

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.02.008

## 输电杆塔材料镀锌钢层耐腐蚀性的快速评价探究

边美华<sup>1,2</sup>, 彭家宁<sup>1,2\*</sup>, 何雨茵<sup>1</sup>, 李君华<sup>1</sup>, 覃宋林<sup>1</sup>

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 输电杆塔是输电线路的重要部分, 它在服役过程中需要承受诸多荷载, 特别是在工业区和沿海地区, 输电杆塔材料的腐蚀问题尤为突出, 产生了极大的安全隐患。采用自制的定点腐蚀装置及室内浸泡腐蚀试验方法, 将镀锌钢表面的锌镀层在酸性腐蚀溶液中溶解, 游离出的亚铁离子( $\text{Fe}^{2+}$ )被氧化剂氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ ; 通过  $\text{Fe}^{3+}$  与磺基水杨酸(SSal)发生显色反应, 利用分光光度计在线检测溶液中的  $\text{Fe}^{3+}$ ; 通过游离出  $\text{Fe}^{3+}$  所需要的时间来评价镀锌层的耐腐蚀性能; 利用扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)分析镀锌钢表面腐蚀产物的形貌和组成。结果显示: 腐蚀溶液  $\text{pH}=1.0\sim 3.0$  时, 可在 3 h 内评价镀锌钢的耐腐蚀性能, 该研究为输电杆塔的合理选材和预测材料寿命提供了重要参考。

**关键词:** 镀锌钢; 快速评价; 耐腐蚀性能; 分光光度法

中图分类号: TQ139.1

文献标识码: A

## A rapid evaluation method for corrosion resistance of galvanized steel layer for transmission tower materials

Bian Meihua<sup>1,2</sup>, Peng Jianing<sup>1,2\*</sup>, He Yuyin<sup>1</sup>, Li Junhua<sup>1</sup>, Qin Songlin<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Transmission tower is an important part of the transmission line, it needs to bear a lot of loads in the service process, especially in industrial areas and coastal areas, the corrosion of transmission tower materials is particularly prominent, resulting in great security risks. The corrosion behavior of galvanized layer on the surface of galvanized steel structural parts of power grid equipment was studied by using a self-made fixed point corrosion device and indoor immersion corrosion test method. The zinc coating on the surface of galvanized steel was dissolved in acid corrosion solution, and the free ferrous ions ( $\text{Fe}^{2+}$ ) were oxidized to  $\text{Fe}^{3+}$  by oxidants. The chromogenic reaction of  $\text{Fe}^{3+}$  with sulfosalicylic acid (SSal) was carried out to detect  $\text{Fe}^{3+}$  in the solution by spectrophotometer. The corrosion resistance of galvanized layer was evaluated by the time required for  $\text{Fe}^{3+}$  ionization. The surface corrosion morphology and

收稿日期: 2024-06-18

修回日期: 2024-08-08

通信作者: 彭家宁(1970—), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为电网设备材料分析检测, email: 27250060@qq.com

基金项目: 广西电网科技项目(GXKJXM20230096)

引用信息: 边美华, 彭家宁, 何雨茵, 等. 输电杆塔材料镀锌钢层耐腐蚀性的快速评价探究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(2): 54-60.

Bian Meihua, Peng Jianing, He Yuyin, et al. A rapid evaluation method for corrosion resistance of galvanized steel layer for transmission tower materials[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(2): 54-60.

composition of corrosion product of galvanized steel were studied by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometer (XRD). The results show that when the pH of corrosion solution is 1.0-3.0, the corrosion resistance of the galvanized steel plate commonly used in the market can be evaluated within 3 h. This study provides an important reference for reasonable material selection and material life prediction of transmission tower.

**Keywords:** galvanized steel; rapid evaluation; corrosion resistance; spectrophotometry

随着电力工程的发展, 输电杆塔的覆盖面积越来越广, 输电杆塔是输电线路最重要的组成部件, 它需承担电气和结构上的双重功能。在电气上, 它需支撑导线和地线, 保证杆塔间的电气安全距离。在结构上, 杆塔不仅要承受导线、地线、金具、绝缘子及杆塔本身的荷载, 还要承受风、冰等附加荷载, 需要有足够的刚度和强度。碳钢作为使用最广泛的金属材料, 具有力学性能好, 廉价易得等优点, 被优先选用为输电杆塔的制造材料。

