

中空夹层混凝土电杆用高强耐候钢 腐蚀行为研究

黄 耀¹, 朱彬荣¹, 李 峰², 李辛庚³, 闫凤洁³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国家电网公司, 北京 100031; 3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 电工新材料技术联合实验室(山东), 山东 济南 250001)

摘 要: 使用室内加速腐蚀试验、XRD 分析、电化学方法等测试方法研究了 AYNH 420、SQNH 420 两种耐候钢的腐蚀行为。使用失重测试的方法确定了两种试验钢的腐蚀速率, 研究了试验钢的腐蚀动力学; 通过对耐候钢锈层微观形貌、结构的表征, 确定了两种钢锈层的成分和结构; 并使用动电位极化曲线和交流阻抗谱的方法对耐候钢的腐蚀机制进行了探索。结果表明: 同等条件下, SQNH 420 的腐蚀速率低于 AYNH 420; 耐候钢的主要锈层产物是 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ 等。锈层的组织结构分为内外两层, 能起到保护作用的是附着性好, 结构致密的内层。随着腐蚀时间的延长, 腐蚀产物的增多, 耐候钢的腐蚀倾向降低, 电极反应由电极控制向扩散控制转变。

关键词: 耐候钢; 中空夹层混凝土电杆; 腐蚀行为; 腐蚀产物; 电极反应

中图分类号: TF76, TU375 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)04-0149-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Corrosion behavior of high strength weathering steel for concrete pole

Huang Yao¹, Zhu Binrong¹, Li Feng², Li Xingeng³, Yan Fengjie³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Corporation Joint Laboratory of Advanced Electrical Engineering Materials (Shandong), State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250001, Shangdong, China)

Abstract: The corrosion behavior of two weathering steels, AYNH 420 and SQNH 420, was studied by using indoor accelerated corrosion tests, XRD analysis, and electrochemical methods. Weightlessness test was used to determine the corrosion rate of the two steels, and the corrosion kinetics of tow steels was studied. The micromorphology and structure of the corrosion products were characterized. Moreover, the corrosion mechanism of tested steels was studied by potentiodynamic polarization and AC impedance spectroscopy. The results indicate that under the same conditions, the corrosion rate of SQNH 420 is lower than that of AYNH 420. The compositions of corrosion products were Fe_3O_4 , $\alpha\text{-FeOOH}$, $\beta\text{-FeOOH}$ and $\gamma\text{-FeOOH}$, etc. There are two layers in corrosion products, and the inner layer with good adhesion and compact structure plays a protective role. In addition, as the corrosion time increases, the corrosion products increase, and the corrosion tendency of two steels decreases, and the electrode reaction changes from electrode control to diffusion control.

Key words: weathering steel, concrete pole, corrosion behavior, corrosion products, electrode reaction

收稿日期: 2020-10-26

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(复合高强混凝土电杆开发与应用, GCB17201900124)。

作者简介: 黄耀(1985-), 男, 湖北孝感人, 博士, 高级工程师, 长期从事电网金属材料研发、应用及腐蚀防护, E-mail: tao-hua-daozhu@163.com。

0 引言

近年来,随着我国城市用电负荷的迅速增长,传统的钢筋混凝土电杆已不能满足部分线路承载能力的要求,且其自重比较大,增加了运输、起吊、组装的难度和工程量;常规角钢铁塔根开较大、占地较多、而且影响城市美观;钢管杆虽重量轻,但其稳定问题突出,且其造价相对较高。在市区新建输电线路时,如果采用传统复合高强中空夹层钢管混凝土电杆,需现场浇注混凝土,存在着费时、费力、效率不高、环境污染等缺点。在此背景下,为了能够较好地解决这种矛盾,基于钢与混凝土两种不同材料的受力特性,提出了一种新型复合高强混凝土电杆—中空夹层轻质高强钢混凝土电杆,其具有体形小、承载力高、刚度大、塑性韧性好、抗震性能好、耐疲劳、耐冲击、结构连接简单、线路走廊占地面积小等优点^[1-10]。

中空夹层轻质高强钢混凝土电杆均需镀锌,镀锌工序带来水、气和土壤污染,且镀锌占杆塔本体成本近 25%,后期需高空防腐维护,而耐候钢作为一种耐大气腐蚀低合金钢,已被广泛应用于铁路、桥梁、铁塔等领域,可免去酸洗、镀锌和钝化等环境

