

沿海地区输电铁塔防护涂层耐腐蚀性能研究

刘峰¹, 宋弘清¹, 黄政然^{1,2}, 范亚洲³, 林岳凌⁴, 龙紫筠⁴, 许立坤¹

(1. 海洋腐蚀与防护重点实验室 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 山东 青岛 266101;
2. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 3. 广东电网公司江门供电局, 广东 江门
529000; 4. 江门市大光明电力设备厂有限公司, 广东 江门 529100)

摘要: 目的 研究沿海地区输电铁塔防护涂层体系的腐蚀失效行为, 评估涂层的防护性能, 为铁塔防护涂层寿命体系评定和修复提供试验依据。方法 分别采用热镀锌、热镀锌/冷涂锌复合涂层、热镀锌/带锈环氧涂层三种技术方案, 对铁塔角钢材料进行防腐保护, 采用中性盐雾方法模拟沿海环境对试样进行耐蚀性测试, 通过试样表面形貌观察、极化曲线、以及阻抗谱等电化学手段对保护效果进行评价。结果 热镀锌、热镀锌/冷涂锌复合涂层在盐雾 150 h 出现大面积腐蚀, 热镀锌/带锈环氧涂层在盐雾 2000 h 未发生明显腐蚀。结论 热镀锌/带锈环氧涂层的耐蚀性能优于热镀锌/冷涂锌漆和热镀锌涂层。

关键词: 输电铁塔; 沿海地区; 防腐蚀涂层; 盐雾试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.015

中图分类号: TJ089; TQ050.9 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)04-0076-06

Anti-corrosion Properties of Protective Coatings for Transmission Line Iron Tower in Coastal Area

LIU Feng¹, SONG Hong-qing¹, HUANG Zheng-ran^{1,2}, FAN Ya-zhou³,
LIN Yue-ling⁴, LONG Zi-jun⁴, XU Li-kun¹

(1. Science and Technology on Marine Corrosion and Protection Laboratory, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corp., Jiangmen 529000, China; 4. Jiangmen DGM Electric Power Equipment Factory Co., Ltd., Jiangmen 529100, China)

ABSTRACT: Objective To study the corrosion failure behavior and evaluate the protection property of the coating for the corrosion critical component on transmission line iron tower, and to provide test proofs for determining the calendar life of coatings and formulating maintenance compendium. **Methods** The anti-corrosion properties of Zn coating, zinc rich paint/Zn, and rust coating/Zn for the transmission line iron tower were investigated by neutral salt

收稿日期: 2015-05-25; 修订日期: 2015-06-13

Received: 2015-05-25; Revised: 2015-06-13

作者简介: 刘峰(1971—),男,山东人,高级工程师,主要研究方向材料表面改性、膜层腐蚀与防护研究。

Biography: LIU Feng(1971—), Male, from Shandong, Senior engineer, Research focus: modification of materials, corrosion and protection of coatings.

通讯作者: 许立坤(1965—),男,江西人,研究员,博士生导师,主要研究方向海洋腐蚀与防护技术。

Corresponding author: XU Li-kun(1965—), Male, from Jiangxi, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: marine corrosion and protection.

spray test to simulate the environment of coastal area. The morphology and electrochemical properties of the coatings were evaluated by microscope, polarization curve and EIS. **Results** The corrosion occurred in large area of the Zn coating and zinc rich paint/Zn coating after 150 h of salt spray treatment, while no obvious corrosion was observed with rust coating/Zn after 2000 h of salt spray treatment. **Conclusion** The anti-corrosion performance of rust coating/Zn was superior to the other two coatings.

KEY WORDS: transmission tower; coastal area; anticorrosion coating; salt spray test

我国海岸线长达3.2万 km,海岛数量众多,沿海也是经济发达地区,工农业生产、人民生活需要大量的电力保证,输电铁塔是电力输送的重要设备。同时沿海地区气候潮湿,特别是南方属于高温、高湿、高盐气候,对输电铁塔极易造成腐蚀,而且盐雾是造成铁塔腐蚀的主要原因之一^[1]。沿海地区输电铁塔主材为16Mn和Q235钢材,防腐蚀方式主要采用热镀锌方式^[2-5],在沿海地区铁塔热镀锌防腐蚀效果一般为3~5年,随后铁塔开始局部锈蚀,局部锈蚀带动整塔锈蚀,使锈蚀速度呈比例增长。铁塔锈蚀后需进行维护,目前维护的方式为刷油漆,常用油漆为冷涂锌漆^[6],油漆的防腐蚀寿命为2~3年,维护频繁,且工程量大。为延长铁塔使用寿命,同时降低维护成本,亟需开展沿海地区铁塔防腐技术研究^[7]。

