

一种耐高温防腐涂料的防护机制研究

孙晓峰¹, 周开河², 宋巍¹, 李占明¹, 郭小平³, 郑文茹³, 刘栓³

(1. 陆军装甲兵学院装备保障与再制造系, 北京 100072)

(2. 国家电网宁波供电公司, 浙江 宁波 315201)

(3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: 以球形铝粉为主要防腐颜料, 制备了一种水性磷酸盐耐高温防腐涂料(牌号为 ZK052), 该涂料具有优异的防腐和耐高温-盐雾性能。通过电化学测试、高温-盐雾加速试验和腐蚀形貌表征, 探究该涂料对碳钢基底的耐高温防腐机制, 并对比研究该涂料与国外知名 Sermetel W 水基含铝耐高温防腐涂料的耐温性和耐蚀性。结果表明, ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层均对碳钢具有良好的耐高温防腐性能; ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层可同时抑制碳钢在质量分数为 5% 的 NaCl 溶液中的阳极氧化反应和阴极还原反应, 将碳钢在 5% NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度降低 10 倍。

关键词: 水性涂料; 铝粉; 高温防护; 电化学腐蚀; 失效

中图分类号: TQ637 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)11-0947-07

引用格式: 孙晓峰, 周开河, 宋巍, 等. 一种耐高温防腐涂料的防护机制研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 947-953.

SUN X F, ZHOU K H, SONG W, *et al.* Study on the Protection Mechanism of a High Temperature Resistant Anticorrosive Coating[J]. Materials China, 2022, 41(11): 947-953.

Study on the Protection Mechanism of a High Temperature Resistant Anticorrosive Coating

SUN Xiaofeng¹, ZHOU Kaihe², SONG Wei¹, LI Zhanming¹, GUO Xiaoping³,
ZHENG Wenru³, LIU Shuan³

(1. Department of Equipment Support and Remanufacturing, Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China)

(2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315201, China)

(3. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: A kind of waterborne phosphate high temperature resistant anticorrosive coating (grade ZK052) was prepared in this paper, and coated spherical aluminum powder was used as pigment. The ZK052 coating exhibited excellent anti-corrosion and high-temperature salt spray resistance. The electrochemical testing, high-temperature salt spray accelerating test and corrosion morphology characterization were used to explore the high temperature resistance and corrosion resistance mechanism of the coating on carbon steel substrate. The high temperature resistance and corrosion resistance of ZK052 and

Sermetel W water-based coatings coated on Q235 carbon steel were compared. Results indicated that ZK052 coating and Sermetel W coating exhibited good high temperature resistance and corrosion resistance to Q235 carbon steel. Both ZK052 coating and Sermetel W coating could inhibit both anodic oxidation and cathodic reduction of carbon steel in 5wt% NaCl solution, and reduce the self-corrosion current density of carbon steel in 5wt% NaCl solution by 10 times.

Key words: waterborne coating; aluminum powder; high temperature protection; electrochemical corrosion; failure

收稿日期: 2020-10-29 修回日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41506098); 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室开放课题资助项目(2020K02)

第一作者: 孙晓峰, 男, 1977 年生, 副教授, 博士生导师,
Email: sxfl9999@126.com

通讯作者: 刘栓, 男, 1986 年生, 高级工程师, 硕士生导师,
Email: liushuan@nimte.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202010015

1 前 言

目前,世界上最知名的水性含铝耐高温防腐涂料 Sermetel W,是美国 Teleflex 公司的专利产品,最早于 1961 年生产并应用,该产品广泛应用于发动机压气机叶片在海洋大气腐蚀环境下的长效防护。Teleflex 公司经过多年发展,目前形成了 600 多种系列涂料产品,用于长期在 600~700 ℃ 高湿热环境工作的金属材料的保护。Sermetel W 涂料产品稳定性高、施工性能好,目前国内还没有科研机构成功研制出该类耐高温防腐的成熟产品。

我国正处于集约低碳经济转型期的关键阶段,也是走向海洋战略实施的关键时期,其中海工装备核心部件,如船舶发动机、压气机叶片、排气管、热交换器、高温炉和高温蒸汽管道,对海洋腐蚀环境下的长效耐高温防腐涂层提出迫切需求,海洋苛刻腐蚀环境下的高温熔盐腐蚀已经成为制约我国关键核心装备的“卡脖子”难题^[1-3]。北京航空航天大学孙振宁等^[4]以二月桂酸二丁基锡为催化剂,通过液体环氧树脂与羟基硅油反应合成环氧改性有机硅聚合物,并以环氧改性有机硅聚合物为主要成膜物质制备室温固化的可剥性耐高温保护涂料,研究发现,当羟基硅油占环氧改性聚合物质量分数的 70% 时,制备的涂层能防飞溅、可剥性好,可有效提高发动机叶片激光打孔的质量;北方涂料工业研究设计院王志强^[5]针对发动机排气管的高温腐蚀难题,研制了铝粉基耐高温涂料,并对比研究了铝粉质量分数分别为 78%、85% 和 90% 时涂料的耐高温((700±10)℃)性能和耐热冲击性能,结果发现,提高铝粉含量可以增加漆膜的光泽度和耐热冲击性能,基材底材喷砂方式和抛光处理对漆膜装饰性和防腐性能影响较大;天津灯塔涂料有限公司高萌等^[6]研制了可常温固化聚硅氧烷的耐高温涂料,该涂层具备优异的耐油性、耐高温性和耐盐雾性,能够满足军机维修单位的使用要求,但产品的长期耐温性和服役性能有待考证。

