

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.02.015

镀锌层在室内模拟大气环境中腐蚀行为及寿命评估

张培军, 李新梅*, 杨现臣, 王晓辉, 田志刚

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 针对电力金具镀锌层在大气环境中腐蚀及寿命评估问题, 通过KY-YW40室内腐蚀试验箱分别模拟工业、海洋腐蚀环境, 采用SEM、EDS、XRD等测试技术表征其腐蚀特性, 采用灰色关联方法计算青岛市和重庆市江津区两地室内外腐蚀行为的相关性。结果表明: 在0~96 h阶段, 工业大气环境中镀锌层的腐蚀深度和腐蚀速率的变化明显高于海洋大气环境。在96~120 h阶段, 海洋大气环境的腐蚀速率接近工业大气环境, 镀锌层在工业大气环境中锈层稀疏多孔, 锈层主要成分为 $\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$; 而在海洋大气环境中, 锈层由稀疏转变成致密, Cl^- 易穿蚀锌层, 造成铁基体腐蚀, 锈层主要成分有 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。分别得到江津工业、青岛海洋大气环境室内外腐蚀时间相关模型: $T_0=23.55T$ 和 $T_0=19.63T$, 室内腐蚀试验与室外暴露试验关联度大于0.6, 有良好相关性, 可以有效评估工业、海洋大气环境下的腐蚀特性和寿命。

关键词: 镀锌层; 海洋大气环境; 工业大气环境; 腐蚀行为; 寿命评估

中图分类号: TG172.3 **文献标识码:** A

Corrosion behavior and life evaluation of galvanized coating in indoor simulated atmospheric environment

Zhang Peijun, Li Xinmei*, Yang Xianchen, Wang Xiaohui, Tian Zhigang

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

Abstract: In order to solve the problems of corrosion and life evaluation of galvanized coating of electric power fittings in atmospheric environment, KY-YW40 indoor corrosion test chamber was used to simulate industrial and marine corrosion environment respectively. The corrosion characteristics were characterized by SEM, EDS and XRD, and the grey correlation method was used to calculate the correlation between the indoor and outdoor corrosion behaviors in Qingdao and Jiangjin district of Chongqing. The results showed that the corrosion depth and corrosion rate of the galvanized coating in the industrial atmosphere were significantly different from that in the marine atmosphere during 0–96 h, but the corrosion rate of galvanized coating in the marine atmosphere during 96–120 h was close to that in the industrial atmosphere. In the industrial atmosphere, the rust layer was sparse and porous, and the main component of the rust layer was $\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$. In the marine atmosphere, the rust layer changed from sparse to dense, and Cl^- easily penetrated the zinc layer, resulting in corrosion of the iron matrix, and the main components of the rust layer were $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}(\text{OH})_2$. The indoor and outdoor corrosion time correlation models of Jiangjin industrial and Qingdao marine atmospheric environment

收稿日期: 2022-03-02

修回日期: 2022-04-26

作者简介: 张培军(1995—), 男, 硕士研究生, email: 1612211766@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: 35335499@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(51865055、52161017); 新疆维吾尔自治区天山英才计划资助项目(201720025)

were obtained: $T_0 = 23.55 T$, $T_0 = 19.63 T$. The correlation degree between indoor corrosion test and outdoor exposure test was greater than 0.6, showing a good correlation, which can effectively evaluate the corrosion characteristics and life in industrial and marine atmosphere environment.

Keywords: galvanized layer; marine atmospheric environment; industrial atmospheric environment; corrosion behavior; life evaluation

特高压输电线路是超远距离输电的主要方式, 在实现“西电东输”过程中起着不可替代的作用。由于热浸镀锌保护性好、价格低廉, 广泛应用于特高压输电线路的杆塔、构支架、连接金具等防护领域^[1]。随着特高压输电线路的高速发展, 镀锌层不可避免地遭受极端环境的影响。研究发现, 高硫和高盐等极端大气环境是引起镀锌层腐蚀失效并造成金具承载力减小的主要原因^[2-3]。因此, 研究输电线路电力金具镀锌层在不同大气环境中的腐蚀行为极具现实意义。

