

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.01.008

强腐蚀环境下输电杆塔塔材腐蚀及寿命预测研究进展

李航, 李新梅*, 杨现臣, 王晓辉, 商利

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 随着我国特高压输电工程进一步发展, 强腐蚀地区输电杆塔的腐蚀问题越来越凸显, 探究输电杆塔塔材在强腐蚀环境下的腐蚀行为和腐蚀机理对于保障整个输电网的安全运行至关重要。本文结合输电杆塔服役环境和腐蚀失效情况, 总结了主要大气污染物腐蚀影响机制, 着重梳理了不同输电杆塔塔材在海洋大气、工业大气以及海洋-工业大气环境下腐蚀行为的差异性及不同腐蚀环境对同一塔材腐蚀影响情况, 对比讨论了大气腐蚀相关性分析方法及寿命预测方法的优缺点, 并对今后输电杆塔大气腐蚀研究工作的发展方向进行了展望。

关键词: 强腐蚀; 输电杆塔; 大气腐蚀; 寿命预测

中图分类号: TG172.3 **文献标识码:** A

Research progress on corrosion and life prediction of transmission tower materials under strong corrosion environment

Li Hang, Li Xinmei*, Yang Xianchen, Wang Xiaohui, Shang Li

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: With the further development of ultra-high voltage transmission projects in China, the problem of transmission tower corrosion becomes more and more prominent in strong corrosion areas. It is very important to study the corrosion behavior and corrosion mechanism of transmission tower materials in the strong corrosion environment for maintaining the safe operation of the whole transmission network. Combined with the service environment and corrosion failure of transmission tower, the corrosion effect mechanism of main air pollutants is summarized. The differences in corrosion behavior of different transmission tower materials in marine atmosphere, industrial atmosphere, and marine industrial atmosphere, as well as the impact of different corrosion environments on the corrosion of the same tower material, are emphatically reviewed. The advantages and disadvantages of atmospheric corrosion correlation analysis method and life prediction method are compared and discussed. Finally, the development direction of atmospheric corrosion research on transmission towers in the future is prospected.

Keywords: strong corrosion; transmission tower; atmospheric corrosion; life prediction

收稿日期: 2023-02-26

修回日期: 2023-03-26

作者简介: 李航(1998—), 男, 硕士研究生, email: 1104012735@qq.com

*通信作者: 李新梅(1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事材料表面改性方面的研究。

email: lxmj2009@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52161017); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C386)

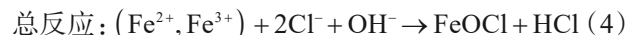
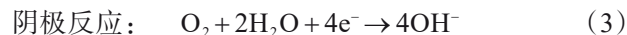
随着我国经济社会的快速发展,承载着输送电能的特高压输电工程快速发展。根据国家电网有限公司 2020 年社会责任报告,国家电网已累计建成投运“十四交十二直”特高压输电工程,在运在建线路总长度达 4.1 万公里。输电杆塔作为特高压输电工程的主体结构,塔材以碳钢、镀锌钢、耐候钢等金属材料为主^[1-2],长期服役于苛刻的野外环境,穿过的大气环境多种多样,诸如乡村大气、城市大气、工业大气、海洋大气等^[3],极易受到各类腐蚀介质作用使输电杆塔发生锈蚀,如遭遇极端天气,输电杆塔极易发生倒塌^[4]。同时有学者注意到,随着沿海城市工业化的迅速发展,一些沿海地区受到 SO₂ 腐蚀影响越来越严重,因而这些地区形成了既含有氯化物又含有 SO₂ 的海洋—工业大气,这给输电杆塔安全性带来了更严峻的挑战。高岩等^[5]通过在广东地区挂片腐蚀试验验证了重工业、海洋—轻工业复合和海洋大气环境相比乡村、特大和中型城市挂片腐蚀更严重。因此,充分认识强腐蚀大气环境下不同输电杆塔塔材的腐蚀行为和腐蚀差异性,对于塔材防腐设计、定期维护和寿命预测非常重要。本文就主要大气污染物腐蚀影响机制、强腐蚀环境下不同输电杆塔塔材的大气腐蚀行为以及相关性分析、寿命预测方法进行总结分析,以期对输电杆塔选址、选材及维护提供参考。