海洋大气腐蚀环境下空气湿度大,金属表面易形成薄液膜,同时海洋大气环境下的水膜中存在大量氯离子,它们可在金属表面形成电解质溶液,加速金属的电化学腐蚀^[7,8]。高温时水汽蒸发后的氯盐会加速破坏金属钝化膜,形成熔盐腐蚀^[9-11]。因此,急需开发海洋腐蚀环境下的长效耐高温防腐涂层。本文以球形铝粉为主要颜料,制备了一种水性磷酸盐耐高温防腐涂料(牌号 ZK052),通过电化学测试和高温-盐雾循环试验,探究 ZK052 涂料对 Q235 碳钢基底的耐高温防腐机制,同时对比研究 ZK052 与 Sermetel W 的耐高温和腐蚀电化学特性。结果表明,ZK052 涂料具有优异的耐高温、耐湿热、耐盐雾性能,产

品性能稳定,储存稳定性高,施工性能好,有望取代 Sermetel W 涂料应用于压气机叶片的耐高温腐蚀实践中。

2 实 验

2.1 实验原料

制备磷酸盐耐高温防腐涂料(ZK052)的主要原料见表 1。

表 1 主要原材料及厂家

Table 1 Main materials and manufacturers		
Materials	Specifications	Manufacturers
Spherical aluminum powder	Micrometre	Shandong Yingke
Aluminum dihydrogen phosphate	Analytical pure	Aladdin
Bentonite	Micrometre	Anji Fenghong
Chromium trioxide	Analytical pure	Aladdin
KH560 Silane	Industrial pure	Nanjing Nengde
Ethanol	Analytical pure	Aladdin
Magnesium oxide	Analytical pure	Aladdin
Chromium oxide	Analytical pure	Aladdin
Phosphoric acid	Analytical pure	Aladdin
Dispersant	Industrial pure	Lubrizol
Deionized water	Analytical pure	Homemade
Leveling agent	Industrial pure	Germany BYK

2.2 涂料制备

在烧杯中依次加入 50 g 无水乙醇和 15 mL 乙氧基硅烷,在搅拌的情况下加入 30 g 球形铝粉,匀速搅拌 2 h,使乙氧基硅烷在铝粉表面均匀包覆,烘干制得包覆铝粉。在 500 mL 广口瓶中加入一定比例的磷酸、三氧化铬、磷酸二氢铝,搅拌至三氧化铬溶解完全;在另一个烧杯中加入水、氧化镁,超声至成为均匀的悬浮物,将悬浮物缓慢滴加到广口瓶中,搅拌并控制滴速(约 60 滴/min)使溶液不出现大块沉淀为佳,控制混合物的温度在 55 ℃ 以下、pH 值在 1.8~2.5 之间。待混合溶液呈透明橙黄色,搅拌加入分散剂与流平剂后,加入包覆铝粉和三氧化二铬,超声分散,然后用 125 μm 孔径的纱网过滤,包装制得水性磷酸盐耐高温防腐涂料(ZK052)。

2.3 涂层制备和测试表征

2.3.1 涂层制备

将 Q235 碳钢板(尺寸为 10 cm × 5 cm × 1 mm)用粒径为 125 μm 的石英砂喷砂,用分析纯酒精清洁表面后待用。用去离子水稀释 ZK052 和 Sermetel W 涂料至喷涂粘度(粘度为涂 4 杯 25~30 s 之间),采用压缩空气喷涂到碳钢板上,常温流平 10 min,在 190 ℃ 烘烤 1 h,烘烤后的表面宏观形貌见图 1;再升温到 550 ℃ 烘烤 2 h,取出

冷却至常温, 涂层制备完毕待用。

2.3.2 涂层防腐性能测试和组织形貌表征

人工合成海水的配制方法参照 WS9 9051—2000 进行, 具体各组分含量为: 氯化钠 26.5 g/L, 氯化镁 2.4 g/L, 硫酸镁 3.3 g/L, 氯化钙 1.1 g/L, 氯化钾 0.73 g/L, 碳酸氢钠 0.2 g/L, 溴化钠 0.28 g/L。溶液配制完毕后静置 24 h 备用。

