

热处理对铁基激光熔覆层力学及耐腐蚀性能的影响

刘双¹, 王勤英^{1*}, 西宇辰¹, 唐怡荣¹, 裴瑞¹, 白树林²

¹西南石油大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610500;

²北京大学工学院, 北京 100871

摘要 在 Q235 碳钢上采用脉冲激光器制备出了铁基熔覆层, 探究了不同热处理温度(600, 750, 900 °C)对熔覆层的影响, 对熔覆层的微观形貌、相组成和力学性能进行了表征, 并探究了不同热处理温度下的熔覆层腐蚀行为。结果表明, 熔覆层由结晶组织和非晶组织组成, 结晶相随热处理温度的升高而增多; 热处理会提高熔覆层近表面的硬度, 其中经过 900 °C × 2 h 热处理的熔覆层近表面平均硬度最高, 约为 1100 HV_{0.1}; 熔覆层的耐腐蚀性能随着热处理温度的上升而提高, 其中 900 °C × 2 h 热处理后的铁基熔覆层具有最高的自腐蚀电位(-0.52500 V)和最低的自腐蚀电流密度(2.2810×10^{-6} A/cm²), 耐腐蚀性能最好。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 铁基涂层; 热处理; 硬度; 腐蚀行为

中图分类号 TG15

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121401

Effect of Heat Treatment on Mechanical and Anti-Corrosion Properties of Fe-Based Laser Cladded Coatings

Liu Shuang¹, Wang Qinying^{1*}, Xi Yuchen¹, Tang Yirong¹, Pei Rui¹, Bai Shulin²

¹School of Materials Science and Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

²College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Herein, Fe-based cladding coatings are prepared on Q235 carbon steels using a pulsed laser. The effects of heat treatment temperatures of 600 °C, 750 °C, and 900 °C on these coatings are investigated. In addition, the microstructures, phase compositions, and mechanical properties of these coatings are characterized. Moreover, the corrosion behaviors of these coatings before and after heat treatment are examined. The results show that after heat treatment, the coatings were observed to consist of both crystalline and amorphous structures. The content of the crystalline phase increases with the increase of heat treatment temperature, and heat treatment can increase the near surface hardness of cladding layers, specifically, the average hardness of cladding layers is the highest at approximately 1100 HV_{0.1} under the heat treatment of 900 °C for 2 h. The anti-corrosion performance of coatings improves with the increase of heat treatment temperature, and the Fe-based cladding layers after heat treatment of 900 °C for 2 h show the highest corrosion potential of -0.52500 V, the lowest corrosion current density of 2.2810×10^{-6} A/cm², implying the highest anti-corrosion performance.

Key words lasers technology; laser cladding; Fe-based coating; heat treatment; hardness; corrosion behavior

OCIS codes 140.3390; 310.1515; 310.1860

1 引言

激光熔覆是 20 世纪 70 年代兴起的一种激光表面改性技术, 即在激光束作用下将合金粉末或陶瓷粉

末与基体表面迅速加热并熔化, 在光束移开后冷却形成与基体材料呈良好冶金结合的表面熔覆层, 具有热影响区小和基体变形小等优点^[1-2]。激光表面熔覆层具有优异的力学性能和耐腐蚀性能, 在世界范围内得

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2018-12-28; 录用日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51801167)、青年人才托举工程(2018QNEC001)、西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室开发课题(PLN201822)

* E-mail: wangqy0401@126.com

到了广泛的应用^[3-5]。常用的熔覆材料有铁基^[6-8]、镍基^[9-10]、钴基^[11-12]等,铁基激光熔覆层^[13]由于其生产成本低于镍基、钴基熔覆层,且性能接近,因而具有很好的应用前景。