污染工序,实现高强钢混凝土电杆自身防腐免维护,其全寿命周期成本低于镀锌杆塔^[5-15]。

中国电科院联合上下游企业,从耐候钢种研发、成套设计技术、关键加工技术和腐蚀评价体系 4 个方面开展了系统研究,形成了环保型架空输电线路耐候钢杆塔成套技术,并实现了工程应用。为首次将耐候钢技术应用到中空夹层高强钢混凝土电杆中,需选用腐蚀性能优异的耐候钢种,掌握选用的耐候钢种微观锈层形貌、腐蚀热力学特性,为后续中空夹层高强耐候钢混凝土电杆易腐蚀节点的防腐设计和辅助稳定剂的研发,提供理论依据。

1 试验材料及方法

表 1 为输电铁塔用耐候钢化学成分,其中, SQNH 420 为中国电科院研发的架空输电线路杆塔用新型低 P 耐候钢种,因其 P 含量控制低,具有高强高韧的特点,试样样品为 8 mm 热轧板材。AYNH 420 为国内某钢厂研发的新型耐候钢,主要应用在桥梁和建筑领域,试样样品为 8 mm 热轧板材。SQNH 420 和 AYNH 420 经性能检测,满足《GB/T 4171—2008 耐候结构钢》要求。

表 1 输电铁塔用耐候钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of weathering steel for transmission tower

牌号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	N	Alt
SQNH 420	0.05	0.29	0.61	≤0.002	≤0.01	0.39	0.50	0.38	0.034	≤0.003 0	0.041
AYNH 420	0.07	0.31	1.03	≤0.005	≤0.02	0.50	0.14	0.30	0.020	≤0.006 0	0.040

采用周期浸润加速腐蚀的方法,对两种耐候钢腐蚀动力学规律进行分析。对经历不同周期浸润试验后的两种耐候钢,去除其腐蚀产物,利用失重法计算其腐蚀速率。周期浸润试验根据 GB/T 19746—2005《金属和合金的腐蚀盐溶液周浸试验》进行,加速腐蚀试验仪器为 GDJS/QP—1200 型周浸试验箱,试验溶液为浓度为 35 g/L±1 g/L 的 NaCl 溶液,试验温度为 45 ℃,溶液 pH 值为 6.0~7.0,循环周期为 60 min,其中浸润时间为 12 min±1.5 min,试验后将试样表面锈层除去,计算试样腐蚀速率。周期浸润的试验周期为 24、72、120、168、240、288 h。SQNH 420 耐候钢所用试样尺寸为 60 mm×40 mm×5 mm,AYNH 420 耐候钢所用试样尺寸为 60 mm×40 mm×7 mm。每组试验取 3 个平行试样。

为观察不同试验周期下致密腐蚀产物的微观形貌,在试样制备时,先采用超声波清洗试样表面,使外层较疏松的腐蚀产物膜随着超声波的震动而脱落,仅保存内部较为致密而不易脱落的腐蚀产物膜,然后利用电子扫描显微镜(SEM)对带有腐蚀产物膜的试样进行观察。

利用 X 射线衍射仪进行衍射花样测试,测试所采用靶材为 Cu 靶,采用连续扫描方法,扫描速度为 5°/min,扫描范围为 3°~90°。采用 Jade 软件对测试结果进行定性分析,从而得到腐蚀产物物相组成。

电化学测试根据 GB/T 24196—2009《金属和合金的腐蚀电化学试验方法恒电位和动电位极化测量导则》进行。采用 Gamry1000 电化学工作站进行电化学测试。试验采用三电极体系,试样为工作电极,

铂片为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极。试验溶液为浓度为 $35 \text{ g/L} \pm 1 \text{ g/L}$ 的 NaCl 溶液,试验温度为 45°C 。测试前先将三电极体系在测试溶液在静置 15 min ,以获得稳定的电位。电化学阻抗测试起始频率为 $10\,000 \text{ Hz}$,终止频率为 0.01 Hz ,测试振幅为 10 mV 。

