

U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层工艺参数优化的研究

雷靖峰, 祁文军, 谢亚东, 韩会

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830008)

摘要: **目的** 研究 U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层的最佳工艺参数。**方法** 首先通过单道单因素试验初步选取激光功率、送粉量、扫描速度和光斑直径 4 个工艺参数, 然后进行 4 因素 3 水平的单道正交试验, 以熔覆层的宽度、高度和稀释率作为判断熔覆层质量的指标, 做极差分析, 最后得到最优工艺参数并分析了熔覆层的显微硬度及显微组织。**结果** 单道单因素试验及单道正交试验得到的工艺参数均为: 激光功率 1500 W, 送粉量 4 g/min, 扫描速度 6 mm/s, 光斑直径 2.2 mm。通过单道正交试验极差表分析发现, 工艺参数对质量指标的影响程度不同, 对熔覆层宽度的影响为扫描速度>送粉量>激光功率>光斑直径, 对熔覆层高度的影响为送粉量>扫描速度>光斑直径>激光功率, 对熔覆层稀释率的影响为送粉量>光斑直径>扫描速度>激光功率, 对比发现送粉量是熔覆层的最大影响因子。熔覆层的显微硬度最高可达到 1170HV, 是基体的 3.7 倍。**结论** 在 U71Mn 钢表面激光熔覆 Ni60-25%WC 涂层, 可以制备出光滑且紧密结合的熔覆层, 且表面硬度明显提高。

关键词: 激光熔覆; U71Mn 钢; 工艺参数; 正交试验; 显微硬度; 显微组织

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0066-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.011

Optimization of Process Parameters of Laser Cladding Ni60-25%WC Coating on U71Mn Steel

LEI Jing-feng, QI Wen-jun, XIE Ya-dong, HAN Hui

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

ABSTRACT: The work aims to study optimum process parameters of laser cladding Ni60-25%WC coating on U71Mn steel surface. First, single-channel single-factor test was performed to preliminarily select four process parameters, namely, laser power (A), powder feeding rate (B), scanning speed (C) and spot diameter (D). Then, single-channel orthogonal test involving 4 factors and 3 levels was completed. Range analysis was done with cladding layer width, height and dilution ratio as criteria of cladding layer quality. Finally, optimum process parameters were obtained, microhardness and microstructure of the cladding layer were analyzed. The process parameters obtained from the single-channel single-factor test were: A=1500 W, B=4 g/min,

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2017-10-30

Received: 2017-09-29; Revised: 2017-10-30

基金项目: 新疆维吾尔自治区军民结合产业发展专项资金投资计划 (000011)

Fund: Supported by Xinjiang Uygur Autonomous Region Military and Civilian Joint Industry Development Special Fund Investment Plan (000011)

作者简介: 雷靖峰 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光熔覆。

Biography: LEI Jing-feng (1993—), Male, Master, Research focus: laser cladding.

通讯作者: 祁文军 (1968—), 女, 教授, 主要研究方向为材料加工领域中的数字化设计与应用。

Corresponding author: QI Wen-jun (1968—), Female, Professor, Research focus: digital design and application in the field of material processing.

C=6 mm/s and D=2.2 mm. The optimum process parameters by single channel orthogonal experiment showed that A=1500 W, B=4 g/min, C=6 mm/s, D=2.2 mm; the range analysis showed that degree of effect of process parameters on quality criteria was different. For effect on cladding layer width, the order was C>B>A>D; for effect on cladding layer height, B>C>D>A; and for effect on dilution ratio of cladding layer, B>D>C>A. Comparison showed that powder feeding rate was the dominating impact factor of cladding layer. The microhardness of cladding layer was up to 1170HV, which was 3.7 times of that of substrate. A smooth and closely-bonded cladding layer can be prepared, and surface hardness is increased obviously by laser cladding Ni60-25%WC coating on U71Mn steel surface.