国内外学者对锌及镀锌钢的腐蚀行为进行了研究, Fuente D等^[4]研究了锌在海洋环境中暴露13~16年后形成的腐蚀产物的主要成分和形态特征; 张岩等^[5]研究了镀锌钢在大气环境中暴露1~12月的腐蚀产物和腐蚀速率变化, 室外试验能反映真实的大气腐蚀情况, 但存在试验周期长的不足。刘雨薇等^[6]通过模拟酸雨大气环境中镀锌钢的腐蚀行为, 研究了腐蚀锈层对大气腐蚀的影响; 尹齐等^[7]在室内模拟海洋大气环境的纯锌腐蚀行为和腐蚀机理。室内模拟试验能在短时间内获得较多的试验数据, 适合研究腐蚀机理, 但缺乏实际工况条件下的腐蚀过程。有学者将灰色关联法应用于腐蚀科学领域, 有效地弥补了室内模拟试验和室外试验的不足。范嘉雯等^[8]通过灰色关联法研究纯锌在我国热带海洋大气环境的腐蚀行为, 定性和定量地评价浸泡试验与户外大气暴露试验的相关性; 尹程辉等^[9]通过灰色关联法研究热带海洋大气环境中不锈钢室内外的腐蚀相关性, 并建立了腐蚀寿命预测模型。

本文主要模拟电力金具镀锌层服役的工业和海洋大气环境, 从腐蚀动力学、腐蚀形貌及产物成分等方面对镀锌层腐蚀行为进行研究, 并采用灰色关联法与国家材料腐蚀与防护科学数据中心的江津、青岛大气试验站腐蚀数据进行比较, 建立预测寿命模型, 从而丰富镀锌材料在工业大气环境和海洋大气环境中的腐蚀数据, 为特高压输电线路电力金具镀

锌层的使用和防护提供数据支持。

1 实验方法

1.1 材料

腐蚀试验材料选用特高压输电线路电力金具的镀锌试样, 试样尺寸为20.0 mm×20.0 mm×3.5 mm。

1.2 室内试验设计

青岛市的年平均湿度为86%, 该大气中Cl⁻浓度>0.5 mg/100 (cm²·d), 重庆市江津区的年平均湿度为81%, 该地区大气中SO₂含量是正常大气的14~38倍^[10]。本文利用室内加速试验箱模拟工业大气环境和海洋大气环境, 针对不同的腐蚀环境, 配制5 mmol/L的Na₂SO₄溶液作为工业环境腐蚀溶液和5 mmol/L的NaCl溶液作为海洋环境腐蚀溶液。工业环境腐蚀试样和海洋环境腐蚀试样各设18个平行试样, 分别在12 h、24 h、48 h、72 h、96 h、120 h取3个平行试样。

1.3 腐蚀失重

参照GB/T19746—2005标准对试验后腐蚀产物清除, 通过公式(1)计算腐蚀试验的质量损失。

$$\Delta M = M_0 - M_1 \quad (1)$$

式中: M_0 为初始质量, g; M_1 为腐蚀后剩余质量, g; ΔM 为失重量, g。

1.4 腐蚀形貌观测及产物分析

利用工业显微镜观察腐蚀宏观形貌, 采用LED-1430VP型扫描电镜观察腐蚀微观形貌, 附带能谱仪分析腐蚀产物元素组成。采用D&Advance型X射线衍射仪分析试样表面产生的腐蚀产物结构。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀动力学

镀锌层试样的失重量见表1, 腐蚀动力学采用平均腐蚀深度和腐蚀速率来表征, 利用公式(2)将失重量换算成腐蚀深度^[11], 并通过公式(3)计算腐蚀速率, 结果见图1所示。

