

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.008

## Fe添加对输变电设备环氧富锌涂层腐蚀行为的影响

易春回, 莫愁

(桂林信息科技学院 机电工程学院, 广西 桂林 541100)

**摘要:** 为优化输变电设备环氧富锌涂层性能, 以5 wt.%、10 wt.%铁粉等质量替代锌粉, 结合盐雾试验、SEM、自腐蚀电位及EIS测试, 探究其对涂层防护性能的影响。结果表明: 铁粉可通过“锌-铁微电池”调控锌粉有序消耗, 且腐蚀产物能强化物理屏障。10 wt.%铁粉改性的10Fe-72ZRE涂层防护最优, 90 d盐雾后无明显锈蚀, 480 h浸泡后自腐蚀电位稳定, 阻抗衰减最慢。5 wt.%铁粉涂层次之, 未掺铁粉的基准涂层锈蚀严重。本研究为输变电设备长效防腐涂层开发提供支撑。

**关键词:** 防腐性能; 阴极保护; 铁粉; 富锌环氧涂料

**中图分类号:** TQ341; TG178 **文献标志码:** A

## Effects of Fe addition on corrosion behavior of epoxy zinc-rich coating for power transmission and transformation equipment

YI Chunhui, MO Chou

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin Institute of Information Technology, Guilin 541100, China)

**Abstract:** The performance of epoxy zinc-rich coating for power transmission and transformation equipment was optimized. 5 wt.% and 10 wt.% iron powders were used to replace zinc powder. Salt spray test, SEM, self-corrosion potential and EIS test were used to explore its effect on the protective performance of the coating. The results show that iron powder can regulate the orderly consumption of zinc powder through 'zinc-iron microcell', and the corrosion products can strengthen the physical barrier. The 10Fe-72ZRE coating modified by 10 wt.% iron powder has the best protection. There is no obvious corrosion after 90 days of salt spray. After 480 h immersion, the self-corrosion potential is stable and the impedance attenuation is the slowest. 5 wt.% iron powder coating is the second, and the reference coating without iron powder is seriously corroded. This study provides support for the development of long-term anticorrosive coatings for power transmission and transformation equipment.

**Keywords:** anticorrosion performance; cathodic protection; iron powder; zinc-rich epoxy coating

在电力输送的关键环节, 大量输变电设备(如输电铁塔、变压器箱体、开关柜和构支架等)使用碳钢(如Q235)及镀锌钢作为结构基材<sup>[1]</sup>。这些设备长期暴露于复杂的户外环境, 承受着工业大气污染物(如SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>等)、沿海盐雾、高湿度以及交变载荷等多

重严苛因素的协同作用, 面临着严峻的腐蚀环境挑战<sup>[2]</sup>。输变电设备的腐蚀不仅削弱结构强度, 威胁电网安全稳定运行, 更带来巨大的维护成本与寿命折损。

富锌涂料(Zinc-Rich Epoxy Coating, ZRRC)作

收稿日期: 2025-08-11 修回日期: 2025-11-06

作者简介: 易春回(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电气工程与新能源应用, e-mail: yichunhui429@126.com

通信作者: 莫愁(1993—), 男, 本科, 实验师, 研究方向为新能源汽车电气及电池, e-mail: 17758664606@163.com

引用信息: 易春回, 莫愁. Fe添加对输变电设备环氧富锌涂层腐蚀行为的影响[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 53-58.

YI Chunhui, MO Chou. Effects of Fe addition on corrosion behavior of epoxy zinc-rich coating for power transmission and transformation equipment[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 53-58.