碳钢的主要成分为Fe和C, 其在潮湿环境中容易发生腐蚀, 导致其强度下降。为了缓解碳钢的腐蚀情况, 通常在碳钢表面镀上一层锌保护层, 镀了锌层的碳钢简称为镀锌钢。镀锌钢的锌表面容易生成ZnO氧化膜, ZnO薄膜是一种比较致密的半导体膜, 覆盖在样品表面, 能够阻碍氧气的进入以及电解质溶液的渗入, 保护金属基体<sup>[1-2]</sup>。因此它既具备碳钢的优点, 又能有效减缓钢材设备的腐蚀情况。但是, 当镀锌钢长期暴露于高腐蚀环境下时, 如海洋大气高盐分环境、工业大气酸性气体环境, 也会造成一定程度的腐蚀, 从而使得输电杆塔的力学性能大幅度下降, 严重影响电力输送的安全性<sup>[3]</sup>。因此, 研究镀锌钢的腐蚀规律和机理, 寻找镀锌钢材耐腐蚀性能的快速评价方法具有重要意义。

目前, 镀锌钢耐腐蚀性能的评价方法主要包括户外暴露试验和室内加速模拟试验。户外暴露试验法是将需要进行研究的金属样品按一定要求投放在户外真实的大气环境下进行试验, 能较好地反映现场实际情况, 试验结果是多种环境因素共同作用的反映, 所得数据直观可靠<sup>[4-5]</sup>。但户外暴露试验的周期较长, 尤其是对耐蚀性好的材料和保护层, 实验周期更长(如10~20年), 不能满足工艺、生产的迫切需要, 而且试验区域性很强, 不利于试验结果的推广和应用。

室内加速模拟试验法是将需要进行研究的试样放在专用的储存室内, 模拟户外自然环境的试验方法。它是通过强化部分大气环境因子(如温度或酸碱度)的方法来达到快速评价的目的, 主要用来快速

评估不同厂家生产的金属材料的耐腐蚀性能, 提高金属制品的选材和防腐设计效率<sup>[6-7]</sup>。常用的主要包括盐雾试验、周期复合盐雾试验、干湿周浸循环试验和多因子循环复合腐蚀试验。通过加速腐蚀试验可以快速预测材料在实际使用中的腐蚀情况, 从而提前采取保护措施或更换受损的材料, 降低因腐蚀导致的安全事故和经济损失。

本文采用室内加速模拟试验法, 根据镀锌钢板在大气中的腐蚀特点, 通过模拟输电杆塔材料在实际环境服役中的腐蚀因子, 将多种自然环境的腐蚀因素叠加, 进而加速镀锌钢的腐蚀速度, 对镀锌钢耐腐蚀性能展开了评价。设计了一套定点腐蚀装置, 用于评价不同锌层厚度的镀锌钢板的耐腐蚀性能; 探究了溶液酸度等对镀锌钢腐蚀速率的影响, 结合腐蚀动力学曲线、腐蚀形貌和腐蚀产物的物相分析等, 探讨了该室内加速腐蚀试验方法对镀锌钢的加速腐蚀行为。在保证实验结果的可靠性和准确性的同时, 加速杆塔材料的腐蚀速度, 以达到能快速评价输电杆塔材料耐腐蚀性能的目的, 为下一阶段电网建设中输电杆塔的合理选材及相应的表面防护措施提供重要参考和依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料和试剂、仪器

以市售镀锌钢为研究对象, 采用室内加速腐蚀方法, 模拟海洋、工业大气的腐蚀环境进行腐蚀性评价试验, 镀锌钢试片的长和宽是150 mm×100 mm, 厚度分别为40、60、80、100和120 μm, 根据镀锌钢的厚度不同, 分别命名为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>。

所用化学试剂: 氯化钠(NaCl)、乙酸(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)、过硫酸钠(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)、二水合5-磺基水杨酸(C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>5</sub>S·2H<sub>2</sub>O)、硝酸钠(NaNO<sub>3</sub>)、无水乙酸钠(CH<sub>3</sub>COONa)等试剂购自国药集团化学试剂有限公司, 皆为分析纯。