$$D = \frac{10^4 \Delta M}{\rho A_0} \quad (2)$$

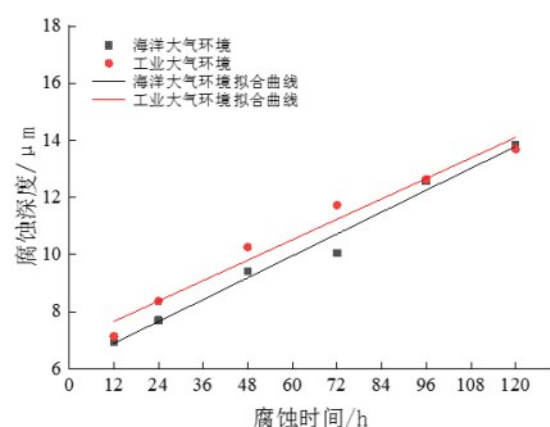
$$r = \frac{D}{T_0} \quad (3)$$

式中: D 为试样平均腐蚀深度, μm ; ΔM 为失重量, g ; 镀锌层密度 $\rho = 7.14 \text{ g/cm}^3$; A_0 为试样表面积, cm^2 ; r 为试样腐蚀速率, $\mu\text{m/h}$; T_0 为室内加速腐蚀试验时间, h 。

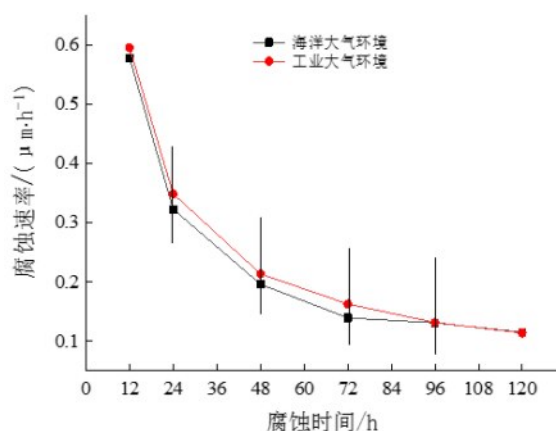
表1 镀锌层不同腐蚀时间的平均失重量

Tab.1 Average weight loss of zinc coating at different corrosion time

失重量/g	室内腐蚀时间/h					
	12	24	48	72	96	120
$\Delta M_{\text{海洋}}$	0.019	0.022	0.026	0.028	0.035	0.039
$\Delta M_{\text{工业}}$	0.020	0.023	0.029	0.033	0.036	0.039



(a) 腐蚀深度



(b) 腐蚀速率

图1 镀锌层在不同大气环境中的腐蚀动力学

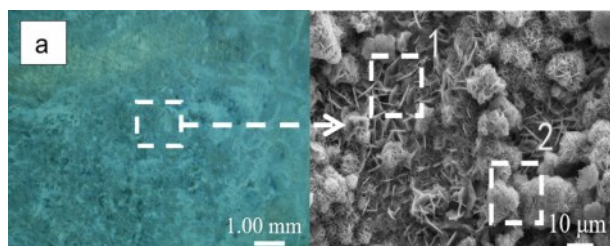
Fig.1 Corrosion kinetics of zinc coating at different atmospheric conditions

图1(a)为镀锌层在不同环境下的腐蚀深度随时间的变化关系,可以看出,腐蚀深度随着腐蚀时间增加而逐渐增大,对其深度和时间关系数据进行线性拟合,得到工业大气环境腐蚀深度的拟合函数为 $D=0.068 T_0$,海洋大气环境腐蚀深度的拟合函数为 $D=0.063 T_0$ 。图1(b)为镀锌层在不同环境下的腐蚀速率随时间变化关系,可以看出,在0~96 h阶段,两种环境中腐蚀速率快速下降,可能是随着锈层厚度的增加,氧的渗入变得困难,使得锈层阴极极化作用减弱,导致速率减小。至96~120 h阶段,海洋大气环境的腐蚀速率接近工业大气环境,可能是工业大气环境中,腐蚀产物积累变厚,对镀锌层起到一定的保护作用,而海洋大气环境中在Cl⁻作用下,局部区域的镀锌层被穿透,铁基体与镀锌层同时进行腐蚀反应,加速腐蚀速率。

