

# 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究

叶四友<sup>1</sup>, 刘建永<sup>1,2</sup>, 杨伟<sup>1</sup>

(1.湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442000; 2.西安交通大学, 西安 710049)

**摘要:** **目的** 提高 45<sup>#</sup>钢的使用性能和耐蚀性。**方法** 以 316L 不锈钢粉末为熔覆材料, 在 45 钢退火基体表面制备不锈钢熔覆层, 采用 CCD 中心组合设计, 利用金相法检测熔覆层的几何形貌参数, 利用光学显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 分析熔覆层的显微组织, 采用显微硬度计和磨损试验机测试熔覆层的显微硬度和磨损性能, 利用电位极化曲线测试熔覆层的耐腐蚀性能。**结果** 当激光功率为 600 W, 扫描速度为 22.5 mm/s, 送粉速率为 0.18 r/min 时, 熔覆层与基体呈良好的冶金结合。熔覆层的硬度在 461.3~559.8HV, 是基材硬度的 2 倍左右; 磨损量为 0.0146 g, 是基材的 0.1 倍; 摩擦系数较为稳定, 保持在 0.5 左右, 是基材的 0.3 倍左右; 自腐蚀电流密度为  $3.274 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>, 是基材的 0.7 倍左右。**结论** 在 45 钢表面激光熔覆 316L 不锈钢涂层后, 可有效提高其耐磨性和耐蚀性。

**关键词:** 激光熔覆; 316L; CCD 中心组合设计; 磨损性能; 耐蚀性

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0048-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.008

## Microstructure and Properties of Laser Cladded 316L Stainless Steel Layer

YE Si-you<sup>1</sup>, LIU Jian-yong<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>

(1.Hubei Automotive Industrial Institute, Shiyan 442000, China; 2.Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve usability and corrosion resistance of 45 steel. With 316L stainless steel powder as cladding material, stainless steel cladding layer was prepared on the surface of annealed 45 steel. CCD center combination design was adopted. Geometrical morphology parameters of the cladding layer was detected in metallographic method. Microstructure of the cladding layer was analyzed with optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Microhardness and wear resistance of the cladding layer were measured with microhardness tester and wear tester. Corrosion resistance of the cladding layer was tested based upon polarization curve. The cladding layer exhibited metallurgical bonding to the substrate provided with laser power of 600 W, scanning speed of 22.5 mm/s, powder feeding rate of 0.18 r/min. Hardness of the cladding layer was 461.3~559.8HV, about 2 times that of the substrate; abrasion loss of the cladding layer was 0.0146 g, 0.1 times that of the substrate; friction coefficient was relatively stable and kept at 0.5, about 0.3 times that of the substrate self-corrosion current density was  $3.274 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>, 0.7 times that of the substrate. Laser cladding of 316L stainless steel coatings on annealed 45 steel can effectively improve wear resistance and corrosion resistance of the coatings.

**KEY WORDS:** laser cladding; 316L stainless steel; CCD center combination design; wear resistance; corrosion resistance

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2017-11-10

Received: 2017-09-29; Revised: 2017-11-10

基金项目: 湖北省教育厅科学研究项目 (B2015120); 光电子技术湖北省协同创新中心专项经费

Fund: Supported by Scientific Research Projects of Hubei Province (B2015120) and Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Optoelectronics

作者简介: 叶四友 (1974—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为激光表面工程。

Biography: YE Si-you (1974—), Female, Master, Associate professor, Research focus: laser surface engineering.

