

一种可原位修复和循环使用的包覆涂层材料 及其耐蚀性能研究

张寒露¹, 林伟², 王虎², 张海龙³, 张海兵⁴,
侯健⁴, 林冰³, 王莹莹³, 唐鋈磊³

(1.中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072; 2.西南石油大学 新能源与材料学院, 成都 610500;
3.西南石油大学 化学化工学院, 成都 610500; 4.中国船舶重工集团公司第七二五研究所
海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: **目的** 制备纤维素基的包覆涂层材料, 研究其原位修复与循环性能。**方法** 以乙基纤维素、蓖麻油和矿物油等为主要原料, 采用熔融共混的方法制备得到可循环使用的包覆涂层材料。通过扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和红外光谱 (FT-IR) 研究包覆涂层材料的微观结构, 通过电化学交流阻抗技术 (EIS)、溶液浸泡实验和中性盐雾试验研究涂层的耐蚀性能。采用自建电磁感应设备研究包覆涂层材料的自修复性能和循环使用性能。**结果** 在包覆涂层材料中添加 Ni 粉后, 使得涂层具有一定的磁响应特性。当 Ni 的质量分数达到 15% 后, 有明显的团聚现象。随着 Ni 含量的增加, 包覆涂层材料的磁性能逐渐增强。含 10% Ni 的包覆涂层材料在 5% 的 HCl 溶液中浸泡 28 天以及中性盐雾 10 000 h 后均无变化, 同时在磁场作用下热熔循环 20 次, 性能和结构没有太大变化。**结论** 添加 10% Ni 粉后不会对包覆涂层材料的结构和性能产生影响, 同时赋予了较好的电磁感应性能。通过磁场的作用可以修复包覆涂层材料的物理损伤, 同时由于包覆涂层材料具有热塑性, 可以多次修复损伤以及循环使用。

关键词: 可循环; 热塑性; 腐蚀; 电磁感应

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.007

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0040-10

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-07-20

Received: 2020-06-29; Revised: 2020-07-20

基金项目: 四川省科技厅科技计划项目 (2018GZ0520); 海洋腐蚀与防护重点实验室开放研究基金项目 (KF190405); 四川省教育厅科研创新团队 (18TD0012)

Fund: Supported by Key R & D Program of Science and Technology Department of Sichuan Province (2018GZ0520); Open Research Fund Project of the Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection (KF190405); Research and Innovation Team of Sichuan Provincial Department of Education (18TD0012)

作者简介: 张寒露 (1981—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为防腐防污涂料。

Biography: ZHANG Han-lu (1981—), Female, Doctor, Engineer, Research focus: anti-corrosion coatings.

通讯作者: 唐鋈磊 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程、新能源材料、航空材料。

Corresponding author: TANG Jun-lei (1983—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering, new energy materials, aviation materials.

Study on a Self-healing and Recyclable Coating Materials and Its Corrosion Resistances

ZHANG Han-lu¹, LIN Wei², WANG Hu², ZHANG Hai-long³, ZHANG Hai-bing⁴,
HOU Jian⁴, LIN Bing³, WANG Ying-ying³, TANG Jun-lei³

(1. Unit 92228, People's Liberation Army, Beijing 100072, China; 2. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. College of Chemical and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute (LSMRI), Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: Recyclable coating materials were prepared, and the repairable and recyclable properties of the coating materials were studied. Ethyl cellulose, castor oil, mineral oil, etc. were used as the main raw materials to prepare the recyclable coating materials with the method of hot melt. The microstructure of the coating material was studied by Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD) and infrared spectroscopy (FT-IR). The electrochemical corrosion resistance (EIS), solution immersion test and neutral salt spray test were used to study the corrosion resistance of the coating materials. The self-made electromagnetic induction equipment was used to study the recycling performance of the coating material. The coating materials had magnetic response characteristics after adding Ni powder. When the Ni powder content reaches 15%, there was obvious agglomeration phenomenon, and the magnetic properties of the coating materials gradually increase with the increase of Ni. The coating materials containing 10% Ni powder had no change after immersion in 5% HCl solution for 28 days and neutral salt spray test for 10000 h. The coating materials properties and structure did not change after 20 cycles of hot melting under the action of an alternating magnetic field. Adding 10% Ni powder will not affect the structure and performance of the coating materials, while giving it better electromagnetic induction performance. The physical damage of the coating materials can be repaired by the action of the magnetic field. Because the coating materials is thermoplastic, it can be repaired and recycled many times.

KEY WORDS: Recyclable; thermoplastic; corrosion; electromagnetic induction

金属材料由于其优异的力学性能和加工性能，自古以来都是使用范围最广、使用量最大的材料。金属也有脆弱的一面，大多数金属单质极易被氧化，造成金属材料的性能下降。金属材料的防护也一直是人类关注的问题，从最早的在表面涂抹桐油、黄油等油脂，发展到天然漆类涂层、有机/无机合成涂层^[1-4]、金属材料的表面钝化^[5]、金属材料合金化^[6]、阴极保护等多种手段的联合^[7]。

包覆防护是将金属部分或完全包裹，使部件与外界环境相隔绝，防止其发生氧化等破坏。西方国家早在 20 世纪 40 年代已经开始研究此类包覆涂层材料，并应用在了航空航天、武器装备、汽车及精密仪器的保护上。同时研制出了可快速剥离的包覆涂层材料，特别适合于武器装备的贮存保护，当发生紧急情况时，可快速剥离包覆层^[8-10]。

传统的包覆涂层材料主要分为油溶性和水溶性两类。油性包覆涂层材料常用的有烯类树脂^[11-12]、丙烯酸树脂^[13-14]和聚氨酯类^[15]等，但仍然使用了大量的有机溶剂^[14,16-18]。随着环境问题的加剧，水溶性包覆涂层材料目前也在大力的发展中，但是各方面性能仍然不如油性溶剂型。文中在总结前人对包覆涂层材料和涂层防护方面研究的基础上，通过熔融共混的方

式制备出了一种无溶剂、可循环使用、可修复的包覆涂层材料，通过 SEM、XRD 和 FT-IR 分析了包覆涂层材料的结构，通过 EIS、中性盐雾试验和溶液浸泡试验研究了包覆涂层材料的耐蚀性能，同时通过自建的电磁修复系统研究了包覆涂层材料的可修复性能。

1 试验

1.1 包覆涂层材料制备

试验所用材料乙基纤维素、矿物油、蓖麻油、Ni 粉(粒度约为 100 nm)、TiO₂ 粉末和环氧树脂(E44)均购于成都市科龙化工试剂厂。首先将 40 份的乙基纤维素、30 份的矿物油、3 份的蓖麻油和 10 份的环氧树脂混合于反应容器中，将容器升温到 220 ℃，在升温的过程中低速搅拌。当各组分熔融混合均一后再将一定量的 Ni 粉、TiO₂ 和助剂加入到反应容器中，快速搅拌混合均一后在室温下冷却固化得到可循环可修复的包覆涂层材料。