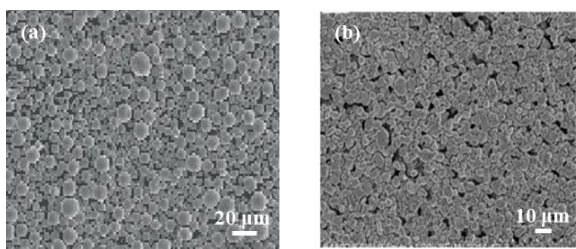
为防腐底漆的核心组分<sup>[3-4]</sup>, 成为保护此类钢铁基材、延长服役寿命的核心防腐手段。其防护机理依赖于涂层中高含量(通常>80 wt.%)的锌粉, 利用腐蚀电位较基材更负的锌粉作为牺牲阳极填料, 对钢铁基材(如输变电设备常用碳钢)提供有效的阴极保护作用, 在一般性及海洋大气环境中展现出良好的防护性能<sup>[5]</sup>。现有研究主要聚焦于优化涂层性能的关键因素, 包括调节锌粉含量<sup>[6-8]</sup>、形态<sup>[9-11]</sup>和粒径<sup>[12]</sup>, 以及对锌粉进行改性处理<sup>[13]</sup>等。然而, 传统高锌含量涂层在实际应用中, 尤其在输变电设备所面临的动态、复杂环境下, 暴露出显著不足: 锌粉消耗过快导致阴极保护周期缩短、涂层孔隙率高削弱屏障效应、脆性大易在机械应力或热应力下产生微裂纹、高锌含量带来的成本及环保压力等, 制约了ZRRRC在要求高可靠性与长寿命的输变电关键A设施上的防护效能和应用潜力。

基于此, 本研究聚焦于通过Fe粉可控掺杂(0~10 wt.%)改性富锌环氧涂层, 深入探究其对涂层防护性能的协同增强机制。采用预裂纹电化学测试精确量化牺牲阳极保护能力; 结合扫描电子显微镜(SEM)解析涂层/锈层微观结构演变; 利用电化学阻抗谱(EIS)在线监测涂层劣化过程与界面反应动力学; 并通过中性盐雾试验(NSS)验证长期防护效能。旨在揭示Fe粉对ZRRRC电化学活性、腐蚀产物沉积行为及最终防护寿命的影响规律, 为开发兼具高效牺牲阳极保护与优异耐久性的新一代改性富锌涂层提供坚实的理论依据和实验支撑。

## 1 材料与试验

### 1.1 材料

锌粉(纯度约为96%)和铁粉(纯度约为98%)购于成都最佳新材料有限公司。采用扫描电子显微镜(SEM)得到锌粉与铁粉的形貌, 如图1所示, 两种粉末均呈类球形形貌。锌粉粒径分布于2~40 μm, 基



(a) 锌粉 (b) 铁粉

图1 锌粉和铁粉的SEM形貌

Fig.1 SEM images of zinc powder and iron powder

于体积分布的平均粒径( $D_{50}$ )为13 μm(图1(a))。铁粉粒径较小( $D_{max} \approx 30 \mu\text{m}$ ),  $D_{50} = (8.1 \pm 2.2) \mu\text{m}$ (图1(b))。实验所用材料与仪器如表1所示。

表1 实验材料与实验仪器

Tab.1 Experimental materials and instruments

实验材料与仪器	型号及生产厂家
锌粉	成都最佳新材料有限公司
铁粉	成都最佳新材料有限公司
二氧化钛	陕西恒升钛金属设备有限公司
高速分散机	DISPERMAT® CV3-PLUS, 德国
测厚仪	Elcometer 121/4, 中国
扫描电子显微镜	Thermo Scientific, 美国
电化学工作站	DH7007, 中国

### 1.2 涂层制备

以锌粉为牺牲阳极填料, 配制锌含量82 wt.%(干膜)的富锌环氧涂料(ZRE)。将锌粉、共颜料(二氧化钛与方解石)、双酚A环氧树脂(聚酰胺固化剂)、溶剂及助剂(分散剂、流变剂)置于高速分散机(DISPERMAT® CV3-PLUS)中混合均匀。为探究铁粉掺杂效应, 在维持颜料体积浓度(PVC=47.7%)不变前提下, 以等质量铁粉分别替代5 wt.%、10 wt.%锌粉。所得涂层标记为: 82ZRE(基准)、5Fe-77ZRE、10Fe-72ZRE(前缀数字表示铁粉/锌粉质量分数), 如表2所示。将涂料通过框式涂布器施涂于喷砂处理(清洁度Sa 2½, ISO 8501-1)的Q235碳钢板(150 mm×75 mm×3 mm)表面。涂层于室温下固化7 d后测试, 干膜厚度经磁感应测厚仪(Elcometer 121/4)测定为(95±10) μm。