2 试验结果及分析

2.1 耐候钢腐蚀速率

图1为两种耐候钢腐蚀速率测试结果。从图1可以看出,随着试验周期的延长,两种材料腐蚀速率均呈现先增大后减小的趋势,浸泡 168 h 时,两种腐蚀速率均达到最大值,随后开始降低。并且,腐蚀 168 h 时,AYNH 420 耐候钢比 SQNH 420 耐候钢腐蚀速率高了 26.86% 。同等条件下对比两种耐候钢, SQNH 420 的腐蚀速率低于 AYNH 420。结合 SQNH 420 试样经周期浸泡后的宏观形貌(图2)可知,腐蚀 24 h 后,试样表面局部区域开始出现腐蚀产物,仍有部分基体裸露在外,因此腐蚀速率持续上升;腐蚀至 168 h 后,试样表面腐蚀产物层覆盖整个试样表面,且光洁平整,腐蚀产物层对腐蚀性离子产生一定的阻碍作用,隔绝基体于电解质溶液发生反应,减弱了腐蚀的进行,即对基体起到一定的保护作用,因此,腐蚀速率逐渐降低。

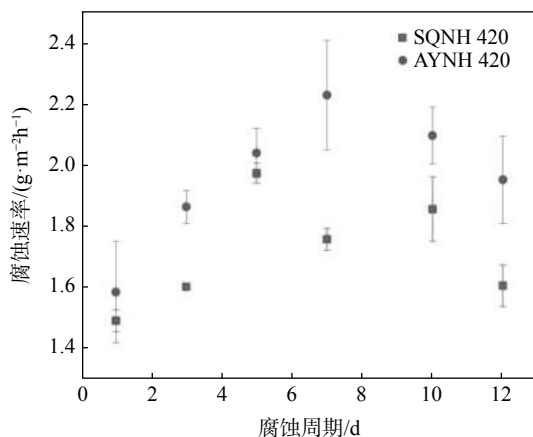


图1 两种耐候钢室内加速腐蚀速率

Fig. 1 Accelerated corrosion rate of two weathering steels

2.2 耐候钢挂片试样锈层微观结构及 XRD 分析

耐候钢在大气腐蚀初期,表面形成黄褐色的锈层,这与普通碳钢相似,但随着时间的延长,黄褐色锈层颜色逐渐加深形成红褐色的致密锈层,锈层分为外锈层与内锈层,外锈层疏松易脱落,而内锈层逐

渐致密,隔绝空气与水,形成防腐保护层,使得耐候钢的腐蚀速率逐渐降低而耐蚀。

SQNH 420 耐候钢挂片试样试验结果如图2所示。由图2可知,经 24 h 周期浸润试验后, SQNH 420 耐候钢试样表面开始生成黄褐色的腐蚀产物,但还有部分基体裸露在外;腐蚀 72 h 后,腐蚀产物覆盖至整个试样表面,但腐蚀产物不平整,凹凸不平;腐蚀 120 h 后,腐蚀产物均匀覆盖至整个试样表面;腐蚀 168 h 后,黄褐色的腐蚀产物逐渐被红褐色的腐蚀产物所取代,试样表面出现沟壑;腐蚀 240 h 后,试样表面出现鼓泡区;腐蚀 288 h 后,腐蚀产物层较厚,表面的鼓泡区域有所扩展,部分腐蚀产物层出现脱落现象。由酸洗后试样照片可以看出,腐蚀 24 h 后,只在试样表面局部区域生成腐蚀产物;腐蚀 168 h 后,去除腐蚀产物后试样表面仍较为平整;腐蚀 240 h 后,试样表面出现肉眼可见的蚀坑,其局部放大图如图3(a)所示;腐蚀 288 h 后,试样表面的蚀坑直径较大,其局部放大图如图3(b)所示。

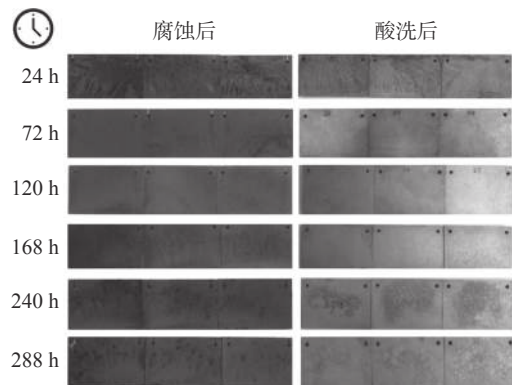


图2 SQNH 420 耐候钢周期浸润腐蚀试样宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of SQNH 420 weathering steel samples after periodic infiltration corrosion test