1 大气污染物腐蚀影响机制

1.1 氯化物

海水中的主要组成是氯化物盐类,氯化物盐类沉积在金属表面会加速金属的腐蚀。Yamashita 等^[6]在探究海洋大气环境下钢铁锈层的主要组成时发现,锈层的组成主要是 α -FeOOH、 γ -FeOOH 和 Fe₃O₄,在高浓度氯化物地区还会出现 β -FeOOH。Morales 等^[7]认为在低 Cl 沉积量的条件下,Cl 可促进 γ -FeOOH 向 α -FeOOH 的转化,有利于降低钢的腐蚀速率,干湿循环会加速这些转化过程,尤其是在干循环中 HCl 释放到环境中。Ma 等^[8]认为在高 Cl 沉积量的条件下,Cl 的存在有利于 β -FeOOH 的形成,降低了低碳钢的耐大气性能。Stratmann 等^[9]也认为,在富含 Cl 的环境中,腐蚀过程主要由 β -FeOOH 主导,而不是 γ -FeOOH, γ -FeOOH 在无 Cl 环境中是加速腐蚀的氧化剂。碳钢高 Cl 沉积量的条件下的腐蚀机理如图 1 所示,其反应式可表示为:

湿循环阶段:



干循环阶段:

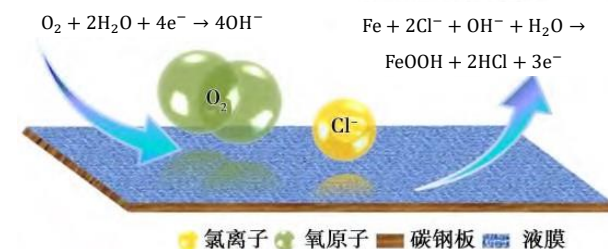
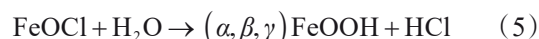


图 1 碳钢在 Cl 沉积条件下腐蚀机理

Fig.1 Corrosion mechanism of carbon steel under Cl⁻ deposition

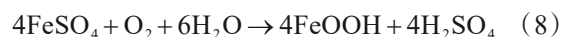
此外,Askey 等^[10]提出一个循环生锈模型,在金属水性附着层或锈迹严重区域,高 Cl 浓度会导致 FeCl₂ 的形成,FeCl₂ 会发生如下水解反应:



这是一个循环反应,重新释放的 HCl 将与铁反应重新生成 FeCl₂,电解液酸性也会被提高,阴极过程被加快。同时,金属阳离子和氢离子的电荷需要被中和,这会使 Cl 浓度增加,加速了金属的腐蚀,且这种腐蚀过程将一直持续到 Cl 被去除。

1.2 二氧化硫

SO₂ 分子极性极强且极易溶于水(SO₂ 在水中的溶解度是氧气的 2600 倍),因此易溶于金属表面的电解液薄膜中,加快金属的腐蚀速率^[11]。Rozenfeld 表明 SO₂ 是一种活性阴极去极化剂,会极大加速阴极过程^[12]。Alcantara 等^[13]也表明当 SO₂ 浓度超过 0.1 mg/m³ 时,对钢铁的侵蚀性更强。对于非铁金属,SO₂ 最终会被消耗在腐蚀反应过程中。而对于钢铁来说,SO₂ 参与的是一个自催化反应(“酸的再生循环机制”),FeSO₄ 持续参与电化学反应,循环往复造成钢铁源源不断被腐蚀,这是 SO₂ 对钢铁腐蚀速率产生很大影响的主要原因,其腐蚀机理如图 2,反应式可以表示为:



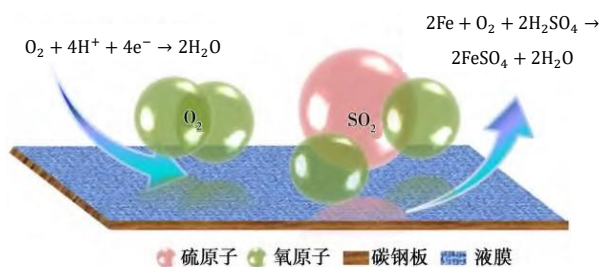


图2 碳钢在SO₂大气环境下腐蚀机理

Fig.2 Corrosion mechanism of carbon steel in SO₂ atmosphere

2 强腐蚀环境下塔材大气腐蚀行为研究

2.1 海洋大气环境

海洋大气环境一般具有高温、高湿、强辐射、多盐等多因素耦合的特点,因此其腐蚀机理较为复杂^[14]。氯化物是海洋大气中最显著污染物之一,氯化物浓度往往决定了输电杆塔塔材的腐蚀速度。在氯化物沉积率相对较低的海洋大气中,输电杆塔塔材表面会形成坚固的锈层,可以抑制腐蚀性物质对下层钢材的腐蚀^[15]。而在氯化物沉积率相对较高的海洋大气中,钢的腐蚀速率随着NaCl浓度增加而增加,高Cl导致基体/锈层界面之间的腐蚀产物呈强磁性,无法形成致密稳定的锈层,输电杆塔塔材往往遭受严重腐蚀破坏^[16-17]。

表1 海洋大气环境下碳钢和镀锌钢暴露3个月后腐蚀速率对比

Tab.1 Comparison of corrosion rates of carbon steel and galvanized steel after exposure in marine atmospheric environment for 3 months

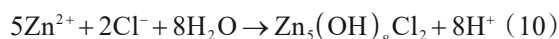
钢材	腐蚀前平均质量/g	腐蚀后平均质量/g	失重率/(g·m ⁻²)	腐蚀速率/(mm·mon ⁻¹)
碳钢	116.9161	114.5074	220.9816	0.0102
镀锌钢	158.4262	158.2601	14.8303	0.0070

2.2 工业大气环境

工业大气环境下不同的输电杆塔塔材往往也表现出不同的腐蚀演化规律。对碳钢而言,孟晓波等^[23]对碳钢进行了多种浓度下的喷雾试验,发现碳钢的腐蚀失重随喷雾浓度的增加呈线性变化规律,高浓度(0.03 mol/L)喷雾有利于α-FeOOH形成,提高了锈层的致密性。

图3为工业大气环境下镀锌钢、碳钢加速腐蚀96 h后微观形貌。相比碳钢,镀锌钢耐腐蚀性明显更优。陈翠等^[24]采用循环盐雾试验模拟工业大气环境,探究镀锌钢的腐蚀行为和腐蚀机理,发现腐蚀速

海洋大气环境下不同的输电杆塔塔材往往表现出不同的腐蚀演化规律。对于碳钢而言,潘刚等^[18]提出碳钢腐蚀前期锈层疏松多孔,Cl⁻、O₂等腐蚀性介质易进入锈层和基体结合面,导致腐蚀速率较大,腐蚀后期锈层变厚,腐蚀速率逐渐较小;而陈文娟等^[19]认为碳钢在经历中期腐蚀速率下降后,在后期腐蚀速率会有所提高。造成这样差异可能是试验环境、腐蚀周期存在较大差异。对于镀锌钢而言,蒋武斌等^[20]对比了几种输电杆塔材料腐蚀行为差异,发现镀锌钢速率远远低于碳钢,是由于表面镀锌层隔绝了腐蚀性介质与基体的直接接触,表1给出了海洋大气环境下碳钢和镀锌钢暴露三个月后腐蚀速率对比。但李文瀚等^[21]提出高温高湿的海洋大气环境下,Cl从镀层缺陷处进入与材料反应形成局部活化区,加速了镀锌层腐蚀,其反应式如下:



对于耐候钢而言,刘雨薇等^[22]提出合金元素富集提升了耐候钢表面氧化层的致密性,减缓了Cl的穿透作用,阻碍了氧气和水进入基材与锈层的结合处,并促进了Fe₃O₄的生成,降低了电化学反应速率。相比较于碳钢和镀锌钢,“以锈防锈”的耐候钢具有耐蚀性强、后期维护成本低等优势,应继续优化现有合金元素搭配,研制出海洋大气环境下耐蚀性更强的耐候钢。

率先减速再加速,试验后期出现红锈和密集的点蚀坑,热浸镀锌很快失效;此外,车淳山等^[25]提出,相比热浸镀锌,热浸镀铝具有更优异的耐工业大气腐蚀性能。对于耐候钢而言,张幸等^[26]提出,相比传统碳钢而言,耐候钢的耐工业大气腐蚀性能要更好;同时,降低S、P含量,增加Cu、Ni、Cr含量可以显著改善耐候钢的耐工业大气腐蚀性能。张琳等^[27]也在对耐候钢进行室内加速腐蚀研究获得了同样的发现。因此,继续开展耐工业大气腐蚀性能镀层和耐候钢的研究,是提升服役于工业大气环境输电杆塔塔材耐蚀性的发展方向。