承受动载荷和冲击、耐磨性和耐腐蚀性都有较高要求的 45<sup>#</sup>钢结构件，在实际工作中受到介质的腐蚀、载荷的冲击后，表面会发生一些磨损腐蚀现象<sup>[1]</sup>。激光熔覆技术不仅能提高材料表面的硬度、耐磨性和耐腐蚀性，而且高效经济<sup>[2-11]</sup>。目前，国内外一些学者对激光熔覆不锈钢涂层进行了相关研究，结果表明不锈钢涂层的性能得到了提高<sup>[11-15]</sup>。

本文采用 CCD 中心组合设计法在 45<sup>#</sup>钢基体上进行单道激光熔覆 316L 试验，通过对单道熔覆层组织和性能的分析，获取最优的多道激光熔覆工艺参数。然后在 45<sup>#</sup>钢基材表面进行多道激光熔覆 316L 的试验，对多道搭接熔覆层的组织和性能进行分析。该研究结果对采用激光熔覆法对普通碳钢进行耐磨、耐蚀强化具有一定的指导意义。

1 试验

1.1 涂层的制备

基体材料为 45<sup>#</sup>钢，尺寸为 500 mm×400 mm×20 mm，前处理流程为：表面打磨→丙酮清洗干净→砂纸逐级打磨至 2000<sup>#</sup>→喷砂。选用的熔覆材料为球形 316L 不锈钢粉末，粒度为 100~150 μm，其化学成分（质量分数计）为：Cr 17.1%，Ni 13.5%，Mo 2.3%，Mn 0.2%，Si 0.8%，Fe 余量。熔覆粉末放入干燥箱烘干，随用随取。

使用 LDF3000-60 型 3.3 kW 半导体激光器，激光波长为((980~1020) ±10) nm，频率为 50 Hz。熔覆采用同轴送粉方法，工艺参数初步确定为：激光功率  $P$

550~650 W，扫描速度  $v_s$  20~25 mm/s，送粉速率  $v_f$  0.2~0.3 r/min。采用 CCD 中心组合设计方法进行单道熔覆实验，确定出最优工艺参数后，再进行多道搭接熔覆实验。涂层制备过程中均采用流速为 4 mL/s 的氩气气氛保护熔池。

1.2 性能测试及组织观察

采用 MH-5 显微硬度计测试涂层的硬度，测试参数分别为：载荷 100 g，保压时间 15 s，每个测量点间距为 0.01 mm。

采用 MMX-3G 摩擦磨损测试系统测试基材和涂层的耐磨性能。通过销盘摩擦副进行摩擦磨损实验，摩擦盘是直径为 10 mm 的 GCr15 钢，经淬火后 180 ℃低温回火，硬度为 920HV。将熔覆层和基材线切割成  $\phi 4.8$  mm×12.7 mm 的试样，相关测试参数如下：摩擦速度 15 mm/s，载荷 5 N，测试时间 15 min。

采用 CHI600E 电化学工作站测试涂层的耐蚀性，所用腐蚀介质为 5%NaCl+5%KCl 溶液（均为质量分数）。用线切割将样品切成 3 mm×3 mm 的薄片，然后对样品进行封边处理。

2 结果及分析

2.1 单道熔覆 316L 不锈钢涂层的硬度

采用 Design expert8.0 进行 CCD 中心组合设计来确定各组试验的工艺参数，依据 1.1 小节中给出的激光功率、扫描速度和送粉速率的上水平和下水平确定工艺参数并获得各工艺参数下的熔宽、熔高和熔深，见表 1。

表 1 316L 不锈钢涂层单道激光熔覆的工艺参数  
Tab.1 Process parameters of 316L stainless steel single-channel laser cladding