采用扫描电子显微镜观察腐蚀产物的形貌,如图4、5所示,由图4、5可知,两种耐候钢腐蚀产物层均比较平整致密,和基体具有很好的结合力和附着性,在长时间的腐蚀过程中不易脱落,能很好地阻止氧气和水分等腐蚀介质进入基体,在一定程度上能很好地保护基体,不易被腐蚀。SQNH 420 耐候钢腐蚀产物层较为不平整,且出现裂纹,腐蚀 240 h 后,腐蚀产物分布不均匀,腐蚀 288 h 后,腐蚀产物呈菜花状,相比之下,AYNH 420 耐候钢表面腐蚀产物分布较为均匀,且无明显裂缝,但是结合图1中的腐蚀速率变化规律可知, SQNH 420 腐蚀速率低于 AYNH 420,这主要是由锈层的结构形貌决定的,

SQNH 420 的锈层形貌虽然在前期有明显裂纹,但其锈层形貌均更为细小,裂纹虽然在一定程度上加

速了腐蚀,但同时也加速了致密锈层的生成,因此,总的来说,腐蚀速率相对偏低。

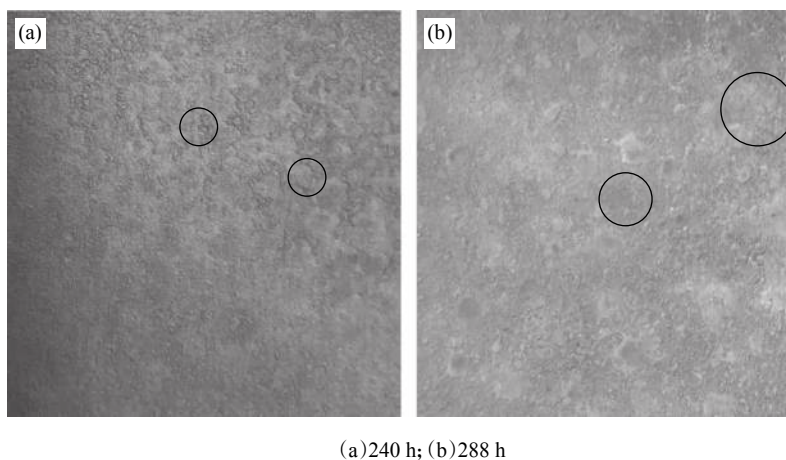


图 3 SQNH 420 耐候钢酸洗后局部放大
Fig. 3 Partial enlarged drawing of SQNH 420 weathering steel after pickling

