

H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层质量研究

叶四友¹, 刘建永^{1,2}, 杨伟¹

(1. 湖北汽车工业学院 材料科学与工程学院, 湖北 十堰 442000;

2. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘要:目的 研究获得高质量 H13 激光涂层的工艺。方法 以 H13 合金粉末为熔覆材料,在 H13 钢退火基体表面制备 H13 合金涂层,采用均匀设计试验,利用金相法检测涂层的几何形貌参数,得到涂层宽度回归模型,并验证所建立模型的准确性。利用光学显微镜和扫描电镜分析涂层的显微组织形貌,对涂层成分进行分析,通过显微硬度计测试涂层截面的显微硬度分布。对涂层气孔、裂纹和成分偏析进行分析。结果 扫描速度 22 mm/s,激光功率 1300 W,送粉速率 21 g/min 时,H13 合金涂层与基体呈良好的冶金结合,涂层内组织均匀致密,无裂纹缺陷,截面显微硬度约 600~699HV,是 H13 基体硬度的 2.4~3 倍。扫描速度 14 mm/s,激光功率 1400 W,送粉速率 42 g/min 时,涂层的截面显微硬度约为 669~698HV,是基体的 2.85~3 倍。结论 在两种工艺条件下,均能获得质量较优的 H13 合金涂层。

关键词:激光熔覆; H13 合金涂层; 几何形貌; 均匀设计; 回归模型; 显微硬度

中图分类号: TG174.45

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)08-0081-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.015

Quality of H13 Alloy Coating on H13 Steel Prepared by Laser Cladding

YE Si-you¹, LIU Jian-yong^{1,2}, YANG Wei¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Hubei Automotive Industrial Institute, Shiyan 442000, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the technology for preparing high-quality H13 alloy laser cladding layers. **Methods** Laser cladding of H13 alloy powder was undertaken on the surface of annealed H13 steel. A uniform design test was conducted and metallographical method was used to detect the geometric parameters of the cladding layers. The width regression model was obtained by regression analysis, and the accuracy of the model was verified. The microstructure and elementary composition of the cladding layers were investigated by OM and SEM. The microhardness distribution of the cladding layers was tested by micro-hardness tester. Holes, cracks and composition segregation of the cladding layer were analyzed. **Results** The results indicated that using a scanning speed of 22 millimeter per second, a laser power of 1300 W, and a powder feeding rate of 21 grams per minute, the metallurgical combination was implemented between cladding layers and substrates. The uniform and compact microstructure was showed without cracks. The microhardness of the cladding layer reached up to 600~699HV, which was 2.4 to 3 times higher than that of

收稿日期: 2015-04-08; 修订日期: 2015-05-15

Received: 2015-04-08; Revised: 2015-05-15

基金项目: 湖北省教育厅科学研究项目(Q20122302)

Fund: Supported by Scientific Research Projects of Hubei Province(Q20122302)

作者简介: 叶四友(1974—),女,湖北人,硕士研究生,讲师,主要研究方向为热锻模激光表面处理。

Biography: YE Si-you(1974—),Female,from Hubei,Master graduate student,Lecturer,Research focus:laser surface treatment of hot forging die.

the H13 steel substrate. At a scanning speed of 14 millimeter per second, a laser power of 1400 W, and a powder feeding rate of 42 grams per minute, the microhardness was 669 ~ 698HV, which was 2.85 to 3 times higher than that of the substrate. **Conclusion** H13 alloy coating with relatively high quality could be obtained under both technological conditions.