高温-盐雾循环测试: 将涂装好的涂层/碳钢体系在马弗炉中 450 °C 保温 2 h, 然后在 35 °C 的喷雾试验箱中放置 22 h, 喷雾溶液为人工合成海水, 沉降量为 1.5 mL/80 cm²·h。24 h 为一个循环, 每隔 1 个循环进行拍照, 观察漆膜表面的腐蚀状态。

ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层的耐蚀性能评价通过电化学工作站测试系统完成。具体是采用 CHI660E 电化学工作站和 Powersine 测试软件组成测试系统, 采用经典三电极腐蚀电化学测试体系, 工作电极为耐高温涂层/碳钢电极, 对电极为铂电极, 参比电极由饱和甘汞电极 (saturated calomel electrode, SCE) 和盐桥组成。测试介质是质量分数为 5% 的 NaCl 溶液, 整个浸泡和测试在室温 (25 °C) 下进行, 浸泡不同时间后, 采用电化学工作站在测试耐高温涂层/碳钢体系的电化学腐蚀性能, 其中动电位极化曲线扫描范围为相对于开路电位 (open circuit potential, OCP) -200 ~ 250 mV, 扫描速率为 0.5 mV/s。交流阻抗谱测试正弦波电位幅值为 10 mV, 频率扫描范围为 0.01 ~ 10⁵ Hz。

耐高温涂层/碳钢体系的组织形貌测试通过冷场发射扫描电子显微镜 (日立 S-4800, 日本日立公司) 完成。ZK052 涂层 550 °C 高温固化后, 采用 X 射线衍射仪 (XRD, D8 Advance) 对涂层成分进行测试。将制备好的涂层/碳钢样板通过超高压水切割机 (APW41037Z, 奥拓福公司) 加工成 10 mm × 10 mm × 1 mm 的小块以进行观察, 通过调节目镜和放大倍数, 观察涂层表面显微结构。

测试前需要对涂层表面进行喷金处理, 镀金层的厚度约 10 ~ 15 nm, 镀金层不改变磷酸盐涂层表面形貌, 加速电压采用 10 kV。

3 结果与讨论

3.1 漆膜固化成膜性能

漆膜在 190 °C 下烘烤 1 h 后的表面形貌照片见图 1。此时漆膜耐水性较差, 主要是因为磷酸盐没有完全固化。进一步在 550 °C 烘烤 2 h, 磷酸根离子与金属基底发生化学反应, 产生磷酸铁, 漆膜完全固化。

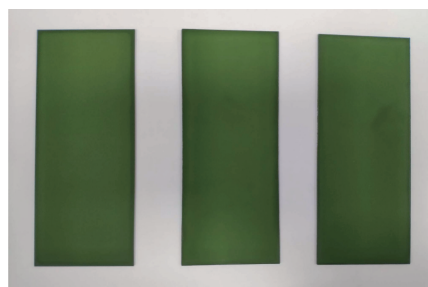


图 1 190 °C 固化 1 h 后的 ZK052 涂层表面形貌照片

Fig. 1 Surface topography photos of ZK052 coating cured at 190 °C for 1 h

图 2 和图 3 分别是 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层高温-盐雾试验前和高温-盐雾循环 10 次后的表面 SEM 照片。高温-盐雾试验前, ZK052 涂层中的球形铝粉在漆膜中均匀分散, 铝粉直径约 1 ~ 4 μm, 排布紧密, 说明包覆后可减少铝粉团聚, 并对基材起到一定的物理阻隔作用 (图 2c); Sermetel W 涂层中的铝粉呈圆柱状, 铝粉的长度约 2 ~ 10 μm (图 3c)。高温-盐雾循环 10 次后, 两种涂层中的铝粉表面均形成针状腐蚀产物, 原因是高温熔盐环境中, 漆膜内部的铝粉逐渐被高温氧化腐蚀, 但 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层漆膜表面完整, 没有出现明显的起泡、剥落现象, 说明两种涂层能够长期耐受高温熔盐环境腐蚀。

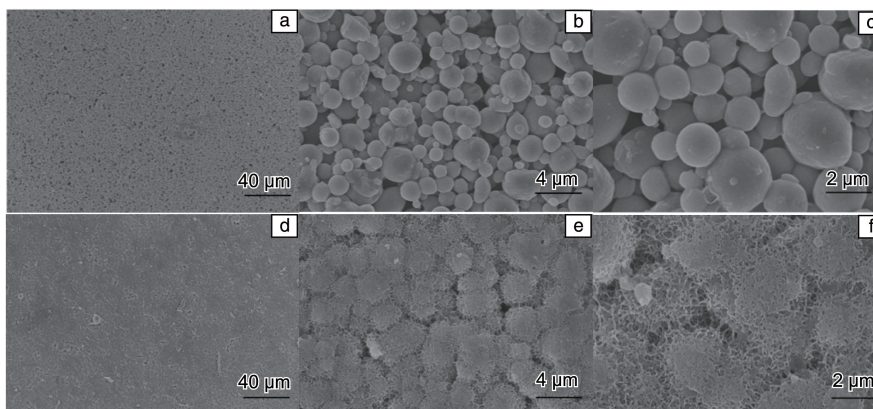


图 2 ZK052 涂层在高温-盐雾实验前 (a~c) 和高温-盐雾循环 10 次后的表面 SEM 照片 (d~f)