KEY WORDS: laser cladding; U71Mn steel; process parameters; orthogonal test; microhardness; microstructure

激光熔覆是一种新型涂层表面改性技术^[1]，该技术可以使廉价、低性能的金属表面具有贵重的高性能合金的性能，以降低材料的成本和能源消耗，节约贵重稀有金属材料，提高基体材料表面的耐磨、耐蚀和抗氧化等性能^[2-3]。改变熔覆层形貌和影响质量好坏的重要因素是激光熔覆中的工艺参数，其包括激光功率、送粉量、扫描速度、离焦量、光斑直径、预热时间、预热温度和搭接率等^[4]，其中最主要的工艺参数有激光功率、送粉量、扫描速度、光斑直径、搭接率。Pual 等^[5]在不锈钢基体上熔覆了 Ni/WC 复合涂层，结果表明 WC 颗粒显著提高了熔覆层的硬度和耐腐蚀性。戎磊^[6]在 CCS-B 钢板上分别熔覆了 Deloro60、Deloro60+10%WC、Deloro60+20%WC、Deloro60+30%WC 四种涂层，结果表明随 WC 含量的增加，熔覆层的平均硬度增加，当 WC 增加到 30%时熔覆层平均硬度可达到基体的 4 倍。王培等^[7]在 TC4 钛合金基体上熔覆了不同 WC 添加量的 WC-12Co/Ni25A 熔覆层，试验结果显示激光熔覆后，基体材料的表面性能均有所提高，但 WC 含量会影响基体的最终性能，表现为 WC 含量越高，熔覆层均匀性越差，硬度分布均匀性也有所下降。

本文以 U71Mn 钢为基体材料，Ni60-25%WC 为熔覆材料，通过单道单因素和单道正交试验，以熔覆层的宽度、高度和稀释率作为判断熔覆层质量的指标，对激光功率、送粉量、扫描速度和光斑直径这 4 个工艺参数进行优化，以选取最佳的工艺参数。

1 试验材料与设备

基材为高铁钢轨所用的 U71Mn 钢，其化学成分（以质量分数计）如下：C 0.65%~0.77%，Si 0.15%~0.35%，Mn 1.10%~1.50%，S≤0.040%，P≤0.040%，Fe 为余量。试样尺寸为 150 mm×70 mm×10 mm。基材待涂覆的面先用砂纸打磨平整，再用丙酮清洗干净后备用。熔覆合金粉末选用 Ni60+25%WC 粉末，其中 Ni60 合金粉末的粒度-150~320 目，化学成分（以质量分数计）是：C 0.8%，Si 4.5%，B 3.5%，Cr 16%，Fe 15%，Ni 为余量。激光熔覆时采用氮气作为保护

气体，激光光斑为圆形，单道熔覆长度为 40 mm。本试验所用仪器有 YLS-4000-S2 型 IPG 大功率光纤激光器、DPSF-2 送粉器、光学显微镜、扫描电子显微镜和显微硬度仪。

2 试验方法与结果分析

2.1 单道单因素试验

影响熔覆层形貌和质量的最主要的工艺参数有激光功率、送粉量、扫描速度和光斑直径。本试验采用控制变量法，用同步送粉的方式，依次改变 4 个参数，根据熔覆后的质量，初步选取工艺参数值^[8]。单因素试验参数组合如表 1 所示。

表 1 单因素试验参数组合
Tab.1 Parameter combination for single-factor test

Sam-ples	Laser power/W	Feeding rate/(g·min ⁻¹)	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Spot dia-meter/mm
1	900	16	6	2
2	1100	16	6	2
3	1300	16	6	2
4	1500	16	6	2
5	1500	4	6	2
6	1500	10	6	2
7	1500	1	6	2
8	1500	4	7	2
9	1500	4	5	2
10	1500	4	4	2
11	1500	4	6	2.2
12	1500	4	6	2.4
13	1500	4	6	2.6

不同参数下单道熔覆层的宏观形貌及主要尺寸分别如图 1 和表 2 所示。不同功率对熔覆层的影响情况^[9]见图 1a，观察试样 1—4 发现：功率从 900、1100、1300 W 依次增大时，粉末均未完全熔化，熔覆层表面机械地粘有一层颗粒粉末；当功率为 1500 W 时，熔覆层完全熔化，表面光滑，熔覆层表面未出现颗粒粉末。