KEY WORDS: laser cladding; H13 alloy coating; geometrical feature; uniform design; regression model; microhardness

激光熔覆技术是一种效率高、熔凝速度快、稀释率小、工件变形小的先进表面改性技术^[1-3]。H13 钢热锻模正常失效形式是热疲劳磨损和塑性变形,失效部位在模膛表面和近表面层。G. Telasang 于 550 ℃ 在 H13 模具钢激光熔覆 H13 粉末并回火 2 h, 获得了均匀的组织, 最高硬度达 650VHN; 激光表面回火得到的组织更细小, 最高硬度为 700VHN^[4]。D Papa-georgiou 和 J H Lee 等^[5-9]在 H13 模具钢表面激光熔覆合金涂层, 能与金属基体界面呈良好的冶金结合, 具有良好的耐热性、耐磨性和耐腐蚀性等。为了解决热锻模使用寿命问题, 并降低制造成本, 本文在 H13 钢表面激光熔覆 H13 合金涂层。激光工艺参数对熔覆层质量影响很大^[10-15]。通过回归分析研究工艺参数对单道熔覆层几何形貌的影响规律, 对涂层的组织、成分和显微硬度进行分析, 以期研究在热锻模表面进行多道多层激光熔覆提供基础。

1 实验

基材为 H13, 尺寸为 250 mm×100 mm×25 mm, 表面喷砂处理。熔覆合金粉末为 H13, 颗粒粒尺寸为 10 ~ 30 μm, 使用前烘干。基体材料化学成分(以质量分数计)如下: C 0.43%, Si 1.20%, Mn 0.36%, Cr 5.38%, Mo 1.35%, V 1.14%, Fe 余量。熔覆材料的化学成分(以质量分数计)如下: C 0.40%, Si 0.42%, Mn 0.33%, Cr 4.79%, Mo 1.12%, V 0.6%, Fe 余量。

熔覆设备采用 LDF3000-60 VG 半导体光纤耦合激光器, IRB4600-45/2.05 六轴机器人。熔覆过程中离焦量为 15 mm, 相对应的光斑直径为 1.5 mm, 通入氩气保护, 气体流量为 8 L/min。

试样经磨样抛光后用王水腐蚀, 用 MDJ200 型光学显微镜观察金相组织, 用 ImageJ 1.147a 图像测量分析软件测量熔覆层的几何尺寸, 如图 1 所示。为了减少测量误差, 每个金相试样熔覆层宽度 w 和高度 h 测量了两次取平均值。在 minitab15 统计软件中进行回归分析, 并进行等值线和 3d 曲面的绘制。

送粉系统通过单位时间的转速(X)来控制单位

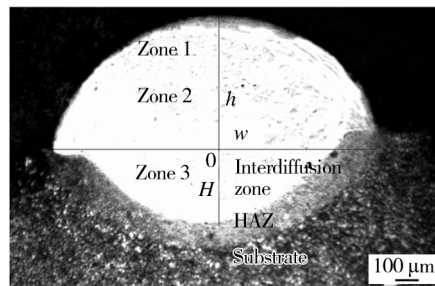


图1 熔覆层形貌

Fig. 1 Image of cladding layer

时间的送粉量(Y), 通过回归分析得到:

$$Y = -1.9 + 25.9X \quad (1)$$

采用均匀设计方法进行实验, 自变量为送粉量 V_f (因素 A), 扫描速率 V_s (因素 B) 和激光功率 P (因素 C), 以熔覆层宽度 w , 高度 h (图 2 中 0 点以上) 和深度 H (图 2 中 0 点以下) 为指标, 通过逐步回归分析得到回归模型。采用 12^{10} 均匀设计表和相对应的使用表。表 1 为因素水平表, 表 2 为均匀设计使用表, 3 个因素安排在第 1, 第 6 和第 9 列, 其中表 2 括号中的值是所选择的工艺参数。

表1 均匀设计因素水平表

Tab.1 Factors and levels of the uniform design

水平	Factors		
	$V_f / (r \cdot \min^{-1})$	$V_s / (mm \cdot s^{-1})$	P/W
1	0.1	10	300
2	0.3	14	400
3	0.5	18	500
4	0.7	22	600
5	0.9	26	700
6	1.1	30	800
7	1.3	34	900
8	1.5	38	1000
9	1.7	42	1100
10	1.9	46	1200
11	2.1	50	1300
12	2.3	54	1400