一般涂料在钢铁表面涂装时都要求彻底除锈^[8],输电铁塔体积庞大,不易拆卸,除锈工作是一种十分繁重的工作,既耗费大量工时又增加费用。据报道钢板涂装费用分配比例为:表面除锈42%,施工30%,涂料19%。钢铁表面上的锈层从结构上看是一个疏松多孔的带水结构,从组成上看又是稳定的无害铁化合物和有害铁化合物混合物。环氧带锈防腐涂料采用渗透性较好的环氧树脂为基料,在渗透剂的配合下使涂层具有较好的渗透性,从而浸润和渗透整个疏松多孔的锈层,使锈层粘结成为连续封闭型涂层,以封闭整个锈层和钢铁表面。环氧带锈防腐涂料依靠涂料中环氧树脂的反应基团、活性颜料或铁锈转化剂与锈层中活泼有害成分反应生成稳定的抑制化合物,从而使整个锈层成为涂料中稳定的具有保护性的填料。涂料中各种不同活泼防锈料的适当配比和填料的配合,可使整个带锈层具有较好的防锈性、耐久性和物理力学性能。总之环氧带锈防腐涂料既要锈蚀的钢铁表面有良好的适应性,同时也能在光洁的钢铁表面上形成能阻蚀的钝化膜,从而起到防锈作用^[9-11]。

文中针对沿海地区输电铁塔腐蚀状况、工况特点和防腐蚀需求,根据目前防腐研究和工程技术状况,分别采用热镀锌、热镀锌/冷涂锌复合涂层、热镀锌/带锈环氧涂层三种技术方案,对铁塔材料角钢及其紧固件进行了防腐保护。采用中性盐雾^[12]方法进行了比较

测试,通过试样形貌比较、极化曲线以及阻抗谱和极化曲线等电化学手段对保护效果进行评价。

1 实验

1.1 试样材料及尺寸

实验基体材料为输电铁塔主材Q235角钢,试样结构与尺寸如图1所示,试样由2片角钢(75 mm×40 mm×1.5 mm)+2颗12 mm的螺母及螺栓组成。试片两端离边缘5 mm处各钻一个5 mm圆孔,用于实验时固定。试样制作时,表面处理按常规处理,未进行酸洗,以及过度打磨等特殊处理,以使试样接近实际应用条件。试片尖锐部位进行倒角处理,保证涂层能完全覆盖试样。

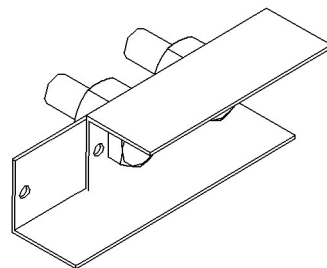


图1 角钢试样示意

Fig.1 Scheme of the steel sample

1.2 涂层材料与涂装工艺

环氧树脂带锈防腐涂料选用环氧双组分的带锈涂料。甲组份为环氧树脂,乙组分为固化剂,质量比为7:1。按比例称量、混合、搅拌均匀,试样为从铁塔拆卸下来的角钢Q235,表面覆盖热镀锌层,部分镀锌层已经破裂,表面锈蚀部分由400#砂纸打磨,并清除浮锈,将配置的带锈涂料直接在刷涂试样表面。涂装完毕后,试样置于阴凉通风处晾干。

对比试样1直接使用现有铁塔常用角钢材料,表面为热镀锌层。对比试样2是在试样1热镀锌层外表面刷涂冷涂锌漆,分别用于实验分析与对比。

1.3 方法步骤

1.3.1 中性盐雾试验

试验标准参照国标^[13],在实验介质为5%(质量分数)NaCl溶液,温度为35℃,设备型号为JK-FH90的复合式盐雾试验箱中进行中性盐雾实验。其中,每组试样取3个平行样,并定期拍照,记录试样表面锈蚀情况。