实验序号	激光功率 $P/W$	扫描速度 $v_s/(mm \cdot s^{-1})$	送粉速率 $v_f/(r \cdot min^{-1})$	熔宽 $W/mm$	熔高 $H/mm$	熔深 $h/mm$
1	650	20	0.25	1.0616	0.3431	0.1158
2	600	22.5	0.23	0.7592	0.2402	0.0857
3	685	22.5	0.23	1.0503	0.3124	0.1096
4	550	20	0.25	0.5919	0.1994	0.1072
5	600	22.5	0.23	0.8149	0.2809	0.1672
6	550	20	0.2	0.9007	0.1844	0.0986
7	600	18.5	0.23	1.0680	0.3238	0.0943
8	515	22.50	0.23	0.5039	0.1394	0.0986
9	650	25	0.2	0.9886	0.3002	0.1351
10	600	22.5	0.27	0.9136	0.2680	0.1394
11	600	22.5	0.23	0.7592	0.2402	0.0857
12	550	25	0.2	0.5104	0.1565	0.0943
13	650	25	0.25	0.7892	0.2676	0.1072
14	600	22.5	0.23	0.8900	0.293	0.1072
15	600	22.5	0.18	1.0830	0.28	0.0979
16	650	20	0.2	1.138	0.302	0.1308
17	550	25	0.25	0.782	0.182	0.0836
18	600	22.5	0.23	0.913	0.288	0.1142
19	600	22.5	0.23	0.988	0.311	0.1175
20	600	26.5	0.23	0.789	0.238	0.0857

对20组316L不锈钢单道激光熔覆的组织进行分析,在第15组激光工艺参数下可获得无缺陷涂层,此时熔覆层上部主要由等轴晶构成,中部和下部由柱状晶构成,见图1。测试了20组实验样品的平均硬度值,见图2。综合涂层形貌特征、组织和硬度可

知,当激光功率 $P$ 为600 W,扫描速度 $v_s$ 为22.5 mm/s,送粉速率 $v_f$ 为0.18 g/min时,单道熔覆层的质量最好。接下来以此激光工艺参数进行多道搭接熔覆实验。