表 2 均匀设计使用表
Tab.2 The uniform design use table

试样号	Factors		
	A	B	C
1	1(0.1)	6(30)	10(1200)
2	2(0.3)	12(54)	7(900)
3	3(0.5)	5(26)	4(600)
4	4(0.7)	11(50)	1(300)
5	5(0.9)	4(22)	11(1300)
6	6(1.1)	10(46)	8(1000)
7	7(1.3)	3(18)	5(700)
8	8(1.5)	9(42)	2(400)
9	9(1.7)	3(14)	12(1400)
10	10(1.9)	8(38)	9(1100)
11	11(2.1)	1(10)	6(800)
12	12(2.3)	7(34)	3(500)

2 结果与分析

2.1 涂层几何形貌和尺寸

图 2 是与表 2 对应的 5 号和 9 号试样的几何形貌和尺寸。

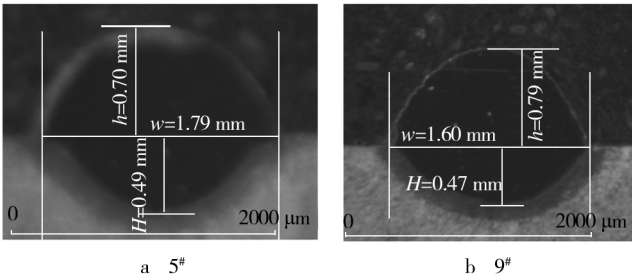


图 2 熔覆层形貌
Fig. 2 Geometrical feature of the cladding

2.1.1 涂层宽度

通过式(1)可以算得与表 1 中 A 因素 12 个水平对应的值,分别为:0.69,5.87,11.05,16.23,21.41,26.59,31.77,36.95,42.13,47.31,52.49,57.67 g/min。实验中 w 和 h 为零的不参与回归分析。

通过多次逐步回归分析,得到熔覆层宽度 w 的回归方程见式(2),回归后残差平方和 $S=0.0106$,调整后 $R^2=0.9886$ 。

$$w=2.834-0.008V_f-\ln V_f+0.00083P-0.002454V_s-0.542/V_f^{2.12}-185/V_s^{2.12}$$

(2)

从回归效果看式(2)可作为后续实验和应用的依

表 3 均匀设计试验结果
Tab.3 Results of the uniform design experiment

试样	w/mm	h/mm	H/mm
1	1.9	0.26	0.42
2	1.67	0.4	0.03
3	0.98	0.68	0.03
4	0	0	0
5	1.79	0.7	0.49
6	1.38	0.32	0.06
7	1.36	0.72	0.04
8	0	0	0
9	1.60	0.79	0.47
10	1.31	0.38	0.12
11	1.49	1.52	0

据。例如,当熔池的宽度为 1.5 mm 时,通过公式(2)和 minitab 中得到 P, V_f 和 V_s 的等值线图(如图 3 所示),即可选取合理的 P 和 V_f ,就可确定 V_s 。在已知 P, V_f 和 V_s 时,也可预测熔池的宽度。

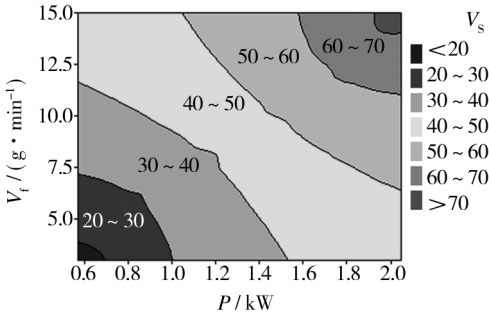


图 3 扫描速度与激光功率和送粉的变化
Fig.3 Scanning speed along with the change of laser power and feeding rate

