

激光熔覆 Ni35WC11 涂层的参数优化设计

井振宇, 李新梅*

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

摘要 为了得到激光熔覆 Ni35WC11 涂层的最优工艺参数,采用单因素控制法,以激光功率、送粉量、扫描速度三种工艺参数作为控制变量,将熔覆层的稀释率、高度和宽度作为参考指标,进行了正交极差分析。结果表明:送粉量、扫描速度、激光功率对参考指标的影响逐渐减小;通过单因素和正交分析得到的最优参数为激光功率为 1500 W,送粉量为 2 g/s,扫描速度为 4 mm/s。根据该参数制作样本,得到的熔覆层硬度为 710 HV 左右,自腐蚀电位为 -0.72 V,自腐蚀电流密度为 0.96 A/cm²,表明了在最优化参数下得到的熔覆层硬度高、组织均匀、耐腐蚀性强。

关键词 激光熔覆; 正交试验; 参数优化; 熔覆层组织; 耐腐蚀

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.091406

Parameter Optimization Design of Laser Cladding Ni35WC11 Coating

Jing Zhenyu, Li Xinmei*

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

Abstract In order to obtain optimal process parameters of the laser cladding Ni35WC11 coating, a single factor control method is adopted. Three process parameters, including laser power, powder feeding rate and scanning speed, are used as control variables. The dilution ratio, height and width of the cladding layer are used as reference indexes for orthogonal range analysis. The results show that the influences of powder feeding rate, scanning speed and laser power on the reference indexes decrease gradually. The optimal parameters obtained by single factor and orthogonal analysis are laser power of 1500 W, powder feeding rate of 2 g/s and scanning speed of 4 mm/s. Samples are prepared according to these parameters. The hardness of the as-prepared cladding layer is about 710 HV, the self-corrosion potential is -0.72 V, and the self-corrosion current density is 0.96 A/cm², indicating the cladding layer obtained under optimal parameters has high hardness, uniform structure, and strong corrosion resistance.

Key words laser cladding; orthogonal experiment; parameter optimization; cladding layer structure; corrosion resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.1340

1 引言

激光熔覆技术利用高能激光束辐射使 Ni 基合金粉末发生熔化、冷凝现象,以获得良好冶金结合的熔覆层,是一种新型表面强化和修复技术^[1-4]。该技术可提高零件表面的耐磨性和耐腐蚀性,但对海水腐蚀环境下的研究相对较少。Ni 基合金粉末属于自溶性粉末,因其熔点、密度、热膨胀系数与钢铁基

体接近,形成的合金层热稳定性好,且在熔化时具有很好的润湿性,有利于获得热应力小、致密性和平整性良好的熔覆层,对提高合金层的耐腐蚀性有重要意义^[5-6]。杨晓红等^[7]在 45 钢表面熔覆了 Ni35 粉末,通过模拟海水的工作情况,探究了熔覆层的耐磨性和耐腐蚀性。结果表明,熔覆层与基体形成了良好的冶金结合,且熔覆层的自腐蚀电位正向偏移,增强了熔覆层的耐磨性和耐腐蚀性。李涌泉等^[8]在

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-08-23; 录用日期: 2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51865055, 51561029)、新疆自治区天山英才计划(201720025)

* E-mail: 837487013@qq.com

45 钢表面熔覆了 Ni 合金粉末,发现熔覆层的耐磨性和耐腐蚀性均有增强,但这些研究没有通过工艺参数优化的方式获得更准确的结果。

本文采用单因素控制变量法和正交试验法,以 45 钢为基体,熔覆了 Ni35WC11 合金粉末(按照 100 g 总质量中,Ni35 占 89 g,碳化钨占 11 g 的比例),研究了激光功率、送粉量和扫描速度对熔覆层的影响。根据极差法得到熔覆层的质量指标,确定了三个因素的主次关系,找到最优工艺参数,最后对熔覆层性能进行了验证。

