

激光熔覆原位生成增强相强化铁基涂层性能研究

尹泉, 彭如恕, 朱红梅

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:目的 采用激光熔覆技术在304不锈钢表面制备含有碳铬、硼钛化合物及氧化钛等增强相的铁基熔覆层,并对涂层的微观组织及其性能进行研究分析,以期以后工业化应用提供理论基础。方法 对钛铁(钛质量分数70%)+硼铁(硼质量分数70%)+石墨(纯度99.9%)复合粉末质量分数分别为5%、10%、20%、30%的4种熔覆层(其余熔覆材料为304不锈钢粉末)进行了实验研究,利用扫描电镜(SEM)、X射线衍射对激光熔覆层的微观组织形貌和增强粒子的成分进行研究分析,用光学显微硬度计对激光熔覆层的显微硬度进行测试,用电化学工作站对熔覆层的耐蚀性能进行测试。结果 熔覆层无明显裂纹、气孔等缺陷,与基材结合良好;加入的石墨与钛铁、硼铁在激光熔覆过程中发生了反应,原位生成了 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 、 TiO_2 、 $\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}$ 等硬质增强相;随着钛铁、硼铁和石墨所占的质量分数增加,熔覆层中生成的硬质增强相含量增加,熔覆层的显微硬度值也随之得到明显提高,其中质量分数为30%的复合粉末熔覆层硬度是基材的3.6倍;激光熔覆试样较基材的耐腐蚀性也随着复合粉末质量分数的增加而提高,其中质量分数为30%的复合粉末熔覆层的耐蚀性是基材的1.58倍。结论 激光熔覆制备含有碳铬、硼钛化合物及氧化钛等增强相的铁基熔覆层较基材性能有明显提高。

关键词: 激光熔覆; 复合粉末; 原位生成; 增强相; 组织; 性能

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)04-0099-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.017

Performance Improvement of Iron Base Coating by Laser Cladding In-situ Generated Reinforced Phase

YIN Quan, PENG Ru-shu, ZHU Hong-mei

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

ABSTRACT: Objective Laser cladding technology was used to prepare iron base cladding layers containing reinforced phases such as carbon chromium, titanium boron compounds and iron base of titanium oxide on the surface of 304 stainless steel, and the micro-structure of the coating and its performance was researched and analyzed, so as to provide theoretical basis for future industrial appli-

收稿日期: 2015-11-27; 修订日期: 2016-01-29

Received: 2015-11-27; Revised: 2016-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51201088); 湖南省教育厅科学研究项目(12C0324); 湖南省重点学科建设项目([2011]76)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51201088), Scientific Research Project of Hunan Province Department of Education (12C0324) and Key Discipline Construction Projects in Hunan Province([2011]76)

作者简介: 尹泉(1990—),男,硕士研究生,从事金属材料激光表面改性方面的研究。

Biography: YIN Quan (1990—), Male, Postgraduate student, Research focus: laser surface modification of metal materials.

通讯作者: 彭如恕(1964—),男,教授,硕导,从事金属材料激光表面改性方面的研究。

Communication author: PENG Ru-shu(1964—), Male, Professor, Postgraduate tutor, Research focus: laser surface modification of metal materials.

cation. **Methods** The four kinds of claddings with 5%, 10%, 20%, 30% mass ratios of ilmenite (titanium 70wt%), iron-boron (boron 70wt%) and graphite (carbon 99.9wt%) composite powder were studied experimentally. The microstructure of laser cladding layers and composition of reinforced particles were analyzed using scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD), the microhardness of the laser cladding layer was tested using optical microscopy hardness tester, and the corrosion resistance of the cladding layer was tested using electricity chemistry workstation. **Results** The results showed that the cladding layer had no obvious defects such as cracks, porosity, and was well bound with the base material. Reaction occurred in the process of laser cladding among the graphite, ilmenite and boron iron added, and rigid reinforced phases such as Cr_{23}C_6 , Cr_3C_2 , TiO_2 , $\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}$ were in situ generated. With increasing mass fractions of graphite, ilmenite and boron iron, the contents of rigid reinforced phase generated in the cladding layer increased, and the microhardness value of the cladding layer was also obviously improved. The hardness of cladding layer containing 30% of the composite powder was 3.6 fold as high as that of the base material. The corrosion resistance of the laser cladding specimens was also higher than that of the base material, and it increased with the increasing mass ratio of the composite powder. The corrosion resistance of cladding layer containing 30% of the composite powder was 1.58 fold as high as that of the base material. **Conclusion** Iron base cladding layers containing reinforced phases such as carbon chromium, titanium boron compounds and titanium oxide prepared by laser cladding had significantly improved performance than the base material performance.