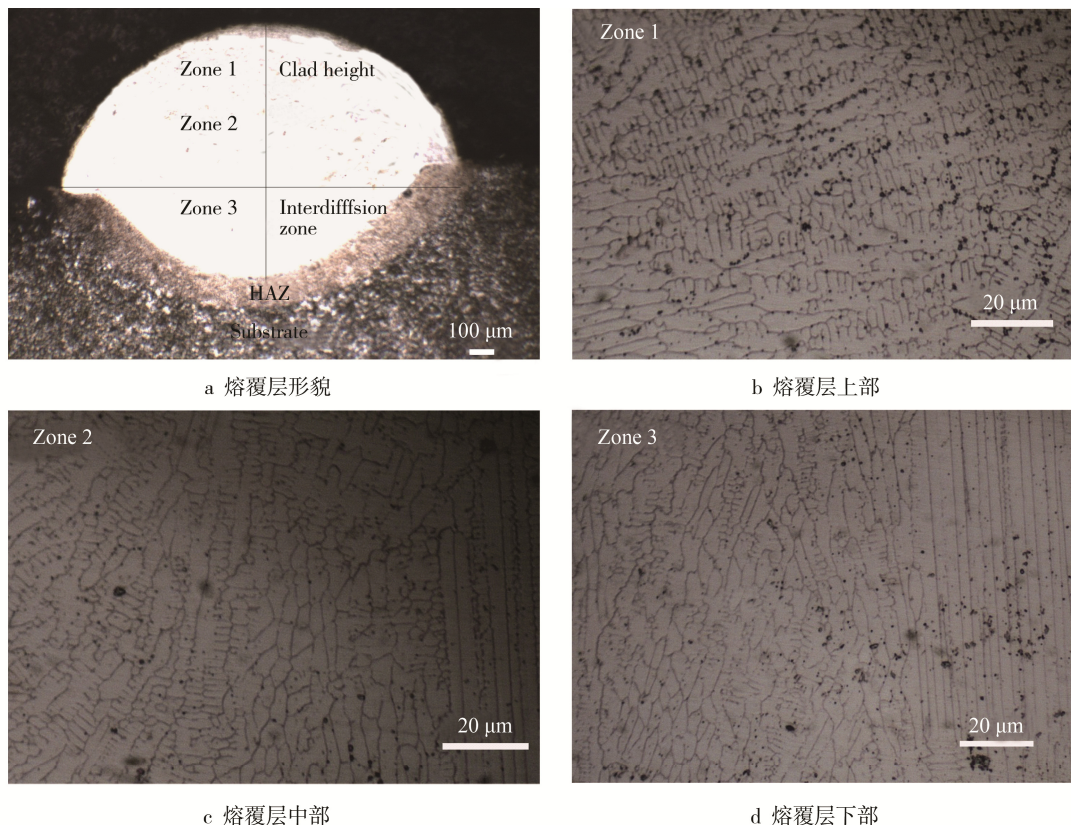


图1 15#样品熔覆层的横截面组织

Fig.1 Cross-sectional structure of clad layer on sample 15#: a) morphology of cladding layer, b) upper part of cladding layer, c) middle of cladding layer, d) bottom of cladding layer

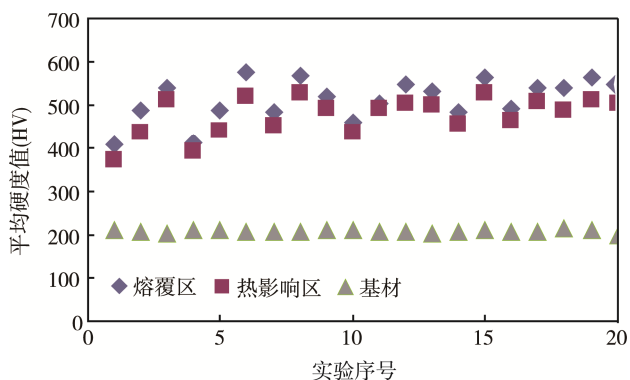


图2 20组涂层的显微硬度分布

Fig.2 Microhardness distribution of 20 groups of coatings

## 2.2 多道搭接熔覆316L不锈钢涂层的组织

图3为多道搭接涂层的表面形貌,可见,表面平整,无裂纹、气孔等常见缺陷。熔覆层的截面组织见图4和图5。图5a为熔覆层上部组织图,可以看

出,组织为细小的等轴晶和胞状晶,这是因为在熔覆层上部,温度下降最快,形核速率大于晶粒的生长速度,从而使得熔覆层表面形成细小的胞状晶和等轴晶。图5b为熔覆层搭接区域的组织图,在进行多道搭接时,第2道熔覆层以第1道熔覆层的一部分为界面,呈外延式生长。由于第2道熔覆层在搭接时,第1道熔覆层的温度较高,所以在搭接区域有大量的柱状晶产生,并且柱状晶的取向是垂直于搭接区的界面,向熔池内部生长。图5c为熔覆层的中部组织,是等轴晶向柱状晶的过渡区。柱状晶的产生是由于凝固过程中温度梯度减小,形核变得困难,柱状晶组织垂直于基体结合面(沿热流方向),向熔池内部生长,晶体长大方向与熔池的散热有关。图5d为熔覆层的底部组织,是熔覆层与基体之间出现平面晶的过渡区域。这是因为在熔池的基体界面处,凝固所释放的热量全部向界面表面传递,从而使得结晶面缓慢向前推移,结晶呈平面状态,在界面处形成平面晶。





