# 安徽省内电网设备常用钢材大气腐蚀试验研究

张洁',张健²,陈国宏',魏鑫³,李宸宇³,汤文明³

(1.国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,合肥 230601;2.安徽新力电业科技咨询有限责任公司, 合肥 230601;3.合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

摘要:目的 针对在安徽省内 H1、R1 及 T28 三个站点自然环境下暴露 1 年后的 Q235、40Cr 及镀锌钢,开 展腐蚀速率、腐蚀产物及腐蚀层形貌的研究,探讨其大气腐蚀机理。方法 采用称量法计算腐蚀质量损失, 通过光学及电子显微镜法观察腐蚀层表面及截面形貌,用电子能谱仪测试微区成分,用 X-射线衍射法测试 腐蚀层的物相构成。结果 Q235、40Cr 的大气腐蚀产物为 FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe(OH)<sub>3</sub>及 FeSO<sub>4</sub>,镀锌钢则为 ZnO 及 ZnSO<sub>4</sub>。Q235、40Cr 腐蚀层表面分布着绒球状的 α-FeOOH 及片状的 γ-FeOOH,镀锌钢大气腐蚀层 致密,但 T28 站点镀锌钢表面形成点状的腐蚀坑,腐蚀防护能力降低。结论 同一站点三种钢腐蚀速率大小 次序为 40Cr>Q235>镀锌钢,站点 R1 钢的腐蚀速率最大,站点 T28 的腐蚀速率最小。 关键词: 电网设备钢材;大气腐蚀;腐蚀速率;腐蚀产物;显微结构;腐蚀机理 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.018 中图分类号: TG172.3 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2020)07-0098-07

# Atmospheric Corrosion of Steels Commonly-used in Power Grid Equipment in Anhui Province

ZHANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, CHEN Guo-hong<sup>1</sup>, WEI Xin<sup>3</sup>, LI Chen-yu<sup>3</sup>, TANG Wen-ming<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Anhui Electric Power Co. Ltd, State Grid, Hefei 230601, China; 2. Anhui Xinli Electric Technology Consulting Co. Ltd, Hefei 230601, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the corrosion rates, corrosion products and morphologies of the corrosion layers Q235, 40Cr and the galvanized steel exposed for 1 year in three sites of H1, R1 and T28 of Anhui province and discuss the atmospheric corrosion mechanism. The weighing method was used to test the weight loss of the steel samples. Optical and electronic scanning microscopes were used to observe the planar and cross-sectional views of the corrosion layers. An energy disperse spectroscopy and an X-ray diffractometer were employed to test the micro-zone compositions and the phases composition of the corrosion layers, respectively. The atmospheric corrosion products of the Q235 and 40Cr were FeOOH, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe (OH)<sub>3</sub> and FeSO<sub>4</sub>, and those of the galvanized steel were ZnO and ZnSO<sub>4</sub>. Wool ball-like  $\alpha$ -FeOOH and flake-like  $\gamma$ -FeOOH can be observed on the surfaces of the corrosion layers of Q235 and 40Cr. The corrosion layer of the galvanized steel was dense; however, etch pits existed on the corrosion layer of the galvanized steel at site T28, which degraded the corrosion protection ability of the

作者简介:张洁(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电网设备的腐蚀与防护。

Biography: ZHANG Jie (1989-), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection of grid equipment.

收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-01-15

Received: 2019-12-30; Revised: 2020-01-15

基金项目: 国网科技攻关项目(B11205190019)

Fund: Science and Technology Research Project, State Grid, China (B11205190019)

corrosion layer. The sequence of the corrosion rate of the three steels is 40Cr > Q235 > the galvanized steel. The steels at site R1 have the highest corrosion rate, and those at site T28 have the lowest corrosion rate.