KEY WORDS: laser cladding; composite powder; in-situ generation; reinforced phase; microstructure; performance

工业用钢是经济建设中使用最广、用量最大的金属材料,在现代工农业生产中占有极其重要的地位^[1]。不锈钢由于具有良好的力学性能和优异的耐蚀性能而成为应用最广泛的工业用钢,大量应用于航空、汽车、核电等领域^[2]。但不锈钢也有硬度较低、摩擦系数高、耐磨性较差等缺点,经常使一些机械件发生早期失效。为了提高不锈钢的表面性能,许多学者^[3-5]在不锈钢表面进行了各种处理和强化研究。

激光熔覆技术作为一种材料表面改性技术,其耗材少、污染小,属于绿色加工技术^[6],因此近年来在改善材料表面性能中得到了大量应用^[7-8]。决定激光熔覆层性能的因素有三个方面,即成分、显微组织和工艺参数。激光熔覆层与基材是否匹配,应考虑熔覆层与基材的热膨胀系数对涂层的结合强度、抗热震性能,特别是抗开裂能力的影响^[9]。所以为了促使形成良好的熔覆层,选用的激光熔覆层粉末应与基材的物性参数相差不大。本文从实用性的角度出发,对生活中常用的304不锈钢进行表面改性,为了减少熔覆层与基材的热膨胀系数对涂层性能的影响,熔覆的粉末主要是在304不锈钢粉基础上添加其他粉末组成的复合粉末,通过球磨机均匀混合后预涂覆在304不锈钢基材上,然后采用激光熔覆技术在其表面制备含增强相的铁基复合涂层,并对涂层的微观组织及其性能进行研究分析,为以后工业化应用提供理论基础。

1 实验

采用304不锈钢作为母材,尺寸为60 mm×40 mm×6 mm。激光熔覆前,先用砂纸将基材表面的氧化层

及其他污垢去除,经用无水乙醇清洗干净,然后在试样表面进行喷砂处理(60~80目石英砂)。

熔覆粉末是在304不锈钢粉末的基础上,添加质量分数(下同)分别为5%、10%、20%、30%(依次命名为1#、2#、3#、4#)的钛铁(钛70%)、硼铁(硼70%)和石墨(碳99.9%)(三者摩尔比为3:4:1)组合而成,粉末粒度为200目,用球磨机均匀混合10 min。粉末用自制粘结剂预涂覆在基体上,厚度为1 mm。采用国产5KW TJ-T5000型CO₂激光器进行激光熔覆,功率为2.2 kW,扫描速度为6 mm/s,光斑点直径为3 mm,搭接率为33%。采用氩气作为保护气体,流量为6 L/min。通过XD-6X射线衍射仪(XRD)对基材和熔覆层进行物相分析;用JSM-6490LA型扫描电镜观察熔覆层组织,并对熔覆层进行点成分分析;用HXD-1000B型维氏显微硬度计进行硬度分析,载荷砝码为200 g,加载时间为15 s;用CS300型电化学工作站进行电化学腐蚀测试,腐蚀环境为质量分数为3.5%的NaCl溶液。

2 结果及分析

2.1 熔覆层中相组成XRD分析

为了弄清熔覆层的相组成,试验采用X射线衍射仪对四种不同质量分数粉末配比的熔覆层及基材进行XRD分析,其结果如图1所示。从图1可以看出,熔覆层主要由(Fe, Ni)、 α -Fe、TiO₂、Ti_{1.8}B₅₀、Cr₂₃C₆、Cr₃C₂等相组成。实验虽然是在氩气保护下进行,但四个试样的熔覆层中均有TiO₂,这主要是因为实验在