1.2 包覆涂层材料测试

中性盐雾试验采用 SH-90 中性盐雾试验箱，根据 GB/T 10125 对包覆涂层材料进行了 10 000 h 试验，

观察包覆涂层材料在试验过程中的变化。采用三电极体系,通过普林斯顿电化学工作站(Versa STAT 4)测量其在3.5% NaCl溶液中的EIS(电化学交流阻抗)曲线,研究包覆涂层材料的耐蚀性能。采用美国Lake Shore的7404型振动样品磁强计(VSM)对包覆涂层材料的磁性能进行了研究。采用扫描电子显微镜(蔡司EVO MA15)对包覆涂层材料表面微观形貌进行了观察。采用荷兰PANalytical的Pert PRO MPD型X射线衍射仪对包覆涂层材料晶体结构进行了观测。采用美国Thermo的Nicolet 6700型红外光谱测试仪对包覆涂层材料官能团进行了表征。

将制备得到的性能较优异的包覆涂层材料通过以上测试表征后,在自主搭建的磁感应修复系统下进行感应加热熔融。磁感应修复系统包括高频磁感应发生设备、红外测温系统和控制单元。如图1所示,首先将包覆涂层材料制备成厚度为1~2 mm的薄片层,并在片层上制造贯穿性的物理伤痕,将破坏后的片层放置于磁感应系统中,设置相应的参数,对破损位置

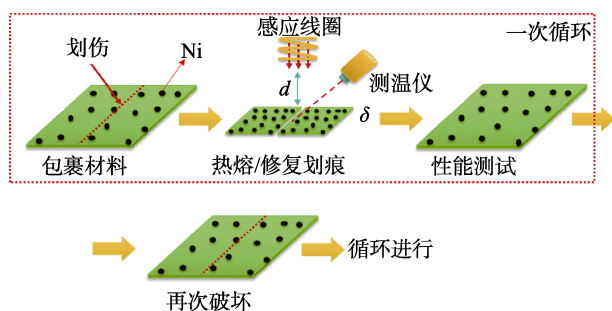


图1 包覆涂层材料循环测试

Fig.1 Schematic diagram of cyclic testing of coating materials

进行修复。修复完成后,对片层进行相应的性能测试和表征分析。划伤修复后的涂层,并进行修复,依次循环进行。

2 结果讨论

2.1 包覆涂层材料的结构与性能研究

2.1.1 Ni含量对包覆涂层材料的影响

不同Ni含量的包覆涂层材料的表面形貌如图2所示。由图2可知,所有样品表面均较致密,没有可见的孔洞、裂纹等缺陷。随着Ni含量的增加,样品表面粗糙度逐渐增加。当Ni的质量分数达到10%后,表面明显可见颗粒状物质。表面在放大2000倍下的EDS(X射线能谱)图谱见图3,可以看出,当Ni的质量分数为5%和10%时,Ni粉在包覆涂层材料中能均匀地分散;当Ni的质量分数达到15%后,Ni粉在包覆涂层材料中发生了明显的团聚,团聚点尺寸大约为70 μm;继续增加Ni粉的含量,团聚现象逐渐加剧,团聚面积达到20%以上。这是由于无机纳米颗粒表面电荷的聚集,表面能较高,处于不稳定状态,当含量较高时容易发生聚集,从而达到稳定状态^[19]。

2.1.2 磁热性能研究

不同Ni含量的包覆涂层材料振动样品磁强计(VSM)和生热速率测试结果如图4所示。图4a样品的磁滞回线扫描图中都存在较小面积的环形回路,随着外加磁场强度的增大,样品的磁感应强度逐渐增