所用仪器: 采用JSM-6490型扫描电子显微镜(SEM)和PAN alytical-Empyrean型X射线衍射仪

(XRD)观察测试腐蚀产物层的表面形貌及成分。

## 1.2 镀锌钢耐腐蚀性能快速评价原理

利用酸性腐蚀溶液溶解镀锌钢表面的锌镀层,暴露出钢基材;钢基材在酸性溶液中腐蚀,游离出的 $\text{Fe}^{2+}$ 被氧化剂氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ;基于 $\text{Fe}^{3+}$ 与磺基水杨酸(SSal)发生显色反应,利用分光光度计在线检测溶液中的 $\text{Fe}^{3+}$ ;通过记录镀锌钢板开始腐蚀到游离出 $\text{Fe}^{3+}$ 所需要的时间来评价镀锌层的耐腐蚀性能。 $\text{Fe}^{3+}$ 与SSal显色反应原理:SSal与 $\text{Fe}^{3+}$ 络合的计量比受腐蚀介质pH的影响,可生成1:1、2:1及3:1型络合物,且呈现出不同的颜色<sup>[8-10]</sup>。pH=1.0~3.0时,形成1:1型络合物 $[\text{Fe}(\text{SSA})]$ ,溶液为红褐色;pH=4~8时,形成2:1型褐色络合物 $[\text{Fe}(\text{SSA})_2]$ ;而在pH=8~11时,形成黄色的3:1型络物 $[\text{F}(\text{SSA})_3]$ ;pH>12时,则生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀。本文主要在酸性条件下评价镀锌钢板的耐腐蚀性能,SSal- $\text{Fe}^{3+}$ 络合物的显色pH范围控制在1.0~3.0。

## 1.3 腐蚀溶液的配制

腐蚀溶液体系是加速腐蚀评价镀锌钢耐腐蚀性能试验中的关键环节。腐蚀条件决定了金属的腐蚀方式及腐蚀速率。腐蚀溶液配方通过模拟实际的腐蚀环境来确定,加入NaCl以模拟海水成分;加入酸、氧化性物质腐蚀因子,以模拟工业大气环境中 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等酸性气体形成酸雨的腐蚀,以及空气中氧气的氧化腐蚀<sup>[11-12]</sup>。腐蚀溶液的成分为5% NaCl、2%磺基水杨酸、5%乙酸(HAc)、0.05%  $\text{NaNO}_3$ 和0.8%  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ,SSal的功能同时作为酸和 $\text{Fe}^{3+}$ 检测指示剂, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 的功能是将反应生成的 $\text{Fe}^{2+}$ 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ;HAc的加入主要用于缓冲,调控溶液的pH。腐蚀溶液的配制步骤如下:分别称取0.50、0.80、5.00和2.33 g  $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 、NaCl和SSal倒入100 mL烧杯;移液器移取并加入4.76 mL冰乙酸;缓慢向烧杯中加入86.37 g蒸馏水,不断搅拌直至完全溶解,随后倒入棕色试剂瓶储存。SSal与 $\text{Fe}^{3+}$ 络合显色的pH范围为1.0~3.0。为了保证在镀锌钢加速腐蚀过程中,腐蚀溶液的pH在 $\text{Fe}^{3+}$ 与SSal显色范围内,本文通过加入乙酸钠(NaAc)来调控其pH。

## 1.4 镀锌钢耐腐蚀性能的评价装置

耐腐蚀性能评价装置包括腐蚀反应装置、蠕动泵、 $\text{Fe}^{3+}$ 在线监测装置(分光光度计),如图1所示。其中,腐蚀反应装置于控温摇床中,以控制腐蚀反应温度和保证溶液传质良好。腐蚀反应装置和分光光度计的比色皿中开设溶液进出口,利用透明硅橡胶软管连接,实现腐蚀溶液和比色皿循环,在线检

测 $\text{Fe}^{3+}$ 。

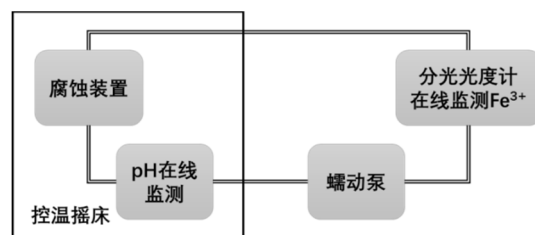
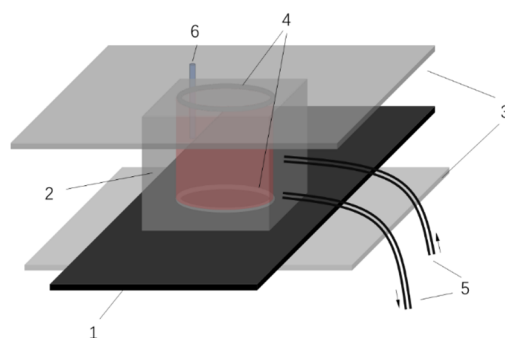


