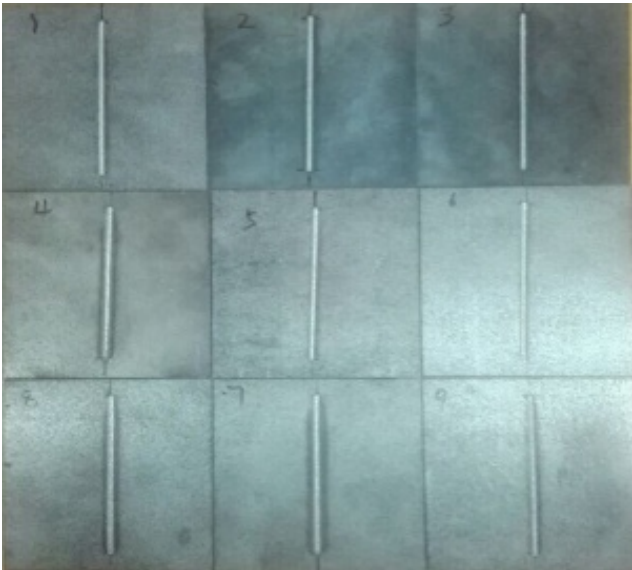


图 3 不同参数下激光熔覆的宏观形貌
Fig.3 Macroscopic morphology of experimental results under different parameters

2.2 工艺参数优化

2.2.1 影响因素

表 6 是对正交试验厚度方向平均变形量的极差分析表。图 4 为三个因素的效应关系。由于激光熔覆技术是一种快速熔化快速冷却的技术，沿基体纵向的温度梯度很大，在冷却时，基体和粉末的膨胀系数不同，在残余应力等各种应力的作用下，基体易变形^[16]。

激光功率、扫描速度和送粉率的改变都会影响到基体对激光能量的吸收，从而影响基体的温度，进而影响到基体沿厚度方向的变形量。

表 6 正交试验对变形量的分析结果
Tab.6 Analysis of deformation quantity by orthogonal test

Experimental index	Laser power	Scanning speed	Feeding rate
K1	0.588	0.855	0.803
K2	0.822	0.797	0.803
K3	0.989	0.748	0.794
Extremum	0.401	0.107	0.009
Optimal level group	A1B3C3		

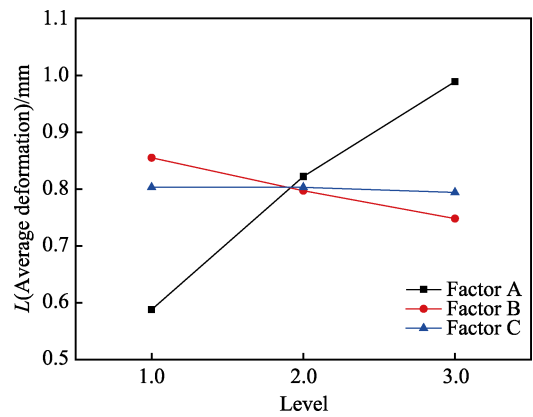


图 4 因素效应关系
Fig.4 Factor effect relationship

激光功率在 600~800 W 时，基体沿厚度方向的变形量逐渐增大，其中，激光功率为 600 W 时，基体沿厚度方向的变形量最小。主要原因是，随着激光功率的增大，基体在单位时间内、单位面积上接受的能量就越大，基体的温升越快，材料的屈服极限逐渐减小，沿厚度方向形成的温度梯度随着激光功率的增加而逐渐增大，因此基体变形量逐渐增大。

扫描速度从 8 mm/s 增加到 12 mm/s 时，基体沿厚度方向的变形量逐渐减小。其中，扫描速度为 12 mm/s 时，厚度方向的变形量最小。原因是，扫描速度增加，激光与基体相互作用的时间减少，导致单位时间内，同一位置基板吸收的能量减少，使沿厚度方向形成的温度梯度随扫描速度的增加而逐渐减小，因此基板变形量逐渐减小。

送粉率在 0.8~1.2 r/min 时，基体沿厚度方向变化的幅度很小，表明送粉速度对基体变形的影响较小。虽然粉末既可以吸收激光能量，又对激光具有遮挡作用，但因为本试验中送粉率较小，对激光的吸收和遮挡作用有限，因此送粉率对基体的变形量影响较小。