Fig. 2 SEM images of ZK052 coating surface before salt spray test (a~c) and after 10 times of high temperature-salt spray test (d~f)

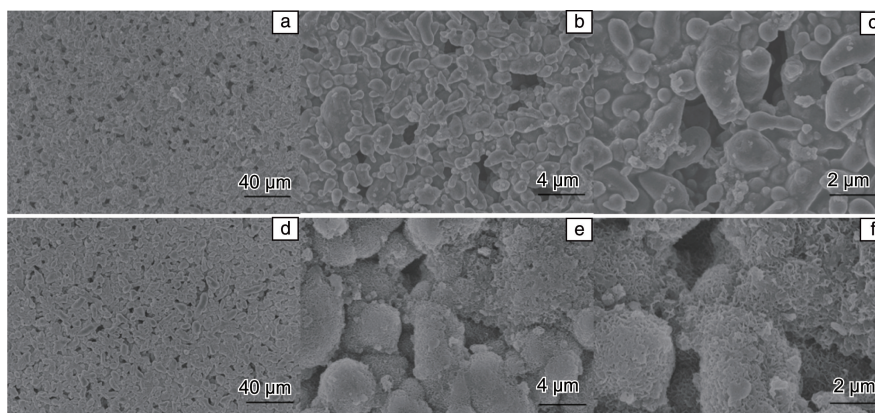


图 3 Sermetel W 涂层在高温-盐雾实验前(a~c)和高温-盐雾循环 10 次后的表面 SEM 照片(d~f)

Fig. 3 SEM images of Sermetel W coating surface before salt spray test (a~c) and after 10 times of high temperature-salt spray test (d~f)

为了探究漆膜与基底碳钢的界面结合性能,对高温固化后的 ZK052 涂层/碳钢试样进行截面切割,并通过 SEM 观察漆膜与碳钢之间的结合程度。通过截面 SEM 照片(图 4)观察可知,ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层在碳钢上紧密附着,涂层内部铝粉排布均匀,漆膜完整。

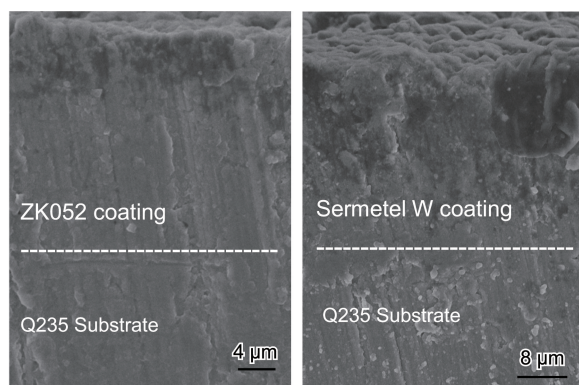


图 4 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层在 Q235 碳钢上的截面 SEM 照片,漆膜厚度 20 μm

Fig. 4 Cross sectional SEM images of ZK052 coating and Sermetel W coating coated on Q235 carbon steel, the film thickness is 20 μm

单独将 ZK052 涂料在 550 °C 高温固化,后进行 XRD 测试,如图 5 所示,可以看出 ZK052 涂料高温固化后的主要产物为磷酸铝和偏磷酸镁,说明将 ZK052 涂料涂装在碳钢上后,其主要成膜物质磷酸二氢铝在高温固化过程中可与碳钢发生化学反应生成稳定致密的磷酸铁结构^[12, 13],固化反应机理见图 6,由于生成的 Fe—O 键结构增加了漆膜与碳钢基材的结合力,故耐高温涂料可以在碳钢基材上良好附着。

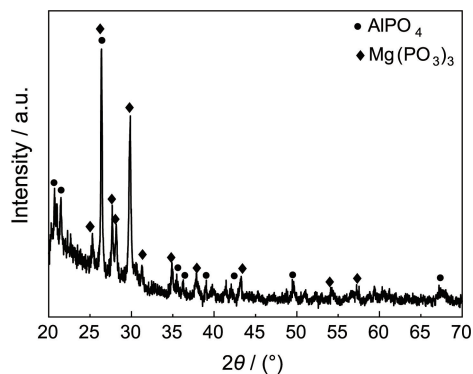


图 5 ZK052 涂料 550 °C 高温固化后的 XRD 图谱
Fig. 5 XRD pattern of ZK052 coating cured at 550 °C