表2 涂层组成成分

Tab.2 Components of coating composition

名称	锌粉/(wt.%)	铁粉/(wt.%)
82ZRE	82	0
5Fe-77ZRE	77	5
10Fe-72ZRE	72	10

### 1.3 加速盐雾试验

为评估涂层防腐性能, 对带划痕样品进行中性盐雾试验(依据ISO 9227标准<sup>[14]</sup>)。试样边缘及背面采用商用环氧涂层密封保护, 使用自动划痕仪在涂层表面制备长50 mm、宽2 mm的划痕以裸露基材。将划痕试样置于盐雾箱中, 持续喷洒5 wt.% NaCl溶

液(35 ℃)。定期观察样品状态, 90 d后量化评估划痕处锈蚀蔓延宽度。每组配方设置3个平行样本。

#### 1.4 预裂纹及观察

通过盐雾暴露试验评估涂层裂纹自修复行为。为避免Zn/Fe颗粒在腐蚀介质中直接溶解, 所有样品表面预先涂覆透明聚氨酯罩光漆(干膜厚约30 μm)。完全固化后, 使用ERICHSEN 304型冲击试验机制备微裂纹: 将1 kg半球形冲头从20 cm高度沿导向管自由落体冲击表面, 模拟钢结构服役期机械损伤。

将含裂纹试样进行盐雾试验, 盐雾暴露后, 采用扫描电子显微镜(SEM, Thermo Scientific, 加速电压20 keV)表征样品形貌, 并利用能谱仪(EDS)分析腐蚀区元素组成。进一步通过电化学阻抗谱(EIS)定量表征自修复效率: 以含裂纹涂层为工作电极(暴露面积1 cm<sup>2</sup>), 石墨棒为对电极, 饱和甘汞电极(SCE)为参比电极, 在3.5 wt.% NaCl溶液中测试。EIS扫描频率范围10 mHz~100 kHz, 施加20 mV振幅扰动。每组测试重复至少3次以确保重现性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 加速盐雾实验

图2分别为3种涂层划痕和未划痕盐雾试验90 d后的表面形貌。从图2(a)(b)(c)中可发现3种试样划痕处均有腐蚀产物的出现, 且划痕两侧涂层被腐蚀产物覆盖。82ZRE作为富锌环氧涂料, 其划痕试样(图2(c))在盐雾90 d后, 划痕处锈蚀蔓延较宽且区域