图1 镀锌钢板的耐腐蚀性能快速评价流程图

Fig.1 Diagram of rapid evaluation process of corrosion resistance of galvanized steel

腐蚀装置图如图2所示,装置的材质为有机玻璃,腐蚀反应池的底面与镀锌钢板和上下挡板之间用密封垫圈封装;腐蚀反应池设有在线pH计。定点腐蚀装置的腐蚀面积为 $7.06\text{ cm}^2$ ,溶液体积为50 mL。腐蚀反应装置于控温摇床中,以控制腐蚀反应温度,保证溶液传质良好。腐蚀反应装置和分光光度计的比色皿中开设溶液进出口,利用透明硅橡胶软管连接,实现腐蚀溶液腐蚀反应器和比色皿中循环,在线检测 $\text{Fe}^{3+}$ 。向腐蚀反应皿中加入50 mL腐蚀溶液,同时启动仪器测试,当吸光度达到0.6时停止实验。



1-镀锌钢板; 2-反应池; 3-上下密封挡板;  
4-密封垫圈; 5-硅橡胶软管; 6-pH计

图2 镀锌钢板的定点腐蚀装置的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of fixed point corrosion device of galvanized steel plate

单位腐蚀面积上作用的腐蚀溶液体积用 $Q_c$ 表示, $Q_c$ 为腐蚀溶液体积( $V$ )与镀锌钢板腐蚀面积( $S$ )的比值。通过计算,定点腐蚀装置的 $Q_c$ 值为0.83。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀动力学分析

#### 2.1.1 腐蚀溶液体系初始pH的影响

为了实现镀锌钢耐腐蚀性的快速评价,选择腐

蚀性较强的反应溶液对镀锌钢进行快速腐蚀,同时所选腐蚀溶液必须能够区分不同镀锌钢的对钢基底的保护能力,且需保证 $\text{Fe}^{3+}$ 析出时溶液pH处于络合物显色pH范围(1.5~3.0)。

从图3和图4可以看出,前40 min,不同初始pH的腐蚀溶液吸光度基本不变。当吸光度开始变化时,溶液pH范围处于SSal指示剂显色pH范围,吸光度达0.6时,腐蚀时间均大于60 min,不同厚度镀锌钢腐蚀时间有一定间距,能有效评价不同镀锌钢的耐腐蚀性能。因此,在定点腐蚀装置 $Q_c$ 为7.07的情况下,对于镀锌层厚度在40~60  $\mu\text{m}$ 的镀锌钢来说,选择初始pH为1.2的腐蚀溶液作为加速腐蚀的测试条件较为合适,对于镀锌层厚度在80~120  $\mu\text{m}$ 的镀锌钢,选择初始pH为0.9的腐蚀溶液较为合适。

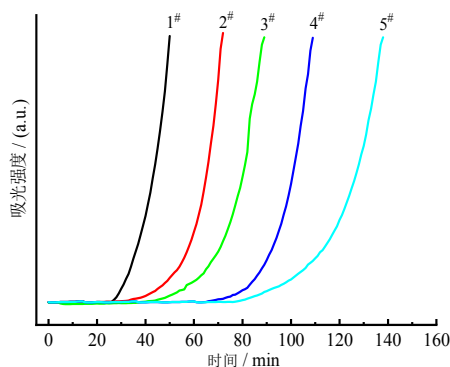


图3 腐蚀溶液腐蚀不同厚度镀锌钢时的吸光度曲线

Fig.3 The absorbances of corrosion solution corroded different thickness of galvanized steel

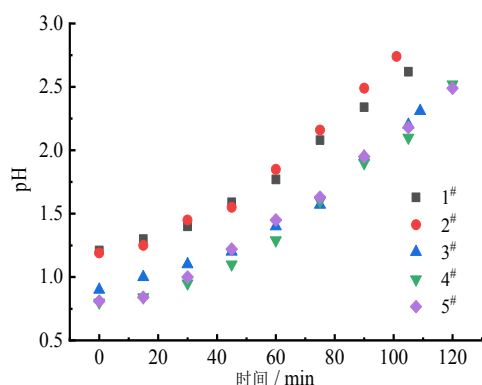


图4 pH与腐蚀时间关系图

Fig.4 The relationship between corrosion time and pH

### 2.1.2 镀锌钢厚度对耐腐蚀性的影响

为了对比不同镀锌层厚度对镀锌钢耐蚀性能的影响,设计两种对比方案:

(1)设定相同的吸光度,对比所需的腐蚀反应时长。

镀锌钢厚度与腐蚀时长的关系如图5所示。从图中可以看出,随着镀锌层厚度的增加,溶液吸光度达到0.6所需的时间逐渐增加。锌层厚度为120  $\mu\text{m}$ 时,其锌层完全腐蚀所需时间最长,为138 min;而锌层厚度为40  $\mu\text{m}$ 时,腐蚀时间最短,约50 min。以上实验结果说明,锌层越厚,对基底的保护性能越强;定点腐蚀装置能较好评价不同镀锌层厚度的镀锌钢板的耐腐蚀性能。

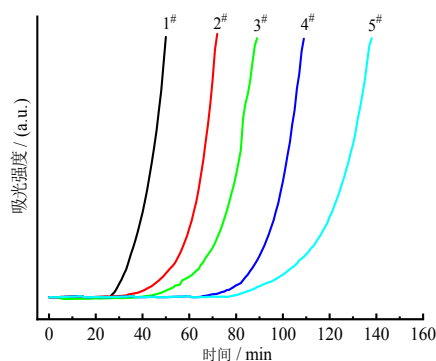


图5 不同锌层厚度的镀锌钢在腐蚀过程中腐蚀溶液吸光度与腐蚀时间关系图

Fig.5 Relationship between absorbance of corrosion solution and corrosion time of galvanized steel with different thickness of zinc layer

(2)取相同的腐蚀时长,对比溶液吸光度。

图6为腐蚀30 min后腐蚀溶液的吸光度与对应的镀锌钢镀层厚度关系图。镀层厚度从薄到厚,腐蚀反应30 min溶液吸光度依次降低,80  $\mu\text{m}$ 与120  $\mu\text{m}$ 镀锌钢腐蚀溶液几乎未观察到明显的吸光度值,此时不能从吸光度值的大小比较这两种镀锌钢的耐腐蚀性能。吸光度越大,则表明材料越易被腐蚀。

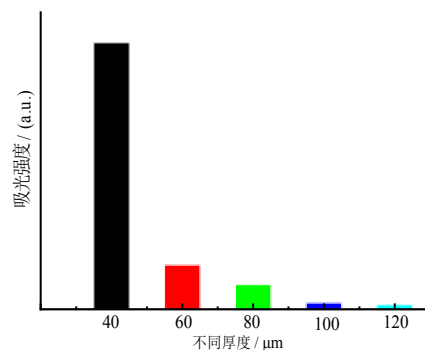


图6 不同厚度镀锌钢被腐蚀溶液腐蚀后的吸光度

Fig.6 The absorbance of galvanized steel with different thickness after being corroded by corrosion solution

图7为锌层厚度与腐蚀时间关系图。锌层厚度

与腐蚀时间成线性关系, 线性方程为:  $y=3.9+0.989x$ , 相关系数  $R^2=0.992$ 。因此, 通过比较腐蚀溶液达到相同吸光度所需的时间来评价镀锌钢板的耐腐蚀性更合适。