2.1.2 涂层高度

熔覆层高度和 V_f, V_s 的 3d 曲面如图 4 所示。可

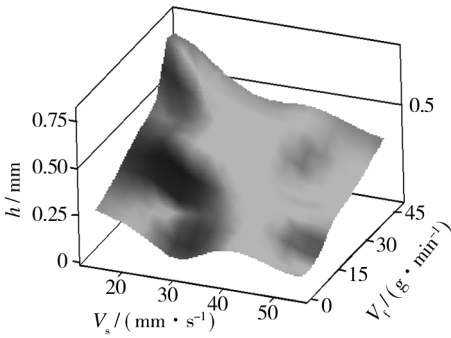


图 4 涂层高度随激光功率和送粉的变化
Fig.4 Coating height under different scanning speed and feeding rate

以看出在扫描速度一定时,随着送粉速度的增加,熔覆层高度增加。送粉速度一定时,随着扫描速度增加熔覆层高度减小。

2.2 涂层缺陷分析

2.2.1 涂层气孔的产生及防止措施

图5是7#试样和5#试样的显微组织图,可以看出7#试样气孔尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}$,5#试样的尺寸为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。两种涂层的扫描速度接近,试样7的气孔大是因为激光功率小,单位面积提供的能量少,熔池对流冲击作用减弱,气体不易溢出,同时送粉速率比试样5大,部分粉末没有熔化,也使熔池流动性降低。通过增加激光功率和减小送粉速率,来减少和消除尺寸很大的气孔。图5中,两种试样中存在数量较多尺寸较小的圆形气孔,且大部分在涂层底部。这是因为激光熔覆是一种快速加热和快速冷却的工艺,如果熔池的温度高,各种气体会高速溢出,并不会形成气孔;熔池温度偏低就来不及逸出,便会留在涂层中形成气孔。本文中气孔的产生有以下两个原因:1)基体材料和熔覆粉末吸潮,吸收的水分中含H元素多,在涂层中易形成氢气孔;2)熔覆合金粉末中的C元素通过冶金反应会产生大量的不溶于金属的CO,以气泡的形式从熔池中快速逸出,随着结晶过程的进行,熔池温度不断降低,熔池金属的流动性变差,此时产生的CO不易逸出,由于CO气孔是在结晶过程中产生的,因此气孔沿结晶方向分布。

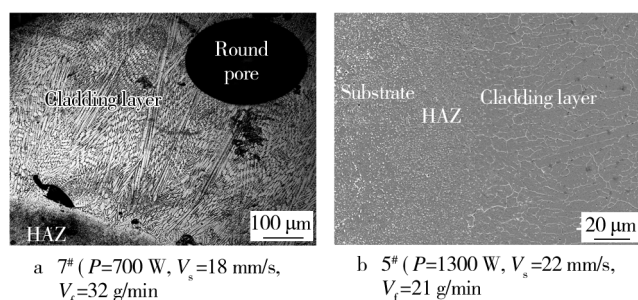


图5 涂层气孔缺陷

Fig.5 Blowhole defects of the cladding layers

可以采用如下措施来防止气孔:1)消除气体来源,基体材料表面去氧化膜、铁锈和油污,基材和熔覆粉末使用前在真空箱中烘干并储存,试验时随用随取;2)通过选择合理的工艺参数,增加熔池凝固的时间,增大气体逸出的机会。

2.2.2 裂纹的产生及防止

从图6可以看出,1#试样和6#试样裂纹呈树枝状

扩展,5#试样没有裂纹产生。裂纹的产生、扩展受工艺因素、冶金因素和力学因素的影响。1#试样出现裂纹,是因为送粉速率过低,导致通过熔覆粉末的激光能量增加,从而基材吸收激光的能量增加,基材和涂层之间的温度梯度变大,涂层冷却速度加大,使其产生裂纹。另外,能量过大也会导致涂层烧损。6#试样开裂,是因为扫描速度较快导致激光熔覆单位面积吸收的能量偏低,使涂层粉末熔化而基体未熔化,基体材料与熔化粉末间的界面能增大,熔体的表面张力占优势,降低了基体和涂层之间的结合强度,导致形成垂直基体表面的裂纹。在基体材料、熔覆材料、预热和涂层后续处理等条件相同的情况下,可通过优化工艺参数来获得无裂纹、组织均匀的涂层,如5#试样。