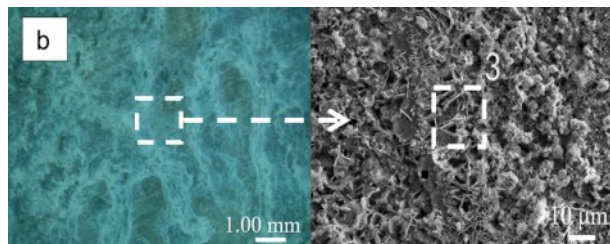
2.2 腐蚀形貌及能谱

图2、图3分别为工业、海洋大气环境中,镀锌层试样腐蚀12 h、48 h、96 h后的宏观形貌和微观形貌图。从宏观形貌可以看出,两种大气环境中镀锌层表面均出现白色产物的沉淀,随着腐蚀时间增加,表面白色产物逐渐覆盖镀锌层。在海洋大气环境中观察到明显的淡黄色和红色的点蚀坑,可能是铁基体被腐蚀的产物^[12-13]。

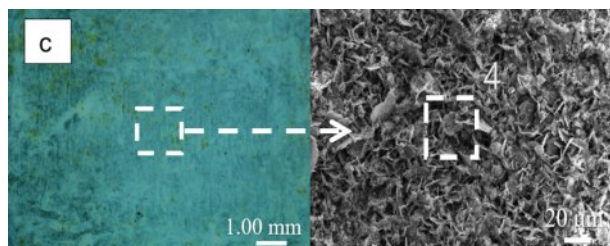
为进一步分析镀锌层在两种环境中的区别,对宏观形貌标识区域进行微观观测,并对微观标识区域进行EDS分析,其结果见表2所示。由图2可以看出,在工业大气环境中,腐蚀12 h时,表面腐蚀产物由团状和片状产物共同组成,且分布不均匀。腐蚀至48 h后,表面腐蚀产物由片状产物和部分团状产物组成。腐蚀至96 h时,表面腐蚀产物以片状为主,形态稀疏多孔。由工业大气环境中EDS分析结果(表2)可以看出,图2(a)中区域1和区域2腐蚀产物都主要由Zn、O和S组成,说明两者是同一产物,可能为小片状产物聚集形成团状产物。图2(b)中区域3腐蚀产物EDS结果表明Zn元素的质量分数下降,说明Zn层被腐蚀。图2(c)中区域4腐蚀产物EDS结果表明Zn元素的消耗更明显,这与刘雨薇等^[14]的实验结果相符,说明随腐蚀时间的增加,Zn层的防护能力不断下降。



(a) 腐蚀 12 h



(b) 腐蚀 48 h



(c) 腐蚀 96 h

图 2 镀锌层在工业大气环境中腐蚀不同时间的形貌照片
Fig.2 Morphological photos of zinc coating corroded in industrial atmosphere at different time

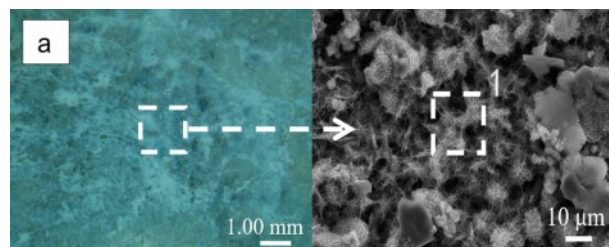
表 2 工业大气环境中不同区域的 EDS 分析结果

Tab.2 EDS analysis results of different areas in industrial atmosphere

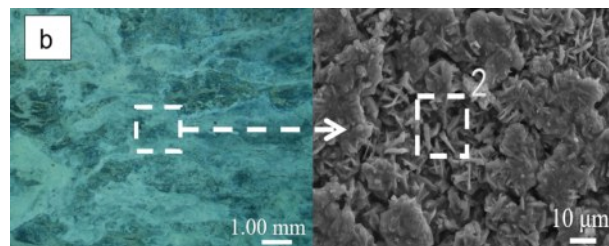
腐蚀时间/h	元素含量/(wt.%)				
	Zn	Fe	O	C	S
12(区域 1)	50.33	2.09	30.40	6.96	10.22
12(区域 2)	49.32	2.56	31.93	6.15	10.05
48(区域 3)	34.21	2.56	41.34	7.17	14.19
96(区域 4)	14.30	4.40	54.89	6.26	19.15