大气气氛下进行,在向熔池内吹送氩气的同时难免会卷入一定量的氧气,因而产生 TiO_2 。此外,由于反应生成相应化合物的难易程度不同,导致熔覆层中有 $\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}$ 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 的生成,而没有生成 TiC 。由图 2 可以看出,温度在 $0 \sim 4000^\circ\text{C}$ 时, $\Delta G_{\text{TiO}_2} < \Delta G_{\text{Cr}_{23}\text{C}_6} < \Delta G_{\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}} < \Delta G_{\text{TiC}} < \Delta G_{\text{Cr}_3\text{C}_2}$, 而由相关文献^[10]可知,当功率为 2.2 kW,扫描速度为 6 mm/s 时,熔覆层的温度低于 2000°C ,因此本实验从热力学上分析可得生成各物相的难易程度 $\text{Cr}_3\text{C}_2 > \text{TiC} > \text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50} > \text{Cr}_{23}\text{C}_6 > \text{TiO}_2$ (从难到易),熔覆层中的 Ti 先与 O_2 、B 反应,导致没有足够的 Ti 与石墨反应,加入的石墨除一部分发生燃烧外,剩下部分与粉末中的 Cr 反应生成 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 ,1[#]、2[#]试样中生成的碳铬化合物主要为 Cr_3C_2 ,3[#]、4[#]试样中生成的碳铬化合物主要为 Cr_{23}C_6 ,其可能是由于 Cr_3C_2 由于热稳定性较低,生成的 Cr_3C_2 一部分在高温下发生分解,一部分转变为更稳定的 Cr_{23}C_6 ^[11],此外,从热力学上来看, Cr_{23}C_6 较 Cr_3C_2 更易于生成,随着熔覆层中粉末所添加的石墨比例增大,生成了更多的 Cr_{23}C_6 。

2.2 熔覆层的显微组织

图 3 为熔覆层和基体界面区域的 SEM 照片。从图 3 可以看出所得试样熔覆层内无裂纹、气泡等缺陷,

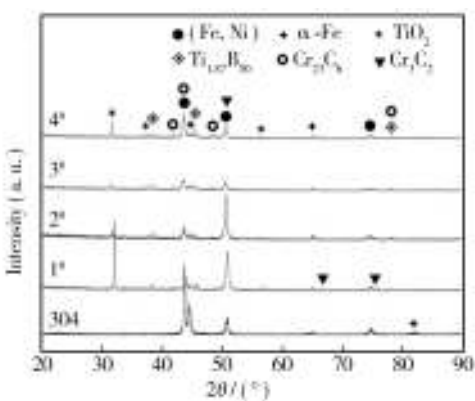


图 1 激光熔覆层 X 射线(XRD)衍射图
Fig. 1 XRD spectra of cladding layers

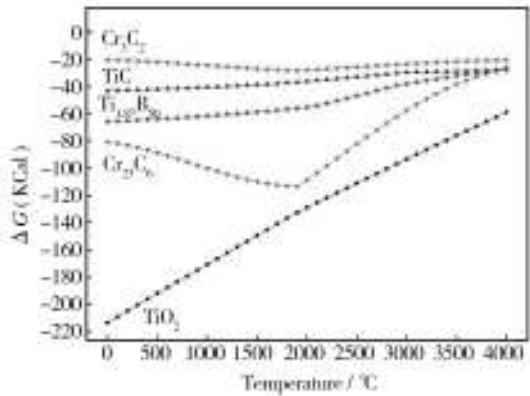


图 2 生成相对应化合物的自由能随温度的变化曲线
Fig. 2 Variation of Gibbs free energy (ΔG) for generation of the corresponding compounds with temperature

