

激光熔覆制备铁基复合涂层及其耐热耐蚀性能

白杨^{1*}, 王振华², 左娟娟¹, 姜秀杰¹, 张学卿¹

¹海洋化工研究院有限公司海洋涂料国家重点实验室, 山东 青岛 266071;

²中船重工七二五所海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237

摘要 为解决现有甲板防滑涂层在高温、高速气流冲刷等特殊服役条件下的使用及防护问题, 采用激光熔覆技术在 Q235 碳钢表面制备了 316L 不锈钢耐蚀底层和 316L+(ZrO₂-8%Y₂O₃) 防滑面层。采用腐蚀电化学测试方法研究涂层在海洋环境中的腐蚀电化学行为, 并结合能谱分析及电镜分析等现代分析测试技术, 对腐蚀后涂层的微观组织及内部结构进行表征; 此外, 对比分析了涂层在不同温度(200, 400, 1000 °C)下的耐热性能和微观组织。结果表明: 该新型铁基复合涂层表现出了较好的耐蚀性, 且其耐蚀性比碳钢基体高出了 2 个数量级; 在 1000 °C 高温下, 涂层表面无明显的剥落、开裂现象, 表现出了较好的耐高温性能。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 铁基涂层; 耐蚀性; 耐高温

中图分类号 TN249; TG174.44

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1002001

Fe-Based Composite Coating Prepared by Laser Cladding and Its Heat and Corrosion Resistance

Bai Yang^{1*}, Wang Zhenhua², Zuo Juanjuan¹, Jiang Xiujie¹, Zhang Xueqing¹

¹State Key Laboratory of Marine Coatings, Marine Chemical Research Institute Co., Ltd.,

Qingdao, Shandong 266071, China;

²Science and Technology on Marine Corrosion and Protection Laboratory, Luoyang Ship Materials Research Institute,

Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract To solve the problems of the use and protection of existing deck anti-skid composite coatings under special service conditions such as high-temperature and high-speed air erosion, we prepared a 316L stainless steel corrosion-resistant bottom layer and 316L+(ZrO₂-8%Y₂O₃) anti-skid top layer on a Q235 carbon steel surface using the laser cladding technology. Corrosion electrochemical analysis was carried out to investigate the corrosion electrochemical behavior of the coatings in a marine environment. Furthermore, the microstructure and the internal structure of the coatings were characterized via the modern analytical testing techniques, including X-ray diffraction and scanning electron microscopy. At different temperatures (200 °C, 400 °C, and 1000 °C), the heat resistance and microstructures of the coatings were compared. The results show that the novel Fe-based composite coating exhibits good corrosion resistance, which is two orders of magnitude higher than that of the carbon steel matrix. At the high-temperature condition of 1000 °C, there was no obvious peeling and cracks on the surface of the Fe-based coating, indicating good high-temperature resistance.

Key words laser technique; laser cladding; Fe-based coating; corrosion resistance; high-temperature resistance

OCIS codes 310.1515; 310.3840; 350.3390

1 引言

防滑涂料是一种具有防滑作用的功能性材料, 它能够在物体表面形成一种具有高摩擦因数的防滑

层^[1-2], 减小物体表面与行人、车辆及其他物体的滑动性, 降低行人滑倒摔伤事故的发生, 已被广泛应用于船舶甲板、海洋石油钻采平台和海岸设施等^[3-4]。

众所周知, 海洋环境是一种非常苛刻的腐蚀环

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-05-26

基金项目: 山东省重点研发计划(2017GHY15108)、山东省博士后创新项目、青岛市博士后应用研究项目

* E-mail: b14040127@s.upc.edu.cn

境,在船舶甲板、海洋平台上应用的防滑涂层,除了需要具有提高摩擦力的基本性能外,还需要具有良好的耐腐蚀性能、抗紫外线老化性能和耐海洋气候性能,而且应用于甲板区域的防滑涂料还需要具有良好的抗冲击性、耐高温性、耐洗涤剂及柴油等性能^[5-6]。