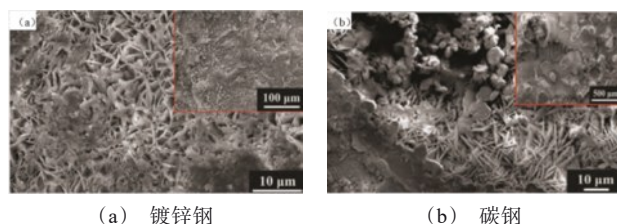


图3 工业大气环境下镀锌钢和碳钢加速腐蚀 96 h 后的微观形貌

Fig.3 Microstructure of galvanized steel and carbon steel after 96 h accelerated corrosion under industrial atmospheric environment

2.3 海洋—工业大气环境

随着我国沿海地区工业化快速发展,部分地区变成了由两种主要污染物同时存在的海洋—工业大气环境^[28]。大量研究表明,这种海洋—工业大气比单一的海洋大气或工业大气对输电杆塔塔材的腐蚀更加剧烈。对于碳钢而言,郭明晓等^[29]通过室内加速试验发现, SO_2 和 Cl^- 的协同效应会加速碳钢的腐蚀,二者比例的变化对碳钢腐蚀失重以及腐蚀产物组成没有明显改变。针对镀锌钢,原徐杰等^[30]也通过试验研究表明, NaCl 和 NaHSO_3 混合介质对镀锌钢腐蚀产生了协同作用,要比单独 NaCl 存在时严重。此外,李波等^[31]发现,随着 Cl^- 浓度的增大, Cl^- 和 SO_2 对镀锌钢的协同腐蚀作用增强,对镀锌钢的腐蚀更加严重。对耐候钢而言,孟晓波等^[32]对比了碳钢、镀锌钢和耐候钢在海洋工业大气环境下的耐蚀

性,发现腐蚀后期 SQ420NH 耐候钢表现出耐候特点,但在整个试验周期内镀锌钢腐蚀速率最低,这可能与试验周期较短,镀锌层尚未被完全腐蚀有关。

关于 SO_2 气体对含有 Cl^- 大气环境的影响,Chen等^[33]模拟了 SO_2 对海洋—工业大气下低合金钢腐蚀的影响。结果发现在腐蚀初期, SO_2 对钢的腐蚀劣化作用不明显,随着腐蚀过程的增加, SO_2 开始加速钢的腐蚀。并且随着 SO_2 含量的增加,钢的腐蚀增重率先增加到一定程度,然后随着 SO_2 含量的进一步增加而减小;同样,Allam等^[34]研究了碳钢在阿拉伯海湾表面腐蚀产物的演化过程,也发现了同样的规律。而梁彩凤等^[35-36]通过大气暴露腐蚀的研究,认为 SO_2 对钢在大气环境中的腐蚀行为的影响主要表现在腐蚀初期的阶段,而对腐蚀后期的作用不是十分明显,腐蚀后期 Cl^- 起主导作用。造成这样研究结果矛盾的原因可能有:(1)试验方法、试验条件存在较大的差异;(2)亦可能是实验组数较少,试验结果具有偶然性。从以上相关研究结果来看,大气腐蚀过程的初始阶段 SO_2 对 Cl^- 的影响以及随着暴露时间延长对钢材腐蚀总量的影响仍然存在相当大的争议。因此,需要在这个方面加大研究力度。

2.4 不同强腐蚀环境对塔材影响情况

同等气候条件或试验条件下,不同强腐蚀环境对同一输电杆塔塔材腐蚀情况存在较大差异性。表2以输电杆塔常用塔材碳钢为例^[37],从影响因素、影响机制、腐蚀失重、锈层形貌等方面对比归纳了不同强腐蚀环境对碳钢腐蚀影响情况的差异性。

表2 不同强腐蚀环境对碳钢腐蚀影响差异

Tab.2 Influence of different strong corrosion environments on carbon steel corrosion

服役环境	影响因素	影响机制	腐蚀失重	锈层形貌
海洋大气	Cl^-	穿透性强、增强导电性、“循环生锈模型”	失重先增加后趋于平缓	初期为疏松片状结构且遍布裂纹、后期为致密的球状产物
工业大气	SO_2	分子极性极强、阴极去极化剂、“酸的再生循环机制”	失重略大于海洋大气	初期为颗粒状凹凸不平条状产物、后期出现胞状产物
海洋工业大气	SO_2 、 Cl^-	二者耦合,具体主导过程存在较大争议	失重最大	初期为不规则花状局部腐蚀、后期有较平整的球状产物