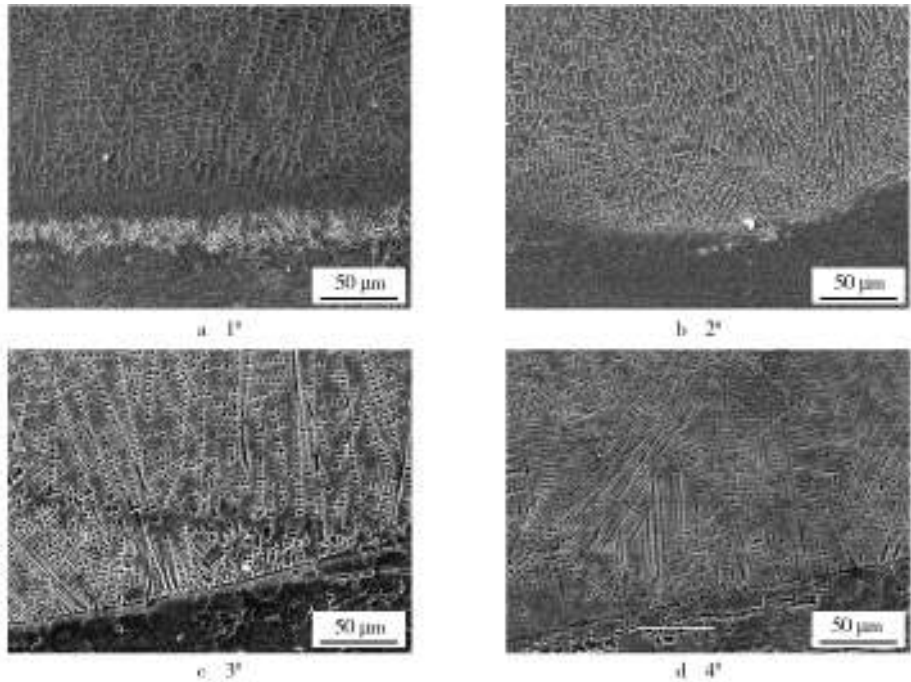


图 3 激光熔覆层显微组织
Fig. 3 The microstructure of the laser cladding layers

组织致密均匀,具有明显的垂直于界面的枝晶生长特征,与基体呈冶金结合。其中 1[#]、2[#]试样中由于生成的碳铬化合物主要为 Cr_3C_2 ,组织主要为类似蜂窝状形貌的等轴树枝晶,这与李杰^[12]等人所得到的实验结果一致。而 3[#]、4[#]试样与 1[#]、2[#]的组织有明显区别,为典型的树枝晶,这主要是因为 3[#]、4[#]试样与 1[#]、2[#]中生成的物相有所不同而造成的,其熔覆层中生成的碳铬化合物主要为 Cr_{23}C_6 。此外,从图 3 可以看出,随着熔覆层中粉末所添加的其他合金粉末的比例增大,熔覆层中生成了更多的碳铬化合物等细晶粒强化相,熔覆层的枝晶组织呈逐渐细化的趋势。

2.3 熔覆层的显微硬度

图 4 中的 4 条曲线分别对应四种不同熔覆层的硬度分布,从图 4 可以看出,随着所添加的其他合金粉末的质量分数增大,熔覆层的硬度呈现出逐步提高的趋势,其中,4[#]试样熔覆层的显微硬度提高到 900HV0.2 左右,较基材提高了 3.6 倍。文献[13]、[14]表明含碳化铬复合涂层的最高硬度达到 1000HV 左右,文献[15]表明相关硼化钛物相的硬度高达 25~26 GPa (2500HV),文献[16]表明添加少量的氧化钛可明显提高材料的硬度。结合之前对熔覆层 XRD 和显微组织的分析,熔覆层中生成了相关硬质相是提高熔覆层硬度的主要原因。此外,熔覆层快速加热与冷却使组织细化,在一定程度上提高了熔覆层的硬度。从图 4 还看出每条曲线都呈现出三个较明显的阶梯分布,它们分别对应于熔覆层、过渡区、母材基体区,并且硬度呈连续分布的形式,减轻了熔覆层的内应力,使得熔覆层和基体可以良好的结合。

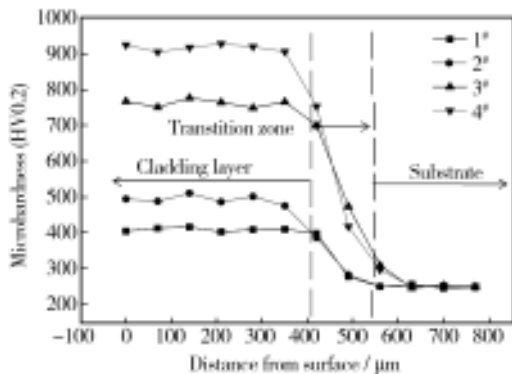


图 4 四种不同熔覆层深度方向的硬度分布曲线

Fig. 4 Microhardness variation with the depth from the surface of the four kinds of laser cladding layers