**KEY WORDS:** grid equipment steel; atmospheric corrosion; corrosion rate; corrosion product; microstructure; corrosion mechanism

我国已建成世界上规模最大、最复杂的电网,覆 盖区域广阔,所处的自然环境复杂多样,既有高温高 湿的沿海地区,又面临部分工业快速发展地区所带来 的重工业大气污染环境[1-3]。电网设备的大气腐蚀是 制约其使用寿命,甚至导致线路故障的重要原因之 一。电网设备及材料的大气腐蚀具有明显的地域差 异,应当有针对性地选材或采取相应的防护措施<sup>[4]</sup>。 目前,安徽省乃至全国不同地点电网设备相关材料的 大气腐蚀数据缺乏,难以建立输变电材料腐蚀选型及 防腐设计的标准,往往导致电网设备运行时的腐蚀问 题突出,后期防腐维护工作和成本大幅增加,严重影 响输变电安全。因此,国网安徽省电力有限公司电力 科学研究院负责开展安徽省国网输变电工程大气腐 蚀地图的建设工作,全面掌握安徽省输变电工程的大 气环境腐蚀性及典型材料的腐蚀数据,为不同大气环 境下的输变电工程防腐设计及选材提供支持,提高电 网安全和防腐寿命。

文中根据 GB/T 700—2006《碳素结构钢》、GB/T 3077—2015《合金结构钢》及 DL/T 1453—2015《输 电线路铁塔防腐蚀保护涂装》等标准要求,采用"曝 露"法<sup>[5]</sup>,分别选取 Q235、40Cr 及镀锌薄钢板三种电 网设备常用钢材,在安徽省内三个不同站点的自然环 境下大气腐蚀1年后,开展腐蚀质量损失、腐蚀产物 类型及腐蚀产物层形貌结构等研究,结合不同站点的 气象条件,开展腐蚀机理研究。

#### 1 实验

选取 Q235、40Cr 及镀锌薄钢板, 裁制尺寸为 150 mm×100 mm×3 mm 的矩形试样, 采用 FA2004N 型电子天平(精度 0.1mg)称量后,分别安放在安庆 某变电站(编号 H1)、池州某变电站(编号 R1)及 淮南某特高压变电站(编号 T28)三个代表性站点, 开展大气腐蚀实验。其中,Q235、40Cr 试样表面状 态为磨光表面,粗糙度 *Ra* 为 3.2 µm; 镀锌钢试样的 基材为 Q235, 镀锌层平均厚度≥86 µm, 最小局部厚 度≥70 μm。搁置试样的框架正面朝南放置,试样与 水平面呈 45°。在自然环境下暴露 1 年(2018.5— 2019.4)后,取回试样并拍照,刷去表面疏松铁锈, 置于干燥器中 48 h 后取出,称量。基于 GB/T 16545— 2015《金属和合金的腐蚀试样上腐蚀产物的清除》, 清除试样表面腐蚀产物后,立即用蒸馏水清洗,再用 无水酒精擦拭,冷风吹干后,再称量。采用式(1) 计算试样的腐蚀速率.

 $V=3.65\times10^{3}\times(m_{0}-m_{t})/(S\cdot t\cdot\rho)$ <sup>(1)</sup>

式中: V 为腐蚀速率, mm/a;  $m_0 \ m_t$  为腐蚀前 后试样的质量, g; S 为试样的总面积, cm<sup>2</sup>; t 为腐 蚀试验时间, d;  $\rho$  为试样的密度, g/cm<sup>3</sup>。

使用 JSM-6490 型扫描电镜(SEM)观察腐蚀试 样的表面形貌,用 Oxford INCA 能谱仪(EDS)测试 其表面微区的成分。在 Q235 及 40Cr 钢腐蚀试样表 面刮取腐蚀产物,研磨成粉末后,采用 D/MAX2500V 型 X-射线衍射仪(XRD)测试腐蚀产物的物相组成, 测试参数:Cu 靶(K $\alpha$ ,波长  $\lambda$ =0.154 nm),管电压 为 20 kV,管电流为 200 mA,衍射角范围 2 $\theta$ =10°~90°, 扫描速率为 3 (°)/min。镀锌钢试样表面腐蚀程度很 低,无法刮取腐蚀产物,直接对腐蚀试样表面进行 XRD 物相测试。腐蚀试样用环氧树脂镶嵌,研磨、 抛光后,采用 MR-3000 型金相显微镜(OM)观察腐 蚀层的截面形貌。