长期以来,国内外对甲板防滑涂层的研制主要集中在树脂基防滑涂层上,这种防滑涂层制备简单,能够满足大多数船舶甲板的防滑要求,但该涂层的耐高温性能很差,在喷气式飞机高温和高速气流的冲蚀下易发生彻底剥落,从而丧失防滑作用^[7-8]。相对于树脂基防滑涂层,金属基防滑涂层的摩擦因数更稳定,且不含有害的有机溶剂及致癌结晶硅石,使用寿命更长,尤其是在抗高温老化方面具有明显优势^[9-10]。因此,国内外研究机构纷纷着手进行金属基防滑涂层的研究。铁基合金不仅具有卓越的防腐、耐磨和抗高温等性能,还具有成本优势,且铁基非晶涂层不仅具有块体非晶的特点,还具有厚度可控、组织均匀、结合力好等优点^[11-14],在甲板防滑涂层领域具有极广阔的应用前景。

激光熔覆作为一种先进高效的表面改性技术,与热喷涂技术相比,具有冷却速度快、涂层孔隙率低、工件变形小以及易于实现自动化等优点。采用该工艺制得的铁基合金涂层可以显著改善金属材料表面的硬度、强度、耐磨损、耐腐蚀等性能,而且避免了热喷涂过程中的氧化和晶化问题,具有广阔的应用前景^[15-19]。此外,在严苛的海洋腐蚀环境下,单层结构金属基防滑涂层在满足防滑、耐磨要求的同时,

耐腐蚀性能往往得不到保证,涂层的耐久性很差,因此,需要研发一种新的耐高温和耐腐蚀的铁基复合结构防滑涂层。

本文采用激光熔覆技术在 Q235 碳钢基体表面分别制备了 316L 不锈钢单层涂层和 316L+(ZrO₂-8%Y₂O₃) 双层结构的复合涂层,然后对涂层的耐热性能以及耐腐蚀性能进行了测试分析。该研究不仅可为新型金属基防滑涂层的开发和应用提供理论依据,还可以为海洋构筑物的耐蚀防滑、耐高温抗冲蚀性设计提供基础数据,对于确保构筑物的服役安全性具有重要意义。

2 试验材料及方法

2.1 原材料

本文所用 316L 不锈钢粉末由北矿新材料科技股份有限公司提供,该粉末是采用气体雾化法制备得到的银灰色球形粉末,其化学成分(质量分数,%)为 19.50 Cr、10.74 Ni、1.63 Mo、1.04 Si、Fe 余量。图 1(a)所示为 316L 不锈钢粉末的扫描电镜(SEM)图像,可以看出,球形颗粒分布得较均匀,只有极少数的不规则颗粒,大多数颗粒粒径为(66±15) μm。

试验所用硬质相陶瓷颗粒为氧化钇稳定氧化锆(牌号为 PR5221, ZrO₂-8%Y₂O₃),它是由湖南兆益热喷涂材料有限公司提供的,其化学成分(质量分数,%)为 0.77 C、28.93 O、68.7 Zr、11.60 Y。图 1(b)所示为 ZrO₂-8%Y₂O₃ 粉末的 SEM 图像。由图可知,ZrO₂-8%Y₂O₃ 粉末颗粒呈中空球形结构,颗粒粒径范围为-35~+65 μm。

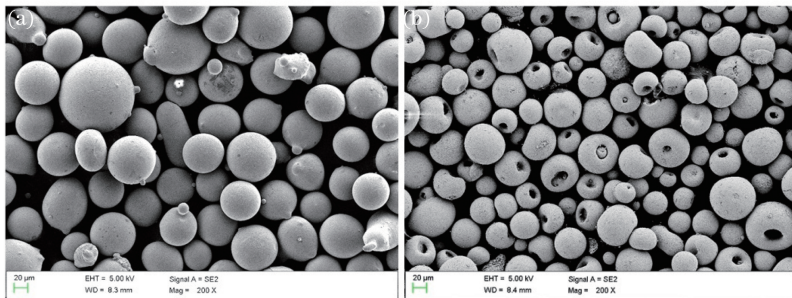


图 1 试验用粉末的 SEM 照片。(a) 316L 不锈钢粉末;(b) ZrO₂-8%Y₂O₃ 粉末

Fig. 1 SEM morphology of experimental powders. (a) 316L stainless steel powders; (d) ZrO₂-8%Y₂O₃ powders

2.2 涂层的制备

采用激光熔覆工艺制备铁基复合结构防滑涂层的步骤如下:

1) 316L 不锈钢耐蚀底层的制备。先对基材表面进行喷砂、除油处理,之后将其清洗干净,使其表面无附着杂物并具有一定的粗糙度;然后采用西安

交通大学青岛研究院研制的激光熔覆设备在基材表面喷涂 316L 不锈钢粉末,制备激光熔覆耐蚀底层(激光功率为 1500 W,扫描速度为 15 mm/s,激光光斑直径为 3 mm,搭接率为 33.33%)。

2) 高温防滑面层的制备。首先将 316L 不锈钢粉末和 ZrO₂-8%Y₂O₃ 粉末按照 3:2 的质量配比进

行机械混合,并在 100 °C 的真空干燥炉中干燥 1 h;然后将机械混合后的粉末在耐蚀底层上进行激光熔覆(喷涂功率为 1800 W,扫描速度为 15 mm/s,激光光斑直径为 3 mm,搭接率为 33.33%)。

2.3 涂层的显微组织及耐蚀性

采用 ULTRA55 型热场发射扫描电镜观察粉末、涂层表面的形貌特征,以及涂层进行高温试验和腐蚀试验后的表面形貌特征;同时,采用扫描电镜配备的 X-MAX 电制冷能谱仪对材料微区的成分进行分析。采用 D8 Advance X 射线衍射仪对粉末和涂层试样表面进行物相分析,辐射波长 $\lambda_{\text{Co}} = 0.15406 \text{ nm}$,扫描步长范围为 $5^\circ \sim 90^\circ$,扫描速度为 $3.8636 (^\circ)/\text{min}$ 。将涂层抛光后的横截面试样浸泡于刻蚀液(1.0 mL 氢氟酸+1.5 mL 盐酸+2.5 mL 硝酸+95 mL 蒸馏水)中刻蚀 25 s,然后采用 DMI 5000M 金相显微镜观察腐蚀后涂层的横截面形貌。

参照 GB/T 1735—2009^[20],将加工好的试样(试样横截面尺寸为 30 mm×30 mm)放入 DC-HB/11 型智能箱式高温炉中(尽量将测试试样放在高温炉的中间部位),并在规定的温度(200, 400, 1000 °C)下保温 2 h。

采用三电极体系在 PARSTAT 2273 电化学工作站上进行电化学实验,工作电极是用环氧树脂密

封好的涂层试样(工作面积为 1 cm×1 cm),参比电极是 223-01 型饱和甘汞电极(SCE),辅助电极是铂铈棒($\phi 3 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$)。电解质溶液采用青岛天然海水,海水中的溶解氧为 6.57 mL/L,盐度为 3.09‰,pH 值为 8.12。电化学阻抗谱(EIS)的测试频率范围为 100 kHz~10 mHz,交流电(AC)幅度为 10 mV,以 0.5 mV/s 的扫描速率在 -500~2000 mV 的范围内进行动电位极化测试。需要注意的是,在阻抗和动电位极化测试前,需要在 10 min 内将开路电位稳定在 $\pm 5 \text{ mV}$ 以内。

3 结果与讨论

3.1 涂层的显微组织及成分分析

图 2 分别为单层涂层(316L 不锈钢耐蚀底层,下同)试样和双层复合涂层(316L 不锈钢耐蚀底层/316L+(ZrO₂-8%Y₂O₃)防滑面层,下同)试样表面的微观 SEM 图像。从图 2(a)中可以看出,单层涂层试样表面光滑平整,涂层表面无裂纹出现,说明原材料粉末均已充分熔融。图 2(b)所示为双层复合涂层试样表面的微观 SEM 图像,可看出,涂层试样表面较粗糙,表面有微裂纹出现。这主要与熔覆层材料和基材之间的热膨胀系数差异有关,也就是说,微裂纹是碳钢基体与熔覆材料中的 ZrO₂-8%Y₂O₃ 之间存在的物理特性差异引起的^[21-22]。

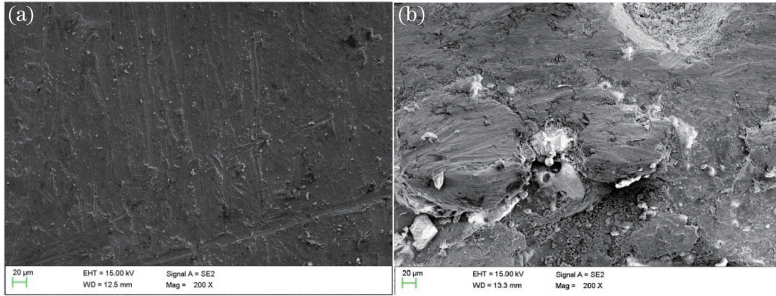


图 2 涂层表面的 SEM 图像。(a)单层涂层;(b)双层复合涂层

Fig. 2 SEM images of the coatings surface. (a) Single-layer coating; (b) double-layer composite coating