2.4 电化学耐蚀性能分析

图 5 是四种不同熔覆层和基材在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学腐蚀结果和对应的极化曲线,表 1 是对相应试样极化曲线进行 Tafel 曲线拟合所得到的相应腐蚀数据。根据法拉第定律和动电位极化曲线分析可得: E_{corr} 反映了材料热力学腐蚀倾向,该值越大,材料的腐蚀倾向相对越小; J_{corr} 反映了材料的均匀腐蚀速率,该值越大,腐蚀速率越快^[17]。从图 4 与表 1 可知,添加了其他粉末的四种激光熔覆试样较基材的耐腐蚀性高,且随着质量分数的增加,其耐腐蚀性能随着提高,这主要得益于熔覆层中生成了耐腐蚀性的硬质增强相^[18-20],及激光熔覆过程中快速加热冷却获得的细晶组织^[21]。耐蚀性能提高最明显的四号试样涂层较基材的腐蚀电位正移了 0.436 85 V,单位面积腐蚀电流密度减少了 $1.4102 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,耐蚀性能提高了 1.58 倍。从图 5 还可以看出熔覆试样均未发生钝化,这可能是由于 Cr、Ni 等合金元素的含量不足以在 NaCl 溶液中形成稳定的保护膜^[17]。

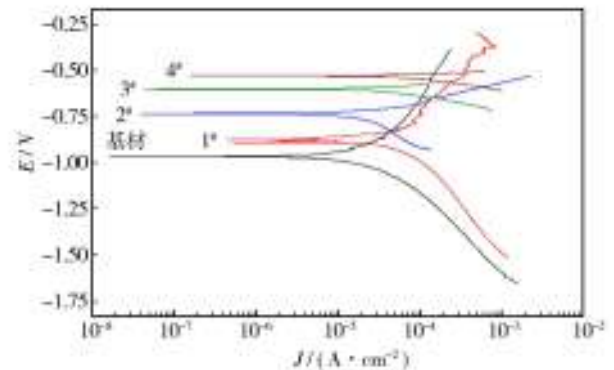


图 5 四种不同熔覆层和基材电化学腐蚀极化曲线

Fig. 5 The potentiodynamic polarization curves of the substrate and the four kinds of laser cladding layers

表 1 基材和激光熔覆试样的电化学腐蚀结果

Tab.1 Electrochemical corrosion test results of the substrate and the laser cladding layers

Sample	E_{corr} /V	J_{corr} / ($\times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Corrosion rate /($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
304 基材	-0.964 69	5.0309	0.582 04
1 [#]	-0.872 78	4.7981	0.564 37
2 [#]	-0.733 45	4.1659	0.481 97
3 [#]	-0.600 05	3.8283	0.402 41
4 [#]	-0.527 84	3.6207	0.368 97

3 结论

1) 激光熔覆过程中,加入的钛铁、硼铁、石墨复合粉末发生了原位反应,生成了 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 、 TiO_2 、 $\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}$ 等硬质增强相,且熔覆层主要由 (Fe, Ni)、 $\alpha\text{-Fe}$ 、 TiO_2 、 $\text{Ti}_{1.8}\text{B}_{50}$ 、 Cr_{23}C_6 、 Cr_3C_2 等相组成。

2) 熔覆层中原位生成的硬质增强相以及细晶组织强化能够显著地提高熔覆层的显微硬度,并且随着生成硬质增强相的含量增加,熔覆层的显微硬度值随之明显提高。激光熔覆试样较基材的耐腐蚀性能得到提高,且随着钛铁、硼铁和石墨复合粉末质量分数的增大,其耐腐蚀性能随之提高。