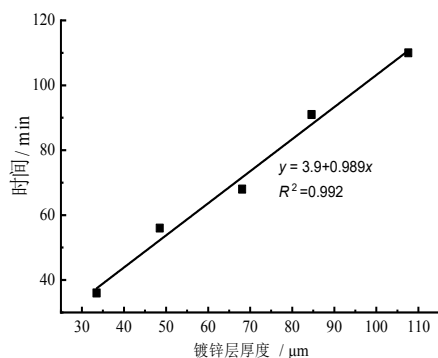


图7 锌层厚度-腐蚀时间的关系曲线

Fig.7 The relation of different thickness of zinc layer with corrosion time

### 2.1.3 腐蚀溶液体积( $Q_c$ )的影响

选取厚度为80  $\mu\text{m}$ 镀锌钢为实验对象, 分别向定点腐蚀装置中加入50和100 mL腐蚀溶液。本装置腐蚀面积固定为7.06  $\text{cm}^2$ , 若腐蚀溶液体积为50 mL时,  $Q_c$ 值为7.07, 若腐蚀溶液体积为100 mL时,  $Q_c$ 值为14.14。当腐蚀反应的产物 $\text{Fe}^{3+}$ 的物质质量一定时, 腐蚀溶液的体积越大则其浓度越小, 溶液的吸光度越低, 则完成一周周期所需时长则越长, 反之亦然。如图8所示, 对于定点腐蚀装置, 使用100 mL腐蚀溶液比50 mL腐蚀溶液加快近50 min。说明腐蚀溶液体积增加, 腐蚀反应速率加快, 腐蚀时间明显缩短。

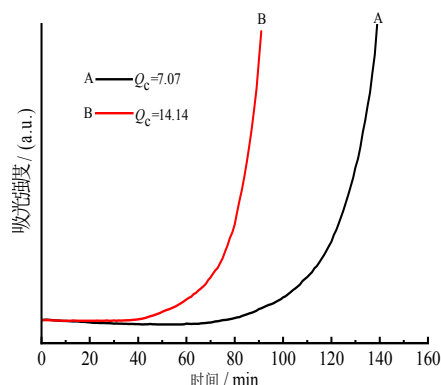


图8 不同  $Q_c$  值下腐蚀溶液吸光度强度与腐蚀时间的关系图

Fig.8 The relationship between absorbance of corrosion solution and corrosion time under different  $Q_c$  values

### 2.2 腐蚀产物分析

为了揭示镀锌层外表面腐蚀层与主体刚层的

界面特征, 镀锌钢在腐蚀前后进行了SEM(图9、图10)及EDS(图11)面扫描测试。腐蚀前镀锌钢表面呈银灰色, 如图9(a)所示。图9(b)和图9(c)为镀锌钢板试样在腐蚀溶液( $\text{pH}=1.2$ )中反应2 h后的表面形貌。图9(b)右侧为本装置反应区, 圆形腐蚀区域内出现少量黄色腐蚀点, 是 $\text{Fe}^{2+}$ 释放的位置。图9(c)为反应区的放大图片, 呈灰黑色, 结构致密且均匀地分布在镀锌钢表面, 没有明显腐蚀孔洞, 呈现均匀腐蚀特征<sup>[13-16]</sup>。以上结果表明, 在定点腐蚀装置中, 镀锌钢板腐蚀区的镀锌层可实现均匀腐蚀。进一步SEM测试表明, 测试区表面结构疏松, 由松散多孔状腐蚀产物构成(图10), 这是铁的氧化物 $\alpha\text{-FeOOH}$ 的形貌特征<sup>[17-19]</sup>, 说明镀锌层已被腐蚀。EDS线扫结果表明: Fe、C、O、Na、Cl、Si、Al元素均匀分布在腐蚀层表面(图11), 进一步说明利用定点腐蚀装置可以实现快速、均匀腐蚀。