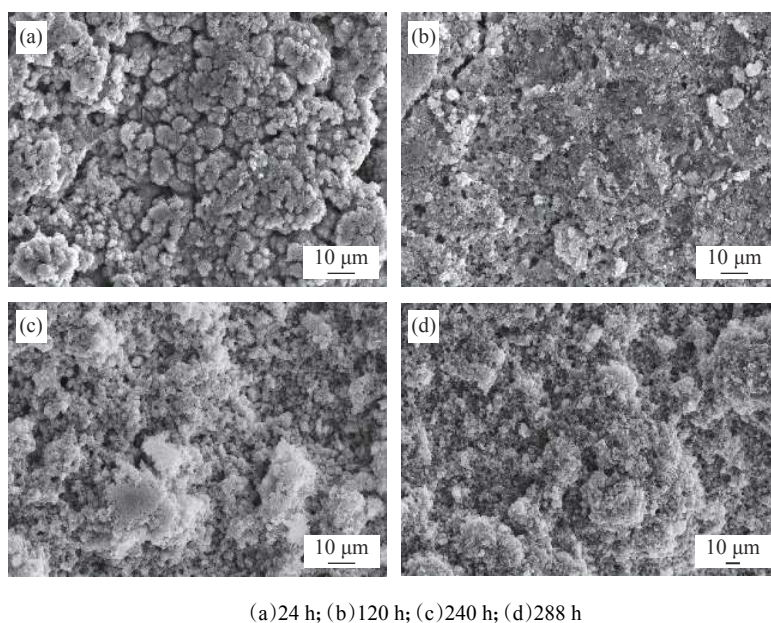


图 4 SQNH 420 腐蚀产物 SEM 图像
Fig. 4 SEM image of SQNH 420 corrosion product

2.3 耐候钢腐蚀产物成分分析

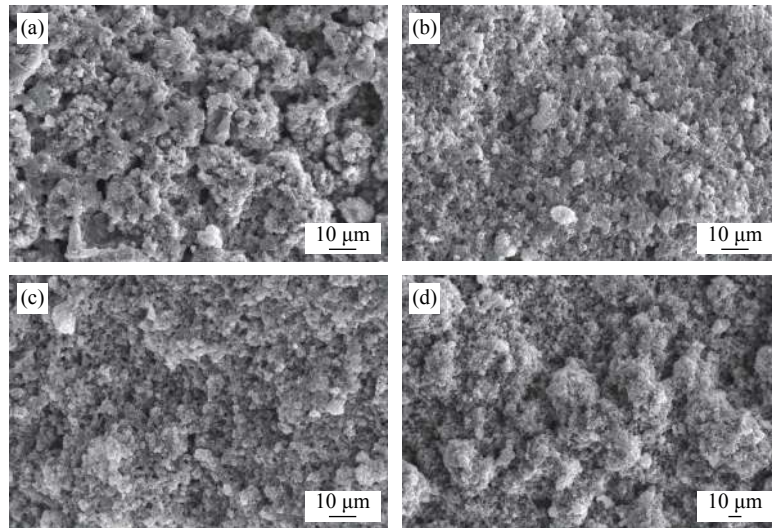
耐候钢具有良好的耐大气腐蚀性能,主要原因是经过长期大气腐蚀,在其表面上形成了稳定致密的保护性锈层,阻碍了腐蚀介质的进入,耐候钢的耐蚀性能与其锈层的结构、成分密切相关。大量研究表明,长期暴露在大气环境中的钢铁,锈层由疏松外锈层与致密内锈层构成^[16-26]。许多研究发现,碳钢和耐候钢的腐蚀产物组成基本一样,主要由 α -FeOOH、 γ -FeOOH、 Fe_3O_4 及一些非晶态腐蚀产物 ($(\text{FeO}_x(\text{OH})_{3-2x}, x=0 \sim 1)$) 组成。许多研究者认为耐

候钢腐蚀内锈层产物主要为 α -FeOOH、 Fe_3O_4 和无定形态的羟基氧化物,外锈层产物主要为 β -FeOOH 及 γ -FeOOH。腐蚀锈层对钢基体的保护性强弱可以用锈层保护性系数 λ 来描述,即由稳定的 α -FeOOH 相和具有活性的 γ -FeOOH 相在锈层产物中的比率 α/γ 来表示。因此,总的来说,随着 α -FeOOH 和 γ -FeOOH 含量的增加,表面耐候钢锈层耐腐蚀能力提高^[8-9]。

利用 XRD 对两种耐候钢经周期浸润 24、120、240、288 h 后的腐蚀产物物相进行分析,所得衍射

花样如图 6 所示。经分析得知两种耐候钢的主要锈层产物有 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ 等。由图 6 可知, 随着室内加速腐蚀的延长, 其腐蚀产物逐渐增加, 如 SQNH 420 耐候钢, 在腐蚀 24 h 时, 其主要腐蚀产物为 $\gamma\text{-FeOOH}$; 当腐蚀 120 h 时, 其主要腐蚀产物为 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 Fe_3O_4 和 $\beta\text{-FeOOH}$; 当腐蚀至 240 h 和 288 h 时, 其主要腐蚀产物为