盐雾试验过程中,由于试样处于高温、高湿、高盐的环境下,腐蚀液将逐渐渗入涂层,破坏涂层的结构,使之发生溶胀、鼓泡、甚至开裂、脱落等现象,导致涂层失效。试样表面形貌变化是反映涂层状态或判断涂层是否失效的重要手段之一,本项目中形貌测试采用以下步骤进行。

1) 光学相机拍照。在盐雾不同时间取样,晾干,拍摄试样表面形貌,用于宏观观察和比较。

2) 三维视频显微镜观察,拍照。用于观察试样在盐雾不同时间的表面微观形貌,获得腐蚀过程的微观变化数据。

1.3.2 电化学测试

实验采用M273恒电位/恒电流仪+M5210频响分析仪电化学综合测试系统进行电化学阻抗谱及动电位极化曲线测试,分别测试了带锈涂层和冷涂锌漆体系随盐雾试验时间变化的电化学阻抗谱,测试了镀锌涂层动电位极化曲线。实验介质为5%的NaCl溶液,温度为35℃,所用的软件为PowerSuite电化学测试软件。涂层体系的电化学阻抗谱测量在开路电位下进行,频率范围为10 mHz~100 kHz,交流正弦波振幅为20 mV,试样工作面积为1 cm²。缺陷涂层体系的动电位极化曲线测试,扫描范围为-1200~800 mV(vs. E_{corr}),扫描速度为0.333 mV/s。阻抗谱数据采用ZSimp Win3.21和Origin 8.0软件进行数据拟合分析处理,动电位极化曲线利用CView2进行分析。

实验装置采用三电极体系,以试样为工作电极,铂铌丝为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,其标准电极电位为0.241 V(vs.SHE)。如图2所示。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌变化

图3给出了试样表面随盐雾试验时间形貌变化的照片。图3a—d为热镀锌试样盐雾0~2000 h的形貌照片,从图3b中可以看出,盐雾150 h时,热镀锌试样

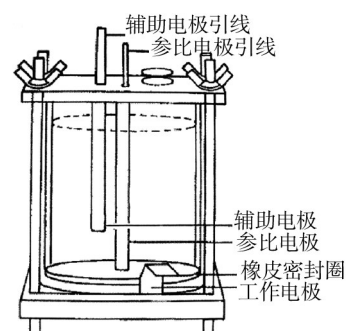


图2 三电极电化学测试体系

Fig.2 Scheme of the three-polar system for electrochemical measurement

的表面出现白锈,螺栓表面出现红锈,螺栓表面无涂层保护,因此在盐雾环境中迅速生锈。盐雾2000 h时,试样的角钢表面仍以白锈为主,试样的紧固件已经完全被红锈覆盖。因为该组试样为镀锌层,锌的自腐蚀电位低于钢,镀锌层作为阳极容易发生腐蚀,从而保护作为阴极的角钢,发生腐蚀的镀锌层生成的腐蚀产物白锈覆盖在试样表面具有隔离作用,延迟腐蚀介质到达基底的时间,继续对基底产生保护作用。因此本方案镀锌层对基底角钢有一定保护作用,但对于无镀锌层的紧固件直接暴露于盐雾环境中,导致螺栓短期内严重锈蚀。图3e—h给出了冷涂锌试样表面随盐雾试验时间形貌变化的照片。从图中可以看出盐雾150 h时,试样的角钢表面涂层出现白锈,紧固件螺栓出现红锈;盐雾960 h时,试样表面出现大面积白锈,特别是紧固件已经完全为红锈所覆盖,表明螺栓部位的冷涂锌涂层已经基本失效;盐雾2000 h时,试样表面完全为白锈所覆盖,有机涂层完全失效。图3i—l给出了带锈涂料试样表面随盐雾试验时间形貌变化的照片。可以看出,盐雾960 h时,试样表面涂层完好,无破损,无锈点;盐雾2000 h时,试样表面涂层完好,但是表面部分区域出现白锈,特别是紧固件与角钢的缝隙处,已经明显出现红锈。主要是缝隙处积蓄腐蚀介质,容易发生腐蚀,称之为缝隙腐蚀^[14-15]。同时看到螺栓的螺纹部分出现红锈,表明涂层已部分破坏,失去保护作用。

带锈涂料试样的基底是表面仍覆盖部分热镀锌涂层的带锈角钢,从测试结果看出,所用带锈涂层经历2000 h盐雾测试仍能保持防腐作用,但是对于紧固件,特别是螺栓的螺纹部位,以及螺栓缝隙处涂层保护效果较差,因此针对紧固件腐蚀建议另外实施特殊的防护手段和材料。