# 2 结果与讨论

#### 2.1 腐蚀状况

由表1可见,H1、R1两个站点都位于城市工业 污染区,分居长江两岸,平均温度相当,但池州地区 空气湿度更大,NO2及SO2含量较高。淮南是我国重 要的煤电及煤化工基地,工业污染整体较为严重,T28 站点虽然位于农村,但SO2含量相当高。此外,该地 区的平均温度较安庆、池州低1℃左右,湿度及NO2 含量与安庆地区相当。

在 H1、R1 及 T28 三个站点自然环境下暴露 1 年

表 1 2018.5—2019.4 安徽省部分地区的气象参数

Tab.1 Meteorological parameters of partial districts of Annul province in May 2018 - April 2019							
地区	平均温度/℃	平均湿度/%	NO2质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	SO2质量浓度/(µg·m <sup>-3</sup> )	空气质量指数(AQI)		
安庆	16.7	76	0.733	8.8	79		
池州	16.5	81	0.774	9.9	78		
淮南	15.5	76	0.732	13.6	95		

后,三种钢试样的表面形貌如图 1 所示。Q235 表面 腐蚀层呈深褐色,40Cr 表面的腐蚀层颜色更深一些, 表面密布黑色的斑点,可见 40Cr 的腐蚀程度普遍较 Q235 严重(见图 1a、b),而镀锌钢表面颜色发暗, 呈深灰色,腐蚀层致密,腐蚀程度最低(见图 1c)。 根据 GB/T 19292.2—2018《金属和合金的腐蚀 大气 腐蚀性 第 2 部分:腐蚀等级的指导值》,对照表 2 的在 H1、R1及 T28 站点三种钢试样的平均腐蚀速率, 判定 Q235及 40Cr 钢试样在 T28 站点的大气腐蚀级 别为 C2,在 H1及 R1 站点的大气腐蚀级别为 C3; 镀锌钢试样在 T28及 H1 站点的大气腐蚀级别为 C2, 在 R1 站点的大气腐蚀级别为 C3。



a Q235

b 40Cr

c镀锌钢

图 1 三种钢大气腐蚀表面腐蚀层形貌

Fig.1 Optical morphologies of the atmospheric corrosion layers of the steels: a) Q235; b) 40Cr; c) galvanized steel

表 2 三种钢的平均腐蚀	速率
--------------	----

Tab.2Average corrosion rates of three steel samples

			μm/a
站点	Q235	40Cr	镀锌钢
H1	26.1	28.4	0.38
R1	38.6	40.9	0.79
T28	22.3	23.4	0.23

相比而言,镀锌钢的腐蚀速率是低碳钢和低合 金钢 1/50~1/100,这得益于 Zn 对 Q235 基体的阴极 保护作用以及 Zn 腐蚀产物对镀锌钢大气腐蚀的抑 制作用<sup>[6]</sup>。根据 Townsend 的研究成果,P、Si、Cr、 C、Cu、Ni、Sn 和 Mo 元素可提高钢的耐蚀性<sup>[7]</sup>。本 研究却发现,40Cr 的腐蚀速率明显高于 Q235。同样 地,谭何灵等<sup>[8]</sup>也发现,在 1.0%NaCl+0.1%NaHSO<sub>3</sub> 混合水溶液中加速干湿循环腐蚀 250 h,添加 2%Cr 的低碳低合金钢试样具有比对比件 Q420 更大的腐蚀 速率。张全成等<sup>[9]</sup>通过 SEM 研究耐候钢大气腐蚀层 发现,在腐蚀层的内层裂纹处有 Cr 元素的富集,而 在外层中合金元素的富集情况则不明显,说明在腐蚀 初期合金元素作用极不明显。但文献[8-9]对上述现象 都未给出解释。笔者认为,之所以 40Cr 耐大气腐蚀 能力低于 Q235,主要是因为其有较高的 C 含量 (40Cr: 0.37%~0.44%; Q235: ≤0.20%),因此, 在其组织中形成更多的渗碳体,与铁素体基体的界面 面积更大,电化学腐蚀更加严重,腐蚀速率更高。