2.2.2 因素主次

根据表 6 中基体厚度方向变形极差分析可知，三个因素的极差值为 0.401、0.107、0.009。现把 3 种参

数对基体变形的影响分别按极差值转化成影响系数,定义基体的变形公式为:

$$\varphi = A\alpha + B\beta + C\gamma \quad (1)$$

式中:激光功率影响系数 α 为77.6%;扫描速度影响系数 β 为20.7%;送粉率影响系数 γ 为1.7%。根据基体的变形公式和三个因素的影响因子,可以明显地看出,3个因素影响基体变形的主次顺序依次为:激光功率、扫描速度和送粉率。

2.2.3 工艺参数优化

从以上分析可以看出,3个因素的优化水平分别为1,3,3,正好是试样3。据此可获得变形量最小的优化工艺参数为:激光功率600 W,扫描速度12 mm/s,送粉率1.2 r/min。

2.3 硬度及显微组织分析

经过极差分析可知,试验3所得的试件基体变形量最小,因此对试验3的试件进行硬度和显微组织分析。金相试样的制备包括线切割取样、镶嵌、磨片、抛光等步骤,用制备好的硝酸酒精和 FeCl_3 溶液对经过抛光的金相试样进行适度腐蚀。制取3号试件后,从熔覆层的表面往基体方向每隔0.1 mm测量一次显微硬度,图5为熔覆层从表面到基体的显微硬度变化情况。从图5可以看出,熔覆层显微硬度的总体变化趋势为:熔覆层硬度明显高于基体;靠近表层的硬度稍低,中部硬度最高,可达348HV;接近冶金结合区后,显微硬度明显下降,直到下降到基体硬度后,达到稳定状态。出现上述变化的原因是,在熔覆层顶部,由于散热渠道多,生成自由生长的树枝晶,且由于空气的影响,形成了氧化膜,导致表层硬度降低;在熔覆层中部,散热渠道较少,受到外部环境的影响较小,易于形成更加致密细小的组织,使显微硬度高于顶部;在冶金结合区,基体经过对流传质,合金粉末与基体互溶,结合区的成分因此发生较大变化,从而导致结合区的硬度高于基体,低于熔覆层,起到过渡作

用。硬度测试表明,熔覆层的最高硬度约是基体的1.6倍,表明经过激光熔覆,基体的显微硬度明显得到提高。

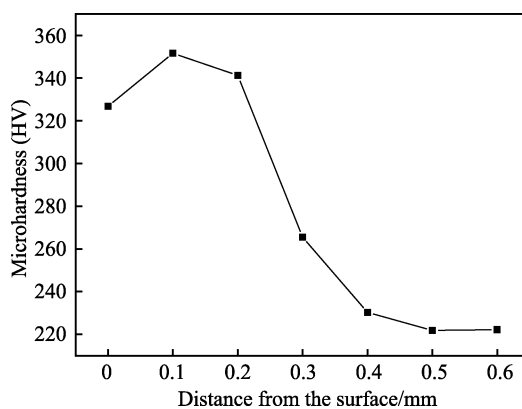
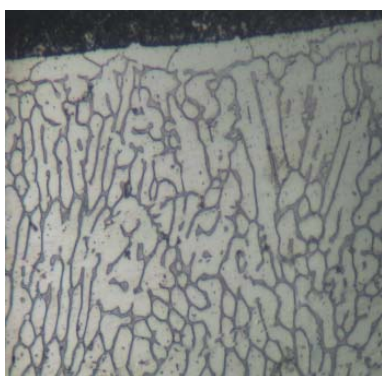
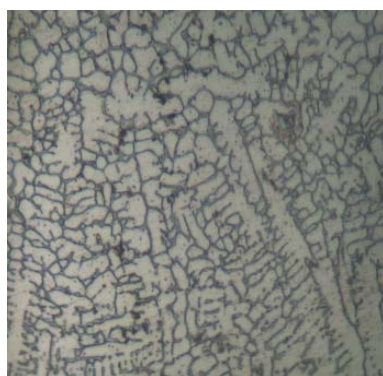