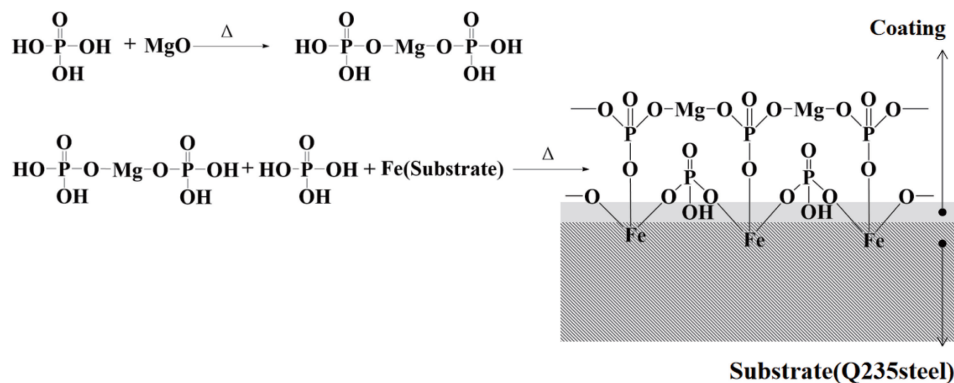


图 6 ZK052 涂层在 Q235 碳钢上的高温固化机理

Fig. 6 High temperature curing mechanism of ZK052 coating coated on Q235 carbon steel

3.2 漆膜耐蚀性能

对比研究 ZK052 涂层/碳钢与 Sermetel W 涂层/碳钢在 5% NaCl 溶液中浸泡 35 d 内的开路电位变化曲线, 如图 7 所示。当碳钢上不涂覆防腐涂层时, 碳钢的开路电位从浸泡初期的 -0.719 V 逐渐负移到 35 d 后的 -0.832 V , 说明碳钢在 5% NaCl 溶液中的腐蚀倾向加剧, 腐蚀速率逐渐加快; 当碳钢 Q235 上涂覆 $60\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 ZK052 涂层后, 随着浸泡时间的延长, 其开路电位曲线缓慢负移, 在 5% NaCl 溶液中浸泡 35 d 后涂层/碳钢体系的开路电位为 -0.716 V ; 当碳钢 Q235 上涂覆 $60\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 Sermetel W 涂层后, 浸泡 35 d 后涂层/碳钢体系的开路电位负移到 -0.864 V , 这表明 ZK052 涂层可抑制碳钢在 5% NaCl 溶液中开路电位的负移。ZK052 涂层/碳钢体系腐蚀后的开路电位相对于碳钢发生正移, 说明 ZK052 涂层在 35 d 的浸泡过程中是通过直接抑制碳钢阳极氧化的方式来对它实现保护的。而 Sermetel W 涂层/碳钢体系的开路电位相对于碳钢更负, 说明 Sermetel W 涂层从浸泡 5 d 开始起到的是牺牲阳极保护作用, 通过涂层中铝粉的优先溶解来防止碳钢腐蚀。在进行牺牲阳极保护的过程中, Sermetel W 涂层中的铝粉会发生反应, 当铝粉被腐蚀产物包裹后发生反应的难度增加, 涂层体系的开路电位正移; 当铝粉表面腐蚀产物溶解后, 铝粉的反应难度下降, 体系的开路电位又再次负移, 因此, 该涂层保护下的碳钢样品在浸泡过程中开路电位表现出明显的波动, 这也说明 Sermetel W 涂层的保护作用并不稳定。而 ZK052 涂层/碳钢体系在 35 d 的浸泡过程中主要依靠抑制阳极氧化进行保护, 开路电位数值变化较小。

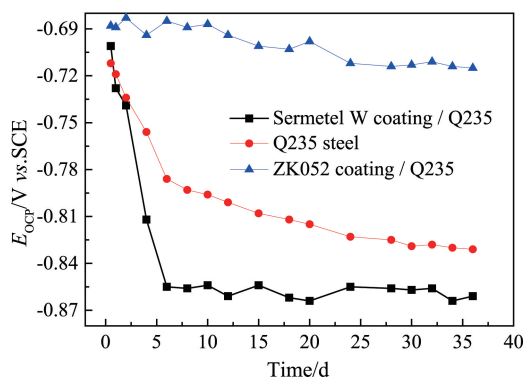


图 7 碳钢、ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢在 5% NaCl 溶液中浸泡不同时间的开路电位 E_{OCP} 变化曲线

Fig. 7 E_{OCP} curves of carbon steel, ZK052 coating/carbon steel and Sermetel W coating/carbon steel system immersed in 5wt% NaCl solution after different time