图 3 为基体与双层复合涂层试样横截面抛光刻蚀后的金相照片。从图 3(a)中可以看出,Q235 碳钢基体的金相组织主要由先共析铁素体和珠光体组成,黑色组织为珠光体,亮色组织为铁素体。图 3(b)中的黑色部分是已被严重刻蚀的碳钢基体,可以看出,熔覆层与碳钢基体之间实现了良好的冶金结合,且熔覆层组织较为致密,主要由柱状晶和规则的等轴晶奥氏体组成。

3.2 涂层的耐热性能

单层涂层试样在不同温度(200, 400, 1000 °C)下的表面微观形貌和能谱测试结果分别如图 4 和图 5(b)所示。图 5(a)为加热至 1000 °C 后单层涂层试样表面的 SEM 照片。可以看出,涂层表面无明显的脱落、开裂等现象,且涂层表面形成了一层致密的氧化层。结合不同温度下涂层表面的 EDS 分析结果可以看出,涂层表面的主要成分为 O、Cr、Fe、

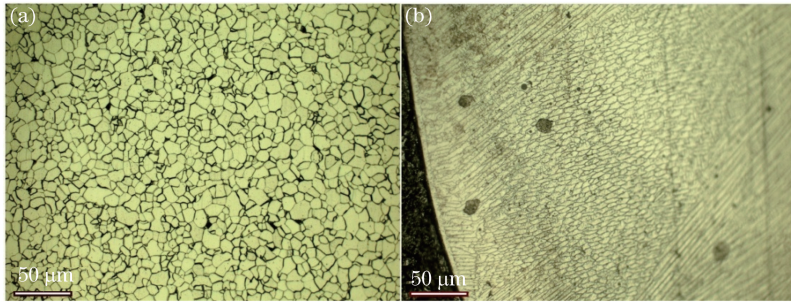


图 3 基体和涂层试样横截面抛光刻蚀后的金相照片。(a) 基体;(b) 双层复合涂层

Fig. 3 Cross-section morphology of substrate and double layer composite coating samples after polishing and etching.

(a) Substrate; (b) double-layer composite coating

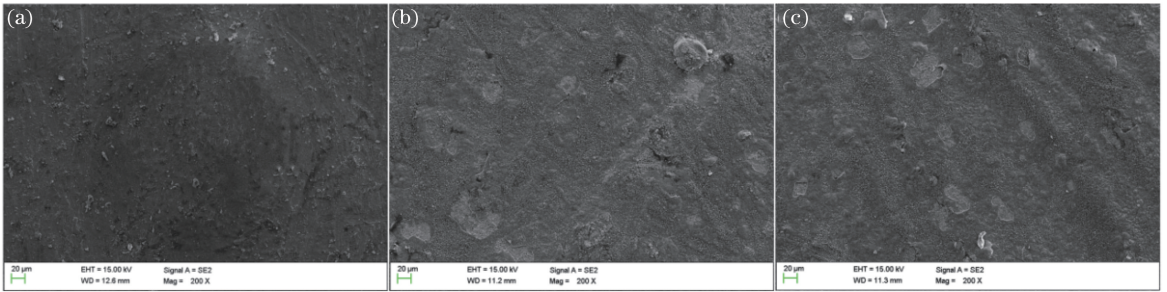


图 4 不同温度下单层涂层试样的 SEM 图像。(a) 200 °C ;(b) 400 °C ;(c) 1000 °C

Fig. 4 SEM images of single-layer coating sample at different temperatures. (a) 200 °C ;(b) 400 °C ;(c) 1000 °C