目前,激光熔覆主要集中于材料和工艺参数的研究。宋新华等^[14]利用 CO₂ 激光器在 35CrMo 的表面熔覆 3540 铁基和 Ni00 镍基合金粉末,发现两种熔覆层的硬度和耐腐蚀性能较基体都有所提高。付志凯等^[15]在轮和钢轨表面制备了铁基熔覆层,发现铁基合金熔覆层主要由枝晶和共晶组织构成,钢轨和轮的硬度与未熔覆时相比分别提高了 141.6% 和 122.6%。Chen 等^[16]用激光熔覆的方法在碳钢表面制备了 Fe₄₁Co₇Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆Y₂ 非晶熔覆层,并利用电化学测试方法研究了熔覆层在 1 mol/L 盐酸中的腐蚀行为,发现当激光功率为 3300 W 时,耐腐蚀性能随激光熔覆速度增加而降低。由于铁基激光熔覆层易产生裂纹和孔隙等,从而限制其进一步发展。Gong 等^[17]在 FV520B 钢燕尾槽基体上制备出了多层 FeCrNi 激光熔覆层,研究了热处理对 FeCrNi 熔覆层组织和力学性能的影响,发现在 1073~1273 K 的温度下,热处理细化了基体材料的晶粒,并有效地消除了熔合区和基体材料之间的软化区。王军等^[18]研究了铁基合金激光熔覆层经过高温回火(690 °C)1 h 后的组织,发现奥氏体相中会

析出 M₂₃C₆、M₂C 及 M₆C 碳化物,高温回火处理不仅改变了碳化物的分布及形态,同时还能使碳化物细化,熔覆层经过热处理后具有明显的二次硬化特征。至今,已有诸多学者研究了热处理对激光熔覆层组织与性能的影响^[19-21],关于热处理对用脉冲激光熔覆技术制备的 Fe-Cr-Mo 系铁基熔覆层的影响研究甚少。

因此,为了了解热处理对激光熔覆技术制备的 Fe-Cr-Mo 系熔覆层的影响,本文采用不同温度对铁基熔覆层进行热处理,并对其相组成、显微组织、力学性能及耐腐蚀性能进行了对比研究,从而为铁基激光熔覆层的应用提供一定的参考。

2 实验材料及方法

实验设备为 Nd:YAG 脉冲激光器,采用预制粉法制备厚度为 1 mm 的激光多道熔覆层。基体材料选用 Q235 低碳钢,熔覆材料选用铁基非晶粉末,颗粒的平均尺寸为 30~50 μm,材料的化学成分如表 1 所示,表中 Bal. 表示的是除去其余元素所剩的含量。激光熔覆的具体工艺参数见表 2,为防止涂层氧化采用氩气作为保护气体。激光熔覆后,将试样切割成 10 mm×10 mm×4 mm 的块状,用 240~2000 # 的金相砂纸依次进行磨制,并用粒度为 1 μm 的刚玉粉进行抛光。

表 1 Q235 碳钢和铁基非晶粉末的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Q235 carbon steel and Fe-based amorphous powder

Sample	Mass fraction / %									
	Cr	Mo	W	Si	Mn	B	C	S	P	Fe
Q235 steel	0	0	0	0.37	0.08	0	0.16	0.04	0.04	Bal.
Fe-based amorphous powder	17.7	7.4	1.6	2.4	1.9	15.2	3.8	0	0	Bal.

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Process parameters of laser cladding

Laser power	Spot diameter	Scanning speed	Overlap ratio	Pulse frequency
P / W	d / mm	$V / (m \cdot s^{-1})$	$\delta / \%$	f / Hz
700	3	6	30	12

采用真空管式高温烧结炉 (OTF-1200X, 合肥科晶材料技术有限公司) 对铁基熔覆层进行热处理, 热处理温度选用 600, 750, 900 °C, 并分别保温 2 h, 采用高纯氩气作为保护气, 流量约为 0.7 L/min; 采用扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS EVO MA15, 卡尔蔡司显微图像有限公司, 德国) 对激光熔覆层的显微组织形貌进行观察; 使用 X 射线衍射仪 (XRD, X Pert PRO MPD, 帕纳科公司, 荷兰) 对铁基熔覆层的物相组成和结晶程度进行分析; 利用数显显微硬