参考文献

- [1] 王彦芳,栗荔,鲁青龙,等. 不锈钢表面激光熔覆铁基非晶涂层研究[J]. 中国激光,2011,38(6):0603017—1.
WANG Yan-fang, LI Li, LU Qing-long, et al. The Stainless Steel Surface Laser Cladding Iron-based Amorphous Coating Research[J]. China Laser, 2011, 38(6): 0603017—1.
- [2] VISWANATHAN A, SASTIKUMAR D, KUMAR H, et al. Formation of WC-iron Silicide (Fe_3Si_3) Composite Clad Layer on AISI 316L Stainless Steel by High Power (CO_2) Laser[J]. Surface & Coating Technology, 2009, 203(12): 1618—1623.
- [3] WANG Yan-fang, LU Qing-long. Laser Cladding Fe-Cr-Si-P Amorphous Coatings on 304L Stainless[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(2): 0274—0277.
- [4] 张焱,高原,吴炜钦,等. 4Cr13 不锈钢表面镀 TiN 薄膜组织结构及性能的研究[J]. 材料导报 B: 研究篇, 2014, 28(2): 84—87.
ZHANG Yan, GAO Yuan, WU Hui-qin, et al. 4Cr13 Stainless Steel Surface TiN Plated Film Organization Structure and Performance Study[J]. Material Review B: Research, 2014, 28(2): 84—87.
- [5] 何卫锋,李应红,李伟. 激光冲击强化提高压机叶片疲劳性能研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1551—1556.
HE Wei-feng, LI Ying-hong, LI Wei. Laser Shock Processing Improve the Compressor Blade Fatigue Performance Study[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1551—1556.
- [6] 杨宁,杨帆. 激光熔覆技术的发展现状及应用[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(8): 118—120.
YANG Ning, YANG Fan. Development Status and Application of Laser Cladding Technology[J]. Material Heat Treatment Technology, 2011, 40(8): 118—120.
- [7] 曾维华,刘洪喜,王传琦,等. 工艺参数对不锈钢表面激光熔覆 Ni 基涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2012(8): 24—29.
ZENG Wei-hua, LIU Hong-xi, WANG Chuan-qi, et al. The Process Parameters of the Stainless Steel Surface Laser Cladding Organization and the Corrosion Resistance of Ni Base Coating[J]. The Influence of Material Engineering, 2012(8): 24—29.
- [8] 周思华,晁明举,刘奎立,等. 原位生成 $\text{WC-B}_4\text{C}$ 增强镍基激光熔覆层及其性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 25—30.
ZHOU Si-hua, CHAO Ming-ju, LIU Kui-li, et al. In Situ Generated WC-B₄C Increase Nickel-based Laser Cladding Layer and Its Performance Study[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 25—30.
- [9] 吴兆坤,丘斌林,周玉重,等. 316L 不锈钢激光熔覆层的组织及硬度分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2014, 28(2): 106—110.
WU Zhao-kun, QIU Bin-lin, ZHOU Yu-chong, et al. 316L Stainless Steel Structure and Hardness of Laser Cladding Layer Analysis[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2014, 28(2): 106—110.
- [10] 石世宏,王晨,徐爱琴,等. 基于环形光内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303002—1.
SHI Shi-hong, WANG Chen, XU Ai-qin, et al. Based on the Circular Room Send Powder in Laser Cladding Temperature Field Numerical Simulation[J]. China Laser, 2012, 39(3): 0303002—1.
- [11] 周正,姚海华,高峰,等. Cr_{23}C_6 -NiCr 涂层制备及其高温氧化行为[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 19—23.
ZHOU Zhen, YAO Hai-hua, GAO Feng, et al. Cr_{23}C_6 -NiCr Coating Preparation and High Temperature Oxidation Behavior[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(6): 19—23.
- [12] 李杰,曾克里,高峰. Cr_3C_2 -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.
LI Jie, ZENG Ke-li, GAO Feng. Cr_3C_2 -25NiCr to Iron Base Layer Microstructure and Properties of Laser Cladding[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(1): 36—40.
- [13] 林成虎,任靖日,贺春林. 激光原位碳化铬-镍基复合涂层的组织特征[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 186—190.
LIN Cheng-hu, REN Jing-ri, HE Chun-lin. Laser in Situ Chromium Carbide the Characteristics of the Nickel-based Composite Coatings[J]. Laser Technology, 2014, 38(2): 186—190.