2 试验材料与设备

试验采用尺寸为 15 cm×6 cm×0.8 cm 的 45 号钢板,先进行抛光处理,再用 600 号砂纸打磨平整,最后用超声波和乙醇清洗,用吹风机吹干,存放在干燥箱;选用球状 Ni35 粉末,粒度为 150~270 目(53~106 μm),碳化钨为 150~270 目,按照粉末配比进行烘干,采用 KQM 行星式球磨机搅拌均匀,如图 1 所示;采用德国 KUKA 机器人 YLS-2000 作为主要运动机构,最大输出功率 $P=2000$ W,保护气体为氮气;采用 HXD-1000TB 型显微维氏硬度计测试涂层硬度,压头载荷为 200 N,加载时间为 15 s;采用 CHI660E 电化学工作站,三电极体系中参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂(Pt)电极(尺

寸为 1 mm×1 mm),用于在样品上熔覆 Ni35WC11。腐蚀溶液是质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液。试验参数:初始电位为 -1.5 V,终止电位为 1 V,扫描电压为 2 mV/s。

将镍粉末和碳化钨粉末按照配比混合均匀,通过扫描电镜可以看到混合后的微观形貌如图 1 所示,其中,较大圆球状为镍,较小的为碳化钨。

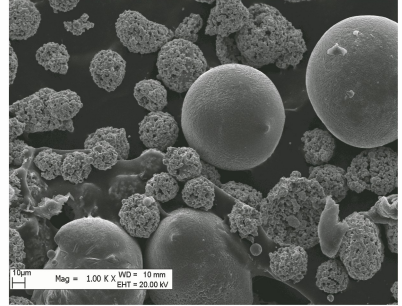


图 1 Ni35WC11 混合粉末

Fig. 1 Ni35WC11 mixed powder

3 试验方法

3.1 单道单因素控制法

采用同步送粉方式,依次改变激光功率、送粉量、扫描速度三个工艺参数。根据熔覆层的形貌、稀释率、硬度、存在的缺陷等指标,初步选取最好的工艺参数,如表 1 所示。

表 1 单因素试验参数

Table 1 Single factor experimental parameters

Sample	Laser power /W	Feeding rate /(g·s ⁻¹)	Scanning speed /(mm·s ⁻¹)	Spot diameter /mm
1	900	2	4	2
2	1100	2	4	2
3	1300	2	4	2
4	1500	2	4	2
5	1600	2	4	2
6	1500	1	4	2
7	1500	3	4	2
8	1500	2	3	2
9	1500	2	5	2

根据表 1 中的参数进行试验,发现激光功率为 900~1300 W 时,熔覆层表面存在未熔化的粉末颗粒,导致表面不光整,截面存在较多气孔;当功率为 1500 W 时,熔覆层表面相对光整,且截面没有气孔和未熔的颗粒,稀释率较好;当功率为 1600 W 时,单道熔覆层出现裂纹,原因是激光功率增加导致熔覆层内产生了热应力。可以发现,激光功率为 1500 W 时,熔覆层为最优状态。

在功率不变情况下,送粉量过多或过少都会导致

粉末熔化不完全,熔覆层的宽度和高度也会受到影响,当送粉量为 1 g/s 时,熔覆高度较低,且熔池深度较深。当送粉量为 3 g/s 时,熔覆层凸起,且未与基体结合,存在缺陷,因此试验将送粉量确定为 2 g/s。

扫描速度对涂层润湿角(熔覆层与基体的接触的界面和液态表面切线的夹角)的影响最大,也会导致粉末熔化不完全。随扫描速度的增加,热输入量会减少,导致熔覆层润湿角减小,扫描速度过大时,热输入量更少,导致粉末未完全熔化。当扫描速度

为3 mm/s时,熔覆层润湿角较大,导致熔覆层表面张力增大。当扫描速度为5 mm/s时,润湿角减小,导致熔覆层出现裂纹,因此试验将扫描速度确定为4 mm/s。

3.2 正交试验法

采用三因素三水平正交试验方法,选取激光功率、送粉量、扫描速度为影响因素,以熔覆层的宽度、高度、稀释率作为检验依据,得到的数据如表2和表3所示。表3的中1、2、3为每个因素(A对应激光

功率, B对应送粉量, C对应扫描速度)均有三水平(实际有27组,表中只给出了9组示例)。

表2 试验因素水平表

Table 2 Level table of experimental factor

Factor	Laser power /W	Feeding rate /($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	Scanning speed /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
Level 1	1400	1.8	3.5
Level 2	1500	2.0	4.0
Level 3	1600	2.2	4.5