度计 (HVS-1000, 烟台莱州华银试验仪器有限公司) 测试基体和铁基熔覆层的维氏硬度; 使用多功能材料表面性能测试仪 (MFT-4000, 兰州华汇仪器科技有限公司) 对基体和熔覆层的摩擦性能进行测试; 采用电化学工作站 (CS310, 武汉科斯特仪器股份有限公司) 对铁基熔覆层的交流阻抗谱和动电位极化曲线进行测试。电化学分析采用三电极体系, 其中工作电极为铁基熔覆层样品, 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 辅助电极为铂电极。交流阻抗谱的测试

参数为:扫描频率 10 mHz~100 kHz,电压振幅 ± 5 mV。动电位极化曲线的测试参数为:电压扫描速度 1 mV/s,电压扫描范围 $-0.5\sim 1.5$ V。为保证准确性,所有实验重复 3 次。选用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液作为腐蚀介质。

3 结果与讨论

3.1 熔覆层显微组织及相分析

不同热处理温度下铁基非晶熔覆层的表面形貌如图 1 所示。由图 1 可知,热处理前后的熔覆层无

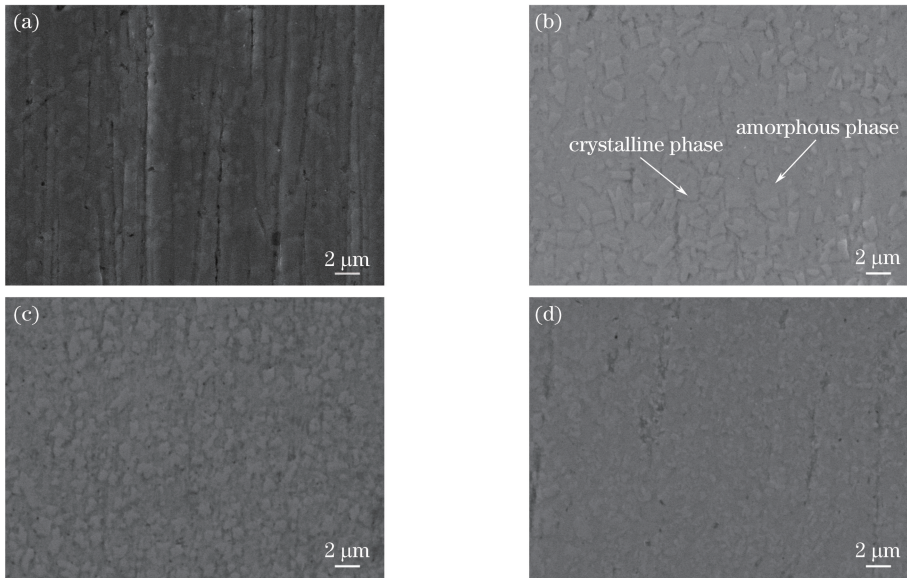


图 1 热处理前后表面形貌图。(a)未热处理;(b) 600 °C×2 h 热处理;(c) 750 °C×2 h 热处理;(d) 900 °C×2 h 热处理

Fig. 1 Surface morphologies before and after heat treatment. (a) Without heat treatment; (b) heat treatment of 600 °C × 2 h; (c) heat treatment of 750 °C × 2 h; (d) heat treatment of 900 °C × 2 h

图 2 为热处理前后铁基熔覆层的 X 射线衍射图谱。从图中可以观察到衍射峰较尖锐,说明铁基熔覆层存在结晶相,但衍射峰相对强度不高,推断可能有非晶组织形成。对衍射峰标定发现,熔覆层中存在的结晶相主要为 $(\text{Mo}, \text{Fe}, \text{Mo})_2\text{C}$ 和 Fe-Cr。随着热处理温度的升高,在 $28^\circ\sim 30^\circ$ (衍射角为 2θ) 逐渐出现新的衍射峰,并且衍射峰强度增高, Mn, Mo, Fe 等元素会逐渐扩散,使原本结晶相 (Mn, Fe, Mo) $_2$ C 的含量增多。 $45^\circ(2\theta)$ 左右的衍射峰增强,推断熔覆层中存在的 Fe-Cr 结晶相也会随着温度的升高而逐渐增多。结果表明,热处理温度升高会提高铁基熔覆层的结晶度。结合图 1 热处理前后的表面形貌图,可以发现,呈规则块状的结晶相为 Fe-Cr 相和 $(\text{Mo}, \text{Fe}, \text{Mn})_2\text{C}$ 相的混合相。