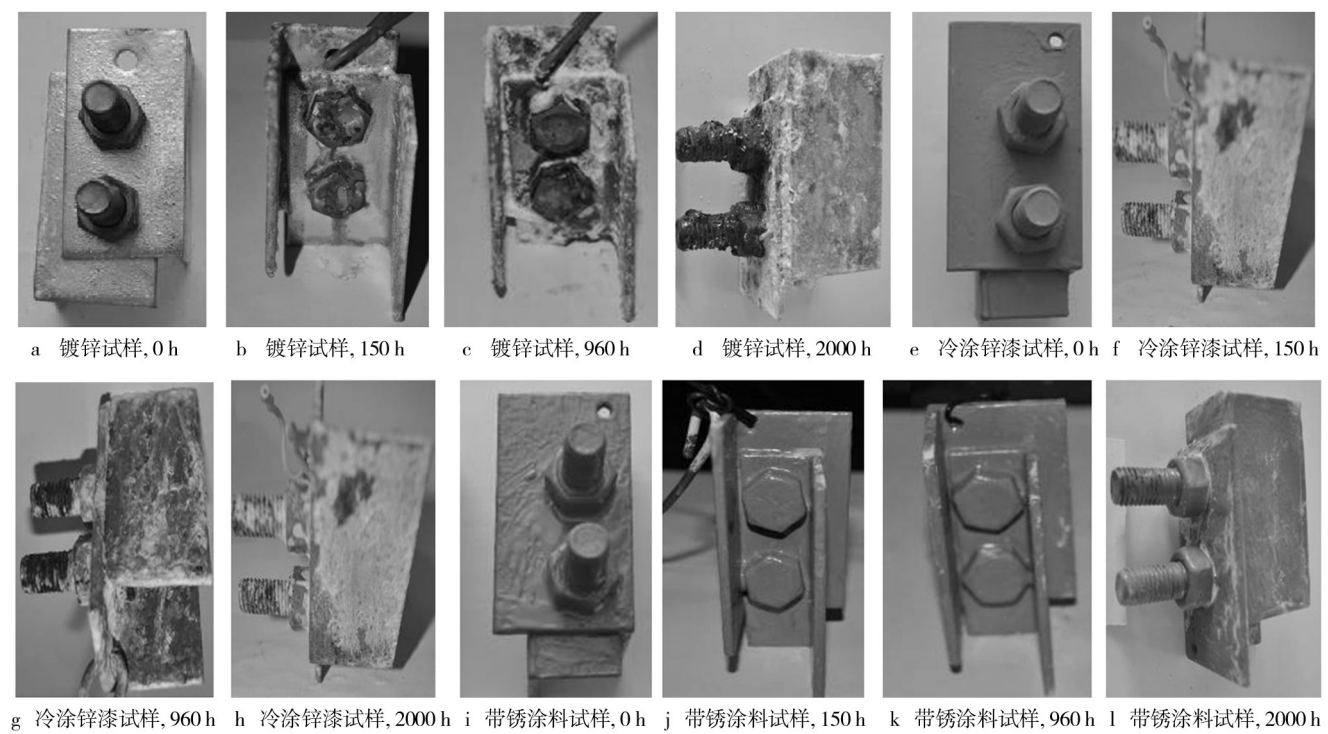


图3 涂层试样表面随盐雾测试时间形貌变化
Fig.3 Morphological change of sample surface with different salt spray time

2.2 微观形貌评价

图4分别给出了热镀锌涂层微观形貌随盐雾时间变化照片。可以看出,试样表面热镀锌为鳞片状分布,鳞片尺寸从几十微米到几百微米不等。经盐雾150 h后,试样表面均出现白锈,即镀锌层发生腐蚀生成的白色产物,腐蚀产物为松散的堆积状态。镀锌层作为阳极发生腐蚀溶解,从而保护角钢基底。

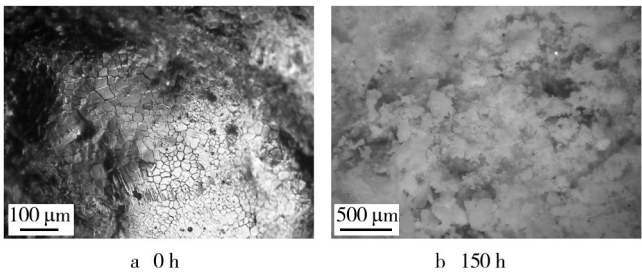


图4 热镀锌涂层微观形貌随盐雾时间变化照片
Fig.4 Micro morphology of Zn coating with different salt spray time