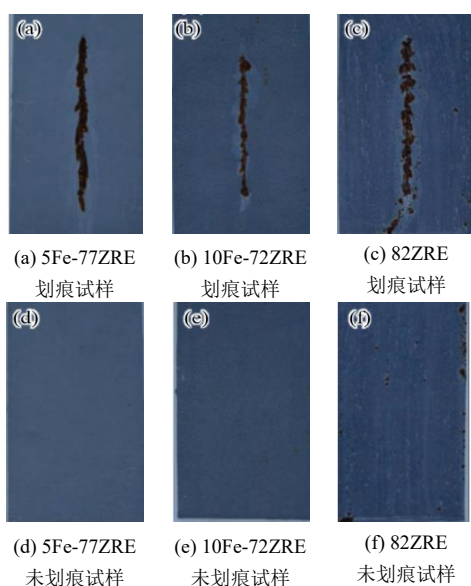


图2 3种涂层盐雾试验90 d后的表面形貌

Fig.2 Surface morphologies of three coatings after 90 days for salt spray tests

分散, 呈不规则状, 未划痕表面(图2(f))出现较多锈点与鼓泡现象。表明纯富锌涂层长期盐雾环境下, 划痕处锈蚀扩散严重, 涂层完整性易受破坏, 整体防护稳定性欠佳。5Fe-77ZRE涂层试样划痕处(图2(a))出现明显锈蚀且范围较集中, 但未划痕面(图2(d))基本无锈蚀与鼓泡现象发生, 表明5 wt.%铁粉可改善涂层防护性能10Fe-72ZRE涂层划痕试样(图2(b))锈蚀程度明显轻于5Fe-77ZRE的(图2(a)), 未划痕面(图2(e))无锈蚀现象发生, 说明当10 wt.%铁粉替代锌粉时, 锌铁协同作用更显著, 对划痕处的锈蚀限制抑制作用更强, 涂层完整性保留更好, 防护性能在三者中表现最佳。

### 2.2 微观结构

对试样裂纹截面进行分析, 图3与图4封面分别为含裂纹试样进行盐雾试验后的SEM截面形貌与EDS能谱分析。可以发现5Fe-77ZRE涂层(图3(a))截面处相对致密, 锌粉与铁粉颗粒分布均匀, 颗粒间结合紧密。在高倍标记区域内(图3(d))可以发现锌粉及铁粉颗粒分布较规整, 且颗粒边缘清晰, 无明显空洞, 这说明使用5 wt.%铁粉替代锌粉后, 涂层内部结构稳定性较好, 在一定程度上保留了防护所需的颗粒协同。在5Fe-77ZRE能谱(图4(a))里, 锌峰值相对稳定, 氧峰强度适中, 表明锌粉牺牲速率可控, 铁粉未过度消耗。

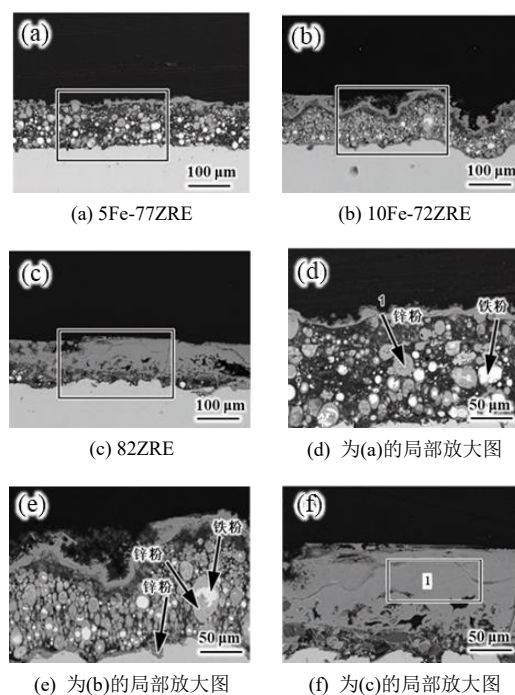


图3 试样裂纹截面 SEM 图

Fig.3 SEM images of crack section of specimen

观察图3(b)可发现在10Fe-72ZRE 涂层中锌粉与铁粉交错, 腐蚀产物填充部分孔隙, 涂层完整性更佳。在高倍可见标记区域内(图3(e))锌粉颗粒与铁粉交互作用明显, 腐蚀产物与颗粒的界面相对清晰, 这说明当10 wt.%铁粉替代锌粉时, 锌铁协同可能更利于延缓腐蚀渗透。在10Fe-72ZRE能谱中(图4(b)), 锌特征峰略有降低, 氧峰因腐蚀产物积累而增强, 体现铁粉驱动锌粉牺牲、同步修复物理屏障的作用, 铁粉驱动锌粉有序牺牲, 同时生成的腐蚀产物填充孔隙强化屏障<sup>[15]</sup>。

82ZRE基准涂层(图3(c))因锌粉大量消耗, 内部出现大量连续空隙, 结构破损严重, 高倍可见标记区域内因锌粉消耗或腐蚀后形成的空隙、缺陷更多, 结构完整性受损严重。在区域1处存在贯穿性裂