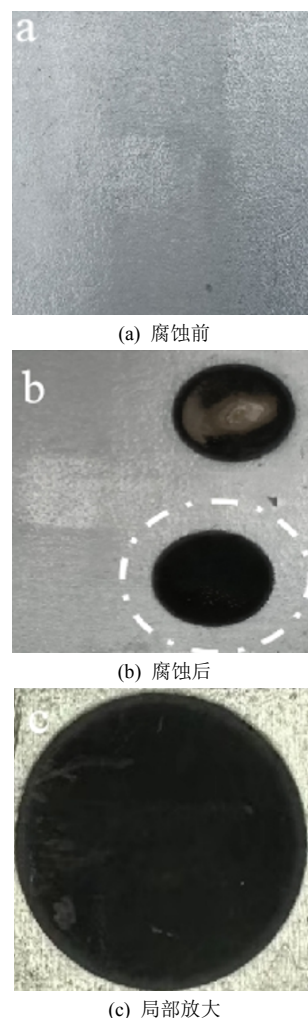


图9 镀锌钢腐蚀前后的照片

Fig.9 Optical photograph of galvanized steel before and after corrosion



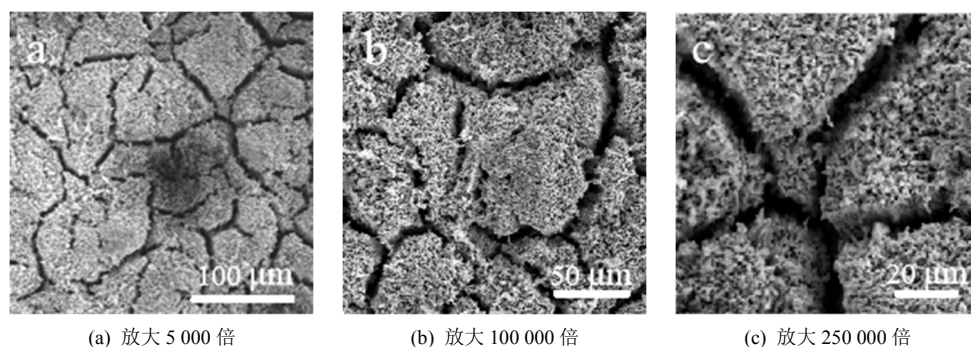


图 10 厚度为 80  $\mu\text{m}$  镀锌钢腐蚀 2 h 后的不同放大倍数的 SEM 图

Fig.10 SEM images of 80  $\mu\text{m}$  thickness galvanized steel corroded for 2 h at different magnifications

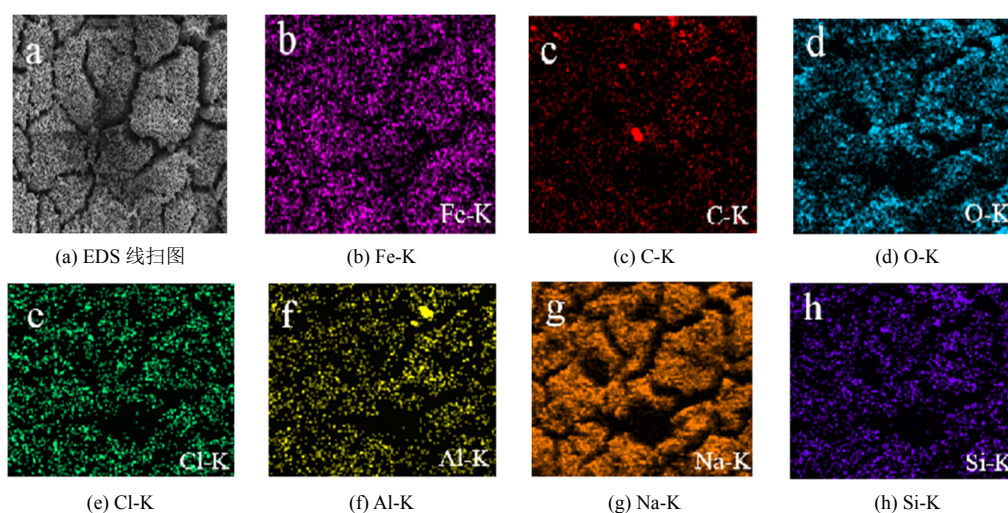


图 11 镀锌钢腐蚀后的 EDS 线扫图

Fig.11 EDS line sweeping diagram of galvanized steel after corrosion

图12为镀锌钢在腐蚀溶液(pH=1.2)中腐蚀2 h后, 腐蚀层的XRD谱图。由图可知, 反应2 h后, 镀锌钢表层的Zn耗尽, 取而代之的是更多具有保护性锈层 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnO}$ 生成, 暴露出的铁基底被腐蚀后产生了 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ 和 $\text{FeCO}_3$ <sup>[20-22]</sup>, 此时镀锌钢的锌层已被破坏。

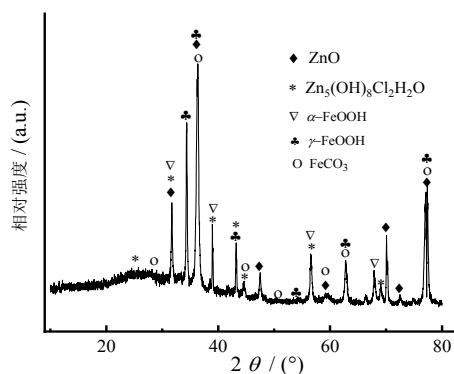


图 12 镀锌钢腐蚀层的 XRD 谱图

Fig.12 XRD pattern of galvanized steel after corrosion

### 3 结论

(1)设计加工了一套定点腐蚀装置用于镀锌钢板耐腐蚀性能快速检测。利用酸性溶液腐蚀溶解镀锌钢表面的锌镀层, 暴露出钢基材; 进一步, 钢基材在酸性溶液中腐蚀, 游离出的 $\text{Fe}^{2+}$ 被氧化剂氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ ; 通过 $\text{Fe}^{3+}$ 与磺基水杨酸(SSal)发生显色反应, 利用分光光度计在线检测溶液中的 $\text{Fe}^{3+}$ ; 通过游离 $\text{Fe}^{3+}$ 所需要的时间来评价镀锌层的耐腐蚀性能。