3.2 熔覆层力学性能

图 3 为铁基熔覆层热处理前后沿着横截面方向

明显的微米级裂纹和孔洞。图 1(b) 为经过 600 °C 热处理 2 h 后的表面形貌图,可以看出,熔覆层主要由规则块状组织和花状组织组成。通过对比分析图 1(b)~(d) 可以发现,随着热处理温度的升高,呈规则块状的组织增多,界限逐渐模糊,花状组织明显减少。王勤英等^[22]发现规则块状为结晶相,花状组织为非晶结构;随着热处理温度的升高,结晶相逐渐增多,非晶结构减少。可见,在一定范围内,热处理的温度越高,熔覆层的结晶相含量越多,热处理有助于结晶组织的析出和长大。

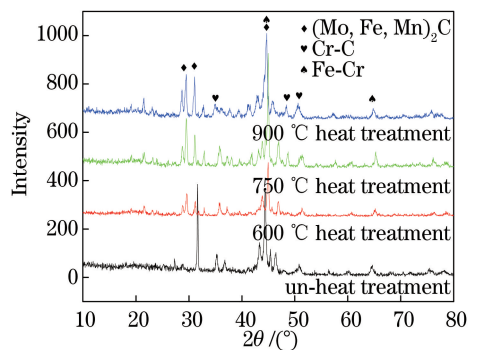


图 2 热处理前后试样的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of sample before and after heat treatment

的硬度分布。由图 3 可知,铁基熔覆层的平均显微硬度均为 $800\sim 1300$ $\text{HV}_{0.1}$,基体的平均显微硬度均在 250 $\text{HV}_{0.1}$ 左右。熔覆层的硬度远高于基体的硬度,约为基体的 4 倍。可见,激光熔覆技术制备的铁

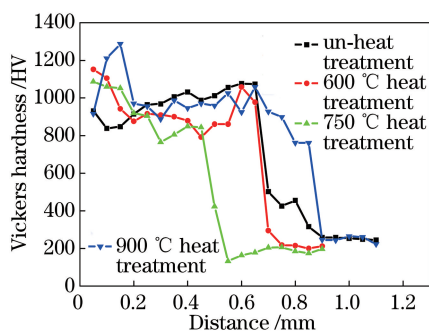


图3 基体和涂层的横截面显微硬度分布

Fig. 3 Cross-sectional microhardness distributions of substrate and coating

基熔覆层具有高硬度,可以作为耐磨材料。经过 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的铁基熔覆层的近表层部分熔覆层的硬度变化较大,熔覆层硬度的最大值出现在距离涂层表面约 0.2 mm 的地方。而经过 $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 和 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理过的铁基熔覆层的硬度分布呈递减的趋势。在熔覆层近表面部分,经过热处理后的熔覆层的显微硬度均高于未经热处理的熔覆层。但熔覆层的中部至基体与熔覆层的结合区部分,未经过热处理的熔覆层的显微硬度高于经过热处理的,由此表明热处理会提高铁基熔覆层的近表面硬度,同时又会使熔覆层中部至基体部分的硬度降低。表面的非晶相含量较高且缺陷多,热处理使碳化物在缺陷析出,使硬度增大;深层熔覆层结晶相含量高,热处理减小了熔覆层内部的残余应力,使硬度降低。