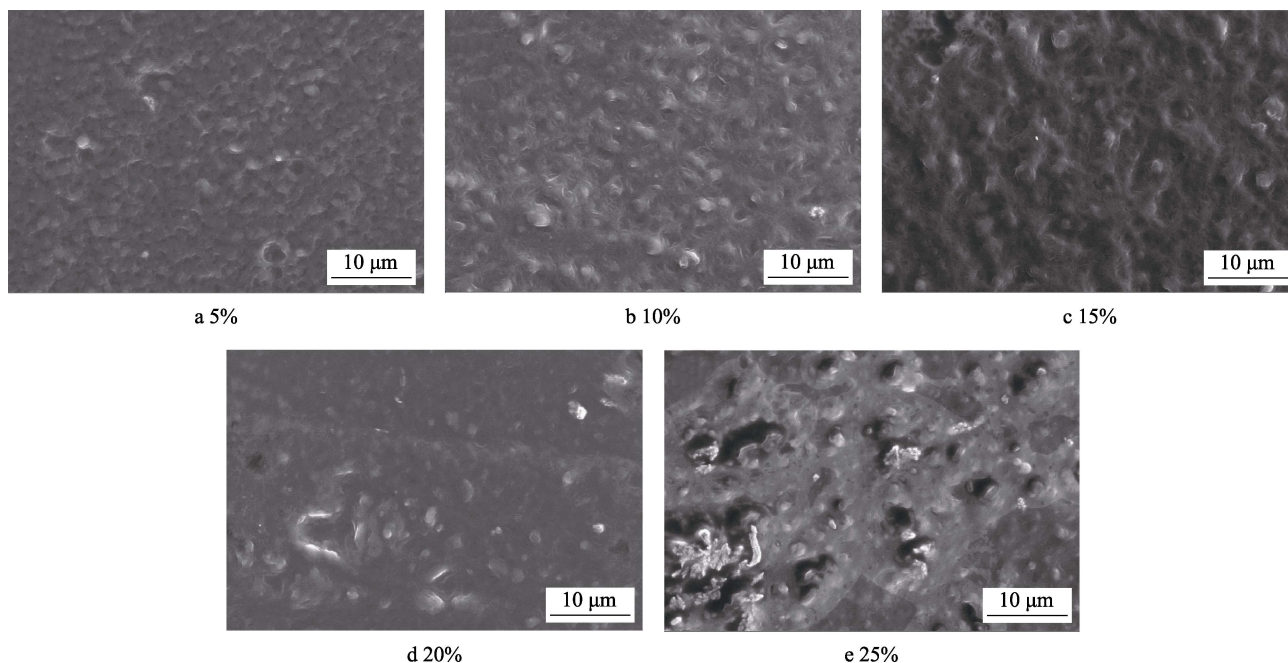


图2 不同Ni含量的包覆涂层材料表面形貌

Fig.2 The surface morphology of the coating materials with different Ni contents

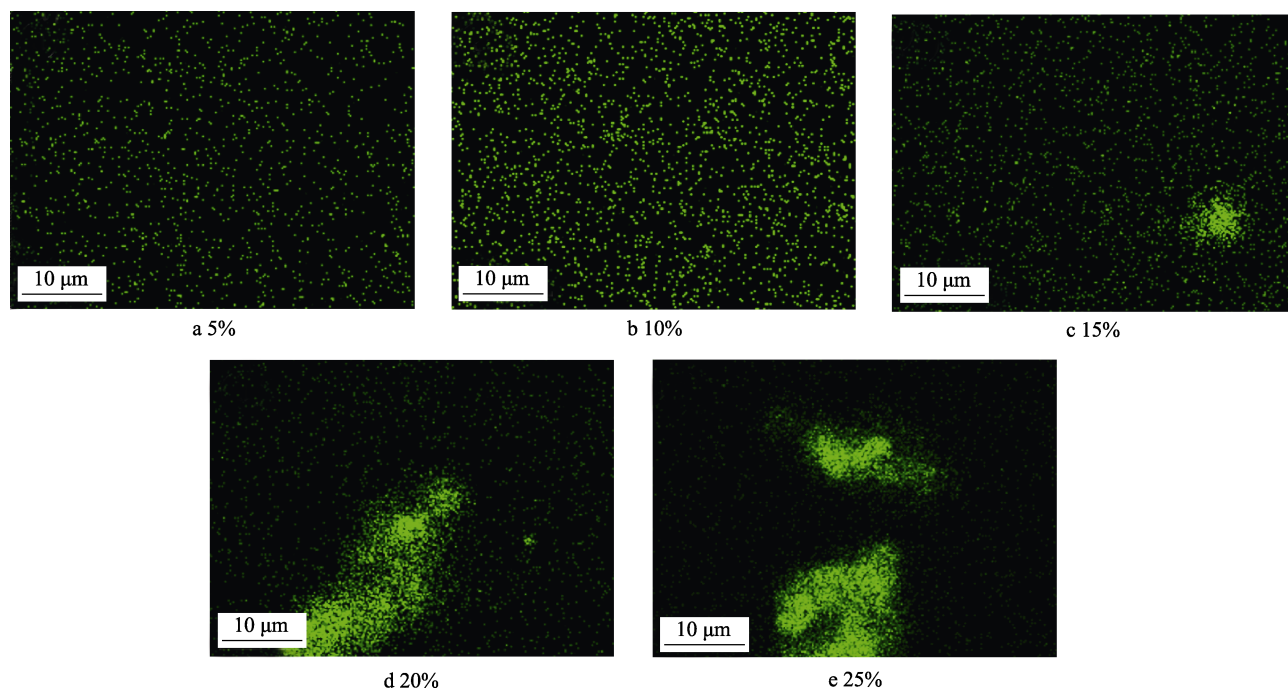


图 3 不同 Ni 含量的包覆涂层材料的 EDS 图谱
Fig.3 The EDS spectrum of coating materials with different Ni contents

大。当外加磁场强度达到 10 T 后,所有样品的磁感应强度基本稳定,所以添加 Ni 后的涂层都表现出了软磁材料磁滞后的特性^[20]。图 4b 显示了样品饱和磁化强度和矫顽力随 Ni 添加量的关系。由图 4b 可知,当 Ni 的质量分数为 5% 时, M_s 为 $2.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, H_c 为 2.52 mT, M_s 和 H_c 随着 Ni 含量的增加逐渐增大。当 Ni 的质量分数为 25% 时, M_s 和 H_c 分别达到了 $12.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 和 5.64 mT。相对于纯的 Ni 材料,样品的 M_s 和 H_c 都较低。

图 4c 为包覆涂层材料在设备功率为 2 kW,线圈与材料表面距离为 5 mm 条件下,随着在磁场中作用时间的延长,样品温度不断升高,同时 Ni 含量越高,温度升高速率越快。当设备运行功率为 2 kW,工作 60 s 后,含有 5% Ni 的样品温度为 41 °C,而含有 25% Ni 的样品温度已经超过了 200 °C。因为样品中含有 Ni 颗粒,当样品放置于高频的磁场环境时,由于磁滞损耗会将损耗的部分能量转化为热能释放到样品

中,引起了样品温度的升高^[21]。随着 Ni 在样品中含量的增加,粒子之间的距离缩小,使得样品饱和磁化强度逐渐增大,磁滞损耗逐渐增加,使得更多的磁能转化为热能^[22-23]。

2.1.3 耐蚀性能研究

含 Ni 包覆涂层材料在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 90 天的 EIS 测试结果如图 5 所示,测试装置如图 6 所示。将包覆涂层材料制备成 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的薄片,并贴附于碳钢片表面,并在片层上方放置一玻璃管,玻璃管中倒入一定量的 3.5% NaCl 溶液,以甘汞电极作为参比电极、铂电极作为对电极、薄片作为工作电极,通过三电极系统进行测试。EIS 测试频率为 $10^{-2} \sim 10^5 \text{ Hz}$,扰动幅值为 20 mV。由图 5 可知,浸泡初期所有样品在 Nyquist 图中均只有一个阻抗弧,同时随着 Ni 粉含量的增加,阻抗弧的半径有增大的趋势,在 Bode 图中表现为相位角在较宽的频率下接近

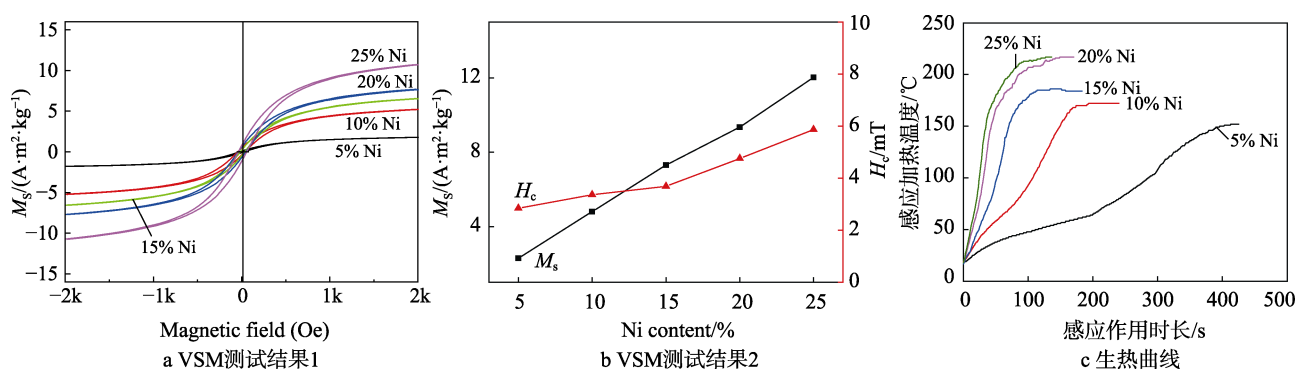


图 4 不同 Ni 含量包覆涂层材料的测试结果

Fig. 4 Test results of coating materials containing different contents of Ni: a) and (b) VSM test results; c) heat generation curve