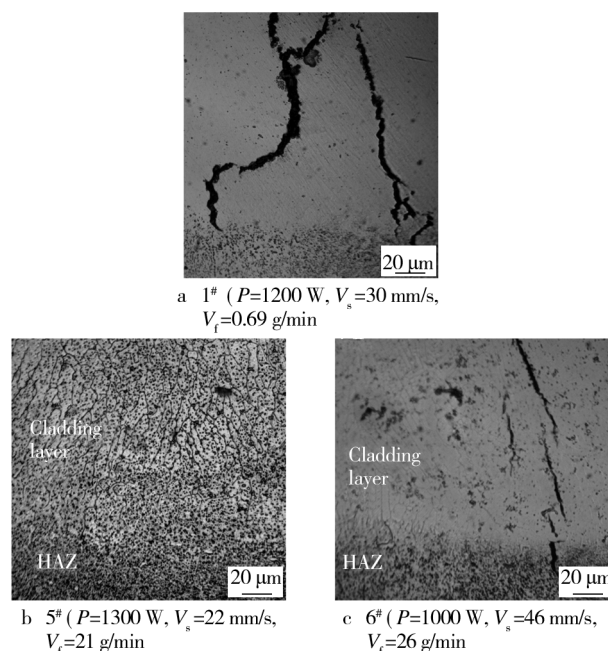


图6 涂层显微组织

Fig.6 Microstructure of the coating

2.3 涂层成分

从图7a和表4中可以看出各元素成分的变化不大,且激光熔覆涂层中所有元素的含量比原H13合金

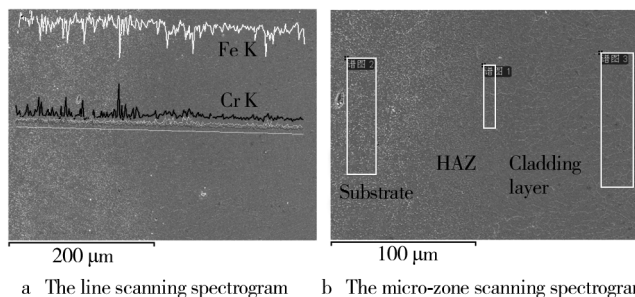


图7 5#试样涂层成分扫描图

Fig.7 The scanning spectrogram of 5# sample

表 4 5[#]试样各微区的成分(以质量分数计)
Tab.4 The Elemental distribution of 5[#] sample (mass fraction)

Zone in fig. 7b	Elemental distribution					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
谱图 1	1.42±0.09	1.09±0.12	6.06±0.17	0.37±0.16	86.46±0.39	1.47±0.24
谱图 2	1.23±0.08	0.95±0.11	6.02±0.17	0.39±0.16	86.73±0.38	1.47±0.23
谱图 3	1.25±0.09	0.87±0.11	6.23±0.18	0.28±0.17	87.18±0.42	1.56±0.25

粉末的要高。这是因为基体中的元素向涂层扩散,同时也说明涂层与基体之间形成了良好的冶金结合。

2.4 熔覆层硬度

测量试样截面的显微硬度分布,从基体到涂层硬度提高:1) Cr, Si, Mo 和 Fe 元素形成固溶强化;2) C 元素形成弥散强化,提高硬度;3) 快速冷却形成的细晶强化^[16]。元素硬度载荷为 5 N,加载持续时间为 15 s,以基材与涂层结合面为坐标原点(如图 1 所示),自上而下以间隔 0.1 mm 距离打点,结合面以上为正值,结合面以下为负值。

图 8 是无裂纹缺陷的 5[#]和 9[#]试样的显微硬度分布。可以看出涂层的硬度分布较均匀,9[#]试样的硬度比 5[#]稍高,且硬度值接近基体的 3 倍。两种试样激光熔覆的能量密度大(9[#]试样能量密度稍高于 5[#]试样),熔池保持的时间长,减少了气孔、裂纹和夹杂等缺陷的产生。涂层中的 Si, V, Cr 和 Mo 元素含量增加,这些元素均能细化晶粒,从而提高涂层的硬度。