图4为铁基熔覆层热处理前后基体到熔覆层的摩擦系数及其变化趋势,可用以评价其摩擦学性能。经过4种不同热处理方式处理的铁基激光熔覆层,其摩擦系数变化趋势相同。摩擦系数先减小,然后逐渐保持平稳,当到达基体与熔覆层结合处,摩擦系数明显减小,表明熔覆层较基体显示出较高的摩擦

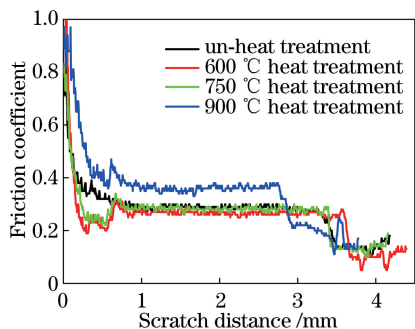


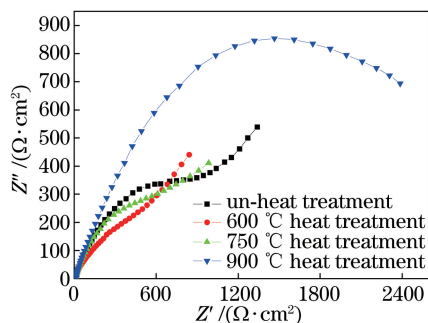
图4 基体和涂层的横截面摩擦系数随划痕距离的变化

Fig. 4 Cross-sectional friction coefficients of substrate and coating versus scratch distance

学性能。另外发现,经过 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的基体以及熔覆层的摩擦系数增大,摩擦学性能降低;而经过 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的熔覆层的摩擦系数最低,显示出的摩擦学性能最高。

3.3 熔覆层耐腐蚀性能

图5为未经热处理以及经过不同热处理温度后铁基熔覆层在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中测得的 Nyquist 曲线。横坐标 Z' 为阻抗的实部,纵坐标 Z'' 为阻抗的虚部。从图中可以看出,经过 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的试样显示出单个容抗弧特征,且容抗弧最大,而其余试样均显示出双容抗弧特征。结果表明,经 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的熔覆层具有更好的耐腐蚀性能;经 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 和 $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理后的熔覆层的容抗弧半径略小于未经过热处理的熔覆层。

图5 不同热处理温度下铁基熔覆涂层在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的 Nyquist 曲线Fig. 5 Nyquist curves of Fe-based cladding coating in NaCl solution with mass fraction of 3.5% at different heat treatment temperatures

为了进一步比较4种熔覆层的耐腐蚀能力,在开路电位稳定后,测试试样的动电位极化曲线,如图6所示。通过对动电位极化曲线的拟合,获得了4种熔覆层的自腐蚀电压 (E_{corr}) 和自腐蚀电流密度 (I_{corr}),拟合的结果如表3所示。结果表明,经过 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理的铁基熔覆层相对于饱和甘汞 (SCE) 电极有最高的自腐蚀电位 (-0.52500 V),说明较其他3种熔覆层发生腐蚀的倾向性更低;发生腐蚀之后,其腐蚀电流密度最低 ($2.2810\times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$),约为未进行热处理的铁基熔覆层的 8% 。由于材料发生腐蚀后的腐蚀速率主要由腐蚀电流密度决定,所以其腐蚀速率最低。对比经过 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 、 $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 、 $900\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 热处理的铁基熔覆层,可以发现,热处理温度越高,铁基熔覆层的自腐蚀电流密度越小,腐蚀速率越慢。可见,适当的热处理温度会提高铁基熔覆层的耐腐蚀能力。

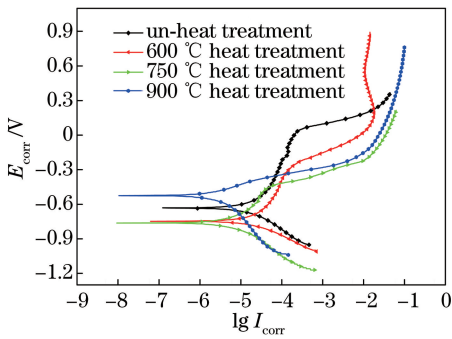


图6 不同热处理温度下铁基熔覆涂层在质量分数为3.5%的NaCl溶液中的动电位极化曲线

Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves of Fe-based cladding coating in NaCl solution with mass fraction of 3.5% at different heat treatment temperatures