根据表1的气象参数,池州地区气温高,空气湿度大,大气中CO<sub>2</sub>及SO<sub>2</sub>的浓度较高,R1站点三种钢材的腐蚀程度均最高;淮南地区大气中的SO<sub>2</sub>的浓度最高,但年平均温度最低,湿度也较低,因而,T28站点腐蚀程度最低。可见,温度、湿度可能是这三种钢试样大气腐蚀的主要原因,且在高湿条件下,SO<sub>2</sub>加速腐蚀作用更加显著<sup>[10]</sup>。

## 2.2 腐蚀层的物相分析

由图 2 可见, Q235 及 40Cr 钢试样表面腐蚀层的 物相组成基本相同, 主要由 Fe(OH)<sub>3</sub>、FeOOH 以及少 量的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (由 Fe 的水合氧化物脱水后形成)构成。 因为大气中 SO<sub>2</sub>的强腐蚀性,腐蚀层中还含有少量的 FeSO<sub>4</sub>。一般地,腐蚀产物 FeOOH 有 α、β、γ 三种 类型,其中 α-FeOOH 由 γ-FeOOH 转变而成,两者的 X-射线衍射峰大多重叠,难以分辨,因此,在图 2a、 b上统一用 FeOOH 表示。由于 β-FeOOH 只有在 CI<sup>-</sup> 环境下才能生成<sup>[11]</sup>,因此,这三个站点钢试样的腐蚀 层中均不含有 β-FeOOH。同样地,腐蚀层中的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 也是由 γ-FeOOH 转变而成<sup>[12]</sup>。镀锌钢表面腐蚀层主 要为 ZnO,考虑到大气腐蚀环境中含有 SO<sub>2</sub>,可能会 形成 ZnSO<sub>4</sub>等腐蚀产物,只是其含量很少或分布不均 匀,图 2c 的 XRD 图谱上未见其明显的衍射峰。

#### 2.3 腐蚀层形貌与结构

大气腐蚀实质上是发生在薄液膜下的电化学反 应。O235 及 40Cr 为两相组织,其中的铁素体与渗碳 体电极电位不同,构成腐蚀原电池的两极,铁素体基 体首先发生点状腐蚀,形成胞状腐蚀产物。随着腐蚀 时间的延长, 胞状腐蚀产物数量增多, 尺寸增大, 最 终形成连续的腐蚀产物层。在腐蚀层表面放大像上可 见腐蚀层表面密布着细小的绒球状突起,为棉花球状 的 α-FeOOH<sup>[13]</sup>(见图 3a、b 中 H1、R1 站点试样)。 在图 3b R1 站点试样上也观察到了片状的 γ-FeOOH<sup>[14]</sup>, 说明在钢试样的暴露试验过程中,发生了 γ-FeOOH 向 α-FeOOH 的转变,结构趋于稳定<sup>[5]</sup>,但转变不完 全。由于 T28 站点大气中 SO2 浓度明显高于 H1 及 R1 站点,试样表面液膜中 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>的浓度更高,破坏了 钢表面腐蚀层的完整性<sup>[5]</sup>,因此,T28站点钢表面的 腐蚀层局部致密度较低,棉花球状 α-FeOOH 层较为 疏松,加速了低碳钢的腐蚀(见图 3a 中 T28 站点试 样)。由于 FeSO4 是水溶性的,在腐蚀层中的残留量 低,表面元素含量的 EDS 测试只测得 Fe、O 成分, 未测得 S 的成分。





镀锌钢大气腐蚀在其表面形成致密的 ZnO 膜, 对镀锌层表面产生保护,对图 3c 中 T28 站点试样上 的点状腐蚀产物进行放大。用 EDS 测试其表面元素 成分,该片状组织含 S 的成分(见图 4)。基于文



图 3 三种钢大气腐蚀表面腐蚀层 SEM 照片 Fig.3 SEM images of the atmospheric corrosion layers of the steels: a) Q235; b) 40Cr; c) galvanized steel



图 4 T28 站点试验 SEM 照片上点 1 的 EDS 图谱 Fig.4 EDS spectrum of point 1 in SEM image of site T28