对比研究 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层对 Q235 碳钢在 5% NaCl 溶液的腐蚀防护性能, 采用电化学工作站分

别测试浸泡 35 d 后的 ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢的动电位极化曲线, 测试结果如图 8 所示, 同时对极化曲线 Tafel 区进行拟合^[14, 15], 得到 3 种体系的腐蚀电化学参数(表 2)。碳钢、ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系在 5% NaCl 溶液中浸泡 35 d 后的自腐蚀电流密度(i_{corr})分别为 426.50 、 46.42 和 $61.63\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 说明 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层都可以有效抑制 Q235 碳钢腐蚀, 两种涂层都将 Q235 碳钢在 5% NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度降低 10 倍左右。ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系的阴极极化率($-\beta_c$)和阳极极化率(β_a)均高于碳钢电极, 说明 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层都可同时抑制碳钢在 5% NaCl 溶液中的阳极氧化反应和阴极还原反应^[16]。综上所述, 在海洋大气腐蚀环境中, 碳钢表面涂覆磷酸盐涂层可以有效抑制金属基材微区电化学腐蚀反应。

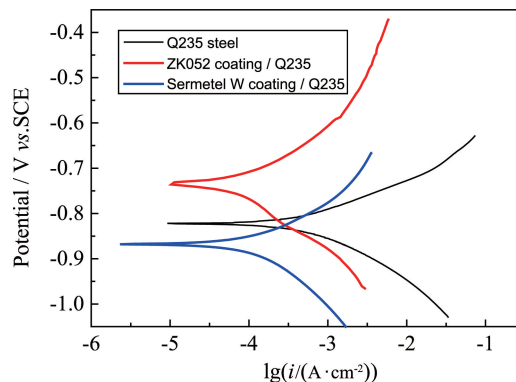


图 8 碳钢、ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系在 5% NaCl 溶液中浸泡 35 d 后的动电位极化曲线

Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves of carbon steel, ZK052 coating/carbon steel and Sermetel W coating/carbon steel system immersed in 5wt% NaCl solution after 35 d

表 2 对极化曲线拟合得到的电化学腐蚀参数

Table 2 Electrochemical corrosion parameters fitted from polarization curves

System	E_{corr}/V vs. SCE	$i_{\text{corr}}/$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	$\beta_a/$ (mV/dec)	$-\beta_c/$ (mV/dec)
Q235 substrate	-0.823	426.50	69.29	85.2
ZK052/Q235	-0.734	46.42	123.21	106.6
Sermetel W/Q235	-0.867	61.63	102.36	191.8

采用电化学工作站对比研究 ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系在 5% NaCl 溶液中浸泡不同时间后的交流阻抗谱, 结果如图 9 所示。两种涂层在溶液中浸泡 24 h 后的 Nyquist 图中均出现两个容抗弧, 其中高频区的容抗弧对应涂层电阻和涂层电容, 低频区的容抗弧对应电荷转移电阻和双电层电容。随着浸泡时间的延长,

ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系的低频容抗弧半径逐渐减小, 低频区的阻抗模值减小。浸泡 240 h 后, ZK052 涂层/碳钢体系在 0.01 Hz 处的低频模值为

$1.05 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, Sermetel W 涂层/碳钢体系在 0.01 Hz 处的低频模值为 $3.16 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 说明在相同漆膜厚度下, ZK052 涂层对碳钢的防护性能比 Sermetel W 涂层稍好。