纹, 腐蚀介质已穿透涂层(图3(f))。

在82ZRE能谱(图4(c))中, 锌特征峰大幅衰减, 氧峰显著增强, 表明锌粉大量消耗, 腐蚀介质侵入。这是由于。纯富锌体系仅依赖锌粉单一牺牲阳极防护, 无铁粉协同调控, 锌粉消耗速率难控<sup>[16]</sup>。锌粉快速消耗后会导致涂层出现空腔等现象, 物理屏障失效, 腐蚀介质易穿透涂层, 导致基材锈蚀蔓延。由此可见铁粉可通过调控微电池效应, 促进损伤区域锌粉牺牲氧化促进锌粉有序牺牲, 从而抑制腐蚀纵深发展, 强化物理屏障。10Fe-72ZRE涂层因锌铁比例适配, 微电池驱动与腐蚀产物填充的平衡达到最优, “电化学防护+物理阻隔”协同最强<sup>[17]</sup>。5Fe-77ZRE涂层因铁粉占比低, 协同效应弱于前者, 但仍优于纯富锌涂层。

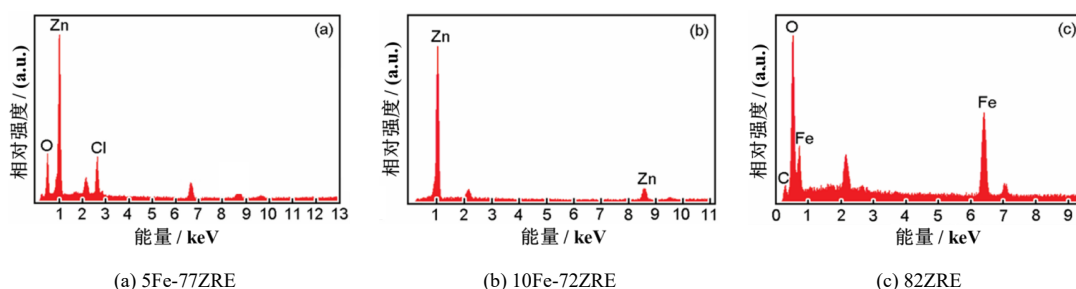


图4 试样裂纹截面 EDS 能谱图

Fig.4 EDS energy spectra of crack cross section of the specimen

### 2.3 浸泡实验

图5为涂层试样自腐蚀电位在3.5% NaCl溶液中不同浸泡时间的变化曲线。观察图5可发现82ZRE基准涂层的自腐蚀电位, 随浸泡进程呈现显著的正向偏移趋势。在浸泡初始阶段, 82ZRE基准涂层初始电位为-1.02 V(vs. SCE), 体现较强的阴极保护作用。但随着浸泡时间延长, 电位快速正移, 240 h时升至-0.75 V(vs. SCE), 480 h达-0.58 V(vs. SCE)。这是由于锌粉持续消耗, 涂层内部缺陷逐步暴露, 腐蚀介质易穿透涂层, 致使牺牲阴极保护作用快速衰减, 自腐蚀电位快速正移。这种现象反映出纯富锌涂层在长效防护中, 电化学与物理屏障协同稳定性欠佳<sup>[18]</sup>。5Fe-77ZRE涂层初始电位为-0.98 V, 略低于基准涂层。随着浸泡时间延长, 电位上升趋势更为平缓, 480 h时达到-0.72 V(vs. SCE)。在浸泡中后期, 自腐蚀电位波动幅度小, 表明5 wt.%铁粉替代锌粉后, 锌粉牺牲速率受微电池效应调控, 涂层物理屏障的完整性得以更好维持, 电化学防护作用的持久性显著提升, 体现出锌铁协同对延缓涂层电化

学失效的积极作用。10Fe-72ZRE涂层的自腐蚀电位在三者中展现出最优的稳定性。在整个浸泡周期内, 自腐蚀电位变化幅度最小, 其初始电位略高于5Fe-77ZRE, 后期近乎维持稳定水平。这是因为当10 wt.%铁粉替代时, 锌铁协同效应达到最有平衡状态。铁的标准电极电位高于锌, 两者在涂层中形成