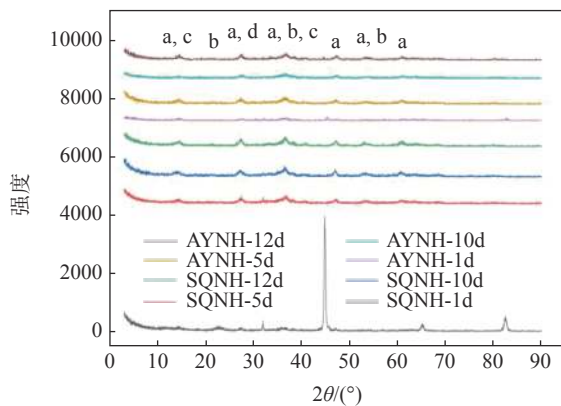
Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ 等, 其 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的波峰明显增强, 说明稳定化锈层逐渐增加。相比较而言, AYNH 420 耐候钢的产物, 其在相同腐蚀周期下, 腐蚀产物的波峰强度均低于 SQNH 420, 这与图 1 中两种耐候钢的腐蚀变化规律一致, 也从腐蚀产物角度解释了腐蚀速率变化规律。



(a) 24 h; (b) 120 h; (c) 240 h; (d) 288 h

图 5 AYNH 420 腐蚀产物 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of AYNH 420 corrosion product



a: $\gamma\text{-FeOOH}$; b: $\alpha\text{-FeOOH}$; c: Fe_3O_4 ; d: $\beta\text{-FeOOH}$

图 6 两种耐候钢在不同浸润周期下腐蚀产物 XRD 衍射花样图谱

Fig. 6 XRD patterns of corrosion products of two weathering steels under different wetting cycles

2.4 耐候钢电化学测试结果

为进一步分析耐候钢的腐蚀动力特性, 对 SQNH420 进行了电化学阻抗测试试验。图 7 为耐候钢经 24、72、120 h 周期浸润后的极化曲线, 由图 7 可知, 经周期浸润后, 耐候钢阳极反应均呈现出活化

溶解特性, 而阴极反应呈现出较为明显的吸氧反应特征。随着腐蚀时间的延长, 耐候钢的自腐蚀电位正移, 自腐蚀电流密度有所降低, 表明当耐候钢表面有腐蚀产物生成后, 耐候钢的腐蚀倾向有所降低。

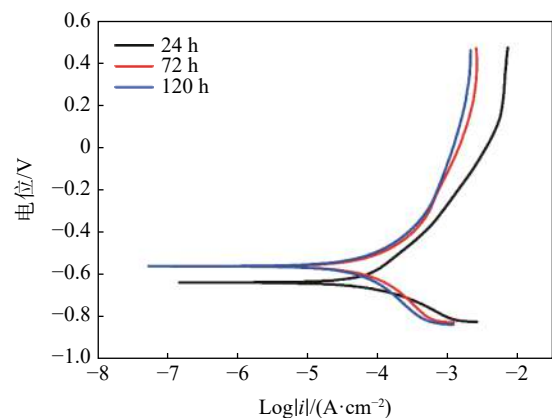


图 7 SQNH 420 极化曲线测试结果

Fig. 7 Polarization curve test results of SQNH 420

电化学阻抗测试是以小幅度正弦交流信号扰动电解池, 通过观察体系在稳态时对抗扰动的信号响应来研究电极反应过程及测试表征电极界面信息, 来判断材料耐腐蚀性能的一种电化学研究方法。图 8

为耐候钢经 24、72 h 和 120 h 周期浸润后的电化学阻抗谱。如图 8 所示,经周期浸润腐蚀试验后,耐候钢的 Nyquist 图出现容抗弧。随着腐蚀时间的延长,耐候钢表面的腐蚀产物膜逐渐增厚。腐蚀 120 h 后,耐候钢的容抗弧明显变大,呈现出一定的扩散控制特征,表明随着腐蚀产物膜厚度的增加,腐蚀介质进出腐蚀产物膜受阻,腐蚀控制过程向扩散控制转变。