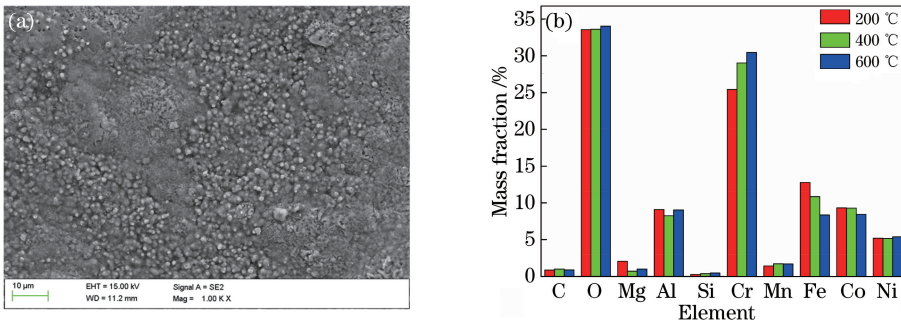


图 5 单层涂层试样的 SEM 照片及其表面的元素分布。(a) SEM 照片;(b) 元素分布

Fig. 5 SEM image and element distributions of single-layer coating sample. (a) SEM image; (b) element surface

Ni、Al、Co 等,这说明高温条件下涂层表面的氧化层主要由 CrO_3 、 Al_2O_3 等抗高温氧化性较好的氧化膜组成。

3.3 涂层的耐腐蚀性能

单层涂层试样在天然海水中浸泡不同时间后的阻抗谱变化如图 6 所示, Z_{re} 为阻抗的实部, Z_{im} 为阻抗的虚部, $|Z|$ 为阻抗的模, f 为频率。从图 6(a) 所示的 Nyquist 图中可以看出,涂层的容抗弧随浸泡时间延长而呈先增大后减小的趋势,这主要与氧化膜的形成和逐渐溶解有关。在浸泡初期,由于 316L 不锈钢涂层表面形成了一层氧化物覆盖层,所以涂层的阻抗逐渐增大;随着浸泡时间延长,海水中的 Cl^- 不断地破坏涂层表面的氧化膜,使其逐渐溶

解,涂层的阻抗呈现出先增大后逐渐减小的趋势。从图 6(b) 所示的 Bode 图中也可以看出涂层的相位角和模值随着浸泡时间延长而呈现出先增大后逐渐减小的变化趋势。从图 6(a) 中可以看出:浸泡 720 h 后,涂层只有一个时间常数,且呈现单容抗弧特征;涂层浸泡 24 h 后的容抗弧最大。

采用等效电路模型对单层涂层的电化学阻抗谱进行拟合,得到涂层试样在海水中浸泡不同时间后的电荷转移电阻,如图 7 所示, R_{ct} 代表电荷转移电阻。从图 7 中可以看出:单层涂层试样的电荷转移电阻 R_{ct} 随着浸泡时间延长而呈现先增大后减小的趋势;浸泡 24 h 后, R_{ct} 高达 718900 Ω ;随着浸泡时间延长,涂层试样的氧化膜逐渐溶解,浸泡 720 h

后,涂层试样的 R_{ct} 下降至 298600 Ω ,比文献[23]所述 Q235 碳钢基体的阻值高了两个数量级。以上说

明单层涂层试样表现出了较好的耐腐蚀性能,能够发挥耐蚀中间层的作用。

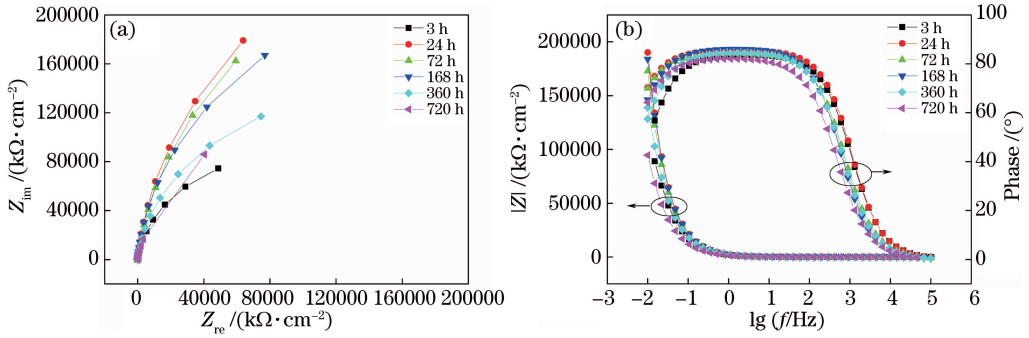


图 6 单层涂层试样在海水中浸泡不同时间后的电化学阻抗谱。(a) Nyquist 图;(b) Bode 图

Fig. 6 Electrochemical impedance spectroscopy of single-layer coating sample immersed in seawater for different time. (a) Nyquist diagram; (b) Bode plots