图5给出了冷涂锌试样表面微观形貌随盐雾时间变化照片。本方案涂层表面分布颗粒状凸起,粗糙度较大。盐雾150 h时,涂层大面积破裂,出现的白锈为镀锌层白色腐蚀产物;盐雾2000 h时,白锈基本覆盖试样表面,部分区域已经露出基底,表明冷涂锌涂层

完全失效。

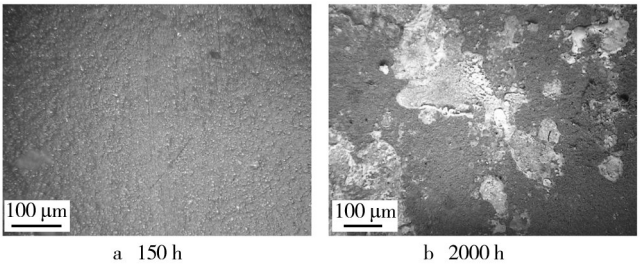


图5 冷涂锌涂层微观形貌随盐雾时间变化照片
Fig.5 Micro morphology of zinc-rich paint with different salt spray time

图6给出了带锈涂料试样微观形貌随盐雾时间变化的照片。可以看出盐雾试验前后,角钢表面涂层平

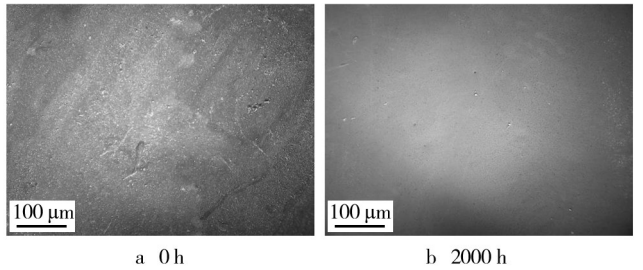


图6 带锈涂料微观形貌随盐雾时间变化照片
Fig.6 Micro morphology of rust coating with different salt spray time

整,有少量微孔,无裂纹,无破损,经历 2000 h 盐雾试验涂层基本保持完好,仍然具有保护作用。

实际应用环境中,镀锌层疏松的腐蚀产物在风吹雨淋的作用下很容易被冲刷掉,从而使钢基底裸露发生腐蚀,降低铁塔的使用寿命。因此在镀锌层外涂装有机涂层是降低腐蚀的有效手段。从试样试验结果可以看出,带锈涂料具有较好的屏蔽作用,阻止或延迟腐蚀介质对镀锌层的侵蚀,从而提高涂层的保护效果,延长防护寿命。

2.3 涂层电化学性能变化

图 7 给出了试样基材角钢和镀锌层的极化曲线。可以看出,角钢的自腐蚀电位在 -0.6 V 左右,而镀锌层自腐蚀电位在 -1.05 V 左右。自腐蚀电位越低,材料表面越容易发生腐蚀。镀锌层的自腐蚀电位远低于角钢表面,因此镀锌层作为阳极,角钢基底作为阴极,镀锌层首先发生腐蚀,而且腐蚀产物附着在角钢表面,具有一定的绝缘和隔离腐蚀介质的作用,从而保护角钢基底。如图 3 所示,表面镀锌层迅速腐蚀生成白锈,延迟了角钢腐蚀的发生,对基底产生一定保护作用,但是镀锌层的腐蚀产物结构疏松,在室外风吹雨淋的作用下容易脱落而使角钢基底暴露发生腐蚀。

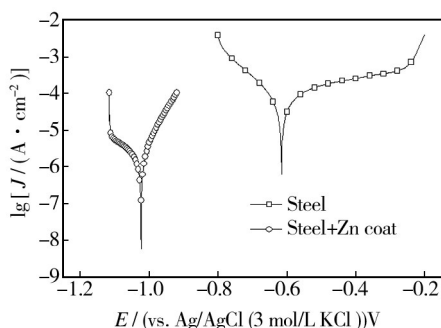


图7 角钢Q235和镀锌层的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of Q235 steel and Zn coating