不同送粉量对熔覆层的影响情况^[10]如图 1b, 结合图 1a, 观察试样 4—7 发现, 送粉量对熔覆层的厚度和宽度均有明显影响。随着送粉量的逐渐增大, 单位时间内送出的粉末增多, 由于功率不变, 粉末平均接收到的能量会减少, 致使粉末不完全熔化, 机械地粘接在一起, 熔覆层质量达不到要求。通过比较, 送粉量为 4 g/min 时, 涂层的效果最好。

不同扫描速度对熔覆层的影响^[11]如图 1c, 结合图 1b, 观察试样 5、8、9 和 10 发现, 扫描速度对涂层的宽度影响最大, 并且扫描速度过大时, 熔覆层表

面会粘有未熔化的粉末。主要原因是随着扫描速度的增加, 热输入量减少, 导致熔覆层宽度减小, 扫描速度过大时, 热输入量更少, 导致粉末未熔化。

光斑直径对熔覆层的影响情况^[12]如图 1d, 结合图 1b, 观察试样 5、11、12 和 13 发现, 光斑直径增大, 熔覆层的宽度增加, 未完全熔化的粉末也随之增多。

通过单因素试验获得的初选工艺参数为: 激光功率 1500 W, 送粉量 4 g/min, 移动速度 6 mm/s, 光斑直径 2.2 mm。

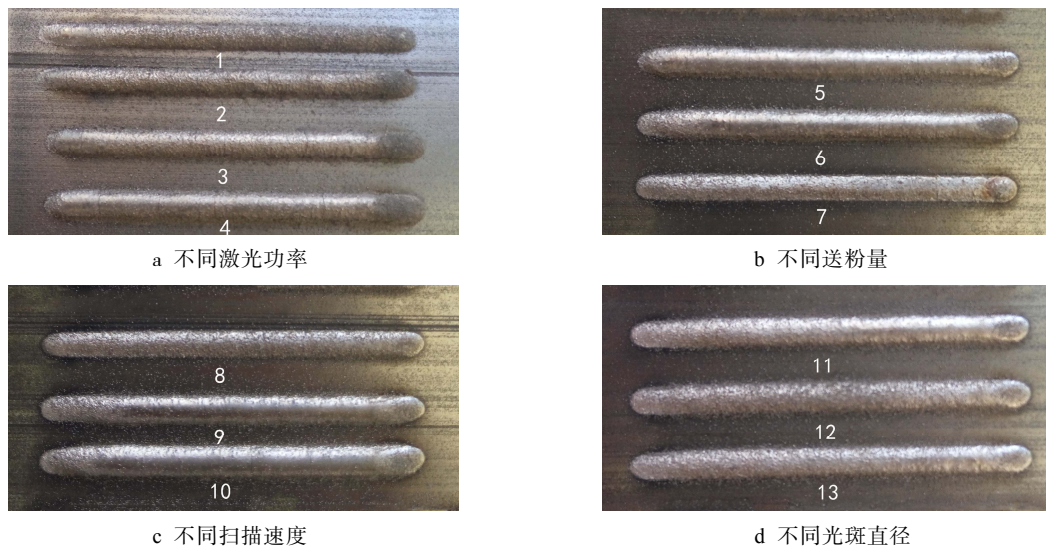


图 1 不同参数下熔覆层的宏观形貌

Fig.1 Macro-morphology of cladding layer under different parameters: a) different laser power, b) different powder feeding rate, c) different scanning speed, d) different spot diameter

表 2 不同参数下熔覆层的主要尺寸
Tab.2 Main dimensions of cladding layer under different parameters

Samples	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Width/mm	2.56	2.98	3.02	3.14	2.76	3.02	2.44	2.76	2.85	3.32	2.88	3.10	3.06
Height/mm	1.30	1.52	1.52	1.56	0.78	1.49	0.42	0.46	1.15	1.32	0.62	0.54	0.52

2.2 单道正交试验

由于工艺参数是多因素相互作用的结果, 所以采用单道正交试验的方法对单因素试验初选的工艺参数进一步优化。对激光功率 (A)、送粉量 (B)、扫描速度 (C)、光斑直径 (D) 设计 4 因素 3 水平的正交试验, 试验选取的因素水平^[13]如表 3 所示。