- 186—190.
- [14] 袁涛,屈铁,史萌,等. 汽轮机超音速火焰喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层[J]. 表面技术,2013,42(6):63—65.
YUAN Tao, QU Yi, SHI Meng, et al. Steam Turbine Supersonic Flame Spraying NiCr-Cr₃C₂ Coating [J]. Surface Technology, 2013, 42(6):63—65.
- [15] DEMIRSKYI D, AGRAWAL D, RAGULYA A. Tough Ceramics by Microwave Sintering of Nanocrystalline Titanium Diboride Ceramics [J]. Ceramics International, 2014, 40(1):1303—1310.
- [16] HANISAH M, SURIYANA M A, AHMAD Z A A. Effects of TiO₂ Addition on the Phase, Mechanical Properties, And Microstructure of Zirconia-toughened Alumina Ceramic composite [J]. Ceramics International, 2015, 41(3):3961—3967.
- [17] ABDULLAH A, MALAKI M, ESKANDARI A. Strength Enhancement of the Welded Structures by Ultrasonic Peening [J]. Mater Des, 2012, 38:7-18.
- [18] 沈婕, 国俊丰, 魏伟, 等. 超音速喷涂 Cr₃C₂-25NiCr 复合涂层的组织及电化学特性研究[J]. 热喷涂技术, 2009, 1(2):48—52.
SHEN Jie, GUO Jun-feng, WEI Wei, et al. Microstructure and Electrochemical Properties of Cr₃C₂-25NiCr Composite Coating by Supersonic Spraying [J]. Thermal Spray Technology, 2009, 1(2):48—52.
- [19] 李美艳, 韩彬, 王勇, 等. B₄C 和 Ti 含量对激光熔覆 Fe-Cr-Ni-Si 系合金涂层结构及性能影响[J]. 中国激光, 2013, 40(12):1203008-1—1203008-5.
LI Mei-yan, HAN Bin, WANG Yong, et al. Effect of B₄C and Ti Content on the Structure and Properties of Laser Clad Fe-Cr-Ni-Si Alloy Coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12):1203008-1—1203008-5.
- [20] 肖正伟, 曾振欧, 赵国鹏, 等. 304 不锈钢上纳米 TiO₂ 涂层的制备与防腐性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(7):35—38.
XIAO Zheng-wei, ZENG Zhen-ou, ZHAO Guo-peng, et al. Nano-TiO₂ Coating on 304 Stainless Steel of Preparation and Anti-corrosion Performance [J]. Electroplating and Surface Finishing, 2007, 26(7):35—38.
- [21] 陈文怡, 周建, 胡明, 等. 超细晶不锈钢/TiC 复合材料的电化学腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10):2068—2072.
CHEN Wen-yi, ZHOU Jian, HU Ming, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Ultrafine Grained Stainless Steel/TiC Composite [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10):2068—2072.

(上接第 88 页)

- LIU Guang-ming, LIU Bin. Post-treatment Processes for Corrosion Resistance on Electroless Ni-P Coating [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(3):265—270.
- [9] 余祖孝, 郝世雄, 李兰, 等. 铝材化学镀 Ni-W-P 溶液中硝酸镧含量对镀层性能的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(5):24—26.
YU Zu-xiao, HAO Shi-xiong, LI Lan, et al. Influence of La(NO₃)₃ Content on Corrosion Resistance of Electroless Ni-W-P Alloy Coating on Aluminum Substrate [J]. Journal of Materials Protection, 2015, 48(5):24—26.
- [10] 俞素芬, 孟繁晶, 范伟光, 等. 化学镀 Ni-W-P 合金的耐蚀耐磨性[J]. 汽车工艺与材料, 2002(1):14—17.
YU Su-fen, MENG Fan-jing, FAN Wei-guang, et al. Corrosion Resistance and Wear Resistance of Electroless Plated Ni-W-P Alloy [J]. Automobile Technology & Material, 2002(1):14—17.
- [11] 武慧慧, 郝利峰, 韩生. 化学镀镍的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3):18—21.
WU Hui-hui, HAO Li-feng, HAN Sheng. Research Advances of Electroless Plating Nickel-phosphorus Alloy [J]. Plating and Finishing, 2014, 36(3):18—21.
- [12] LIU H, GUO R X, LIU Y, et al. The Effect of Processing Gas on Corrosion Performance of Electroless Ni-W-P Coatings Treated by Laser [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(15):3350—3359.
- [13] LUO H H, CAI Q Z, HE J, et al. Preparation and Properties of Composite Ceramic Coating Containing Al₂O₃-ZrO₂-Y₂O₃ on AZ91D Magnesium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation [J]. Current Applied Physics, 2009, 9(6):1341—1346.
- [14] 朱焱, 江茜, 张印, 等. 化学镀镍磷合金复合配位剂的研究[J]. 电镀与涂饰, 2012, 32(3):25.
ZHU Yan, JIANG Qian, ZHANG Yin, et al. Research on Complexing Agent of Electroless Plating Nickel-phosphorus Alloy [J]. Plating and Finishing, 2012, 32(3):25.
- [15] 谢洪波, 江冰, 陈华三, 等. 化学镀镍规律及机理探讨[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(2):26—30.
XIE Hong-bo, JIANG Bing, CHEN Hua-san, et al. Discussion on the Mechanism of Electroless Nickel Plating [J]. Plating and Finishing, 2012, 34(2):26—30.