电化学阻抗谱是评价有机涂层耐蚀性能的重要手段。通常情况下,当涂层体系阻抗值保持在 $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时,说明该体系具有良好的耐腐蚀性能;当涂层体系阻抗值低于 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时,就说明该体系的耐腐蚀能力已有下降;而当阻抗值降低到 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时,则有可能在有机涂层/金属界面发生了电化学腐蚀反应,此时涂层对外界电解质溶液的阻挡能力已经很低。

图 8 和图 9 为两种有机涂层体系经中性盐雾时间变化的电化学阻抗谱图。由 Nyquist 图可知,两种涂层

体系电化学阻抗初始值均超过 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。随着在盐雾环境中时间的延长,容抗弧半径逐渐减小,阻抗值逐渐降低,这说明涂层的防护性能逐渐降低。在盐雾 2000 h 时,带锈涂料试样涂层的阻抗值其阻抗谱图响应均呈现单容抗弧,仅出现 1 个时间常数,阻抗值维持在较高的数值 ($10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右)。表明腐蚀介质通过微孔、缝隙向涂层内部渗透,涂层保护效果有所降低,但是仍具有较好的保护作用^[16]。这说明带锈环氧涂层作为一个屏蔽层,盐雾 2000 h 时仍能起到良好的隔绝、屏蔽作用,避免了腐蚀电解质溶液与金属基体直接接触。这与腐蚀形貌评价一致。

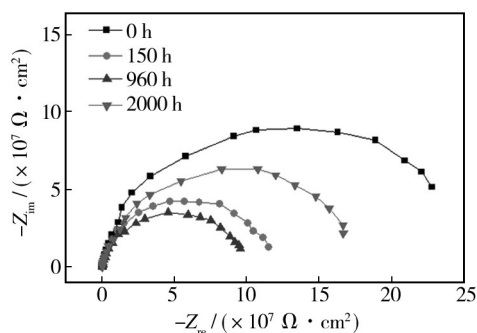
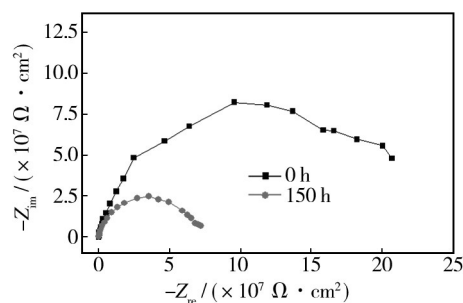
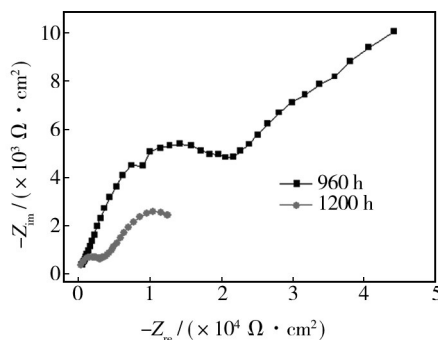


图8 带锈涂料试样随盐雾时间变化的EIS谱图

Fig.8 EIS of rust coating with different salt spray time



a 0, 150 h



b 960, 1200 h

图9 冷涂锌漆试样随盐雾时间变化的EIS谱图

Fig.9 EIS of zinc-rich paint with different salt spray time

由图 9a 看出,冷涂锌涂层阻抗值下降幅度较大。

盐雾 960 h 时,其阻抗值下降至 $1.07 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,如图 9b 所示;盐雾 2000 h 时,其阻抗值下降至 $7.2 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而且阻抗谱图出现 2 个容抗弧,阻抗值在 $10^2 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,表明有机涂层已经失去保护作用。这与腐蚀形貌分析一致,试样表面覆盖白色腐蚀产物,主要来自角钢表面原有镀锌层的腐蚀。这些腐蚀产物具有一定绝缘和隔离腐蚀介质的作用,因此在阻抗测试中,腐蚀产物与残余有机涂层共同作用形成 2 个容抗弧。

3 结论

1) 中性盐雾结果表明,热镀锌层通过自身腐蚀保护基底,但是其腐蚀产物疏松,易脱落,导致对钢基底保护期限较短。

2) 中性盐雾前后的电化学阻抗谱测试结果显示,带锈环氧涂层阻抗在经过 2000 h 盐雾后,其阻抗值仍保持在 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$,而冷/热镀锌涂层的阻抗只有 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右,并且该涂层都已经出现局部剥离失效,钢基体出现大量锈蚀,失去防护功能。