90°。同时通过模拟电路（如图7所示）进行了拟合，由拟合数据可知，薄层电阻值都在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上，说明对腐蚀介质有良好的阻隔作用^[24-25]。在浸泡90天后，进行EIS测试，从图5c的Nyquist图可以看出，所有样品仍然只有一个阻抗弧。从图5d的Bode图可以看出，相位角为90°时的频率范围仍然较宽，模值没

有明显的降低。随着浸泡时间的延长，水分子逐渐从表层向薄层内部渗透。相对于浸泡初期，Nyquist图中阻抗弧的半径有一定的减小，但是仍然只有一个半圆弧，同时Bode图中 10^{-2} Hz处模值仍然在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上，说明腐蚀介质一直没有渗透到薄层与钢片的界面，包覆涂层材料有较好的耐蚀性能。

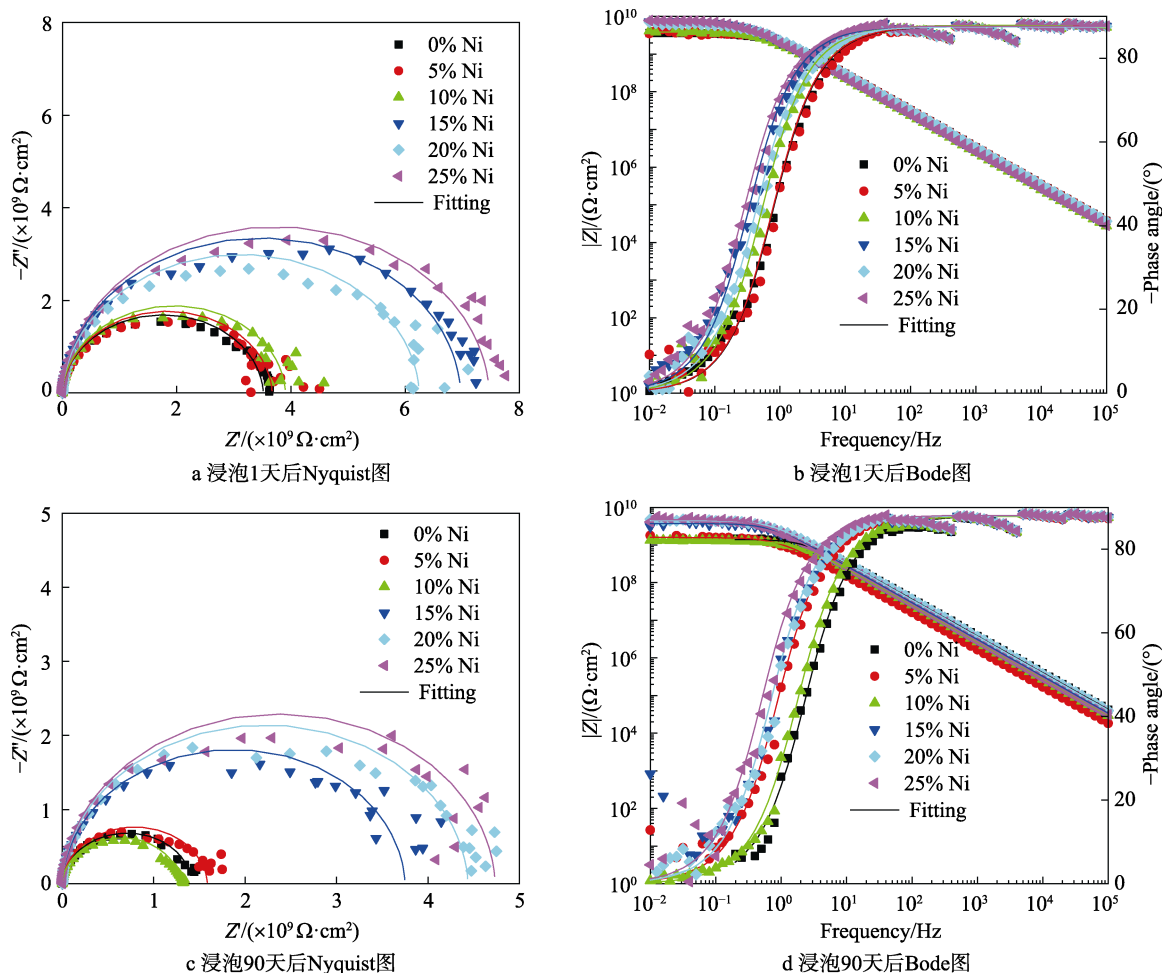


图5 包覆涂层材料浸泡于3.5% NaCl溶液中90天过程中的EIS图谱

Fig.5 EIS spectrum of the coating materials immersed in 3.5% NaCl solution for 90 days: a) Nyquist diagram after 1 day immersion; b) Bode diagram after 1 day immersion; c) Nyquist diagram after 90 days immersion; d) Bode diagram after immersion for 90 days, (f)

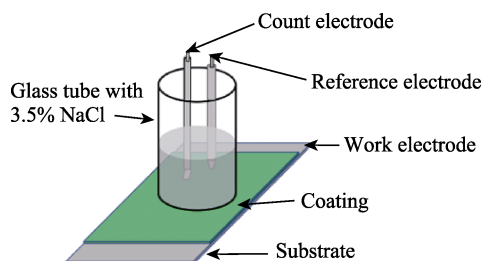


图6 测试装置
Fig.6 Test setup

2.1.4 溶液浸泡试验

随着Ni含量的增加，包覆涂层材料的磁感应强度逐渐增加，磁滞损耗逐渐增加有利于材料的生热熔融，同时包覆涂层材料在3.5% NaCl溶液中的耐蚀性

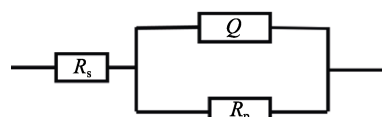


图7 拟合电路

Fig.7 Fitting circuit diagram

能不能降低(见表1)。当Ni的质量分数增加到15%后，包覆涂层材料中的Ni颗粒会发生严重的团聚现象，所以最终选择Ni的质量分数为10%的包覆涂层材料进行进一步的研究。

如图8所示，将含10% Ni的包覆涂层材料制备成50 mm×70 mm×2 mm的片材，将片材浸泡在5% HCl溶液中，观察表面形貌变化，并记录质量变化率。由图8可知，在整个浸泡过程中，包覆涂层材料表面

表 1 包覆涂层材料浸泡于 3.5% NaCl 溶液中 90 天的 EIS 拟合值

Tab.1 Fitting values of EIS for 90 days when the coating materials were immersed in 3.5% NaCl solution