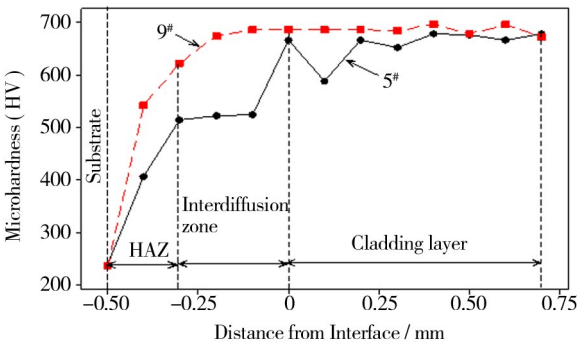


图 8 涂层的显微硬度分布
Fig.8 Microhardness distribution of the coating

3 结论

1) 根据回归分析结果和误差检验得到熔覆层宽度的回归模型,通过模型可预测熔覆层宽度。

2) 当扫描速度为 22 mm/s ,激光功率为 1300 W,送粉速率为 21 g/min 和扫描速度为 14 mm/s ,激光功率为 1400 W,送粉速率为 42 g/min 时, H13 合金涂层与基体呈良好的冶金结合,涂层内组织均匀致密,无裂纹缺陷;前者涂层的截面显微硬度为 600 ~ 699HV,是 H13 基体的 2.4 ~ 3 倍,后者为 669 ~ 698HV,是基体的 2.85 ~ 3 倍。

参考文献

[1] HUANG Y J. Characterization of Dilution Action in Laser Duction Hybrid Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2011,43(5):965—973.

[2] LUO F,YAO J H,HU X X,et al. Effect of Laser Power on the Cladding Temperature Field and the Affected Zone[J]. Journal of Iron and Steel Research,2011,18(1):73—78.

[3] LEI Y W,SUN R L,TANG Y. Microstructure and Phase Transformation in Laser Clad Cr_xS_y/Ni Coating on H13 Steel[J]. Optics and Lasers in Engineering,2015,66:181—186.

[4] TELASANG G. Effect of Laser Parameters Microstructure and Hardness of Laser Clad and Tempered AISI H13 Tool Steel [J]. Surface & Coating Technology,2014,258:1108—1118.

[5] PAPAGEORGIOU D. Failure Analysis of H13 Working Die Used in Plastic Injection Moulding[J]. Engineering Failure Analysis,2013,35(15):355—359.

[6] LEE J H. Application of Direct Laser Metal Tooling for AISI H13 Tool Steel [J]. Transactions of Nonferrous Metals of China,2009,19(1):284—287.

[7] WU Q L,LI W G,ZHONG N,et al. Microstructure and Wear Behavior of Laser Cladding VC-Cr₇C₃ Cermamic Coating on Steel Substrate[J]. Material and Design,2013,49:10—18.

[8] EMAMIAN A. The Influence of Combined Laser Parameters on In-situ Formed Tic Morphology during Laser Cladding [J]. Surface & Coating Technology,2011,206(1):124—131.

(下转第 125 页)

- 响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(2): 96—99.
- WANG Yin-xu, HU Fan, WANG Jia. Rusting Properties of Cold-rolled Steel Sheet and the Effect of Oxides[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(2): 96—99.
- [14] 钟声. 冷轧薄板表面缺陷产生原因综述[J]. 四川冶金, 2007, 29(3): 23—27.
- ZHONG Sheng. Summary of Cause Analysis for the Surface Defects of Cold Rolled Sheet[J]. Sichuan Metallurgy, 2007, 29(3): 23—27.
- [15] 赵诚, 单芳. 不锈钢冷轧带钢表面光洁度的控制[J]. 2005, 25(3): 38—39.
- ZHAO Cheng, SHAN Fang. Control of Surface Degree of Finish of Cold Rolled Stainless Steel Strip[J]. 2005, 25(3): 38—39.