3) 对于现有沿海铁塔角钢结构材料来说,采用带锈环氧/热镀锌涂装防护效果优于目前常用的热镀锌和冷镀锌/热镀锌涂层。

4) 对于与紧固件偶合连接的盐雾试验结果显示,铁塔紧固件需要额外的涂层或包覆处理防护。

参考文献:

- [1] 马东伟,王平,任汉涛. 滨海输变电线路铁塔腐蚀与防护技术探讨[J]. 全面腐蚀控制,2013,27(11):37—38.
MA Dong-wei, WANG Ping, REN Han-tao. Corrosion and Protection Technology of Transmission Line Iron Tower by the Sea[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(11): 37—38.
- [2] 樊雄伟,彭泉光. 广西输电铁塔腐蚀防现状调查与防治建议[J]. 广西电力,2012,35(4):64—66.
FAN Xiong-wei, PENG Quan-guang. Investigation and Suggestion on Corrosion of Transmission Tower in Guangxi[J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(4): 64—66.
- [3] 彭菲. 输变电铁塔热镀锌工艺技术[J]. 科学传播,2012(12):178—179.
PENG Fei. Hot-dip Galvanized Process of Transmission Line Iron Tower[J]. Public Communication of Science Technology, 2012(12): 178—179.
- [4] 徐秀清,王顺兴. 连续热镀锌工艺进展与展望[J]. 表面技术,2007,36(1):71—74.
XU Xiu-qing, WANG Shun-xing. Development and Prospect of Continuous Hot-dip Galvanized Process[J]. Surface Technology, 2007, 36(1): 71—74.
- [5] 陈彤,谈天,洪毅成,等. 输电网镀锌金属部件的腐蚀与防护[J]. 中国电力,2013,46(11):1—7.
CHEN Tong, TAN Tian, HONG Yi-cheng, ZHANG Jun-xi. Corrosion and Protection of Hot-Dipped Components in Power Transmission Grid[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 1—7.
- [6] SHI Hong-wei, LIU Fu-chun, HAN En-hou. The Corrosion Behavior of Zinc-rich Paints on Steel: Influence of Simulated Salts Deposition in an Offshore Atmosphere at the Steel/Paint Interface[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 4532—4539.
- [7] 陈耀财,安贞基. 输电铁塔腐蚀分析与有机涂料防护设计[J]. 现代涂料与涂装,2010,13(10):23—27.
CHEN Yao-cai, AN Zhen-ji. Corrosion Analysis and Protection Design of Organic Coatings about Transmission Tower[J]. Modern Paint & Finishing, 2010, 13(10): 23—27.
- [8] 洪啸吟,冯汉保. 涂料化学[M]. 北京:科学出版社,2005.
HONG Xiao-yin, FENG Han-bao. Coatings Chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [9] 杜克敏. 带锈涂料现状及其发展趋势[J]. 上海涂料,2010,48(1):33—37.
DU Ke-min. Status and Development Trend of Rusty Paint[J]. Shanghai Coatings, 2010, 48(1): 33—37.
- [10] 李伟华,田惠文,宗成中,等. 低表面处理涂料的配方设计和研究进展[J]. 涂料工业,2008,38(2):54—58.
LI Wei-hua, TIAN Hui-wen, ZONG Cheng-zhong, et al. Formulation Design and Progress of Surface Tolerant Coatings[J]. Paint & Coating Industry, 2008, 38(2): 54—58.
- [11] 阮峥,刘朝辉,邓智平,等. 环氧树脂体系功能化研究进展[J]. 装备环境工程,2015,(1):51—58.
RUAN Zheng, LIU Zhao-hui, DENG Zhi-ping, et al. Research Progress in Functionalization of Epoxy Resin Systems [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, (1): 51—58.
- [12] 张琳,王振尧,赵春英,等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程,2014,11(1):1—6.
ZHENG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 1—6.
- [13] GB/T 10587—2006,盐雾试验箱技术[S].
GB/T 10587—2006, Specifications for Salt Mist Testing Chambers[S].
- [14] 鲍戈拉德 И. Я. 海船的腐蚀与防护[M]. 王曰义,杜桂枝,译. 北京:国防工业出版社,1983.
Б О Г А П А Д И Я. Corrosion and Protection of Ship in (下转第 88 页)