浸泡 天数/d	Ni 的质量分数/%					
	0	5	10	15	20	25
1	3.52	3.67	3.90	6.97	6.25	7.47
90	1.42	1.59	1.29	3.75	4.44	4.74

$\times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$

均未发生粉化、溶胀、开裂、严重失色等现象。图

8b 为浸泡过程中片材吸水后质量增加率的变化情况，在前 7 天的浸泡过程中，包覆涂层材料吸水率较快，随着浸泡时间的延长，水分子渗透阻力逐渐增加，包覆涂层材料增重速率逐渐降低最后增重率保持在 1.2% 附近。同时发现在浸泡前期，添加 Ni 粉后包覆涂层材料的吸水率略微低于不含 Ni 粉的包覆涂层材料。这是由于添加无机粉体后，增加了包覆涂层材料的致密性，同时增加了水分子的扩散路径。在浸泡后期，两种材料吸水率几乎一致。

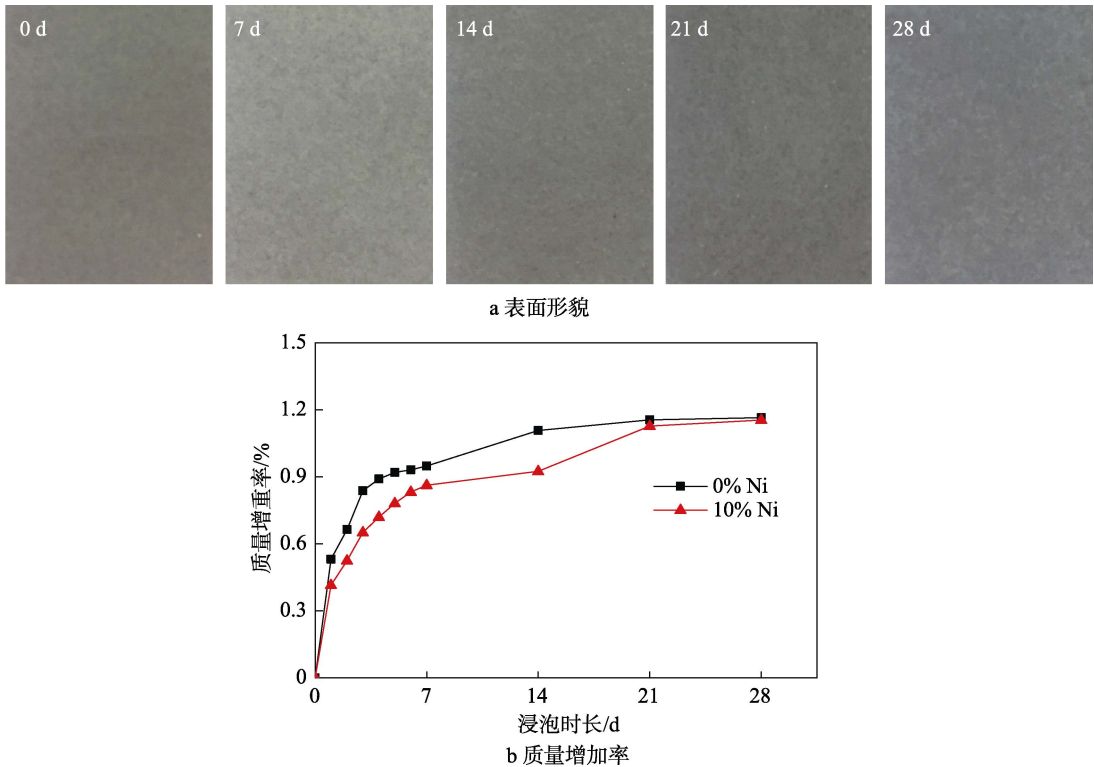


图 8 含 10% Ni 的包覆涂层材料在 5% HCl 溶液中浸泡 28 天测试结果
Fig.8 Test results of the coating materials containing 10% Ni immersed in 5% HCl solution for 28 days:
a) surface morphology; b) weight gain rate

2.1.5 中性盐雾试验

碳钢表面含 10% Ni 的包覆涂层在中性盐雾试验中的实验结果如图 9 所示。从图 9a 中可以看出，在 10 000 h 的试验过程中，包覆涂层材料宏观形貌均未发生粉化、开裂、溶胀和失色等肉眼可辨识的变化。从图 9b 中可以看出，试验可分为三个阶段：试验初期（0~1000 h），表界面附近的水分子会在浓度梯度的驱动下趋向于向包覆涂层材料中扩散，初期水分子浓度梯度最大，扩散速率较快，包覆涂层材料的质量增加速率最大；在较长的试验中期（1000~8000 h），水分子的浓度梯度逐渐减小，渗透速率减缓，包覆涂层材料质量仍然处于缓慢增加的趋势；当到达试验后期（8000~10 000 h），由于水分子逐渐渗入到近表面的深度后，显著减小了水分子向内扩散的浓度梯度，水分子向内扩散渗透的速度极大地下降，因此质量增加率趋向于稳定。在经过 10 000 h 试验后，质量增加

率仅为 1.5% 左右，说明了包覆涂层材料具有较强的耐蚀性能，耐蚀性能评级为 10 级（无缺陷面积，试样表面外观无变化）。

2.2 包覆涂层材料循环使用性能

2.2.1 循环修复对包覆涂层材料结构的影响研究

前面的研究表明，含 10% Ni 的包覆涂层材料具有良好的综合性能，因此进一步研究了该组分材料的循环使用性能。包覆涂层材料连续破坏熔融修复 20 次后的微观形貌如图 10 所示。将含 10% Ni 的包覆涂层材料制备为 50 mm×50 mm×2 mm 的片材，表面通过刻刀划十字划痕，划痕深度为 2 mm，宽度约为 20 μm。然后放置于高频磁场中，设备功率为 2 kW，作用时长为 60 s，冷却后进行表面观察。由图 10 可知，当包覆涂层材料进行一次修复后，表面留有明显的修复痕迹。随着循环次数的增加，修复痕迹逐渐变