按正交试验的方法, 将因素的水平值进行排列组合, 排列方式如表 4 所示, 构成 9 组试验^[14]。正交试验得到的激光熔覆涂层的宏观形貌如图 2 所示, 观察熔覆层发现, 不同参数下熔覆层的形貌区别很大。单道涂层开始段的厚度低于后段的厚度, 且出现粉末未完全熔化的情况, 这是由于激光功率从 0 增加到 1500

W 是一个由低到高的过程。开始时, 功率小, 温度低, 而扫描速度和送粉量不变, 所以有部分粉末未能完全熔化; 当激光移动一段距离后, 功率升高到设定值, 粉末完全熔化, 熔覆层的厚度增加, 因此该点以后的所有熔覆层厚度均匀, 表面光滑。

表 3 试验因素水平
Tab.3 Experimental factors and levels

Factors	Laser power/W	Feeding rate/(g·min ⁻¹)	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Spot Diameter/mm
Level 1	1450	2	5	2
Level 2	1500	4	6	2.2
Level 3	1550	6	7	2.4

表 4 参数排列方式组合
Tab.4 Combination of parameter arrangement mode

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



图 2 正交试验熔覆层的宏观形貌

Fig.2 Macro morphology of cladding layer in orthogonal test

稀释率^[15]是指在激光熔覆的过程中,熔化的基体材料的合金元素进入熔化的粉末材料中,对熔覆层产生稀释作用。稀释率的计算公式为 $\eta = h / (h + H)$ (H 为熔覆层高度, h 是熔池深度),它是基体材料与激光熔覆层之间产生良好的冶金结合的重要标志。由于激光熔覆时可以调节工艺参数,因此应尽量将稀释率控制在一定的范围内,以确保熔覆层的性能和结合强度。稀释率过小时,熔覆层与基体结合力不足,同时增大开裂倾向;稀释率过大时,许多熔覆层的元素渗出,也会导致熔覆层的性能下降。

以熔覆层的宽度、高度和稀释率作为参考指标,来判断熔覆层的质量。测量并计算稀释率,测量方式如图 3 所示,结果见表 5。

采用极差法分析熔覆层的质量指标,如表 6 所示。从表 6 可以看出,工艺参数对质量指标的影响程度不同:对宽度的影响为扫描速度>送粉量>激光功率>光斑直径,对高度的影响为送粉量>扫描速度>光斑直径>激光功率,对稀释率的影响为送粉量>光斑直径>扫描速度>激光功率。很显然送粉量对熔覆层质量的影响最大,是熔覆层宽度、厚度和稀释率的首要影响因素,扫描速度对熔覆层的宽度和高度影响较大^[16-17]。

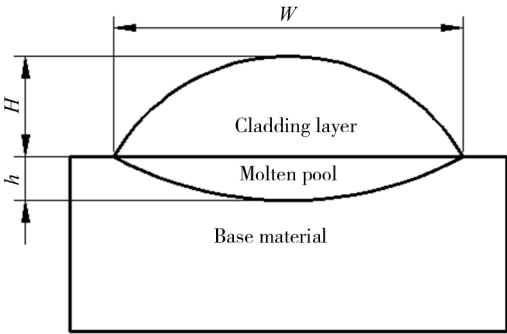


图 3 熔覆层宽、高和熔池深度的测量方式

Fig.3 Cladding layer width, height and pool depth measurement

表 5 参考指标表

Tab.5 Reference index table

Samples	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Width/mm	2.8	2.76	2.70	2.62	2.76	3.18	2.70	3.20	2.98
Height/mm	0.77	0.81	0.81	0.47	0.77	1.22	0.51	0.92	1.16
Pool depth/mm	0.75	0.51	0.43	0.96	0.46	0.53	0.85	0.65	0.55
Dilution ratio	0.49	0.39	0.35	0.67	0.37	0.30	0.63	0.41	0.32