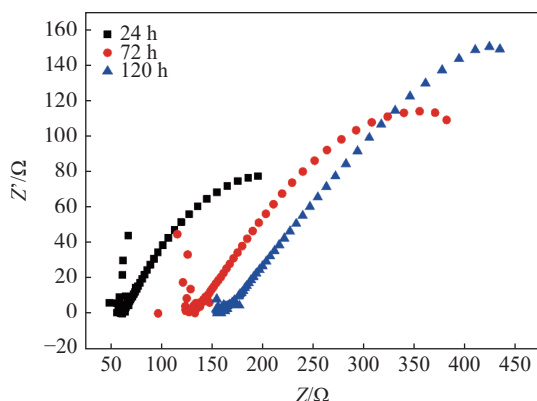


图 8 SQNH 420 电化学阻抗测试结果

Fig. 8 Electrochemical impedance test results of SQNH 420

3 结论

1) 采用周期浸润试验方法时, SQNH 420 耐候钢挂片试样腐蚀 120 h 后, 其腐蚀速率达到最大值 $1.97 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, AYNH 420 耐候钢挂片试样腐蚀 168 h 后, 其腐蚀速率达到最大值 $2.22 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 同等条件下, AYNH 420 耐候钢挂片试样的腐蚀速率较高于 SQNH 420 耐候钢挂片试样。

2) 采用周期浸润试验方法时, 耐候钢的腐蚀产物均为 $\gamma\text{-FeOOH}$ 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 Fe_3O_4 和 $\beta\text{-FeOOH}$ 。SQNH 420 耐候钢腐蚀产物在前期虽有裂纹, 但其锈层形貌均更为细小, 且 $\alpha\text{-FeOOH}$ 相含量较多, 其耐腐蚀性能优于 AYNH 420 耐候钢。

3) SQNH 420 耐候钢极化曲线表明随腐蚀时间延长, 其自腐蚀电位正移, 电流密度降低, 腐蚀倾向降低, 且 72 h 后, 容抗弧明显, 腐蚀控制由极化控制转向扩散控制。

参考文献

- [1] Xie Zhen. Application prospect of weathering steel in transmission tower[J]. Special Structure, 2014, (4): 29–33.
(谢震. 展望耐候钢在输电杆塔中的应用[J]. 特种结构, 2014, (4): 29–33.)
- [2] Li Maohua, Yang Jinbo, Liu Siyuan. The latest progress of materials for transmission tower structure[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2011, (S1): 191–195.
(李茂华, 杨靖波, 刘思远. 输电杆塔结构用材料最新进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, (S1): 191–195.)
- [3] Prabha S L, Dattatreya J K, Neelamegam M, *et al.* Study on stress-strain properties of reactive powder concrete under uniaxial compression[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(11): 6408–6416.
- [4] Xing Haijun, Zhang Zifu, Qi Jinming, *et al.* Characteristics and application of ultra-high performance concrete poles: Interpretation of China electricity Union standard "ultra high performance concrete poles"[J]. China Electric Power Enterprise Management, 2017, (21): 54–55.
(邢海军, 张子富, 祁锦明, 等. 超高性能混凝土电杆的特点和应用——中电联标准《超高性能混凝土电杆》的解读[J]. 中国电力企业管理, 2017, (21): 54–55.)
- [5] Xing Haijun, Yue Ping, Wang Cancan, *et al.* Study on connection performance of D-type composite pipe[J]. China Electric Power, 2015, 48(3): 70–75.
(邢海军, 岳平, 王灿灿, 等. D型复合材料管连接性能研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 70–75.)
- [6] Wang Xiantie, Zhou Chao, Jia Guiqiang, *et al.* Experimental study on seismic performance of thin steel plate wall structure with inner middle opening in concrete-filled square steel tubular column frame[J]. Journal of Building Structure, 2015, 36(8): 16–23.
(王先铁, 周超, 贾贵强, 等. 方钢管混凝土柱框架内置中间开洞薄钢板墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 16–23.)
- [7] Yang Fengli, Han Junke, Yang Jinbo, *et al.* Experimental study on corrosion resistance of weathering steel joints for transmission towers[J]. Power Construction, 2008, (9): 23–28.
(杨风利, 韩军科, 杨靖波, 等. 输电铁塔用耐候钢节点耐腐蚀性能试验研究[J]. 电力建设, 2008, (9): 23–28.)
- [8] Yang Jinbo, Li Maohua, Yang Fengli, *et al.* New progress in the study of transmission tower structure of China[J]. Power Grid Technology, 2008, (22): 77–83.
(杨靖波, 李茂华, 杨风利, 等. 我国输电线路杆塔结构研究新进展[J]. 电网技术, 2008, (22): 77–83.)