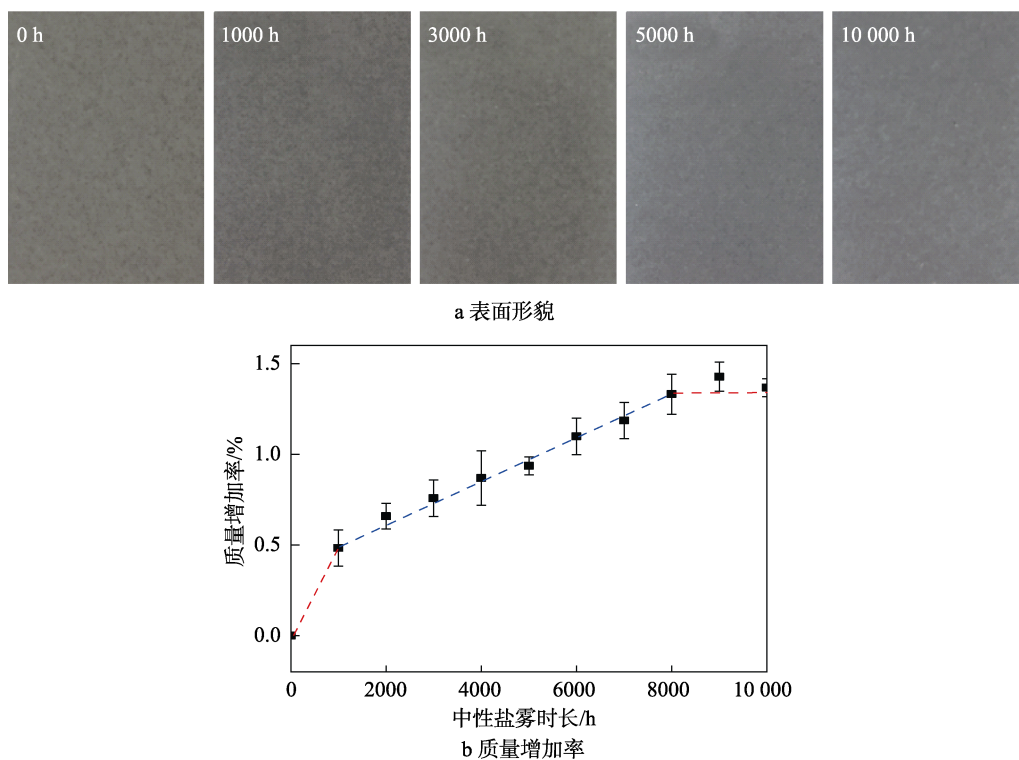


图 9 含 10% Ni 的包覆涂层材料 10000 h 中性盐雾测试结果

Fig.9 The results of 10000 h neutral salt spray test of the coating materials containing 10% Ni:
a) surface morphology; b) weight gain rate

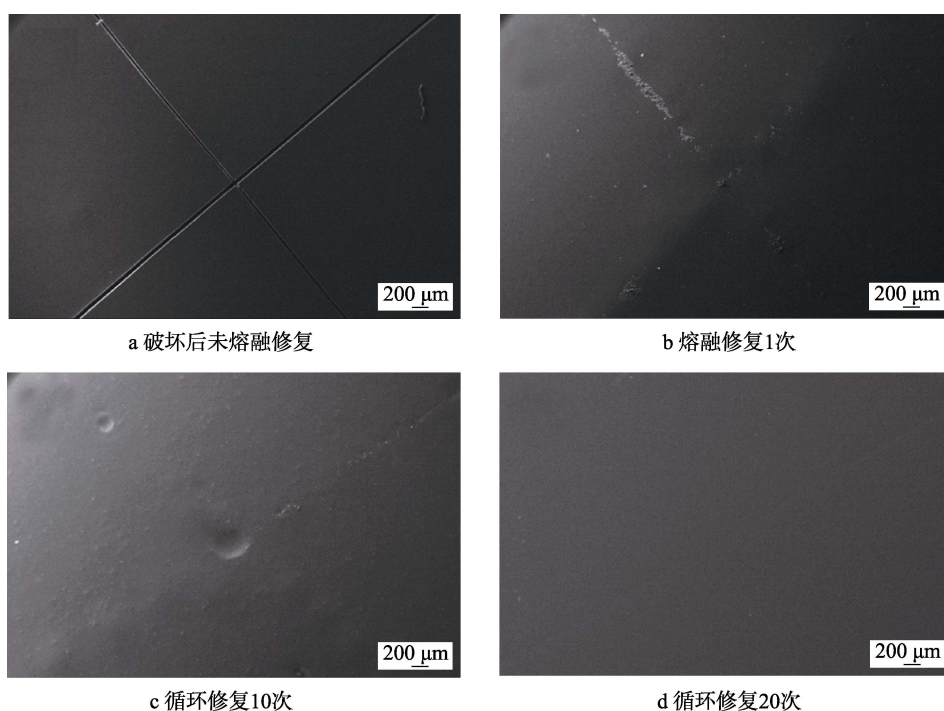


图 10 含 10% Ni 的包覆涂层材料循环破坏熔融不同次数后的表面形貌

Fig.10 The surface morphology of the coating materials containing 10% Ni after different cycle of repair:
a) after damage; b) 1 time of melt repair; c) after 10 cycles of repair; d) after 20 cycles of repair.

得模糊,最后消失。该包覆涂层材料是以乙基纤维素为基本组成成分混合矿物油和蓖麻油等制备得到的,乙基纤维素和蓖麻油中含有较多的一OH,包覆涂层材料内部主要以氢键的作用相互连接,同时在包覆涂层材料中添加了 Ni 粉,在磁场的作用下,由于磁滞损耗,

将磁能转变为热能,释放到包覆涂层材料中,包覆涂层材料温度升高,氢键作用减弱,内部的高分子链段和油分开始流动,从而填补了缝隙。当外加磁场消失后,包覆涂层材料温度逐渐降低,氢键作用逐渐恢复,高分子链段和油分被禁锢,从而达到表面修复的目的。

含 10% Ni 的包覆涂层材料循环修复 20 次前后的红外光谱和 XRD 测试图谱如图 11 所示。由图 11a 可知, 1743 cm^{-1} 处的峰归因于蓖麻油形成的脂肪酸酯的 COOC —基团振动, 1630 cm^{-1} 处的峰归因于蓖麻油中羧酸的 COOH 基团振动, 1463 cm^{-1} 和 1374 cm^{-1} 处的峰归因于乙基纤维素和蓖麻油中 C—OH 基团振动, 1256 cm^{-1} 处的峰归因于蓖麻油中生成的内脂的 C—O—C —基团振动, 800 cm^{-1} 处的峰归因于 —COO 基团振动。包覆涂层材料循环 20 次后, 红外光谱中吸收峰的位置和相对强度均未发生明显变化, 说明连续循环对包覆涂层材料中高分子物质官能团没有太大影响。

由图 11b 可知, 与标准 PDF 卡片对照, 2θ 为 25° 、 37° 、 40.7° 、 47.5° 、 54.5° 、 62° 附近的衍射峰归因于 TiO_2 晶体, 2θ 为 44° 、 51.5° 、 75.8° 附近的衍射峰归因于 Ni 晶体。可以看到, 在循环 20 次后, 衍射峰的位置和相对强度均未发生明显的变化, 说明连续循环对包覆涂层材料中 TiO_2 和 Ni 的晶体结构没有太大影响。