图5 熔覆层的显微硬度
Fig.5 Microhardness of cladding layer

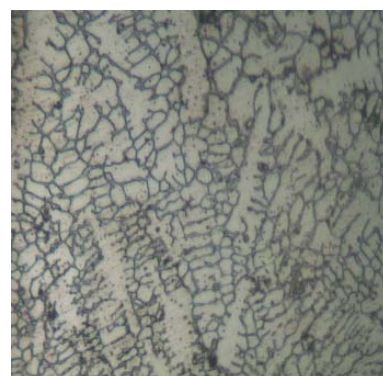
图6为3号试样熔覆层典型组织形貌。从图6分析可知,整个熔覆层均无较大的气孔、裂纹等缺陷,且随着熔覆层深度的变化,组织形貌是渐变的。图6a为熔覆层与基体集合区的组织形貌,分别由基体结合区及熔覆层三部分组成。从图中可以清晰地看到,熔覆层和基体结合区之间存在明显的白色分界带。这是因为,在熔池快速凝固过程中,基体和熔覆层间温度梯度最大,凝固速率趋近于0,因此在基体表面生长出连续生长的平面晶带,这说明基体表面与熔覆层间形成了良好的冶金结合。随着凝固的进行,由于熔池底部液态金属与固态基体之间有较大的附着阻力,使得对流难以进行,此时,单向散热起主要作用,导致靠近基体的组织沿垂直于界面的方向外延生长,形成胞状结构晶粒。图6b所示为熔覆层中部树枝状枝晶,从图6b可以看出晶粒排列方向较为一致。这是因为熔覆层与基体结合区的亮带形成后,阻碍了中部组织与基体的热量传递,同时中部组织主



a 熔覆层与基体结合处 (400×)



b 熔覆层中部 (400×)



c 熔覆层顶部 (400×)

图6 熔覆层显微组织

Fig.6 Microstructure of cladding layer: a) junction between cladding layer and substrate (400×); b) middle layer of cladding layer (400×); c) top of cladding layer (400×)

要通过基体一侧散热, 受外部环境的影响较小, 散热渠道较少, 不易与空气等外部介质发生热交换, 热量损失较慢, 有利于晶体组织的生长, 且形成单一方向生长的枝晶。图 6c 所示为熔覆层顶部的枝晶和胞状晶, 从图 6c 可以看出晶粒排列呈现多样化。这是因为顶部与空气接触后, 热量损失大, 在对流散热和已凝固合金热传导的双重作用下, 凝固速度最大, 易于形成新的晶核。从图 7 熔覆层的 SEM 照片也可以看出, 熔覆层组织致密, 无裂纹, 熔覆效果良好。

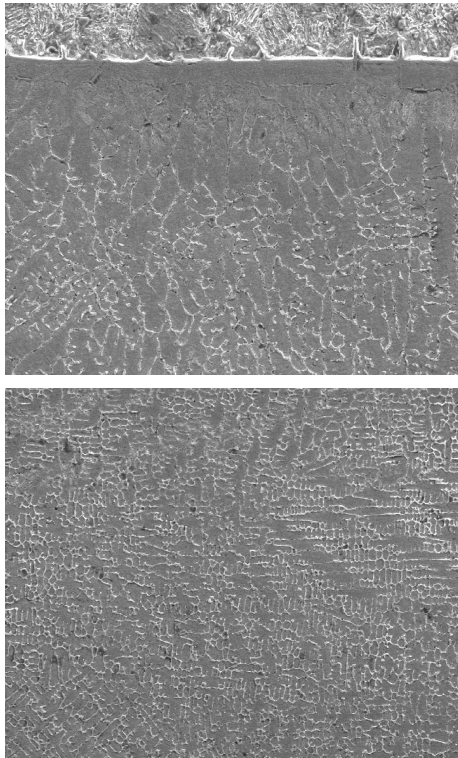


图 7 熔覆层 SEM 图 (1000×)

Fig.7 SEM photos of cladding layer (1000×)

3 结论

1) 通过正交试验分析可知, 不同的工艺参数对基体变形的影响不同。在本实验中, 随着激光功率的增加, 沿基体厚度方向的变形逐渐增加; 随着扫描速度的增加, 变形逐渐减小; 送粉率对变形幅度的影响不大。

2) 各工艺参数影响基体变形的主次顺序为: 激光功率>扫描速度>送粉率。基体变形最小而且能形成良好冶金结合的最佳工艺参数为: 激光功率 600 W, 扫描速度 12 mm/s, 送粉率 1.2 r/min。

3) 最优工艺参数下, 熔覆层内部组织连续致密, 未产生明显的裂纹和气孔等缺陷。熔覆层最高硬度达到 348HV, 约为基体硬度的 1.6 倍, 基体表面硬度显著提高, 达到薄壁件修复的硬度要求, 这为薄壁件修复时基板变形的控制提供了重要的理论基础。