- [9] Morcillo M, Díaz I, Chico B, *et al.* Weathering steels: From empirical development to scientific design: A review[J]. *Corrosion Science*, 2014, 83: 6–31.
- [10] Ge Zhaojun, Zhang Qiang, Huang Yao, *et al.* Corrosion behavior of weatherproof steel for transmission tower in different atmospheric environment[J]. *China Electric Power*, 2016, 49(12): 8–13.
(葛兆军, 张强, 黄耀, 等. 输电铁塔耐候钢在不同大气环境下的腐蚀行为[J]. *中国电力*, 2016, 49(12): 8–13.)
- [11] Luo Yihua, Huang Yao, Yang Xuefeng, *et al.* Effect of P element on mechanical properties and corrosion resistance of weathering high strength steel tower[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(1): 142–147.
(罗义华, 黄耀, 杨雪锋, 等. P元素对耐候高强度钢铁塔力学性能和腐蚀性能的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(1): 142–147.)
- [12] Dillmann P, Mazaudier F, Hœrlé S. Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. Rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion[J]. *Corrosion Science*, 2004, 46(6): 1401–1429.
- [13] He Kun, Wang Li. Corrosion behavior of 316ng stainless steel in high purity water[J]. *Corrosion and Protection*, 2016, 37(8): 631–634.
(何琨, 王理. 316NG不锈钢在高纯水环境中的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2016, 37(8): 631–634.)
- [14] Fan Liyan, Zhong Tingzhi, Zou Ke, *et al.* Review of stainless steel and its intergranular corrosion[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2013, (6): 176–177.
(范丽颜, 钟廷志, 邹克, 等. 不锈钢及其晶间腐蚀综述[J]. *化学工程与装备*, 2013, (6): 176–177.)
- [15] Chen Y Y, Tzeng H J, Wei L I, *et al.* Corrosion resistance and mechanical properties of low-alloy steels under atmospheric conditions[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(4): 1001–1021.
- [16] Yamashita M, Shimizu T, Konishi H, *et al.* Structure and protective performance of atmospheric corrosion product of Fe–Cr alloy film analyzed by Mössbauer spectroscopy and with synchrotron radiation X-rays[J]. *Corrosion Science*, 2003, 45(2): 381–394.
- [17] Asami K, Kikuchi M. In-depth distribution of rusts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal–industrial atmosphere for 17 years[J]. *Corrosion Science*, 2003, 45(11): 2671–2688.
- [18] Yamashita M, Miyuki H, Matsuda Y, *et al.* The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century[J]. *Corrosion Science*, 1994, 36(2): 283–299.
- [19] Wang J, Wang Z Y, Ke W. A study of the evolution of rust on weathering steel submitted to the Qinghai salt lake atmospheric corrosion[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 139(1): 225–232.
- [20] Zhang Quancheng, Wang Jianjun, Wu Jianshen, *et al.* Effect of corrosion resistance of weathering steel on corrosion resistance of weathering steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, (2): 193–196.
(张全成, 王建军, 吴建生, 等. 锈层离子选择性对耐候钢抗海洋性大气腐蚀性能的影响[J]. *金属学报*, 2001, (2): 193–196.)
- [21] Diaz I, Cano H, De La Fuente D, *et al.* Atmospheric corrosion of Ni-advanced weathering steels in marine atmospheres of moderate salinity[J]. *Corrosion Science*, 2013, 76: 348–360.
- [22] Qian Y, Ma C, Niu D, *et al.* Influence of alloyed chromium on the atmospheric corrosion resistance of weathering steels[J]. *Corrosion Science*, 2013, 74: 424–429.
- [23] Zhou Y, Chen J, Liu Z. Corrosion behavior of rusted 550 MPa grade offshore platform steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20(3): 66–73.
- [24] Chen A, Xu J, Li R, *et al.* Corrosion resistance of high performance weathering steel for bridge building applications[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19(6): 59–63.
- [25] Chiavari C, Bernardi E, Martini C, *et al.* Atmospheric corrosion of Cor-Ten steel with different surface finish: Accelerated ageing and metal release[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 136(2-3): 477–486.
- [26] Song Liying, Shi Hao, Wang Wei, *et al.* Study on the influence of corrosion product properties on metal atmospheric corrosion process[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(10): 8–13.
(宋立英, 石浩, 王巍, 等. 腐蚀产物性质对金属大气腐蚀过程影响的研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(10): 8–13.)