表3 正交组合和检验指标

Table 3 Orthogonal combination and test indicators

Sample	Factor A	Factor B	Factor C	Width /mm	Height /mm	Rate of dilution /%
1	1	1	1	3.5	1.7	14
2	1	2	2	3.4	2.1	6
3	1	3	3	3.6	2.3	7
4	2	1	2	3.4	1.6	12
5	2	2	3	3.3	2.2	11
6	2	3	1	4.4	3.3	4
7	3	1	3	3.2	1.4	19
8	3	2	1	4.1	2.9	6
9	3	3	2	3.9	2.7	6

将九组设计好的正交试验数据,采用激光熔覆技术,以单道形式熔覆出来,每个熔覆层的长度为50 mm,间隔为10 mm,具体形貌如图2所示。

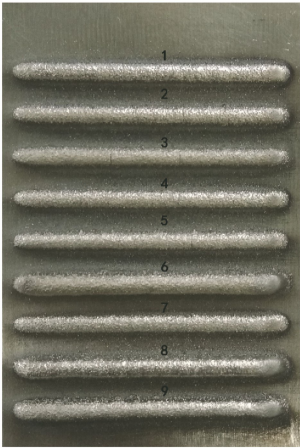


图2 正交熔覆层

Fig. 2 Orthogonal cladding layer

熔覆层的宽度、高度、稀释率作为评价熔覆层好坏的重要指标,三者之间相互关联。稀释率过小时,熔覆层与基体结合力不足,会出现开裂现象;稀释率过大时,熔覆层的元素渗出,熔池加深,会导致熔覆层的性能下降^[9-11]。稀释率常用截面积求解,因测量面积时误差较大,为了减小误差,将面计算法转化为高度计算法,即熔覆层的宽度与熔覆层的面积存在一定对应关系^[12]。

通过测量熔覆层首部、中间部、尾部的宽度,多次测量求取平均值,分别记录每个因素对应水平为1、2、3的试验结果总和(即 K_1 、 K_2 、 K_3 对应值),取 K_1 、 K_2 、 K_3 的平均值 k_1 、 k_2 、 k_3 ,用 R 表示 k_1 、 k_2 、 k_3 的最大值与最小值的差值。具体数据如表4所示,因素对熔覆层宽度的影响如图3所示。

表4 宽度极差

Table 4 Range of width unit: mm

Target	Statistic average	Factor A	Factor B	Factor C
	K_1	10.5	10.1	12.0
	K_2	11.1	10.8	10.7
	K_3	11.2	11.9	10.1
Width	k_1	3.5	3.4	4.0
	k_2	3.7	3.6	3.6
	k_3	3.7	4.0	3.4
	R	0.2	0.6	0.6

由表4和图3可以看出,因素B和因素C的极差值都为0.6 mm,这说明两个因素对熔覆层宽度都有较大影响。从图3中可以发现因素B对熔覆层宽度的影响呈递增趋势,而在 K_1 与 K_2 之间,因素A的影响较大,之后有所减弱,这表明送粉量和扫描速度是影响熔覆层宽度的主要因素,激光功率占次要因素。由于因素B与因素C在图中交于 K_2 点,因此实际情况中送粉量和扫描速度的最优水平值是

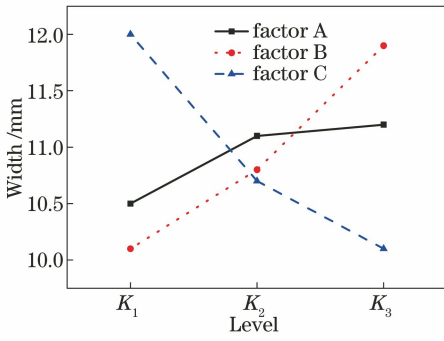


图3 因素对熔覆层宽度的影响

Fig. 3 Influence of factors on cladding layer width

A2B2C2(因素与水平对应值)。

按相同的方法,测量熔覆层首部、中间部、尾部的高度,多次测量求取平均值,得到的数据如表5所示,因素对熔覆层高度的影响如图4所示。

表5 高度极差

Table 5 Range of height unit: mm

Target	Statistic average	Factor A	Factor B	Factor C
Height	K_1	6.1	4.7	7.9
	K_2	7.1	7.2	6.4
	K_3	7.0	8.3	5.9
Height	k_1	2.0	1.6	2.6
	k_2	2.4	2.4	2.1
	k_3	2.3	2.8	2.0
	R	0.4	1.2	0.6