表 6 极差表

Tab.6 Range table

Index		Factor A	Factor B	Factor C	Factor D
Width/mm	K_1	8.26	8.12	9.18	8.54
	K_2	8.56	8.72	8.36	8.64
	K_3	8.88	8.86	8.16	8.52
	k_1	2.75	2.71	3.06	2.85
	k_2	2.85	2.91	2.79	2.88
	k_3	2.96	2.95	2.72	2.84
	R	0.21	0.24	0.34	0.04
Height/mm	K_1	2.29	1.75	2.91	2.70
	K_2	2.46	2.50	2.44	2.54
	K_3	2.59	3.09	1.99	2.10
	k_1	0.76	0.58	0.97	0.90
	k_2	0.82	0.83	0.81	0.85
	k_3	0.86	1.03	0.66	0.70
	R	0.10	0.45	0.31	0.2
Dilution ratio	K_1	1.26	1.76	1.20	1.18
	K_2	1.34	1.17	1.38	1.32
	K_3	1.36	0.97	1.35	1.46
	k_1	0.4100	0.5866	0.4000	0.3933
	k_2	0.4467	0.3900	0.4600	0.4400
	k_3	0.4533	0.3233	0.4500	0.4767
	R	0.0433	0.2633	0.0500	0.0834

极差法的选择标准为:熔覆层宽度、高度和稀释率适中。对工艺参数进行优化,优化方案为:宽度 $A_2B_2C_2D_1$ 、高度 $A_2B_2C_2D_2$ 、稀释率 $A_2B_2C_3D_2$ 。综合分析,最优的工艺参数方案为 $A_2B_2C_2D_2$,即工艺参数分别是:激光功率 1500 W,送粉量 4 g/min,扫描速 6 mm/s,光斑直径 2.2 mm。在最优工艺参数下,粉

末和基体能够获得足够的能量, 固体完全熔化为液体, 凝固后熔覆层表面光滑, 未出现裂纹, 成形质量高。

2.3 熔覆层的显微硬度

单道熔覆层截面如图 4 所示, 整个结构由 5 部分组成, 依次是熔覆层、基体熔化区、相变区、热影响区和基体。从表面开始, 每隔 0.2 mm 测 1 次显微硬度, 硬度仪的参数设为 500 g 和 15 s, 图 5 为熔覆层从表面到基体的显微硬度变化情况。由图 5 可知, 靠近熔覆层表面的硬度稍低, 而其里层的硬度较高, 最高可达 1170HV, 是基体硬度的 3.7 倍。这是因为熔覆过程中, 未熔化的 WC 颗粒下沉, 使得熔覆层内部的 WC 密度高于表面, 并且析出的 C 原子与 W 元素形成更复杂的化合物, 使得硬度升高。基体与熔覆层之间的相变层硬度也很高, 达到了 1076HV, 这是因为该区域在加热过程中材料温度超过奥氏体化温度而未达到材料的熔点, 在快速冷却的条件下奥氏体转变为细小的马氏体, 从而提高了硬度。相变区与基体交界处的热影响区硬度出现波动, 是由该区域组织不均匀导致的。

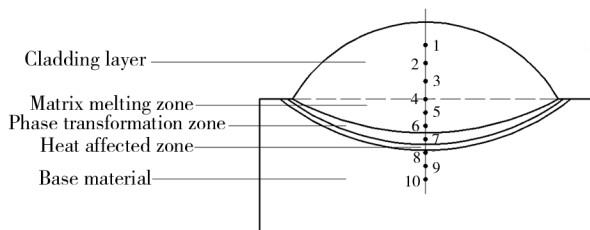


图 4 熔覆层内部结构

Fig.4 Internal structure of cladding layer

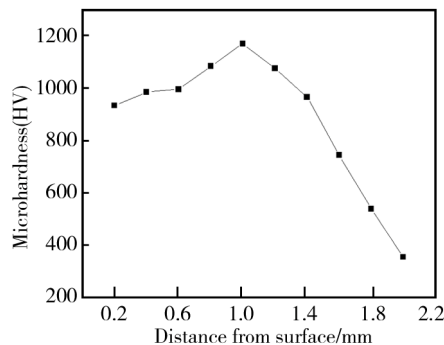
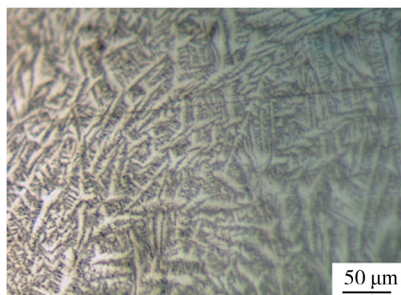