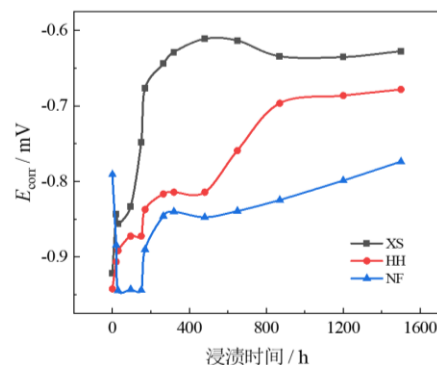


图5 3种涂层试样在3.5% NaCl溶液中自腐蚀电位随浸泡时间的变化

Fig.5 Changes of self-corrosion potential of three coating samples with immersion time in 3.5 % NaCl solution

“锌(阳极)-铁(阴极)”的微电池体系,这种结构化的微电池调控使锌粉实现“按需牺牲”的有序溶解模式,避免了传统富锌涂层中锌粉无序消耗、快速耗尽的问题,从而持续稳定地为基材提供阴极保护<sup>[19]</sup>。此外,铁粉的引入对涂层性能产生多重优化作用,不仅与锌粉交错分布优化了涂层微观结构,降低了孔隙率并增强了颗粒间结合力,自身的导电性还改善了涂层整体导电网络,确保阴极保护电流在涂层表面均匀分布,减少因电流集中导致的局部腐蚀。既强化了涂层对腐蚀介质的物理阻隔,有效抑制水分、氯离子等侵入扩散,又有效抑制了腐蚀介质的侵入与扩散<sup>[20]</sup>,使得电化学防护与物理屏障协同机制长期稳定运行。

## 2.4 电化学阻抗谱

图6为3种涂层试样在3.5% NaCl溶液中不同浸泡时间的电化学阻抗谱(EIS)变化,所用电化学拟合图如图7所示。Nyquist图中高频区半圆反应涂层的阻抗和电容,低频区半圆则表示锌溶解反应的阻抗和双层电容。从图中可以看出,在短期浸泡(0.5 h)时,各涂层均呈现单一高频容抗弧,阻抗膜值均处于较高水平,此时“物理屏障+电化学防护”协同作用显著,锌粉未被大量消耗,涂层较为致密,腐蚀介质难以被快速穿透。其中10Fe-72ZRE涂层容抗弧半径最大,5Fe-77ZRE涂层容抗弧半径次之。82ZRE基准涂层容抗弧半径最小,说明其纯锌涂层的初始物理屏障对介质阻挡作用弱。