(2)本方法可用于评价不同镀锌层厚度的镀锌钢板的耐腐蚀性能, 而且可通过调控腐蚀溶液的pH以及 $Q_c$ 值等参数, 在3 h内快速评价市场上常用镀锌钢板的耐腐蚀性能。

### 参考文献

[1] 刘孟磊. 高腐蚀环境下输变电设施的金属腐蚀机理研

- 究[D]. 贵州: 贵州大学, 2023.
- [2] 高岩, 黄殷辉, 郑志军. Q235 钢在广东省输电杆塔现场的大气腐蚀行为[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 39-46.
- [3] 刘昌帅, 董泽才, 王若民. 工业污染区输电铁塔构件的大气腐蚀与防护[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(7): 906-911.
- [4] 蒋武斌, 孟晓波, 廖永力. 输电杆塔材料在海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 99-103.
- [5] 王贵, 李位. 分光光度法测定水中总铁含量的探讨[J]. 山东化工, 2017, 46(4): 80-83.
- [6] 田旭, 李想, 裴锋, 等. 镀锌钢和碳钢在江西省的大气腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2023, 52(8): 32-38.
- [7] 李博. 提高 TC6 钛合金零件镀铬层结合力的方法[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3): 26-28.
- [8] 陈俊超, 张林海. 工艺参数对 Q345 钢锌系磷化膜耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(8): 329-333.
- [9] 程秀花, 吴胜杰. 磺基水杨酸光度法快速测定锰矿石中铁[J]. 冶金分析, 2014, 34(2): 74-78.
- [10] 张天斌, 李政, 许海. 水溶液中 5-磺基水杨酸合铁(III)配合物组成的测定[J]. 化学教育, 2014, 35(4): 21-24.
- [11] Qi Y M, Luo H Y, Zheng S Q, et al. Effect of temperature on the corrosion behavior of carbon steel in hydrogen sulphide environments[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2014, 9: 2101-2112.
- [12] Ma Y T, Li Y, Wang F H. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content [J]. Corrosion Science, 2007, 51: 997-1106.
- [13] 张琳, 赵春英, 王振尧, 等. 模拟工业大气环境中碳钢和耐候钢的腐蚀行为研究[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(4): 265-270.
- [14] Hou B R, Li X G, Ma X M, et al. The cost of corrosion in China[J]. Materials Degradation, 2017, 1(1): 1-10.
- [15] Kim Y H, Yoo M H, Moon M S. Effects of surface roughness on the electrochemical properties and galvanic corrosion behavior of CFRP and SPCC alloy[J]. Materials, 2020, 13: 4211-4231.
- [16] Jin S Y, Ma X C, Wu R Z, et al. Effect of carbonate additive on the microstructure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coating on Mg-9Li-3Al alloy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29: 1453-1463.
- [17] 陈琴, 余敏, 葛洁洁, 等. 冷喷涂 Al 基复合涂层的制备及耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 44-49.
- [18] 张立平, 刘庆然, 何小兵, 等. 封孔-成膜工艺对电镀薄镍层耐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(2): 56-59.
- [19] Poza P, Garrido-Maneiro M A. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and wear behaviour[J]. Progress in Materials Science, 2022, 123(1): 100839.1-100839.35.
- [20] 吴芳, 王伟. 化学镀 Co-P 和 Co-Mo-P 薄膜的结构与耐腐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(4): 7-10.
- [21] Shozib I A, Ahmad A, Abdul-Rani A M, et al. A review on the corrosion resistance of electroless Ni-P based composite coatings and electrochemical corrosion testing methods[J]. Corrosion Reviews, 2022, 40(1): 1-37.
- [22] 张亚茹, 黄青丹, 刘静, 等. 输电杆塔钢构件腐蚀防护新技术[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(1): 1-4.