图 3 激光熔覆表面  
Fig.3 Lase cladded surface

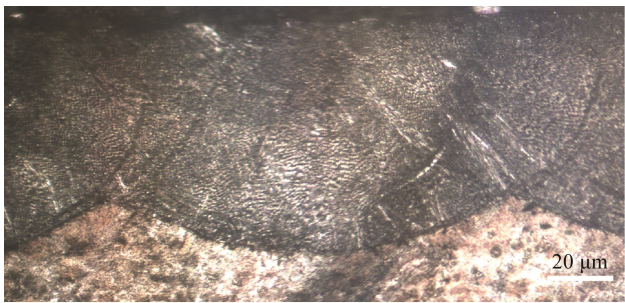
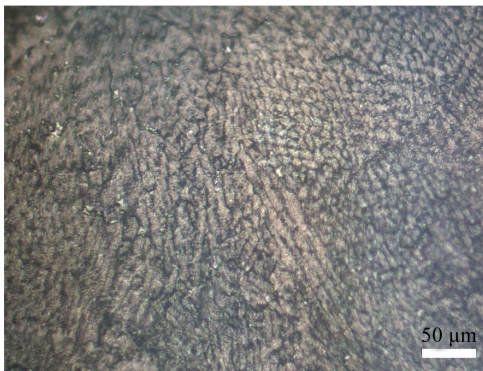
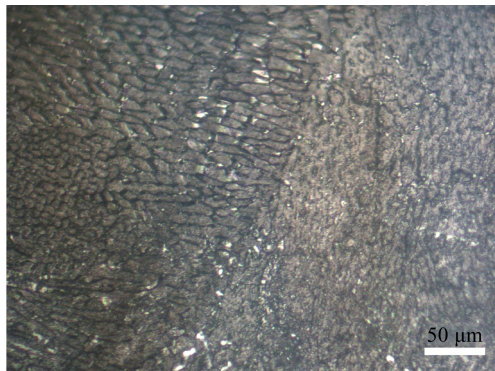


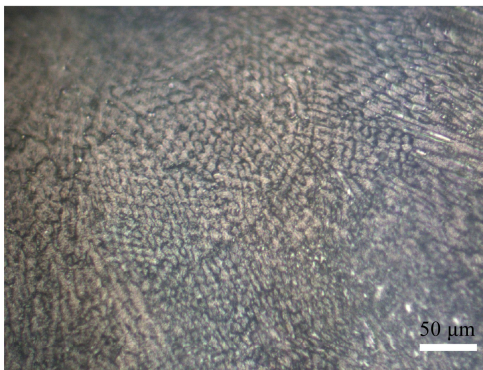
图 4 熔覆层截面组织 1  
Fig.4 Cross-sectional structure 1 of cladding layer



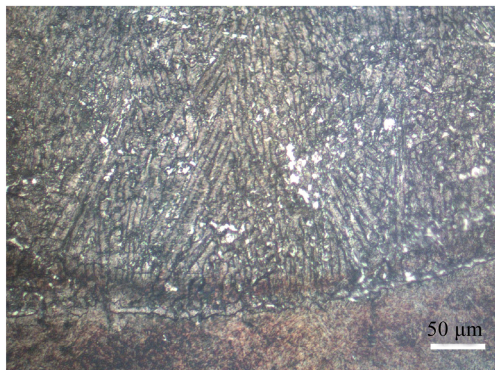
a 熔覆层上部



b 熔覆层搭接区



c 熔覆层中部



d 熔覆层下部

图 5 熔覆层截面组织 2

Fig.5 Cross-sectional structure 2 of cladding layer: a) upper part of cladding layer, b) lapping area of cladding layer, c) middle of cladding layer, d) bottom of cladding layer

2.3 多道搭接熔覆 316L 不锈钢涂层的磨损性能

45#钢基体和熔覆层磨损失重和摩擦系数随时间的变化曲线分别见图 6 和图 7。由图 6 可知，在同样的磨损条件下，基材失重为 0.1674 g，是熔覆层失重（0.0146 g）的 11 倍左右，由此可见通过熔覆 316L 涂层，材料表层的抗磨损性能大大提高。由图 7 可知，随着时间的延续，熔覆层摩擦系数变得相对稳定，保持在 0.5 左右。基材摩擦系数波动较大，稳定后保持在 1.5 左右，是多道搭接熔覆层的 3 倍。