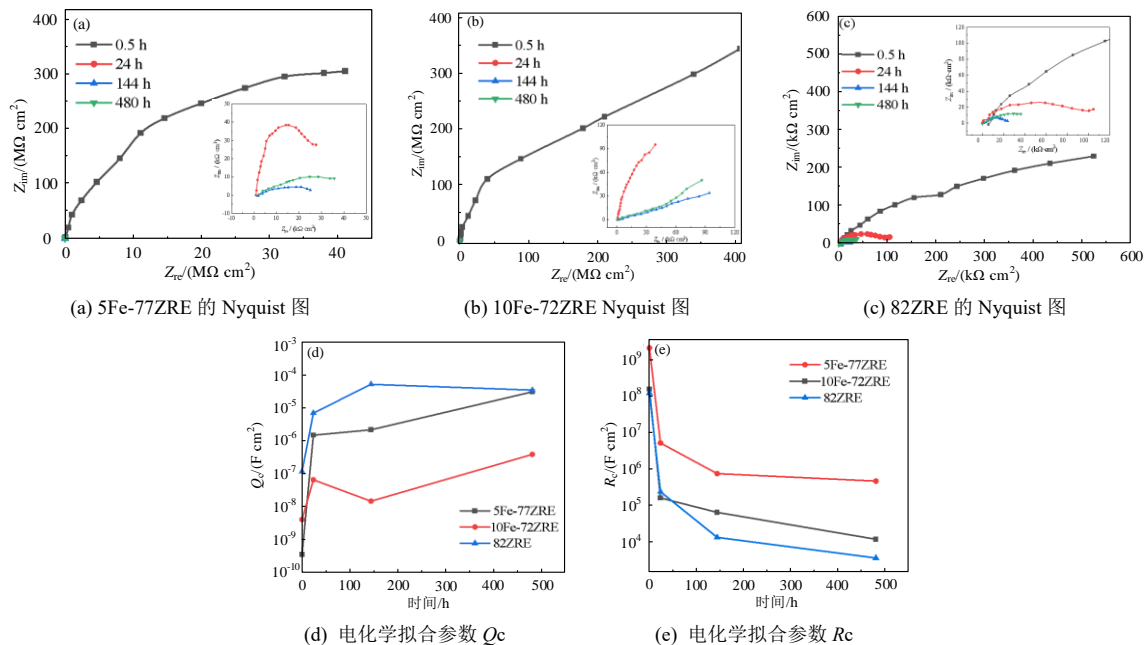


图6 3种涂层实验在3.5% NaCl溶液中不同浸泡时间下的Nyquist图及电化学拟合参数

Fig.6 Nyquist plots and electrochemical fitting parameters of three coating experiments under different immersion time in 3.5 % NaCl solution

随着浸泡时间延长,3种涂层容抗弧半径均逐渐减小。其中,10Fe-72ZRE涂层的Nyquist图逐渐出现新容抗弧(第二个时间常数),这是由于此时锌粉开始反应,“牺牲阴极保护”反应激活。而铁粉促进锌粉有序溶解,腐蚀介质渗透触发电化学防护。低频区域锌溶解反应的阻抗弧半径先增大后趋于稳定,这说明此时“物理屏障+电化学防护”协同启动,涂层电阻值数量级由 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 逐步降至 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 并维持(图6(e)),说明此时防护机制从“纯物理阻挡”向“电化学-物理协同”过渡,且协同作用更加持久。含5Fe-77ZRE特征的涂层,容抗弧

半径减小速度介于10Fe-72ZRE涂层与82ZRE基准涂层之间,低频区域的锌溶解反应阻抗弧半径增大后又缓慢减小。这是由于当5 wt.%铁粉替代锌粉时,锌铁微电池效应驱动锌粉牺牲,但协同平衡弱于10Fe-2ZRE体系,“牺牲阴极保护”持续时间有限,物理屏障修复能力不足,导致电化学防护衰减。在反应后期以“物理屏障为主、电化学防护为辅”,但整体仍优于纯富锌涂层。82ZRE基准涂层在浸泡中容抗弧半径持续减小,无明显稳定低频容抗弧,涂层电阻值数量级由 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 骤降至 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (图6(e)),且 $Q_c$ 最大(图6(d))。在浸泡后期因基体发生

腐蚀，导致低频域出现新阻抗弧且容抗弧半径增大。这是因为没有铁粉参与协同作用，锌粉无序消耗，导致涂层物理屏障失效，电化学防护难持续。腐蚀介质可快速穿透渗入基体，触发基体腐蚀。

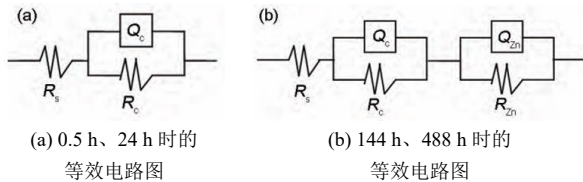


图7 等效电路图

Fig.7 Diagram of equivalent circuit

### 3 结论

(1) 铁粉可显著提升环氧富锌涂层的长期防护性能，其中10Fe-72ZRE涂层防护效果最优，90 d盐雾暴露后划痕处锈蚀最轻且未划痕表面无锈蚀。5Fe-77ZRE涂层防护性能次之，82ZRE基准涂层锈蚀蔓延明显，表面出现大量锈点与鼓泡。

(2) 铁粉能通过调控微电池效应促进锌粉有序牺牲，且诱导生成的腐蚀产物可填充涂层孔隙以强化物理屏障。10Fe-72ZRE，涂层中锌粉与铁粉颗粒交错分布，孔隙填充效果最佳。5Fe-77ZRE涂层颗粒结合紧密，锌粉消耗速率可控，82ZRE涂层因锌粉无序消耗形成大量空隙，结构破损严重。