献[15-16],该片状的腐蚀产物应为 ZnSO<sub>4</sub> 及其与 ZnO 反应所得的水合物 Zn<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>。

Q235 及 40Cr 钢试样的大气腐蚀首先发生点蚀, 向钢基体内部扩散,点蚀逐渐聚集连接,形成表面腐 蚀层。表面腐蚀层厚薄不均,结构较疏松,易开裂、 脱落(见图 5a、b)。R1 站点两种钢试样的腐蚀程度 最大,腐蚀层厚度较大,T28 站点腐蚀层的均匀性最 低,尤其是该站点 40Cr 钢的腐蚀产物基本不成层。 主要是因为该站点大气中的 SO<sub>2</sub>含量最高,试样表面 液膜中 SO<sup>2</sup>-的浓度高,易形成水溶性的 FeSO<sub>4</sub>,破坏 钢表面腐蚀层的完整性<sup>[5]</sup>。H1 及 T28 站点镀锌钢表 面腐蚀产物层薄且不连续,与钢基体结合也不紧密 (见图 5c 中 H1、T28 站点试样)。R1 站点镀锌钢的 腐蚀速率较 H1 及 T28 站点试样高 2~3 倍,且腐蚀层 分布连续。

### 2.4 腐蚀机理

大气腐蚀实质上是发生在薄液膜下的电化学反应,Q235及40Cr大气腐蚀的主要腐蚀产物有Fe(OH)<sub>3</sub>、FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>及FeSO<sub>4</sub>。主要反应过程为:

阳极反应 2Fe→2Fe<sup>2+</sup>+4e

阴极反应 2H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub>+4e→4OH<sup>-</sup>

总反应 2Fe+2H<sub>2</sub>O+O<sub>2</sub>→2Fe(OH)<sub>2</sub>↓

当钢试样表面液膜溶解 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>等时, 液膜 pH 下降, 促使 Fe(OH)<sub>2</sub> 部分转变为可溶性 Fe<sup>2+</sup>, 在 O<sub>2</sub> 的 作 用 下, 继 续 发 生 反 应:  $4Fe^{2+}+6H_2O+O_2 \rightarrow$ 4FeOOH+8H<sup>+</sup>, 2Fe(OH)<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>→4FeOOH+2H<sub>2</sub>O。

钢试样表面的腐蚀以点状腐蚀开始,逐渐向试样 内部及两侧扩展,形成连续的腐蚀层。在随后的腐蚀 过程中,腐蚀产物朝热力学更稳定的状态演变,即,  $\gamma$ -FeOOH $\rightarrow \alpha$ -FeOOH+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> $\rightarrow$ Fe(OH)<sub>3</sub>或 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。钢试 样腐蚀层的内层主要由 FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>构成,呈黑褐 色;而外层则主要由 FeOOH、Fe(OH)<sub>3</sub>或 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>构成, 呈红褐色。同时,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 Fe<sup>2+</sup>或 Fe(OH)<sub>2</sub>反应,形成 水溶性的 FeSO<sub>4</sub>,破坏钢表面腐蚀层的完整性。

由于 Zn 的标准电极电位(-0.762 V)低于 Fe (-0.441 V)<sup>[17]</sup>,因此,暴露在大气腐蚀环境中的镀 锌钢主要发生镀 Zn 层的腐蚀。反应过程为:

阳极反应  $Zn \rightarrow Zn^{2+}+2e$ 阴极反应  $2H_2O+O_2+4e \rightarrow 4OH^-$ 总反应  $2Zn+2H_2O+O_2\rightarrow 2Zn(OH)_2$ 在干燥环境中,  $Zn(OH)_2$ 脱水形成 ZnO, 因为 Zn



图 5 三种钢大气腐蚀表面腐蚀层截面光镜照片 Fig.5 Optical cross-sectional images of the atmospheric corrosion layers of the steels: a) Q235; b) 40Cr; c) galvanized steel