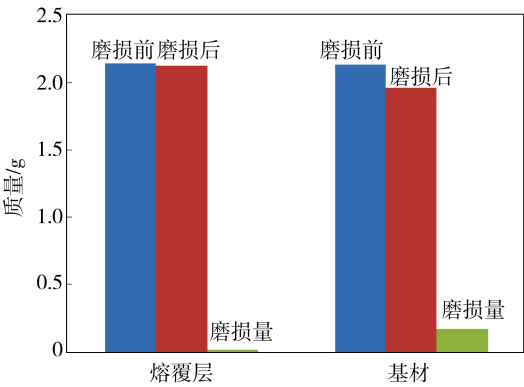


图 6 磨损失重  
Fig.6 Wear weight loss

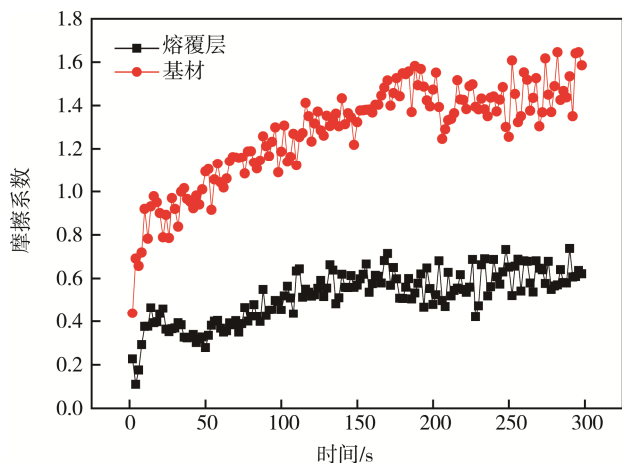


图7 摩擦系数随时间的变化

Fig.7 Coefficient of friction as a function of time

## 2.4 多道搭接熔覆 316L 不锈钢涂层的耐腐蚀性能

图8为45#钢基体和316L不锈钢熔覆层的电位极化曲线。由图可知,熔覆层的自腐蚀电流密度为  $3.274 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 基材的自腐蚀电流密度为  $4.818 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 熔覆层的自腐蚀电流密度低于基材, 可以得出熔覆层的耐腐蚀性能优于基材。

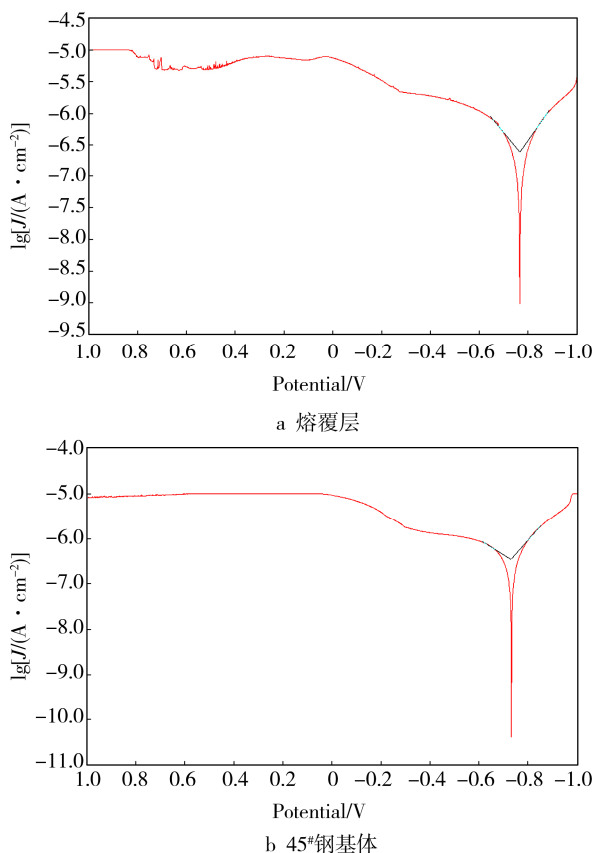


图8 电位极化曲线

Fig.8 Potentiodynamic polarization curves of cladding layer (a) and 45 steel substrate (b)

## 3 结论

1) 摩擦磨损实验结果表明,在相同条件下磨损时,多道搭接熔覆层的失重较少(基材失重 0.1674 g,熔覆层失重 0.0146 g),基材失重是熔覆层的 11 倍。在磨损试验中,熔覆层的摩擦系数保持在 0.5,基材摩擦系数为 1.5。