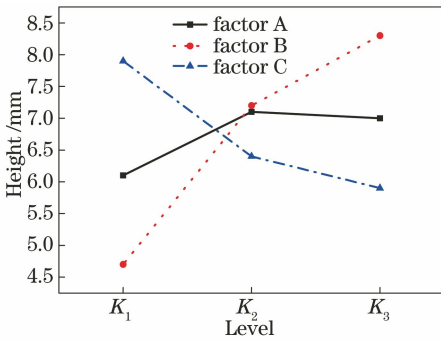


图4 因素对熔覆层高度的影响

Fig. 4 Influence of factors on cladding layer height

从表5和图4中可以看出,因素B的极差为1.2 mm,与其他两个因素相比对熔覆层高度的影响较大。从图4中可以发现因素B呈增长趋势,且增幅较大,而因素A逐渐趋于水平。这表明熔覆层高度主要受送粉量的影响,其次为扫描速度,最后为激光功率。因素A与因素B交于 K_2 ,再结合熔覆层的实际效果,得到最优水平值是A2B2C1。

按相同的方式,测量熔覆层截面的高度,如图5所示,具体数据如表6所示,因素影响关系如图6所示。

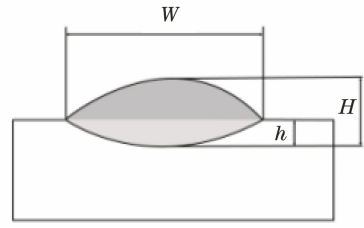


图5 熔覆层宽、高和熔池深度的测量方式

Fig. 5 Measurement methods of cladding layer width, height and pool depth

$$\eta = \frac{h}{h + H} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, η 为熔覆层稀释率, W 为熔覆层的宽度(mm), H 为熔覆层的高度(mm), h 为基体的熔深(mm)。

表6 稀释率极差

Table 6 Range of dilution rate unit: %

Target	Statistic average	Factor A	Factor B	Factor C
Dilution rate	K_1	27.0	45.0	24.0
	K_2	27.0	23.0	24.0
	K_3	31.0	17.0	37.0
	k_1	9.0	15.0	8.0
	k_2	9.0	7.6	8.0
	k_3	10.3	5.6	12.3
	R	1.3	9.4	4.3

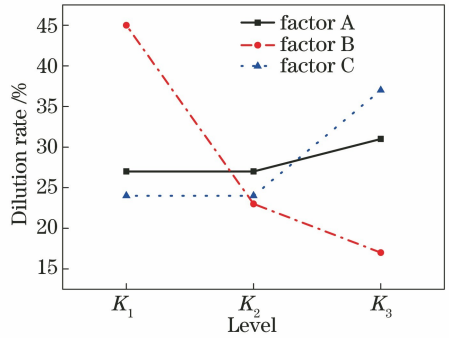


图6 因素对熔覆层稀释率的影响

Fig. 6 Influence of factors on dilution rate of cladding layer

从图6和表6可以看出因素B的极差为9.4%,这表明影响稀释率的主要因素是送粉量,其次为扫描速度,最后为激光功率。因素B与因素C相交于 K_2 可以得出最优组合是A1B2C2。

通过分析并结合实际熔覆的样本,得到最优参数:光功率为1500 W,送粉量为2 g/s,扫描速度为4 mm/s。

3.3 熔覆层的硬度

综合实际情况得到最优参数,对熔覆层进行硬

度分析。从熔覆层到基体,先横向采集3个点,每点横向间隔为0.1 mm,最后取一个平均值;然后往下(纵向)取间隔为0.4 mm的第二点测得硬度值,以此类推,得到第五个点的硬度值。从第六个点开始往下间隔为0.2 mm直至取到第九个点的硬度值。硬度仪的参数:每一次施加载荷为2 N、每一次测试时间为15 s。图7为最优参数熔覆层的硬度值,从熔覆层开始依次向基体测试硬度。前五个点的硬度值为熔覆层的硬度,第六个点硬度值为基体热影响区域的硬度,最后三个较低硬度值为45号钢基体的硬度。熔覆层的硬度普遍在700 HV左右,是基体的2.2倍,熔覆层的中部区域硬度较为稳定,熔覆层和基体热影响区域硬度较高,距离热影响区域较远