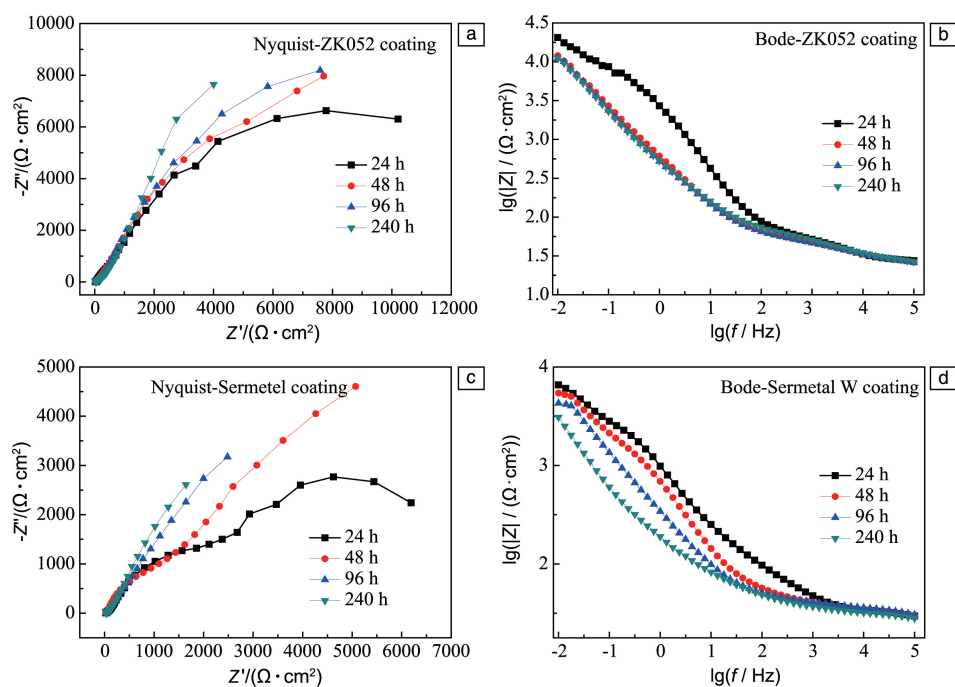


图9 ZK052 涂层/碳钢体系(a, b)和 Sermetel W 涂层/碳钢体系(c, d)在 5% NaCl 溶液中浸泡不同时间后的交流阻抗谱
Fig. 9 EIS curves of ZK052 coating/carbon steel system (a, b) and Sermetel W coating/carbon steel system (c, d) immersed in 5wt% NaCl solution after different time

将 ZK052 涂层/碳钢和 Sermetel W 涂层/碳钢体系进行高温-盐雾循环试验, 经过 10 次循环后, 两种涂层体系漆膜表面完好, 没有出现起泡、脱落和腐蚀迹象(图 10 和图 11), 说明 ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层均对碳钢表现出良好的耐高温防腐性能。同时, 将 ZK052 涂料和 Sermetel W 涂料直接涂装到压气机叶片上, 经过 10 次高温-盐雾循环后发现漆膜完整, 无腐蚀迹象, 见图 12a。

然后对压气机叶片表面采用质量分数为 20% 的 NaOH 溶液进行脱漆处理, 脱漆后的压气机叶片腐蚀形貌见图 12b, 发现两种涂层对压气机叶片防护良好, 叶片都没有发生腐蚀迹象, 但涂装 Sermetel W 涂层保护的压气机叶片颜色变深, 可能是由于压气机叶片在高温试验过程中表面发生氧化导致。

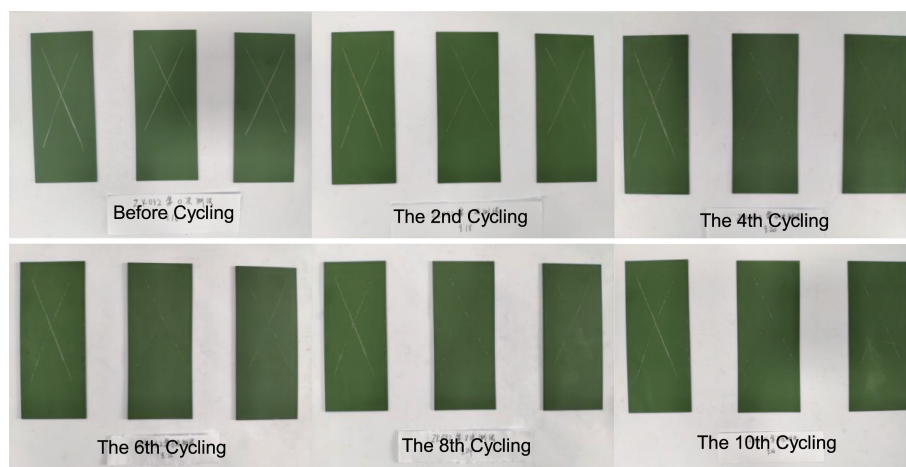


图 10 ZK052 涂层/碳钢在高温-盐雾循环不同次数后的表面腐蚀形貌照片

Fig. 10 Surface corrosion morphology photos of ZK052 coating/carbon steel system after different high temperature-salt spray cycles

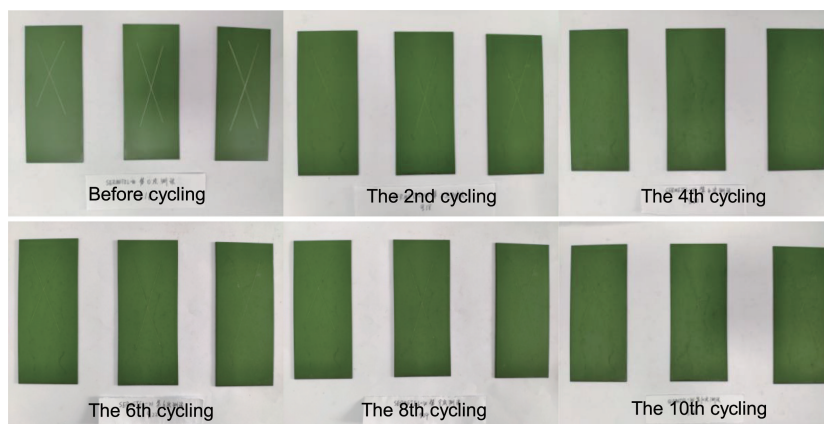


图 11 Sermetel W 涂层/碳钢在高温-盐雾循环不同次数后的表面腐蚀形貌照片

Fig. 11 Surface corrosion morphology photos of Sermetel W coating/carbon steel system after different high temperature-salt spray cycles