表3 不同热处理温度下铁基熔覆涂层在质量分数为3.5%的NaCl溶液中的Tafel拟合结果

Table 3 Tafel fitting results of Fe-based cladding coating in NaCl solution with mass fraction of 3.5% at different heat treatment temperatures

Treatment condition	E_{corr} (V vs. SCE)	$I_{\text{corr}} / (10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Un-heat	-0.63243	2.8519
600 °C × 2 h	-0.74774	1.9398
750 °C × 2 h	-0.76149	0.6159
900 °C × 2 h	-0.52500	0.2281

4 结 论

采用脉冲激光熔覆技术,在合适的工艺参数下,在Q235碳钢上成功制备出铁基熔覆层,并对其进行了3个不同温度的热处理。结果发现,随着热处理温度的升高,呈规则块状组织的结晶相增多,呈花状组织的非晶结构减少;热处理后熔覆层的近表面部分的硬度提高,在600 °C × 2 h热处理的熔覆层的摩擦学性能最高。此外,电化学测试结果表明,热处理后试样的耐腐蚀性能优于热处理前的试样,并且随着热处理温度的升高,耐腐蚀性能更加优异。

综上所述,不同的热处理温度对激光铁基熔覆层的力学性能和耐腐蚀性能有着不同的影响。然而,采用哪种热处理温度可使熔覆层的综合性能更加优异还有待进一步探究。

致谢 衷心感谢西南石油大学蒋毓蔓同学对本论文后期修改所做的贡献。

参 考 文 献

[1] Zhang J, Wu W N, Zhao L Z. Research progress and

development trend of laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(6): 131-134, 139.

张坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131-134, 139.

[2] Wu W P, Liu J W, Wang H, *et al.* Microstructure and tribological performance of NiAl-SiC composite coating by laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091406.
吴王平, 刘剑文, 王辉, 等. 激光熔覆 NiAl-SiC 复合涂层的组织与摩擦性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091406.

[3] Xi Y C, Zhu J B, Liu S, *et al.* Effect of pulsed current on mechanical and anticorrosion properties of laser clad coating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 043102.

西宇辰, 朱建波, 刘双, 等. 脉冲电流对激光熔覆层力学及耐腐蚀性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 043102.

[4] Liu H X, Wang C Q, Zhang X W, *et al.* Improving the corrosion resistance and mechanical property of 45 steel surface by laser cladding with Ni₅₀CuMoW alloy powder[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: S296-S300.

[5] Wang Q Y, Xi Y C, Zhao Y H, *et al.* Effects of laser re-melting and annealing on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of Fe-based amorphous/crystalline composite coating [J]. Materials Characterization, 2017, 127: 239-247.

[6] Zhang H, Zou Y, Zou Z D, *et al.* Effects of chromium addition on microstructure and properties of TiC-VC reinforced Fe-based laser cladding coatings [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 614: 107-112.

[7] Li J, Zeng K L, Gao F. The effects of Cr₃C₂-25NiCr on microstructure and properties of iron based laser clad layer [J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4 (1): 36-40.

李杰, 曾克里, 高峰. Cr₃C₂-25NiCr 对铁基激光熔覆层微观组织与性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2012, 4 (1): 36-40.

[8] Wang Y F, Li H, Sun X, *et al.* Microstructures and formation mechanism of Fe-based amorphous coatings by broad-band laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302006.

王彦芳, 李豪, 孙旭, 等. 宽带激光熔覆铁基非晶涂层的微观组织及形成机制[J]. 中国激光, 2018, 45 (3): 0302006.