由图 3 可以看出,在海洋大气环境中,腐蚀 12 h 时,表面出现稀疏的丝状产物。腐蚀至 48 h 时,表面出现较致密的块状和针尖状腐蚀产物。腐蚀至 96 h 时,除了块状产物外,出现铁基体被腐蚀的毛绒状产物^[15]。海洋大气环境中 EDS 分析结果见表 3 所示,可以看出,图 3(a)中区域 1 腐蚀产物中 Zn 元素含量最高,其次是 O 元素,Fe、Cl、C 元素含量较少。

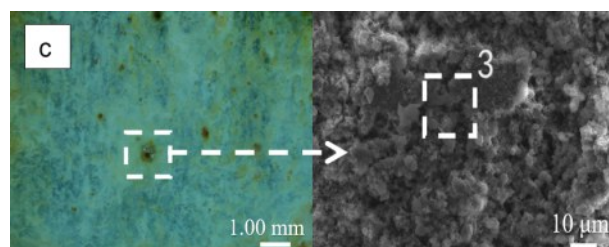
图 3(b)中区域 2 腐蚀产物主要由 Zn、O 组成,此时 Zn 的含量减少,表明随时间的增加,镀锌层被消耗。图 3(c)中区域 3 腐蚀产物主要有由 Fe、O 组成,Fe 元素的含量升高,说明铁基体被腐蚀^[16]。此外,腐蚀产物含有一定比例的 C 和 Na,C 元素来自试验箱中的空气,Na 元素来源于腐蚀溶液。



(a) 腐蚀 12 h



(b) 腐蚀 48 h



(c) 腐蚀 96 h

图 3 镀锌层在海洋大气环境中腐蚀不同时间的形貌照片
Fig.3 Morphological photos of zinc coating corroded in marine atmosphere at different time

表 3 海洋大气环境中不同区域的 EDS 分析结果

Tab.3 EDS analysis results of different areas in marine atmosphere

腐蚀时间/h	元素含量/(wt.%)					
	Zn	Fe	O	C	Cl	Na
12(区域 1)	51.38	1.38	29.97	8.64	8.62	—
48(区域 2)	42.98	5.20	39.54	—	12.28	—
96(区域 3)	9.74	41.99	27.02	—	14.48	6.77

通过形貌和能谱分析发现,工业大气环境中,镀锌层的锈层稀疏多孔,说明 S 元素易穿过锈层到达

镀锌层,加速腐蚀。海洋大气环境中,镀锌层的锈层由稀疏变致密,阻止腐蚀介质侵入,但局部区域出现红锈点蚀坑,能谱发现产物中含有Fe元素,说明Cl⁻穿透性强,造成局部区域铁基体腐蚀。

2.3 腐蚀产物组成

图4是镀锌层试样在不同环境腐蚀12 h、48 h、96 h后腐蚀产物的XRD图。由图4(a)可以看出,工业大气环境中,腐蚀至12 h时,产物以Zn、ZnO为主,伴有ZnSO₄、Zn(OH)₂和Zn₅(CO₃)₂(OH)₆。腐蚀至48 h时,腐蚀产物Zn、ZnO所对应的衍射峰强度减弱,ZnSO₄、Zn(OH)₂和Zn₅(CO₃)₂(OH)₆的衍射峰强度增加。腐蚀至96 h时,ZnSO₄、Zn(OH)₂、Zn₅(CO₃)₂(OH)₆和Zn₄SO₄(OH)₆的衍射峰强度都增加。结果表明,随着腐蚀时间的增加,工业大气环境中镀锌层表面的裸露区域逐渐消失,锈层逐渐覆盖,