2.2.2 耐蚀性能变化

含 10% Ni 的包覆涂层材料循环 20 次前后, 在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 30 天前后的 EIS 测试结果如图 12 所示。图 12a 为包覆涂层材料未被破坏、破坏

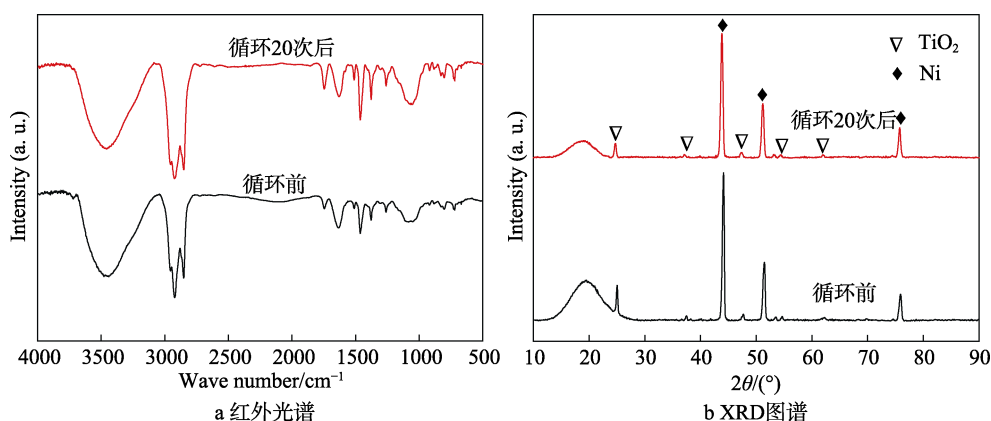


图 11 含 10% Ni 的包覆涂层材料循环破坏熔融 20 次前后的红外光谱和 XRD 测试结果
Fig.11 (a) Infrared spectrum and (b) XRD spectrum of the coating materials containing 10% Ni before and after 20 cycles

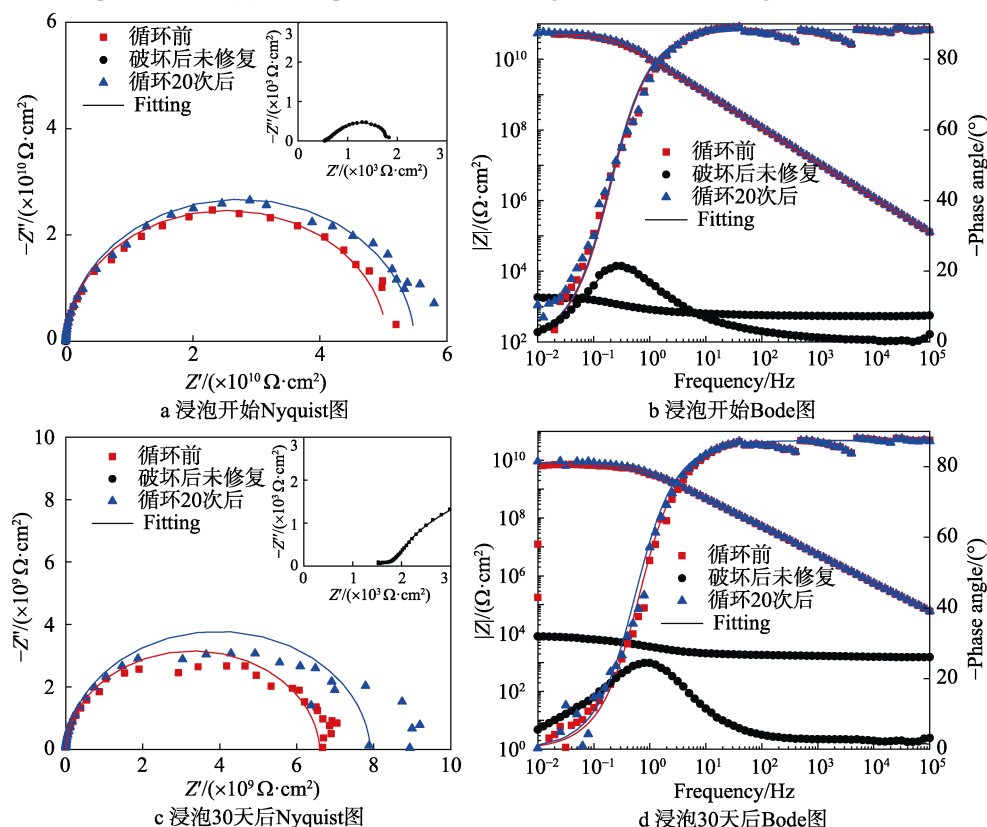


图 12 含 10% Ni 的包覆涂层材料循环前样品、破坏后未修复样品和循环修复 20 次后的样品浸泡 30 天过程中 EIS 图谱
Fig.12 EIS spectra of the coating materials containing 10% Ni before cycling, the unrepaired sample after destruction and the sample after 20 cycles of immersion for 30 days: a) Nyquist graph after soaking; b) after soaking Bode diagram; c) Nyquist diagram after 30 days of immersion; d) Bode diagram after 30 days of immersion.

后未修复和循环修复 20 次后样品的 EIS 测试谱图。从图 12a、b 可以看出,破坏后未被修复的包覆涂层材料 Nyquist 图中阻抗弧半径很小, Bode 图中模值也很小,说明腐蚀介质已经沿着缝隙渗透到了金属基体表面。同时可以看到,循环修复 20 次后和未被破坏的薄层 Nyquist 图中半圆弧半径相当,且 Bode 图中 10^{-2} Hz 处模值也超过了 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。当浸泡 30 天后,从图 12c 中可以看出,破坏后未被修复样品的金属界面已经发生了严重的腐蚀,并发生了扩散效应,相比于浸泡初期未被破坏的样品和循环修复 20 次的样品,随着腐蚀介质逐渐向内部渗透,阻抗弧半径有一定的减小。从图 12d 中可以看出,在 10^{-2} Hz 处模值仍然超过了 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,说明循环修复的过程不会对包覆涂层材料的耐蚀性能产生影响。

3 结论

文中通过熔融共混的方法制备得到了一种可在交变磁场中进行重复熔融的包覆涂层材料。Ni 粉含量对涂层的电磁感应特性和微观结构有显著的影响,随着 Ni 含量的增加,包覆涂层材料磁性能增强,原位修复效率显著提升,但是当 Ni 粉的质量分数达到 15%后,团聚现象较严重。EIS 测试结果表明, Ni 粉的含量对耐蚀性能影响总体较小,但在研究范围内,耐蚀性能随 Ni 粉含量的增加而增加。Ni 的质量分数为 10%时,该包覆涂层材料具有最优的综合性能, SEM、FT-IR、XRD 和 EIS 测试结果表明,在循环修复 20 次后,其微观形貌、结构和各项性能均未发生显著的变化,且能够通过 10 000 h 的中性盐雾实验,具有优异的耐蚀性能和循环使用性能。该包覆涂层材料可以在对金属紧固结构、异型结构等部位实施长效腐蚀防护时进行在线修复和循环利用。