为活泼金属,即使在干燥环境中也会部分氧化形成 ZnO。另外,在液膜含有一定浓度的 SO4<sup>-</sup>时,镀锌钢 表面腐蚀层中的 Zn(OH)、ZnO 也会与 SO4<sup>-</sup>反应,形 成 ZnSO4,再与 ZnO 反应,形成碱式硫酸锌 (Zn4SO4(OH)6)。镀锌钢试样表面 ZnO 结构致密,对 镀锌层及钢基体都具有很好的保护作用,大大提高了 镀锌钢的抗大气腐蚀性能。但镀锌钢表面腐蚀层中形 成 ZnSO4及其碱式盐呈点状分布,具有片状结构,致 密度低,对镀锌钢试样表面 ZnO 保护膜产生一定程 度的破坏,降低了镀锌钢抗大气腐蚀的能力。

# 3 结论

1) 在安徽省内 H1、R1 及 T28 三个站点自然环 境下暴露 1 年的 Q235、40Cr 表面腐蚀层呈红褐色, 局部呈黑褐色,镀锌钢表面灰暗。同一站点三种钢腐 蚀速率的大小趋势相同,即 40Cr>Q235>镀锌钢。不 同站点间,站点 R1 的温度、湿度最高,钢的腐蚀速 率最大;虽然站点 T28 大气中 SO<sub>2</sub>的含量最高,但温 度、湿度最低,钢的腐蚀速率最小。

2)Q235、40Cr及镀锌钢的大气腐蚀主要为电化 学腐蚀,在Q235、40Cr试样表面主要形成FeOOH、 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe(OH)<sub>3</sub>或 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及 FeSO<sub>4</sub>等腐蚀产物。其中, FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>构成腐蚀内层,呈黑褐色;而 FeOOH、 Fe(OH)<sub>3</sub>或 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>构成腐蚀外层,呈红褐色层。同时, 大气中的 SO<sub>2</sub>溶于试样表面液膜,并参与反应,形成 水溶性的 FeSO<sub>4</sub>。镀锌钢主要发生镀锌层的氧化及电 化学反应,形成致密的 Zn(OH)、ZnO 腐蚀层,该腐 蚀产物与 SO<sub>4</sub><sup>2–</sup>反应,形成 ZnSO<sub>4</sub>及 Zn<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>。

3)Q235、40Cr 大气腐蚀形成连续的腐蚀产物 层,在其表面分布着绒球状的 α-FeOOH 及片状的 γ-FeOOH。T28 站点因大气中 SO<sub>2</sub>浓度高,腐蚀层遭 到明显破坏,α-FeOOH 绒球间存在缝隙,结构疏松。 同样,镀锌钢表面的腐蚀层致密,但T28 站点镀锌钢 表面形成点状的腐蚀坑,坑内为片状结构的 ZnSO<sub>4</sub> 及其碱式盐,结构疏松,腐蚀防护能力下降。

**致谢** 参加本项目研究的还有合肥工业大学材料科 学与工程学院聂强强、陈国栋、段谟刚、王万里、常 浩、杨汝琪、徐林海等。在此一并致以谢意!

#### 参考文献:

[1] 陈云, 徐利民, 药宁娜, 等. 输变电钢构件的大气腐蚀

与防护[J]. 华北电力技术, 2014(12): 10-14.

CHEN Yu, XU Li-min, YAO Ning-na, et al. Atmospheric Corrosion and Protection of Steel Components for Transmission and Distribution Projects[J]. North China Electric Power, 2014(12): 10-14.

 [2] 王劲,黄青丹,刘静,等.镀锌钢在模拟广州地区大气 环境中的室内加速腐蚀研究[J].材料研究学报,2018, 32(8):631-640.

> WANG Jin, HUANG Qing-dan, LIU Jing, et al. Accelerated Indoor Corrosion of Galvanized Steel in a Simulated Atmospheric Environment of Guangzhou Area[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(8): 631-640.

[3] 刘峰, 宋弘清, 黄政然, 等. 沿海地区输电铁塔防护涂
 层耐腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4):
 76-81.

LIU Feng, SONG Hong-qing, HUANG Zheng-ran, et al. Anti-corrosion Properties of Protective Coatings for Transmission Line Iron Tower in Coastal Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 76-81.