参考文献:

- [1] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
ZHU Gang-xian, ZHANG An-feng, LI Di-chen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2010, 37(1): 296-301.
- [2] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 激光熔覆零件破损边界提取和形状还原研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 675-679.
WANG Xin-long, SUN Wen-lei, ZHANG Jian-jie, et al. Study on damage boundary extraction and shape reduction of laser cladding parts[J]. Laser technology, 2017, 41(5): 675-679.
- [3] 黄勇, 孙文磊, 陈影. 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 45-51.
HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying. Research on laser remanufacturing method of complex shaft parts based on NURBS interpolation[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(5): 45-51.
- [4] HOFMAN J T, LANGE D F, PATHIRAJ B, et al. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding[J]. Journal of materials processing technology, 2011, 211: 187-196.
- [5] 李亚敏, 范福杰, 韩锦玮. 工艺参数对激光熔覆 718 合金涂层的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 7-14.
LI Ya-min, FAN Fu-jie, HAN Jin-wei. Effect process parameters on laser-cladded 718 alloy coating[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 7-14.
- [6] 钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 388-391.
ZHONG Min-lin, NING Guo-qing, LIU Wen-jin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components[J]. Laser technology, 2002, 26(5): 388-391.
- [7] 郑必举, 魏金宇, 蒋业华, 等. 激光熔覆 NiCoFeCrTi 高熵合金涂层及其耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 432-435.
ZHENG Bi-ju, WEI Jin-yu, JIANG Ye-hua, et al. Wear property of NiCoFeCrTi high entropy alloy coating by laser cladding[J]. Laser technology, 2016, 40(3): 432-435.
- [8] 罗奎林, 郭双全, 何勇, 等. 激光熔覆修复航空发动机风扇机匣 TC4 钛合金静子叶片[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 141-146.
LUO Kui-lin, GUO Shuang-quan, HE Yong, et al. Repairing TC4 titanium stator blade of aero-engine fan casing by laser cladding[J]. China surface engineering, 2015, 28(6): 141-146.
- [9] 任德亮, 林齐, 李婷, 等. 冷作模具曲面激光熔覆修复工艺及路径研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 54-60.
REN De-liang, LIN Qi, LI Ting, et al. Laser cladding repair technology and path of cold-worked dies[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 54-60.

- [10] 高士友, 咸士玉. 激光直接沉积过程中基板变形分析[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 57-61.
GAO Shi-you, XIAN Shi-yu. Analysis of substrate deformation in the process of laser direct deposition[J]. Journal of plasticity engineering, 2007, 14(5): 57-61.
- [11] 罗明贤. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺热-力耦合数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 73-74.
LUO Ming-xian. Numerical simulation of thermal-mechanical behavior during laser cladding 316L stainless steel powder[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 73-74.
- [12] KRZYZANOWSKI M, BAJDA S, LIU Y J, et al. 3D analysis of thermal and stress evolution during laser cladding of bioactive glass coatings[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2016, 59: 404-417.
- [13] 张德强, 张吉庆, 李金华, 等. 离焦量对 45#钢表面激光熔覆镍基碳化钨粉的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 92-97.
ZHANG De-qiang, ZHANG Ji-qing, LI Jin-hua, et al. Effect of defocusing amount on laser cladding of self-fluxing Ni-based WC on 45# steel surface[J]. Surface technology, 2015, 44(12): 92-97.
- [14] 梁荣著. 三坐标测量机的设计、使用、维修与检定[M]. 北京: 中国质检出版社, 2001.
LIANG Rong-ming. Design, operation, maintenance and verification of three coordinate measuring machines[M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2001.
- [15] 黄金开, 谢长生, 许德胜. 薄板模具钢脉冲 Nd: YAG 激光熔凝试样变形量的测量[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 750-754.
HUANG Jin-kai, XIE Chang-sheng, XU De-sheng. Deformation measurement of thin plate die steel during pulsed Nd: YAG laser remelting[J]. Chinese journal of lasers, 2003, 30(8): 750-754.
- [16] 姜伟, 胡芳友, 黄旭仁. 工艺参数对激光熔覆微观形貌的影响[J]. 表面技术, 2007, 36(4): 57-58.
JIANG Wei, HU Fang-you, HUANG Xu-ren. The influence of craft parameter on the microstructure by CO₂ laser cladding[J]. Surface technology, 2007, 36(4): 57-58.