参考文献:

- [1] KING A D, KANNAN B, SCULLY J R. Environmental Degradation of a Mg-rich Primer in Selected Field and Laboratory Environments: Part 1 Without a Topcoat[J]. Corrosion, 2014, 70: 512-535.
- [2] WOOD R J K. Marine Wear and Tribocorrosion[J]. Wear, 2017, 376-377: 893-910.
- [3] DONG Shi-gang, ZHAO Bing, LIN Chang-jian, et al. Corrosion Behavior of Epoxy/Zinc Duplex Coated Rebar Embedded in Concrete in Ocean Environment[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 72-78.
- [4] LIU Bin, FANG Zhi-gang, WANG H Bin, et al. Effect of Cross Linking Degree and Adhesion Force on the Anti-corrosion Performance of Epoxy Coatings under Simulated Deep Sea Environment[J]. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(12): 1814-1818.
- [5] 李晓杰, 郭瑞光. 铝合金表面硅酸盐转化膜研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 64-66.
- [6] LI Xiao-jie, GUO Rui-guang. Silicate Conversion Coatings on the Surface of Aluminum[J]. Surface Technology, 2010, 39(2): 64-66.
- [7] 王慧婷, 史娜, 刘章, 等. 6xxx 系铝合金表面腐蚀及其防腐的研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 160-167.
- [8] WANG Hui-ting, SHI Na, LIU Zhang, et al. Surface Corrosion and Corrosion Prevention of 6xxx-series Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(1): 160-167.
- [9] 施云芬, 孙树森, 张世龙, 等. 牺牲阳极和外加电流联合保护法在长输管道中的应用研究[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 286-295.
- [10] SHI Yun-fen, SUN Shu-sen, ZHANG Shi-long, et al. Application of Combined Protection of Sacrificial Anode and Applied Current in Buried Pipeline[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 286-295.
- [11] 康厚端. 1181 溶剂型可剥性防锈涂料[J]. 材料保护, 1965(4): 4-8.
- [12] KANG Hou-rui. 1181 Solvent-based Flexible Antirust Paint[J]. Materials Protection, 1965(4): 4-8.
- [13] 罗少杰. 可剥性模具防锈涂料[J]. 特种橡胶制品, 1970(10): 5.
- [14] LUO Shao-jie. Peelable Mold Antirust Coating[J]. Special Rubber Products, 1970(10): 5.
- [15] 冯明星. 过氯乙烯可剥性清漆及环氧 667 抗腐漆涂层沾污后的湿法与剥除去污[J]. 核防护, 1979(2): 13-17.
- [16] FENG Ming-xing. Wet method and decontamination after staining of perchloroethylene peelable varnish and epoxy 667 anti-corrosion paint coating[J]. Nuclear Protection, 1979(2): 13-17.
- [17] KISMET Y, WAGNER M H. Enhancing the Potential of Employing Thermosetting Powder Recyclates as Filler in LLDPE by Structural Modifications[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(3): 287-296.
- [18] KISMET Y. Change of Mechanical Properties of Powder Recyclate Reinforced Polyolefin Based on Gamma Radiation[J]. Polymers, 2017, 9(9).
- [19] FU Ce, ZHANG Tong-xian, CHENG Fa, et al. Double-layer Coating Films Prepared from Water-borne Latexes of Acrylate-vinylidene Chloride Copolymers: Investigating Their Heavy-duty Anticorrosive Properties[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(12): 4534-4543.
- [20] FU Ce, QIN Hong-wei, BEN Hai-jie, et al. Acrylate-vinylidene Chloride Copolymers Derived from Corresponding Water-borne Latexes: Influence of Acrylate Units on Their Potential as Heavy-duty Anticorrosive Coating Materials[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(8): 1-9.
- [21] QI Yu-hong, ZHANG Zhan-ping, WANG Li-li, et al. Investigation on Anti-corrosion Property of Nano-TiO₂ Fluoro-carbon Coatings[J]. Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, 2009, 7493: 74933D.

- [16] FU Ce, ZHANG Tong-xian, JI Cheng-qi, et al. Optimizing Heavy-duty Anticorrosive Performances of Coating Films Formed by Acrylate-vinylidene Chloride Copolymer Latexes through Twice-painting Technique[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2015, 33(1): 14-22.
- [17] WANG N, GAO H, ZHANG J, et al. Effect of Graphene Oxide/ZSM-5 Hybrid on Corrosion Resistance of Water-borne Epoxy Coating[J]. Coatings, 2018, 8(5): 179.
- [18] DASTPAK A, YLINIEMI K, DE OLIVEIRA MONTEIRO M, et al. From Waste to Valuable Resource: Lignin as a Sustainable Anti-Corrosion Coating[J]. Coatings, 2018, 8(12): 454.
- [19] 张春祥. 磁性粒子的制备表征及在热塑性高分子材料感应加热中的应用[J]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [20] ZHANG Chun-xiang. Preparation Characterization of Magnetic Particles and Their Induction Heating Application in the Thermoplastic Polymers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [20] KOUHKBAGHI S, JAFARI P, RABIEI J, et al. Fabrication of PET/PAN/GO/Fe₃O₄ Nanofibrous Membrane for the Removal of Pb (II) and Cr (VI) Ions[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 301: 42-50.
- [21] HE J, ZHAO S, LIAN Y, et al. Graphene-doped Carbon/Fe₃O₄ Porous Nanofibers with Hierarchical Band Construction as High-performance Anodes for Lithium-ion Batteries[J]. Electrochimica Acta, 2017, 229: 306-315.
- [22] SONG Z, XIA Z, NIE J, et al. Improving the Electrical and Electromagnetic Shielding Properties of Conductive Silicon Rubber Filled with Ni-coated Carbon Fibre by Magnetic Field[J]. Plastics, Rubber and Composites, Taylor & Francis, 2016, 45(5): 224-228.
- [23] LIU Cheng-lin, SU Hai-jun, ZHANG Jun, et al. Effect of Electromagnetic Field on Microstructure of Ni-Based Single Crystal Superalloys[J]. Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(10): 1428-1434.
- [24] LIU Jing-rong, LIU Tao, GUO Zhang-wei, et al. Promoting Barrier Performance and Cathodic Protection of Zinc-rich Epoxy Primer Via Single-layer Graphene[J]. Polymers, 2018, 10(6): 591.
- [25] NAWAZ M, YUSUF N, HABIB S, et al. Development and Properties of Polymeric Nanocomposite Coatings[J]. Polymers, 2019, 11(5): 852.