腐蚀类型由局部腐蚀逐渐转变为均匀腐蚀。

由图4(b)可以看出,海洋大气环境中,腐蚀至12 h时,锈层由Zn、Zn(OH)₂、Zn₄CO₃(OH)₆H₂O、Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O组成。腐蚀至48 h时,Zn(OH)₂、Zn₄CO₃(OH)₆H₂O和Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O的衍射峰强度增加。腐蚀至96 h时,除了Zn(OH)₂、Zn₄CO₃(OH)₆H₂O和Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O的衍射峰之外,还出现了Fe、Fe(OH)₂的衍射峰,这与能谱测试结果一致。随着腐蚀时间的增加,Zn衍射峰强度的降低和Zn(OH)₂、Zn₄CO₃(OH)₆H₂O、Zn₅(OH)₈Cl₂H₂O衍射峰强度的逐渐增加,到Fe、Fe(OH)₂衍射峰的出现,表明镀锌层表面逐渐被锈层覆盖,并且在Cl⁻的穿透作用下,铁基体参与到腐蚀反应中,腐蚀类型由局部腐蚀转变为均匀腐蚀,并伴随有局部铁基体的腐蚀。

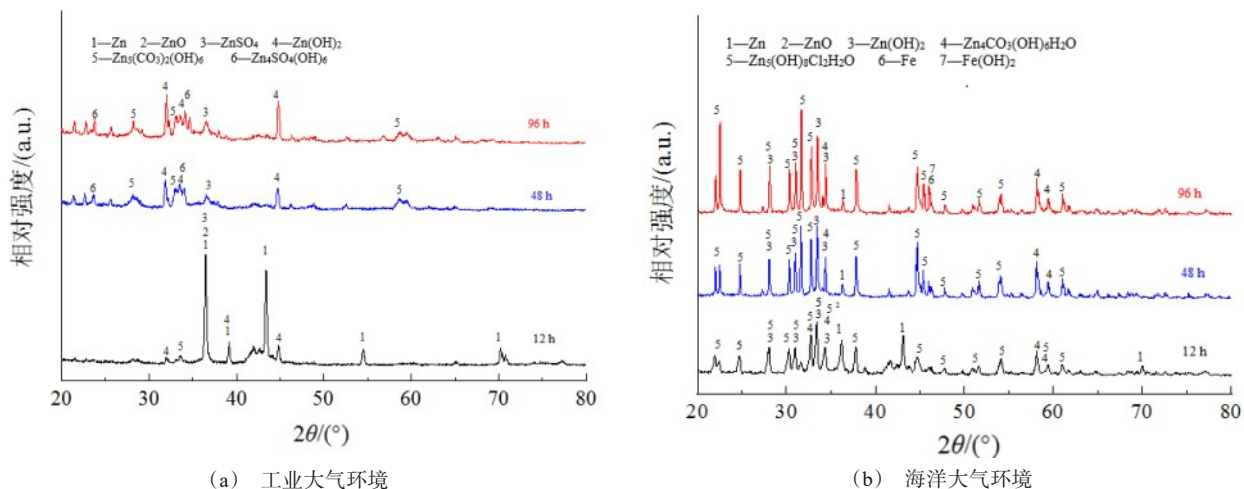


图4 工业和海洋大气环境中不同腐蚀时间下产物的XRD图

Fig.4 XRD photos of products at different corrosion time in industrial and marine atmosphere

2.4 灰色关联法及寿命预测

根据灰色关联法^[17-18]计算重庆市江津区、青岛市户外暴露试验与室内腐蚀试验的灰色关联度,分别将 X_0 江津、 X_0 青岛的室外暴露试验腐蚀深度作为参考数列, X_1 工业环境、 X_2 海洋环境的室内腐蚀试验中腐蚀深度作为比较数列,室外暴露试验对应的时间序列为(1、2、3、4、5、9 a),室内腐蚀试验对应的时间序列为(12、24、48、72、96、120 h),见表4。对原始数据按公式(4)、(5)进行初始化处理,按公式(6)、(7)、(8)、(9)、(10)计算室内腐蚀试验与室外暴露试

验之间的最大值、最小值及关联度,结果如表5所列。

$$X'_0 = \frac{X_0(k)}{X_0(1)} = \{X'_0(1), X'_0(2), \dots, X'_0(n)\} \quad (4)$$

$$X'_i = \frac{X_i(k)}{X_i(1)} = \{X'_i(1), X'_i(2), \dots, X'_i(n)\} \quad (5)$$