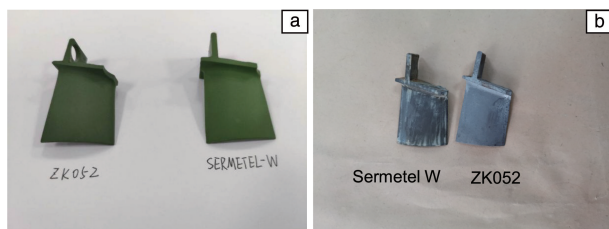


图 12 ZK052 涂层/叶片、Sermetel W 涂层/叶片在高温-盐雾循环后的腐蚀照片(a)和叶片脱漆后的照片(b)

Fig. 12 Corrosion photos after high temperature-salt spray cycle (a) and photos of the blade after paint removal (b) of ZK052 coating/blade, Sermetel W coating/blade

4 结 论

(1) 本文以球形铝粉为颜料, 通过搅拌和化学反应制备了一种水性磷酸盐耐高温防腐涂料, 该涂料在高温固化时会与碳钢发生钝化反应, 生成稳定致密的磷酸铁结构, 与基材结合力好。

(2) 电化学测试、高温-盐雾循环实验和形貌表征结果显示, ZK052 涂层与 Sermetel W 涂层均对 Q235 碳钢具有良好的防护性能。

(3) ZK052 涂层和 Sermetel W 涂层都可同时抑制碳钢在 5% NaCl 溶液中的阳极氧化反应和阴极还原反应, 将碳钢在 5% NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度降低 10 倍左右。ZK052 涂层有望取代进口 Sermetel W 涂层, 实现在压气机叶片防护中的应用。

参考文献 References

- [1] DIMITRA K, DIMITRIOS C, CHRISTOSH V, *et al.* Corrosion Science[J], 2019, 148: 12-23.
- [2] WANG M N, CHUANG Q X, LIN J, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2020, 15: 40-53.
- [3] DU F Y, JIN Z Q, WEI S, *et al.* Construction and Building Materials

[J], 2020, 263: 1-11.

- [4] 孙振宁, 陈贻焱, 钱建刚, 等. 航空制造技术[J], 2019, 62(20): 50-54.
SUN Z N, CHEN Y C, QIAN J G, *et al.* Aviation Manufacturing Technology[J], 2019, 62(20): 50-54.
- [5] 王志强. 现代涂料与涂装[J], 2010, 13(10): 6-8.
WANG Z Q. Modern Paint & Finishing[J], 2010, 13(10): 6-8.
- [6] 高萌, 黄震, 何效凯, 等. 中国涂料[J], 2016, 31(9): 30-35.
GAO M, HUANG Z, HE X K, *et al.* China Coating[J], 2016, 31(9): 30-35.
- [7] YOU N Q, SHI J J, ZHANG Y M. Corrosion Science[J], 2020, 175: 108874.
- [8] 刘栓, 周开河, 王立平, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2019, 31(1): 114-120.
LIU S, ZHOU K H, WANG L P, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 2019, 31(1): 114-120.
- [9] ZHU J Y, LI D P, CHANG W, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2020, 9(4): 8104-8116.
- [10] LIU S, ZHAO X, ZHAO H C, *et al.* Chinese Journal of Oceanology and Limnology[J], 2017, 35: 423-430.
- [11] LIU S, SUN H Y, SUN L J, *et al.* Corrosion Science[J], 2012, 65: 520-527.
- [12] HUANG Q, LIU L L, WU Z Z, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2020, 384: 125321.
- [13] ELIJAH C, VINCENZO D, MICJAEL P, *et al.* Surface and Coatings Technology[J], 2020, 399: 126161.
- [14] ZHAO X, LIU S, WANG X T, *et al.* Chinese Journal of Oceanology and Limnology[J], 2014, 32: 1163-1171.
- [15] 刘栓, 孙虎元, 孙立娟. 材料工程[J], 2015, 43(3): 113-118.
LIU S, SUN H Y, SUN L J. Journal of Materials Engineering[J], 2015, 43(3): 113-118.
- [16] GU L, LIU S, ZHAO H C, *et al.* ACS Applied Materials and Interfaces[J], 2015, 7: 17641-17648.
- [17] LIU S, GU L, ZHAO H C, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2016, 32: 425-431.

(编辑 吴 锐)