3 相关性分析及寿命预测

3.1 相关性分析

大气腐蚀研究方法包括了室内加速腐蚀试验和室外暴晒试验,但二者不能简单的进行相互代替,因此对于两者的相关性研究成为当前和今后研究的重

点问题。相关性分析方法包括了图表法、腐蚀机理对比、回归分析、秩相关系数法等^[38],部分相关性分析模型优缺点如表3所示。周经中等^[39]通过对比输电杆塔用镀锌钢在室内加速腐蚀试验和室外暴晒试验后的腐蚀试样,从腐蚀形貌、腐蚀产物、腐蚀机理、腐蚀动力学等多角度进行了相关性分析,并提出室

内中性盐雾+周浸加速试验具有良好的加速性。范嘉雯等^[40]采用周浸加速腐蚀试验研究了纯锌在模拟热带海洋大气环境下腐蚀行为,并通过灰色关联分析方法发现周浸加速腐蚀试验具有很好的加速性和相关性。王振尧等^[41]对沈阳地区碳钢和低合金钢的腐蚀结果进行了回归分析,得到了腐蚀规律公式 $\Delta W=Kt^n$,从而得到了室外暴晒试验和室内加速腐蚀试验达到相同腐蚀量所需要的时间。

大气腐蚀试验可能会受到试验条件、大气成分等众多因素影响,这阻碍了相关性研究进一步的推广和发展。对此 James 提出^[42]:若只是对材料耐蚀

性进行评估,则不必充分模拟室外大气环境,但需保证试验重现性和加速性,如单一盐雾试验、周浸试验等;若要以相关性分析、寿命评估为研究目的,则要充分模拟室外大气环境,设计尽可能完备的多因素耦合试验,如:杨晓然等^[43]设计了一种能够同时模拟盐雾、湿度、温度、光照和风速共5种因素综合海洋气候的加速试验箱,经过技术评价测试,该试验箱模拟结果具备良好的相关性和加速性;徐迪等^[44]提出在周期喷雾试验机基础上增加盐水浸渍、低温等系统,可以较好地模拟典型地区金属材料的大气腐蚀行为。

表3 相关性分析及寿命预测模型

Tab.3 Correlation analysis and life prediction model

分析预测模型	功能	优点	缺点
回归分析	相关性分析	可以达到相关性定量分析目的	函数关系模型只是一个推测
秩相关系数分析	相关性分析	适用范围广,实用性强	数据组数较小时,相关系数波动较大
灰色关联度分析	相关性分析	找出影响材料腐蚀机理的关键因素	不反映材料腐蚀的一般规律
解析法	预测	该模型表达简单,易于应用	但对腐蚀全过程的拟合误差较大
灰色系统理论	预测	相对误差小,拟合精度高	该模型的建立过程相对复杂
BP神经网络	预测	具有更高的预测精度	过拟合可能发生在小样本量

3.2 寿命预测

现阶段,材料设计和材料评估皆通过腐蚀试验,如何通过短期腐蚀试验预测材料长期服役寿命,这对于输电杆塔塔材选择和定期维护具有重要意义。当前,寿命预测方法包括:解析法、灰色系统理论、人工神经网络等,部分腐蚀寿命预测模型的优缺点在表3中列出。尹程辉等^[45]在模拟万宁海洋大气环境下对四种不锈钢腐蚀行为进行研究分析,灰色关联度方法分析表明,室内加速试验环境谱与万宁户外暴露试验符合腐蚀动力学一致原则,建立了不锈钢大气腐蚀预测模型。萧彧星等^[46]基于贝叶斯正则化算法,建立了BP神经网络预测模型,选取青岛、广州等数据作为检验样本,发现模型具备较好预测性。黄海军等^[47]利用武汉地区空气污染物含量数据,选取二氧化硫和氯化物典型大气腐蚀介质,建立了不同维数的GM(1,1)预测模型,探讨了不同维数对腐蚀预测精度的影响。

金属材料腐蚀破坏是一个复杂长期的过程,腐蚀行为受到材料服役环境影响,不同地区的气象条件可能千差万别,这导致对材料在不同大气环境下的腐蚀寿命预测研究工作一直是重点工作,同时又是难点工作。目前,腐蚀寿命预测分析方法在不断