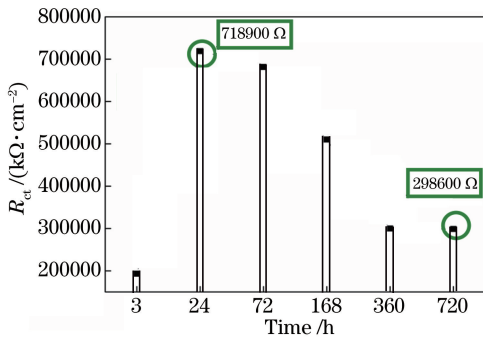


图 7 单层涂层试样浸泡不同时间后的电荷转移电阻 R_{ct}

Fig. 7 Charge transfer resistance R_{ct} of single-layer coating sample immersed in seawater for different time

图 8 是 Q235 碳钢基体、单层涂层以及双层复合涂层试样在海水中浸泡 24 h 后的动电位极化曲线, i_{corr} 为自腐蚀电流密度。可见:单层涂层试样和双层复合涂层试样的极化曲线在 $-0.25 \sim 0.25$ V (vs. SCE) 电位区间出现了明显的钝化平台,这是因为涂层在腐蚀过程中生成了氧化物钝化膜;Q235 碳钢基体只是发生了快速的阳极溶解,并没有钝化平台出现;单层涂层试样和双层复合涂层试样的腐蚀电位分别为 -0.559 V 和 -0.4850 V,明显比 Q235

碳钢基体的腐蚀电位 (-0.6260 V) 正,这说明在相同的腐蚀环境下,双层复合涂层试样和单层涂层试样比 Q235 碳钢基体的腐蚀倾向更小,且双层复合涂层试样的腐蚀倾向最小,从维钝电流密度来看,双层复合涂层试样的维钝电流密度比单层涂层试样的维钝电流密度小,这说明双层复合涂层试样比单层涂层试样更易钝化,具有更好的耐腐蚀性能。

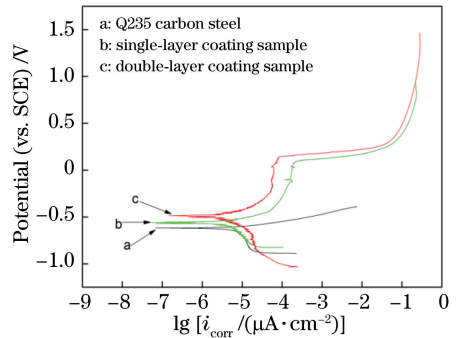


图 8 基体和涂层试样在海水中浸泡 24 h 后的动电位极化曲线

Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves of substrate and coating samples immersed in seawater for 24 h

3.4 涂层表面的腐蚀形貌

图 9 是单层涂层试样在海水中浸泡 720 h 后表

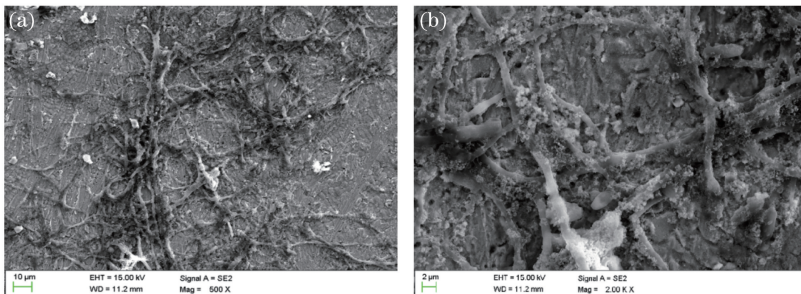


图 9 单层涂层试样在海水中浸泡 720 h 后表面的 SEM 照片

Fig. 9 SEM images of corroded surface of single-layer coating sample immersed in seawater for 720 h

面的 SEM 照片,可以看出,涂层试样表面的腐蚀产物呈“蜘蛛网”状。经能谱测试后可知,该腐蚀产物的化学成分(质量分数,%,下同)为 10.59 O、16.48 Cr、20.10 Fe、18.43 Ni、6.40 Al、22.73 Co。结合前述涂层的电化学性能测试结果可知,单层涂层试样具有良好的耐腐蚀性能,这主要与其表面生成的致密的氧化锆、氧化铝等钝化膜有关。钝化膜的形成有效地减缓了腐蚀介质的进一步侵入,在一定程度上起到了缓解腐蚀的作用。