2) 激光熔覆层的自腐蚀电流密度为  $3.274 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 基材的自腐蚀电流密度为  $4.818 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 激光熔覆层的耐蚀性显著提高。

## 参考文献:

- [1] 张德强, 张吉庆, 郭忠娟. 45 钢表面激光熔覆自熔性镍基碳化钨粉末[J]. 表面技术, 2015, 44(11): 66-70. ZHANG De-qiang, ZHANG Ji-qing, GUO Zhong-juan. Laser Cladding of Self-fluxing Ni-based WC Powder on 45 Steel Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(11): 66-70.
- [2] 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. XIANG Kun. Study on Titanium Alloy Single Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91-93.
- [3] LIU Hong-xi, WANG Chuan-qi, ZHANG Xiao-wei, et al. Improving the Corrosion Resistance and Mechanical Property of 45 Steel Surface by Laser Cladding with Ni60CuMoW Alloy Powder[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(5): S296-S300.
- [4] ABDOLAH B, SHAHVERDI H R, TORKAMANY M J, et al. Improvement of the Corrosion Behavior of Low Carbon Steel by Laser Surface Alloying[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(23): 9921-9924.
- [5] CHAO Ming-ju, WANG Wen-li, LIANG Er-jun, et al. Microstructure and Wear Resistance of TaC Reinforced Ni-based Coating by Laser Cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(10): 1918-1922.
- [6] ZHOU Sheng-feng, XIAO Qin-dai, ZHENG Hai-zhong. Microstructure and Wear Resistance of Fe-based WC Coating by Multi-track Overlapping Laser Induction Hybrid Rapid Cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 190-197.
- [7] BAO Rui-bang, YU Hui-jun, CHEN Chuan-zhong, et al. Development of Laser Cladding Wear-resistant Coating on Titanium Alloys[J]. Surface Review and Letters, 2006, 13(5): 645-654.
- [8] JENDRZEJEWSKI R, NAVAS C, CONDE A, et al. Properties of Laser-cladded Stellite Coatings Prepared on Preheated Chromium Steel[J]. Materials & Design, 2018, 150: 104-115.

- 2008, 29(1): 187-192.
- [9] GANESH P, MOITRA A, PRAGYA T, et al. Fracture Behavior of Laser-clad Joint of Stellite 21 on AISI 316L Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16/17): 3748-3756.
- [10] LGOR S. Titanium Base Functional Graded Coating via 3D Laser Cladding[J]. Material Letters, 2012, 73(8): 32-35.
- [11] 何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 79-84.
- HE Xiang-ming, LIU Xiu-bo, YANG Mao-sheng, et al. Elevated Temperature Tribological Behaviors of Laser Cladding Nickel-based Composite Coating on Austenitic Stainless Steel[J]. Chinese Lasers, 2011, 38(9): 79-84.
- [12] 徐鹏, 董梁, 鞠恒, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的组织及耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(s1): 221-225.
- XU Peng, DONG Liang, JU Heng, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of 304 Stainless Steel Layer by Laser Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(s1): 221-225.
- [13] 冯爱新, 陈凤国, 裴绍虎, 等. 激光熔覆对 304L 不锈钢表面摩擦磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 223-228.
- FENG Ai-xin, CHEN Feng-guo, PEI Shao-hu, et al. Effects of Laser Cladding on Friction and Wear Properties of 304 Stainless Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(8): 223-228.
- [14] ZHANG L, ZHANG Y K, LU J Z, et al. Effects of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Resistance of ANSI 304 Stainless Steel Weldments after Cavitation Erosion[J]. Corrosion Science, 2011, 66: 5-13.
- [15] TOBAR M J, ALVAREZ C, AMADO J M, et al. Morphology and Characterization of Laser Clad Composite NiCrBSi-WC Coatings on Stainless Steel[J]. Surface & Coating Technology, 2006, 200(22-23): 6313-6317.