- [4] 王平, 孙心利, 马东伟. 输变电设备大气腐蚀情况调查 与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(6): 525-526. WANG Ping, SUN Xin-li, MA Dong-wei. Investigation and Analysis of Atmospheric Corrosion of Transmission and Transformation Equipment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(6): 525-526.
- [5] 曹公望, 刘雨薇, 张丹丹, 等. Q235 和 Q345 钢在红沿 河大气环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(1): 24-29.

CAO Gong-wang, LIU Yu-wei, ZHANG Dan-dan, et al. Corrosion Behavior of Q235 and Q345 Carbon and Steel in Hongyanhe Atmosphere[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(1): 24-29.

- [6] 杨海洋, 丁国清, 黄桂桥, 等. 镀锌钢在不同大气环境 中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(5): 369-372. YANG Hai-yang, DING Guo-qing, HUANG Gui-qiao, et al. Corrosion Behavior of Galvanized Steels in Different Atmospheric Environments[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(5): 369-372.
- [7] TOWNSEND H E. Effect of Alloying Elements on the Corrosion of Steel in Industrial Atmospherics[J]. Corrosion, 2001, 57(6): 497- 501.
- [8] 谭何灵,周成,刘希辉,等. Cr对Q420钢在高盐度大气 环境下耐蚀性的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2017, 37(3): 267-272.
   TIAN He-ling, ZHOU Cheng, LIU Xi-hui, et al. Effect of

Cr on Corrosion Resistance of Q420 Steel in Atmosphere with High Salinity[J]. Journal of Chinese Society for

Corrosion and Protection, 2017, 37(3): 267-272.

[9] 张全成, 吴建生, 陈家光, 等. 暴露 1 年的耐大气腐蚀 用钢表面锈层分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(5): 297-300.

ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng, CHEN Jia-guang, et al. Analysis on the Corrosion Rust of Weathering Steel Exposed in Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2001, 21(5): 297-300.

[10] 王振尧,郑逸苹,刘寿荣.环境因素对锌大气腐蚀影响的试验研究[J]. 全面腐蚀控制, 1993(3): 16-17.
 WANG Zhen-yao, ZHENG Yi-ping, LIU Shou-rong. Experimental Study on the Influence of Environmental Factors on Zinc Atmospheric Corrosion[J]. Total Corrosion Control, 1993(3): 16-17.

[11] 郝献超,李晓刚,肖葵,等. Q235 钢在西沙大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(6): 465-470.
 HAO Xian-chao, LI Xiao-gang, XIAO Kui, et al. Corro-

sion Behaviors at the Initial Stage of Q235 Steel in Xisha Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 29(6): 465-470.

- [12] MISAWA T, ASAMI K, HASHIMOTO K, et al. The Mechanism of Atmospheric Rusting and the Protective Amorphous Rust on Low Alloy Steel[J]. Corrosion Science, 1974, 14(3): 279-289.
- [13] PALRAJ S, SELVARAJ M, MARUTHAN K, et al. Kinetics of Atmospheric Corrosion of Mild Steel in Marine and Rural Environments[J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(1): 105-112.
- [14] DE LA FUENTE D, DÍAZ I, SIMANCAS J, et al. Long-term Atmospheric Corrosion of Mild Steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2): 604-617.
- [15] ODNEVALL I, LEYGRAF C. The Formation of Zn<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>·4H<sub>2</sub>O in a Rural Atmospheric[J]. Corrosion Science, 1994, 36(6): 1077-1087.
- [16] 孟晓波, 蒋武斌, 廖永力, 等. 输电杆塔材料在模拟工 业环境中的大气腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学 报, 2017, 37(5): 460-466.
  MENG Xiao-bo, JIANG Wu-bin, LIAO Yong-li, et al. Investigation on Atmospheric Corrosion Behavior of Transmission Tower Materials in Simulated Industrial Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(5): 460-466.
- [17] 章小鸽. 锌的腐蚀与电化学[M]. 仲海峰, 程东妹译. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
   ZHANG Xiao-ge. Corrosion and Electrochemistry of Zinc[M]. ZHONG Hai-feng, CHENG Dong-mei Translated. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.