发展和完善中,通过深化对灰色系统理论和人工神经网络等非线性数学方法的研究,加强现有分析方法之间的深度融合,提高输电杆塔服役寿命预测的精度和准确性。

4 展望

输电杆塔塔材在强腐蚀大气环境下的腐蚀研究工作虽已经取得了一定的进展,但输电杆塔服役环境复杂多变,大气腐蚀影响因素众多,腐蚀机理极其复杂,未来仍存在很多研究工作要做,主要表现在以下几方面:

(1)开展输电杆塔塔材在不同地区大气环境下的腐蚀实验,特别是针对一些极端恶劣的大气环境,充分获取输电杆塔大气腐蚀相关信息,开发输电杆塔腐蚀数据库。根据掌握的输电杆塔腐蚀信息,选择适配性较好的材料,设计不同的防护体系和防护级别。

(2)开展更加贴合真实大气环境下的输电杆塔塔材室内加速腐蚀试验,特别是多因素耦合试验;充分利用当前计算机数据处理技术方面的优势,深入探究室内加速腐蚀试验和室外暴晒试验的相关性。

(3)目前,在材料寿命预测方面使用和研究较多

的是人工神经网络和灰色系统理论技术,需要继续强化人工神经网络和灰色系统理论等非线性数学问题研究,并继续深入发掘能够准确预测输电杆塔塔材在不同地区腐蚀速率的数学模型。

(4)研制高耐候、高耐蚀、低成本和绿色环保的涂层和涂料;开发具备低合金、高耐候、高强度等优势的钢材。

参考文献

- [1] 曾尚武, 黄耀, 郭晓宏, 等. 耐候钢在输电线路杆塔中的应用与研究进展[J/OL]. 中国材料进展, 2022, 1-12.
- [2] 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.
- [3] Natesan M, Selvaraj S, Manickam T, et al. Corrosion behavior of metals and alloys in marine-industrial environment[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2008, 9(4): 045002.
- [4] 黄孝良. 桶型输电杆塔自振周期修正及腐蚀整体安全性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [5] 高岩, 黄殷辉, 郑志军, 等. 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.
- [6] Yamashita M, Maeda A, Uchida H. Crystalline rust compositions and weathering properties of steels exposed in nation-wide atmospheres for 17 years[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2001, 65(11): 967-971.
- [7] Morales A L, Cartagena D, Rendon J L. The relation between corrosion rate and corrosion products from low carbon steel[J]. Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics, 2000, 220(1): 351-356.
- [8] Ma Y T, Li Y, Wang F H. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content [J]. Corrosion Science, 2009, 51(5): 997-1006.
- [9] Stratmann M. The atmospheric corrosion of iron —A discussion of the physico-chemical fundamentals of this omnipresent corrosion process invited review[J]. Berichte der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemi, 1990, 94(6): 626-639.
- [10] Askey A, Lyon S B, Thompson G E, et al. The corrosion of iron and zinc by atmospheric hydrogen chloride[J]. Corrosion Science, 1993, 34(2): 233-247.
- [11] 刘月娥, 林翠, 赵晴. 碳钢在SO₂大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 51-57.
- [12] Wörner T h, Laub H. Atmospheric corrosion of metals [J]. Journal of Corrosion Science and Engineering, 1968, 15(10): 12-13.
- [13] Alcantara J, Fuente D, Chico B, et al. Marine atmospheric corrosion of carbon steel: A review[J]. Materials, 2017, 10(4): 406.
- [14] Albrecht P, Hall T T. Atmospheric corrosion resistance of structural steels [J]. Journal of materials in civil engineering, 2003, 15(1): 2-24.
- [15] De la Fuente D, Díaz I, Alcántara J. Corrosion mechanisms of mild steel in chloride-rich atmospheres[J]. Materials and Corrosion, 2016, 67(3): 227-238.
- [16] 潘玉霞, 王玫, 王志高, 等. 大气腐蚀环境对四川电网输变电设备腐蚀的影响研究[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 110-113.
- [17] Nishimura T, Tanaka K I, Shimizu Y. Effect of NaCl on rusting of steel in wet and dry corrosion cycle[J]. Tetsu to Hagane, 1995, 81(11): 1079-1084.
- [18] 潘刚, 陈文娟, 王瑛, 等. 高湿热海岸大气环境中Q235B钢的腐蚀演化规律[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(1): 55-60.
- [19] 陈文娟, 陈翌庆, 潘刚. O₃/Cl⁻复合大气环境中Q235B钢的腐蚀演化特性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(1): 8-18.
- [20] 蒋武斌, 孟晓波, 廖永力, 等. 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.
- [21] 李文翰, 尹学涛, 周学杰, 等. 电网输变电设备钢结构和镀锌构件的大气腐蚀与防护措施[J]. 材料保护, 2018, 51(10): 114-118.
- [22] 刘雨薇, 赵洪涛, 王振尧. 碳钢和耐候钢在南沙海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1247-1254.
- [23] 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.
- [24] 陈翠, 王瑾, 陈娜娜, 等. 模拟酸雨大气环境镀锌钢的室内加速腐蚀行为和机理[J/OL]. 表面技术, 2022, 1-15.
- [25] 车淳山, 曾发明, 孔纲, 等. 热浸镀锌铝系列合金镀层的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(15): 135-138.
- [26] 张幸, 刘道新, 万兰凤, 等. 新型耐候钢和碳钢在模拟工业大气环境中的腐蚀行为与机理研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1025-1030.
- [27] 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): 38-41, 46.
- [28] Wang L B, Wang J H, Hu W B. Influence of Cl⁻ on the initial corrosion of weathering steel in simulated marine-