(上接第85页)

- [9] ZHANG F Y, CHEN H, HU Y K, et al. Influence of Mo Content on Microstructure and Microhardness of Laser Solid Formed Ti-6Al-Mo System Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1332—1336.
- [10] 高霖, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80.
- GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80.
- [11] 项坤. 钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 91—93, 104.
- XIANG Kun. Study on Titanium Alloy Single Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91—93, 104.
- [12] PAULO D. Predicting the Geometric Form of Clad Angle in Laser Cladding by Powder using Multiple Regression Analysis (MRA)[J]. Materials and Design, 2008, 29(2): 554—557.
- [13] LALAS C, TSIRBAS K, SALONITI S. An Analytical Model of the Laser Clad Geometry[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(1): 34—41.
- [14] HEMMATI I, OCELIK V. The Effect of Cladding Speed on Phase Constitution and Properties of AISI 431 Stainless Steel Laser Deposited Coatings[J]. Surface & Coating Technology, 2011, 205(21/22): 5235—5239.
- [15] TANG Xiao-dan, YAO Jian-hua, KONG Fan-zhi. Manufacture and Microstructure Performance of H13-TiC Gradient Composite Coating Made by Laser Cladding[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 18—21.
- [16] 徐卫仙, 张群莉, 姚建华. 热锻模激光熔覆 Co 基 WC 涂层的高温磨损性能研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 370—375.
- XU Wei-xian, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua. Research on High-temperature Wear Resistance of Laser Cladding Co-based WC Composite Coating on Hot-forging Die[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 370—375.

(上接第109页)

- BAO Chun-jiang, WANG Rui-li. Experimental Research on Surface Pretreatment Process in Electro-brush Plating[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 78—81.
- [47] 孙增伟, 赵晓春, 刘晓明, 等. 电刷镀在轴类修复中的应用[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(7): 30—31.
- SUN Zeng-wei, ZHAO Xiao-chun, LIU Xiao-ming, et al. Application of Brush Plating in Shafts Repairing[J]. Plating & Finishing, 2010, 32(7): 30—31.
- [48] 孙凯伟, 于华, 吴公一, 等. TA2 表面电火花沉积 NiCr 涂层的界面行为[J]. 焊接技术, 2015, 44(4): 10—12.
- SUN Kai-wei, YU Hua, WU Gong-yi, et al. Interface Behavior of NiCr Coating on TA2 Alloy Produced by Electrospark Deposition[J]. Welding Technology, 2015, 44(4): 10—12.
- [49] 赵程, 高玉新. 电火花沉积 Ni 基涂层的质量过渡及电极损失[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 51—53.
- ZHAO Chen, GAO Yu-xin. Mass Transfer Regularity and Mass Loss of Electrode of Electrospark Deposited Ni-based Coating[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 51—53.
- [50] 金君, 董晨竹, 徐东. 电火花沉积 Ni 基合金涂层的摩擦磨损特性[J]. 表面技术, 2011, 40(3): 32—34.
- JIN Jun, DONG Chen-zhu, XU Dong. Tribological Properties of Ni-based Coating Prepared by Electrospark Deposition[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 32—34.
- [51] 罗成, 董仕节, 熊翔, 等. 电火花沉积表面处理技术的应用进展[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 53—56.
- LUO Cheng, DONG Shi-jie, XIONG Xiang, et al. Application Progress of Electrospark Deposition Surfacing Technology[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 53—56.
- [52] 赵晓春, 孙增伟, 刘晓明, 等. 电火花堆焊技术的研究及在电力轴类修复中的应用[J]. 热加工工艺, 2010(19): 170—172.
- ZHAO Xiao-chun, SUN Zeng-wei, LIU Xiao-ming, et al. Research and Application of Electric-spark Overlaying Process in Restoring Electric Axle Parts[J]. Hot Working Technology, 2010(19): 170—172.