[9] Navas C, Colaço R, de Damborenea J, *et al.*

- Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(24): 6854-6862.
- [10] Wang Q Y, Wang X Z, Luo H, *et al.* A study on corrosion behaviors of Ni-Cr-Mo laser coating, 316 stainless steel and X70 steel in simulated solutions with H₂S and CO₂ [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 291: 250-257.
- [11] Li M X, He Y Z, Sun G X. Laser cladding Co-based alloy/SiCp composite coatings on IF steel [J]. *Materials & Design*, 2004, 25(4): 355-358.
- [12] He L H, Zhou F, Yang H Y. Research of *in situ* synthesis of TiC-TiB₂ reinforced Co-based composite coating by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 306-309.
何良华, 周芳, 杨惠瑶. 激光熔覆原位合成 TiC-TiB₂ 增强钴基复合涂层的研究 [J]. *激光技术*, 2013, 37(3): 306-309.
- [13] Ning S, Bian X F, Tian Y S, *et al.* Effects of WC on the microstructure and wear resistance of Fe-based laser-cladding coating [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2008, 28(6): 422-424, 405-406.
宁爽, 边秀房, 田永生, 等. WC 对铁基激光熔覆层微观组织与磨损性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28(6): 422-424, 405-406.
- [14] Song X H, Zou Y F, Xing J K, *et al.* Comparison between laser cladding Fe-based and Ni-based alloy coatings on 35CrMo [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 39-45.
宋新华, 邹宇峰, 邢家坤, 等. 35 CrMo 激光熔覆铁基合金与镍基合金涂层性能比较 [J]. *激光技术*, 2015, 39(1): 39-45.
- [15] Fu Z K, Wang W J, Ding H H, *et al.* Effect of laser cladding Fe-based alloy on wear performance of wheel and rail steels [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(8): 217-222.
付志凯, 王文健, 丁昊昊, 等. 激光熔覆铁基合金对轮轨材料磨损与损伤性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(8): 217-222.
- [16] Chen Q J, Guo S B, Yang X J, *et al.* Study on corrosion resistance of Fe-based amorphous coating by laser cladding in hydrochloric acid [J]. *Physics Procedia*, 2013, 50: 297-303.
- [17] Gong F B, Shen J, Gao R H, *et al.* Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of FeCrNi coating produced by laser cladding [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(8): 2117-2125.
- [18] Wang J, Wu X L, Hong Y S. High temperature tempered microstructure and wear resistance of laser clad iron-based alloy coating [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2000, 12(3): 51-54.
王军, 武晓雷, 洪友士. 铁基合金激光熔覆涂层的高温回火组织及其磨损性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2000, 12(3): 51-54.
- [19] Xiong W, Zhang Q M, Xia Q, *et al.* Effect of heat treatment on the microstructure and properties of laser cladding alloy [J]. *Applied Laser*, 2013, 33(3): 233-238.
熊炜, 张庆茂, 夏琪, 等. 高温热处理对激光熔覆合金层组织与性能的影响 [J]. *应用激光*, 2013, 33(3): 233-238.
- [20] Zhai Y J, Qiao S J, Lu X L, *et al.* Effects of heat treatment on mechanical properties of γ -(Ni, Fe)/CrB/hBN self-lubrication anti-wear composite coatings by laser cladding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(12): 229-235.
翟永杰, 乔世杰, 陆小龙, 等. 热处理对激光熔覆 γ -(Ni, Fe)/CrB/hBN 自润滑耐磨复合涂层力学性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(12): 229-235.
- [21] Gu W. Effect of heat treatment on Ni-Al laser cladding layer on 20# steel surface [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 357-361.
顾伟. 热处理对 20# 钢表面 Ni-Al 激光熔覆层的影响 [J]. *激光技术*, 2013, 37(3): 357-361.
- [22] Wang Q Y, Pu Y W, Liu S, *et al.* Comparison of hastelloy coating and Fe-based amorphous composite coating prepared by laser cladding on Q235 steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 123102.
王勤英, 蒲雨薇, 刘双, 等. Q235 钢表面激光熔覆哈氏合金涂层及铁基非晶复合涂层的比较 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 123102.