- industrial atmosphere[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(8): 7356-7369.
- [29] 郭明晓, 潘晨, 王振尧, 等. 碳钢在模拟海洋工业大气环境中初期腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2018, 54(1): 65-75.
- [30] 原徐杰, 张俊喜, 季献武, 等. 电力输电杆塔用镀锌钢在污染环境中的腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(1): 13-18.
- [31] 李波, 何锦航, 余思伍, 等. 镀锌钢在模拟沿海-工业大气中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2022, 55(7): 128-136.
- [32] 孟晓波, 陈日, 高岩, 等. 输电杆塔材料在模拟海岸-工业复合环境中的大气腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(14): 49-53.
- [33] Chen W J, Hao L, Dong J H. Effect of sulphur dioxide on the corrosion of a low alloy steel in simulated coastal industrial atmosphere[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 155-163.
- [34] Allam I M, Arlow J S, Saricimen H. Initial stages of atmospheric corrosion of steel in the Arabian Gulf[J]. Corrosion Science, 1991, 32(4): 417-432.
- [35] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢、低合金钢 16 年大气暴露腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 1-6.
- [36] Wang Z F, Liu J R, Wu L X. Study of the corrosion behavior of weathering steels in atmospheric environments [J]. Corrosion Science, 2013, 67: 1-10.
- [37] 赵悦彤, 丁红蕾, 邱凯娜, 等. 船用碳钢大气腐蚀行为的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(S2): 385-391.
- [38] 曾佳俊, 周学杰, 吴军, 等. 金属材料大气腐蚀试验相关性与寿命预测研究现状[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 90-94.
- [39] 周经中, 王晓芳, 陈云, 等. 输电杆塔用热镀锌钢在模拟东南沿海大气环境中的加速腐蚀试验方法研究[J]. 材料保护, 2021, 54(11): 57-62.
- [40] 范嘉雯, 程学群, 李晓刚, 等. 纯锌在我国热带海洋大气环境耐蚀寿命预测模型[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 797-806.
- [41] 王振尧, 于国才, 韩薇. 碳钢和低合金钢在污染环境中的大气腐蚀规律[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(3): 47-51.
- [42] Maxted J. Short term testing and real time exposure[J]. Journal of Corrosion Science Engineering, 1999, 9(2): 15.
- [43] 杨晓然, 赵方超, 杨小奎, 等. 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 141-150.
- [44] 徐迪, 杨小佳, 李清, 等. 材料大气环境腐蚀试验方法与评价技术进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 447-457.
- [45] 尹程辉, 潘吉林, 陈俊航, 等. 热带海洋大气环境下不锈钢的腐蚀寿命评估[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 183-193, 246.
- [46] 萧彧星, 吴光海, 孙宁, 等. BP 神经网络在碳钢和低合金钢大气腐蚀数据预测中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(2): 171-174.
- [47] 黄海军, 李婵, 王俊. 典型大气腐蚀介质的灰色预测模型分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 13-16.