上起到了缓解腐蚀的作用。

图 10 所示为双层复合涂层试样在海水中浸泡 720 h 后的腐蚀产物形貌,可以看出,涂层表面生成的腐蚀产物较为疏松。经能谱测试后可知,该腐蚀产物的主要化学成分为 25.06 O、10.59 Cr、29.56 Fe、3.85 Ni、20.33 Zr、3.31 Co。双层复合涂层试样与单层涂层试样的腐蚀机制一致,其良好的耐腐蚀性能也主要与单层涂层试样表面生成的钝化膜有关。

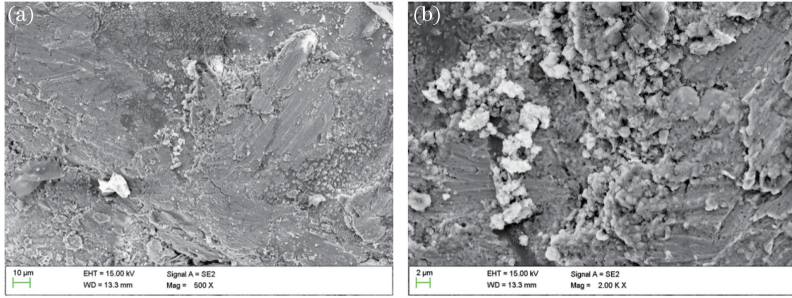


图 10 双层复合涂层试样在海水中浸泡 720 h 后表面的 SEM 照片

Fig. 10 SEM images of corroded surface of double-layer coating sample immersed in seawater for 720 h

4 结 论

单层涂层试样表面光滑平整,涂层表面无裂纹出现,说明喷涂的原材料粉末均已充分熔融;双层复合涂层表面有微裂纹出现,这是熔覆层材料与基体热膨胀系数之间的差异造成的。

观察涂层的金相组织发现,熔覆层与碳钢基体之间实现了良好的冶金结合,且熔覆层组织较为致密,主要由柱状晶和规则的等轴晶奥氏体组成。

涂层的耐热性能测试表明,单层涂层试样在加热至 1000 °C 后,表面无剥落、开裂等现象,表现出了较好的耐高温性能。

涂层的耐腐蚀性能测试表明:单层涂层的电阻值比 Q235 碳钢基体高了两个数量级,具有较好的耐腐蚀性能;单层涂层试样和双层复合涂层试样在极化过程中均出现了钝化平台,且双层复合涂层试样的维钝电流密度比单层涂层试样的小,表明双层复合涂层试样比单层涂层试样更易钝化,具有更好的耐腐蚀性能。

参 考 文 献

[1] Song S H, Zhang X Q. Summary on the anti-skid coatings[J]. China Coatings, 2009, 24(7): 60-63.
宋世红, 张学卿. 防滑涂料概论 [J]. 中国涂料, 2009, 24(7): 60-63.

[2] Gu M B, Jiang X J, Leng X F, et al. Aircraft skid-resistant coatings summary [J]. China Coatings,

2013, 28(7): 69-71.

谷美邦, 姜秀杰, 冷晓飞, 等. 飞机防滑涂料概述 [J]. 中国涂料, 2013, 28(7): 69-71.

[3] Zhang X N, Liu T, Liu C L, et al. Research on skid resistance of asphalt pavement based on three-dimensional laser-scanning technology and pressure-sensitive film [J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 49-59.

[4] Hadiwardoyo S P, Sinaga E S, Fikri H. The influence of Buton asphalt additive on skid resistance based on penetration index and temperature [J]. Construction and Building Materials, 2013, 42: 5-10.

[5] Deng Q, Xu J W, Gao X H, et al. Technology and developing tendency of warship deck paints [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(2): 111-116.

邓琦, 徐金文, 高新华, 等. 舰船甲板防滑涂料技术现状及发展趋势 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 111-116.

[6] Hong W H. Situation and development trend of foreign aircraft carrier deck anti-slip coating technology [J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(12): 166-169.

洪伟宏. 国外航母甲板防滑涂料技术现状及发展趋势 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(12): 166-169.