(3) 10Fe-72ZRE涂层自腐蚀电位稳定性最优，480 h浸泡后电位稳定在-0.85 V，阴极保护持续时间最长，且阻抗衰减最慢，协同防护机制维持更久；5Fe-77ZRE涂层电化学防护持久性较基准涂层显著提升；82ZRE涂层自腐蚀电位随浸泡时间快速正移，防护作用衰减明显。

(4) 10 wt.%铁粉替代锌粉时，锌铁比例适配度最高，电化学防护-物理阻隔的协同效应达到最优，为输变电设备用改性富锌涂层开发提供理论与实验支撑。

### 参考文献

[1] 高鹏, 李晗, 张博, 等. 输变电设备用水性涂层体系防护性能演变规律研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 74-78.  
 [2] MENG Q, WU Y, LIU Y, et al. Enhanced conductivity and anticorrosion properties of zinc-rich epoxy coatings via polydopamine-modified MWCNTs[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2025, 14(7): 071003-071003.  
 [3] AGHELI M, VAEZI R M, AGHABARARI B, et al.

Integrating PANI@BTA@MSN mesoporous nano-hybrid into zinc-rich epoxy coatings for long-term smart anti-corrosion durability[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 205: 109329-109329.  
 [4] 杨跃光, 张予阳. 环氧富锌铝涂层的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(2): 29-34, 49.  
 [5] 冷昕阳, 余海斌. 石墨烯包覆空心玻璃微球改性水性环氧富锌防腐涂料[J]. 涂料工业, 2025, 55(1): 1-7.  
 [6] 胡东波, 施志红, 祝宝英, 等. 长贮存周期型水性环氧富锌涂料固化剂树脂的制备与性能研究[J]. 涂层与防护, 2024, 45(9): 14-17, 31.  
 [7] JIANG Y, ZHANG H, ZHANG H, et al. Incorporating graphene-modified mica and conductive nickel particles for enhanced corrosion resistance in epoxy zinc-rich coatings[J]. Frontiers in Chemistry, 2025, 131: 544762-1544762.  
 [8] 李波, 孙清, 刘卓毅, 等. 贵州大气环境中耐候钢在电网应用中的关键技术[J]. 材料保护, 2023, 56(3): 142-149, 158.  
 [9] 王朋振, 王雨铖, 刘德洋, 等. 环氧富锌底漆的性能研究[J]. 上海涂料, 2024, 62(4): 10-16.  
 [10] 王晓亮. 水性环氧富锌涂层的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.  
 [11] 刘凯吉, 赵慧宇, 曲政, 等. 环氧富锌涂层配套体系长效防护性能研究[J]. 环境技术, 2024, 42(3): 30-37.  
 [12] 黎敏, 董妮妮, 潘明, 等. 典型汽车用镀锌板耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(4): 295-303.  
 [13] 蔡源德. 改性水性环氧富锌及环氧底漆的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.  
 [14] 韩忠智, 康绍炜, 梁镐, 等. 环氧富锌底漆的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2023, 26(3): 9-12.  
 [15] 白炜琛, 李瑛. 电偶腐蚀对石墨烯环氧富锌涂层阴极保护作用的影响[C]//第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2021: 87-88.  
 [16] 赵书彦, 童鑫红, 刘福春, 等. 环氧富锌涂层防腐性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 563-570.  
 [17] 郭玥. 纳米 ZnO 改性环氧树脂复合材料绝缘特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.  
 [18] 张叔禹, 王晓超, 张文战, 等. 恶劣大气环境中输变电金属设施防腐涂层制备及性能[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(2): 201-205.  
 [19] 朱洪. 新型锌粉防腐底漆的制备及性能研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012.  
 [20] 孟冬燕. 输变电设备外防腐技术的最新进展[J]. 电工技术杂志, 2001(9): 58-59, 52.