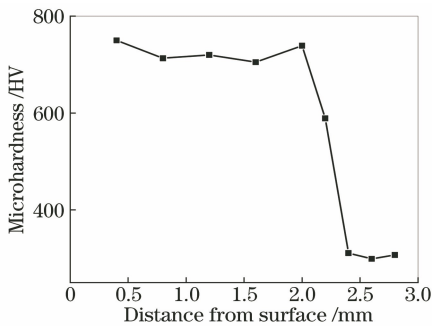


图7 熔覆层到基体的硬度值

Fig. 7 Hardness value from cladding layer to substrate

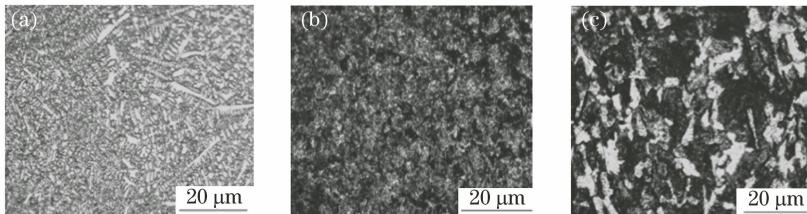


图8 显微组织。(a)熔覆层;(b)热影响区域;(c)基体

Fig. 8 Microstructure. (a) Cladding layer; (b) heat affected zone; (c) substrate

通过组织比较,可看出熔覆层的金相组织有别于基体,碳化钨的添加能够起到细化组织作用,从而提高熔覆层的综合性能。

3.5 熔覆层的耐腐蚀性能

图9为基体和熔覆层在模拟海水(质量分数为3.5%的NaCl溶液)中进行电化学腐蚀的结果,可以看出熔覆层的塔菲尔曲线正向偏移,有明显的钝化区,且有电流密度急增的现象,经过测试得到熔覆层的自腐蚀电位 E 为 -0.72 V,自腐蚀电流密度 i 为 0.96 A/cm²。相对基体,塔菲尔曲线钝化区域呈现增加趋势,腐蚀电位与电流密度较大。原因是基体的钝化膜遭到破坏,溶液中的氯离子加速了基体表面腐蚀速率。而熔覆层中镍基合金本身就具有耐腐

的基体硬度数值比较低。

具体原因:将溶液喷射到基体瞬间产生对流和表面张力,导致熔覆层外缘受到的氧化比熔覆层中部区域更多;溶液产生温度差,导致熔覆层的外缘区域冷却和收缩较快。所以,熔覆层的外缘硬度高于熔覆层的中部区域。受到激光的高温影响,基体热影响区域的硬度也有所提高。而激光熔覆粉末融化后,元素结合发生变化,添加的碳化钨分解,与其他元素形成硬度高的化合物,所以熔覆层的整体硬度值均在720 HV左右。

3.4 熔覆层的显微组织

图8为熔覆层、热影响区域、基体部位的显微图像,通过金相显微镜可以发现,图8(a)中主要有白色短枝状晶体和长枝状晶体,且分布不规则,靠近基体的右边部分主要分布的是长枝晶体,原因是激光具有快热快冷特点,使粉末融化后靠近基体的部位冷却速度较快;而左侧的晶体相对比较短小,且发生了明显的枝晶偏析现象,枝晶间白色条块状为碳化物分布,有黑色弥散点状 γ' 强化相析出。图8(b)为基体的热影响区域,由于在观察之前,进行了轻微腐蚀,导致组织已经碳化严重。图8(c)为基体的金相组织,可以清晰看出珠光体和铁素体,其中白色区域为铁素体。