[7] 于月光, 高峰, 张鑫, 等. 一种耐腐蚀防滑涂层制备方法及其涂层结构: CN104357793A [P/OL]. [2020-03-10]. <http://cp.rs.patentstar.com.cn/Search/Detail?ANE=9HBB9EFA9HHG9IDG8CFA9FIE9BED9IEF7HAADFGA9CEF9HCA>.

- Yu Y G, Gao F, Zhang X, et al. Preparation method and coating structure of anti-slip coating [P/OL]. [2020-03-10]. <http://cprs.patentstar.com.cn/Search/Detail?ANE=9HBB9EFA9HHG9IDG8CFA9FIE9BED9IEF7HAADFGA9CEF9HCA>.
- [8] Liu C M. Research of the polyurethane anti-skid deck coatings reinforced by SiC fibers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. 刘承明. SiC 纤维增强的聚氨酯系甲板防滑涂料研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [9] Cheng J B, Liu D, Liang X B, et al. Wear behaviors of arc-sprayed FeBSiNb amorphous coatings [J]. Tribology Letters, 2015, 60(2): 22.
- [10] Wu Q D, Xiao J K, Zhang G, et al. Thermal sprayed metal-based non-skid wear-resistant coatings [J]. Surface Technology, 2018, 47(4): 251-259. 吴庆丹, 肖金坤, 张嘎, 等. 热喷涂金属基防滑耐磨涂层的研究进展 [J]. 表面技术, 2018, 47(4): 251-259.
- [11] Jiang C P, Xing Y Z, Hao J M, et al. Effects of heat-treatment on crystallization and wear property of plasma sprayed Fe-based amorphous coatings [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2013, 28(4): 643-646.
- [12] Segu D Z, Choi J H, Kim S S. Sliding wear behavior of Fe-based bulk metallic glass at high temperature [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(11): 3565-3570.
- [13] Li Y N, Li Z G, Wang X X, et al. Fe-based wear-resistant coating on railroad switch prepared using laser cladding technology and its properties [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402009. 李英男, 李铸国, 王晓翔, 等. 道岔尖轨表面的激光熔覆铁基耐磨涂层及其性能 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402009.
- [14] 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.
- [15] Tang C Y, Wang M W, Zhuang Z F, et al. Research progress of laser cladding technology to prepare amorphous alloy coating [J]. Laser Journal, 2015, 36(12): 22-25. 唐翠勇, 汪明文, 庄哲峰, 等. 激光熔覆技术制备非晶合金涂层的研究进展 [J]. 激光杂志, 2015, 36(12): 22-25.
- [16] Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: a review [J]. Materials & Design, 2014, 58: 412-425.
- [17] Leunda J, García Navas V, Soriano C, et al. Effect of laser tempering of high alloy powder metallurgical tool steels after laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 259: 570-576.
- [18] Liu S, Wang Q Y, Xi Y C, et al. Effect of heat treatment on mechanical and anti-corrosion properties of Fe-based laser cladded coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121401. 刘双, 王勤英, 西宇辰, 等. 热处理对铁基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, 2019, 56(12): 121401.
- [19] Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of $Al_2O_3/Fe901$ composite coating prepared by laser cladding [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0514001. 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 $Al_2O_3/Fe901$ 复合涂层的强化机制及耐磨性 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0514001.
- [20] 中国石油和化学工业协会. 色漆和清漆 耐热性的测定: GB/T 1735—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. China Petroleum and Chemical Industry Association. Paints and varnishes: determination of heat resistance: GB/T 1735—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [21] Wu L F, Zeng Q S, Yang Y, et al. Research progress of surface crack in laser cladding [J]. Mechanical Engineer, 2016(9): 26-27. 吴柳飞, 曾庆生, 杨毅, 等. 激光熔覆表面裂纹的研究进展 [J]. 机械工程师, 2016(9): 26-27.
- [22] Zhong W H, Liu G Z, Pan J Z, et al. Effect of Y_2O_3 on structure and properties of Ni/Cr₃C₂ cladding layer [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(2): 147-151. 钟文华, 刘贵仲, 潘洁宗, 等. Y_2O_3 对镍基碳化铬激光熔覆层结构性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34(2): 147-151.
- [23] Cherg Q L, Tin T, Song L Y, et al. Corrosion behaviour of Q235B carbon steel in sediment water from crude oil [J]. Corrosion Science, 2016, 111(10): 61-71.