- 2003.
- WANG Xue-hua. Natural Environmental Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [4] GJB 150.10A—2009, 军用装备实验室环境试验方法, 第10部分: 霉菌试验[S].
- GJB 150.10A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 10: Fungus Test[S].
- [5] 金文. 合成润滑油的市场需求及开发情况[J]. 石油知识, 2014(4): 24—25.
- JIN Wen. Market Demand and Development of Synthetic Lubricants[J]. Petroleum Knowledge, 2014(4): 24—25.
- [6] 于唯, 董元虎, 贾文, 等. 复合锂基润滑脂实验室制备工艺研究[J]. 润滑与密封, 2013(1): 92—95.
- YU Wei, DONG Yuan-hu, JIA Wen, et al. Study on the Processing Technology of Complex Lithium Grease in Laboratory[J]. Lubrication Engineering, 2013(1): 92—95.
- [7] 夏越美, 傅耘. 电子产品常用有机涂层防霉特性研究[J]. 装备环境工程, 2007, 2: 32—35.
- XIA Yue-mei, FU Yun. Mould Proofing Characteristic of Common Organic Coatings in Electronics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 2: 32—35.
- [8] 夏玲玲, 李明明, 李亭亭, 等. Zn-Ni合金电镀、钝化工艺及镀层性能[J]. 材料保护, 2013(8): 44—46.
- XIA Ling-ling, LI Ming-ming, LI Ting-ting, et al. Plating, Passivation Process and Properties of Zn-Ni Alloy[J]. Materials Protection, 2013(8): 44—46.
- [9] 宣卫芳, 胥泽奇, 肖敏, 等. 装备与自然环境试验·基础篇[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min, et al. Equipment and Natural Environmental Test · Basic Course[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [10] 张秀, 龙晋明, 裴和中, 等. 一种碱性电镀锌镍合金镀层的抗腐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2013(2): 127—129.
- ZHANG Xiu, LONG Jin-ming, PEI He-zhong, et al. Study on Corrosion Resistance of Alkaline Zinc-nickel Alloy Plating[J]. Hot Working Technology, 2013(2): 127—129.
- [11] 孔水龙, 楼白杨, 李培华, 等. 铝合金阳极氧化膜的耐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2012(10): 157—158.
- KONG Shui-long, LOU Bai-yang, LI Pei-hua, et al. Study on Corrosion Behavior of Anodic Oxidation Coating on Al Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012(10): 157—158.
- [12] 孙志华, 章妮, 蔡建平, 等. 7B04铝合金的一种阳极化膜层电化学性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 281—284.
- SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, et al. Electrochemical Behavior of an Anodic Oxidation Film Aluminum Alloy 7B04[J]. Corrosion Science And Protection Technology, 2009, 21(3): 281—284.
- [13] 周赞, 宣天鹏, 汪亮, 等. 铝合金阳极氧化膜的封闭方法[J]. 电镀与精饰, 2011(4): 14—17.
- ZHOU Yun, XUAN Tian-peng, WANG Liang, et al. Pore Sealing Methods for Anodic Oxidation Film of Aluminum Alloy[J]. Plating & Finishing, 2011(4): 14—17.
- [14] 谭生, 郭军红, 崔锦峰, 等. 抗菌涂料的研究现状及发展趋势[J]. 中国涂料, 2011(2): 16—19.
- TAN Sheng, GUO Jun-hong, CUI Jin-feng, et al. Research Status and Development Trend of Antibacterial Coatings[J]. China Coatings, 2011(2): 16—19.

(上接第81页)

- Marine[M]. WANG Yue-yi, DU Gui-zhi, Translate. Beijing: National Defence Industry Press, 1983.
- [15] AHMAD Ivan Karayan, JAVIER Esquivel Guerrero, HOME-RO Castaneda. Single-boss Crevice Former for Studying Crevice Corrosion of UNS S32003 in Chloride-containing Solution at High Temperature[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 544—552.
- [16] 陈云, 药宁娜, 陈新, 等. 电化学阻抗谱评价输电铁塔防护涂层配套性能[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(9): 735—738.
- CHEN Yun, YAO Ning-na, CHEN Xin, et al. Evaluation of Protective Coating Systems for Transmission Tower by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(9): 735—738.