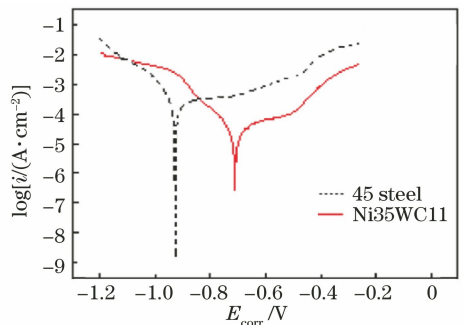


图9 熔覆层和基体的电极化曲线

Fig. 9 Electrification curves of cladding layer and substrate

蚀性,与碳化钨结合后耐腐蚀性更强,这表明熔覆层的耐腐蚀性优于基体。

4 结 论

通过正交试验和极差分析,将影响熔覆层性能的因素从大到小排列依次为送粉量,扫描速度,激光功率,得到的最优参数:激光功率为 1500 W、送粉量为 2 g/s、扫描速度为 4 mm/s。对比熔覆层与基体的显微组织,并对熔覆层的硬度和耐腐性进行检测,结果表明,熔覆层的硬度、耐磨性和耐腐性均有提高。因镍合金熔覆后会出现裂纹缺陷,而 Ni35 可以在不减弱性能方面,避免一些不必要的缺陷,在实际中应用更广泛。

参 考 文 献

- [1] Xu W, Xie J G, Wu H L. Application of laser surface strengthening materials in remanufacturing research[J]. Surface Engineering & Remanufacturing, 2015(3): 38-42.
徐文, 谢剑刚, 吴贺利. 激光表面强化材料在再制造修复研究中的应用[J]. 表面工程与再制造, 2015(3): 38-42.
- [2] Chen C Z, Wang D G, Bao Q H, et al. Effects of technological parameters on the microstructure of laser remelted hydroxyapatite (HA) coatings [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(6): 1169-1173.
- [3] Lu C, Liu J W, Ma W Y, et al. Microstructure and high-temperature wear resistance of laser cladding nickel-based alloy coating [J]. Materials Protection, 2012, 45(2): 1-4, 84.
路程, 刘江文, 马文有, 等. 激光熔覆镍基合金层的组织与高温耐磨性能[J]. 材料保护, 2012, 45(2): 1-4, 84.
- [4] Zhang G Y, Wang C L, Gao Y, et al. Microstructure and corrosion resistance of laser cladding layer 2% CeO₂/Ni60A on aluminum alloy surface [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(7): 69-72, 76.
张光耀, 王成磊, 高原, 等. 铝合金表面 2% CeO₂/Ni60A 激光熔覆层的组织及耐腐性能[J]. 机械工程材料, 2015, 39(7): 69-72, 76.
- [5] Zhang L, Chen X M, Liu W, et al. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-cladded Ni-based-alloy coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111401.
张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的

形成机理及敏感性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111401.

- [6] Li Y Q, Xie F Q. Study on microstructure and corrosion resistance of laser cladding Cr/Ni-based composite coating [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(22): 133-135.
李涌泉, 谢发勤. 激光熔覆 Cr/Ni 基合金复合涂层组织与耐腐性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 133-135.
- [7] Yang X H, Chen J F, Wang Z, et al. Study on laser cladding wear and corrosion resistance layers on 45 steel [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(24): 150-152.
杨晓红, 陈菊芳, 王泽, 等. 45 钢表面激光熔覆 Ni35 粉末的耐磨耐腐性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(24): 150-152.
- [8] Li Y Q, Ji N, Liu J Q. Microstructure and tribological properties of laser cladding Ni-based alloy on 45 steel surface [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(2): 170-172.
李涌泉, 稽宁, 刘建强. 45 钢表面激光熔覆 Ni 合金粉末的组织与耐腐性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(2): 170-172.
- [9] Zhu G B. Research on microstructure and properties of laser cladding Ni-based alloy coating on 304 stainless steel [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
朱国斌. 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基合金涂层组织与性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [10] Lei J F, Qi W J, Xie Y D, et al. Optimization of process parameters of laser cladding Ni60-25% WC coating on U71Mn steel [J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 66-71.
雷靖峰, 祁文军, 谢亚东, 等. U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25% WC 涂层工艺参数优化的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 66-71.
- [11] Xu S R, Wang Y L, Zhang G H, et al. Research on parameter optimization of laser cladding Fe65 alloy on 20CrMnTi steel surface [J]. Laser Journal, 2016, 37(11): 28-31.
徐善瑞, 王玉玲, 张光华, 等. 20CrMnTi 钢表面激光熔覆 Fe 基合金工艺参数优化[J]. 激光杂志, 2016, 37(11): 28-31.
- [12] Chen C C. Experimental study of the effect of process parameters laser on cladding layer [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
陈川川. 工艺参数对激光熔覆层影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.