图 5 熔覆层内部显微硬度

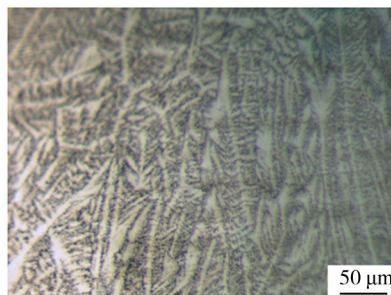
Fig.5 Microhardness of cladding layer

2.4 熔覆层的显微组织

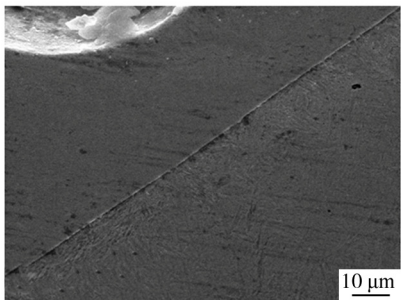
图 6 是不同区域的微观组织形貌, 图 6a 为熔覆层的微观形貌, 由于该部分最后凝固, 所形成的组织为短小的枝状晶体, 且无固定的方向性。图 6b 为基体熔化区的组织, 由于该区域更靠近基体, 冷却速度快, 所以形成了长枝状晶体, 而在晶体上二次结晶, 生长出短的枝状晶体。图 6c 为熔覆层与基体结合处的组织, 该处出现了一条光亮的线带, 说明它们之间是冶金结合。通过电子显微镜发现, 硬化相变区出现非常细小的马氏体, 而熔覆层剖面光滑的部分, 是完全熔化的 WC 颗粒镶嵌在里面^[18], 通过观察图 6d 发现, 颗粒周围出现非常细小的组织, 未熔化的 WC 颗粒使得晶体形核更容易, 从而加速了晶体的生长速度, 细化了晶体颗粒, 使熔覆层的性能更好。



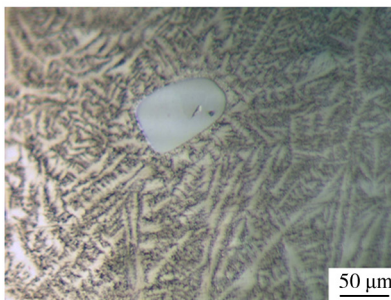
a 熔池



b 基体熔化区



c 熔覆层与基体结合处



d 未熔化的 WC 颗粒

图 6 熔覆层的显微组织

Fig.6 Microstructure of cladding layer: a) weld pool, b) U71Mn melting zone, c) junction between cladding layer and substrate, d) unmelted WC particles

3 结论

1) 用极差表分析单道正交试验发现, 不同的工艺参数对熔覆层的影响不同, 对宽度的影响为扫描速度 > 送粉量 > 激光功率 > 光斑直径, 对高度的影响为送粉量 > 扫描速度 > 光斑直径 > 激光功率, 对稀释率的影响为送粉量 > 光斑直径 > 扫描速度 > 激光功率。对比发现, 送粉量是熔覆层的最大影响因子。

2) 单道正交试验是对单道单因素试验结果的进一步优化, 得到的正交试验结果为: 激光功率 1500 W, 送粉量 4 g/min, 移动速度 6 mm/s, 光斑直径 2.2 mm。

3) 熔覆层的最高显微硬度为 1170HV, 是基体的 3.7 倍, 使得基体的表面硬度明显提高。

参考文献:

- [1] 杨玉玲, 董丹阳. 材料的激光表面改性技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 22-24.
YANG Yu-ling, DONG Dan-yang. Laser Surface Modification and Application of Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 22-24.
- [2] 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.
- [3] 杨勇, 赵靖宇, 李静. 氩气保护下碳化钨对镍基合金熔覆层组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 55-59.
YANG Yong, ZHAO Jing-yu, LI Jing. Effect of Tungsten Carbide on the Microstructure and Wear Resistance of the Nickel-based Alloy Cladding Layer under the Protection of Argon[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 55-59.
- [4] ERFANMANESH M, ABDOLLAH-POUR H, MOHAMMADIAN-SEMNANI H, et al. An Empirical-statistical Model for Laser Cladding of WC-12Co Powder on AISI 321 Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 97: 180-186.
- [5] PAUL C P, MISHRA S K, TIWARI P, et al. Solid-particle Erosion Behaviour of WC/Ni Composite Clad Layers with Different Contents of WC Particles [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50(2): 155-162.
- [6] 戎磊, 黄坚, 李铸国, 等. 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层的组织与性能[J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 40-44.
RONG Lei, HUANG Jian, LI Zhu-guo, et al. Microstructure and Property of Laser Cladding Ni-based Alloy Coating Reinforced by WC Particles[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(6): 40-44.
- [7] 王培, 李争显, 黄春良, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆 Ni 包 WC 复合涂层研究[J]. 钛工业进展, 2014, 31(3): 39-42.
WANG Pei, LI Zheng-xian, HUANG Chun-liang, et al. Research of Ni/WC Composite Coatings on TC4 Titanium Alloy by Laser Cladding[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(3): 39-42.
- [8] 孙后顺. 基于激光光内同轴送粉的非圆滑过渡薄壁件快速成形研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
SUN Hou-shun. Research on the Rapid Manufacturing of Thin-walled Part with Unsmooth Transition by Coaxial Inside-beam Powder Feeding[D]. Suzhou: Suzhou University, 2012.
- [9] 李帅. 激光熔覆制备 TiB₂-Al₂O₃ 涂层的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LI Shuai. Study on TiB₂-Al₂O₃ Coating by Laser Cladding[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [10] 董世运, 马运哲, 徐滨士, 等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9.
DONG Shi-yun, MA Yun-zhe, XU Bin-shi, et al. Current Status of Material for Laser Cladding[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 5-9.
- [11] 陈庆华, 魏仑, 龙晋明, 等. 激光熔覆 NiCrAl-陶瓷涂层的显微组织研究[J]. 中国工程科学, 2001, 3(10): 64-71.
CHEN Qing-hua, WEI Lun, LONG Jin-ming, et al. Study on the Microstructure of Laser Clad NiCrAl-ceramic Coating[J]. Engineering Science, 2001, 3(10): 64-71.
- [12] 马玉涛. 激光熔覆钢基表面自生复合材料的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
MA Yu-tao. Study on Steel Matrix Surface Composites in Situ by Laser Cladding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [13] 王剑彬, 杨毅. 激光烧结 DZ-Ni60AA 粉末成形的工艺研究[J]. 应用激光, 2007(4): 284-289.
WANG Jian-bin, Yang Yi. Technology Research on Laser Sintering Forming DZ-Ni60AA Powder[J]. Applied Laser, 2007(4): 284-289.
- [14] GUO S, ZHOU X, SONG S, et al. Optimization of Leaching Conditions for Removing Sodium from Sodium-rich Coals by Orthogonal Experiments[J]. Fuel, 2017, 208: 499-507.
- [15] 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]. 吉林: 吉林大学, 2016.
ZHU Guo-bin. Research on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-based Alloy Coating on 304 Stainless Steel[D]. Jilin: Jilin University, 2016.
- [16] 四库, 孙进. 45 钢送丝激光熔覆成型基础工艺[J]. 制造技术与机床, 2012(6): 149-152.
SI Ku, SUN Jin. The Basic Process of Laser Cladding Fabrication with 45 Carbon Steel Wire[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(6): 149-152.
- [17] 董梁. 高速钢表面焊丝激光熔覆工艺及熔覆层性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
DONG Liang. Technology and Coating Performance Research of Welding Wire Laser Cladding on High Speed Steel Surface[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [18] 张雪. 激光功率对 Ni 基 WC 熔覆层组织与性能的影响[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2013.
ZHANG Xue. The Influence of Laser Power of Ni-WC Cladding Layer Organization and Performance[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2013.