式中: X_0 为参考数列, X_i 为比较数列, $k=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, m$ 。

$$\nabla_{0i} = |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (6)$$

式中: ∇_{0i} 为绝对差数列。

表 4 海洋和工业大气环境中室内外腐蚀实验原始数据

Tab.4 Original experimental data of indoor and outdoor corrosion in marine and industrial atmosphere

时间/h	X_j	X_i	X_Q	X_2
12	1.062	7.143	1.200	6.933
24	2.722	8.368	2.300	7.738
48	4.602	10.259	4.190	9.419
72	7.100	11.730	5.244	10.049
96	8.342	12.610	6.130	12.570
120	14.166	13.690	10.908	13.831

$$\min_i \min_k = |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (7)$$

$$\max_i \max_k = |X'_0(k) - X'_i(k)| \quad (8)$$

式中: $\min_i \min_k$ 、 $\max_i \max_k$ 分别为两级最小差和最大差。

$\varepsilon_{0i}(k) =$

$$\frac{\min_i \min_k |X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X'_0(k) - X'_i(k)|}{|X'_0(k) - X'_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X'_0(k) - X'_i(k)|} \quad (9)$$

$$\gamma_{0i} = \frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon_{0i}(k)}{n} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{0i}(k)$ 为参考数列 X_0 和比较数列 X_i 在 k 时刻的关联系数, ρ 为分辨率, 一般取 0.5, γ_{0i} 关联度 > 0.6 时, 表示该序列具有较好的关联性。

表 5 镀锌层在两种环境中最大值和最小值及关联度

Tab.5 Maximum and minimum values and correlation degree of zinc plating in two environments

项目	X_j	X_Q
$\min_i \min_k$	0	0
$\max_i \max_k$	11.422	11.344
关联度	0.638	0.632

结果表明, 工业、海洋大气环境中室内腐蚀试验与室外暴露试验的灰色关联度均大于 0.6, 符合腐蚀动力学一致原则。同时查阅相关文献^[19-22]发现镀锌材料在实际海洋大气环境中的典型腐蚀产物为 $Zn(OH)_2$ 、 $Zn_4CO_3(OH)_6$ 、 $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$, 在工业大气环境中的典型腐蚀产物为 $ZnSO_4$ 、 $Zn(OH)_2$ 、 $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ 、 $Zn_4SO_4(OH)_6$, 与本文实验结果一致, 并且在表面形貌变化、腐蚀产物演变等方面均具有相似的变化规律。

综上所述, 采用室内腐蚀试验可以有效地模拟重庆市江津区工业大气环境和青岛市海洋大气环境

中镀锌层的腐蚀情况。通过腐蚀数据拟合得到青岛市室外的镀锌层腐蚀深度函数为 $D=1.237T$, 重庆市江津区室外的镀锌层腐蚀深度函数为 $D=1.602T$ 。令室内腐蚀试验的腐蚀深度等于室外暴露试验的腐蚀深度, 整理得重庆市江津区工业大气环境室内外腐蚀时间相关模型 $T_0=23.55T$, 青岛市海洋大气环境室内外腐蚀时间相关模型 $T_0=19.63T$ (T 为对应环境中大气暴露腐蚀时间, a ; T_0 为室内加速腐蚀试验时间, h)。可以利用室内外腐蚀时间相关模型推测镀锌层在工业、海洋大气环境的自然腐蚀情况, 例如, 在工业大气环境下进行 471 h 加速腐蚀试验, 可以预测重庆市江津区工业大气环境中镀锌层 20 年后的腐蚀特性, 对工程应用具有一定参考价值。

3 结论

(1) 金具镀锌层在 0 ~ 96 h 阶段海洋和工业大气环境中腐蚀深度均随时间而增长, 腐蚀速率均随时间而降低, 在 96 ~ 120 h 阶段海洋大气环境中腐蚀速率接近工业大气环境。

(2) 镀锌层在工业大气环境中, 锈层稀疏多孔, S 元素穿过锈层, 锈层成分有 $ZnSO_4$ 、 $Zn(OH)_2$ 、 $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$ 、 $Zn_4SO_4(OH)_6$, 而在海洋大气环境中, 锈层由稀疏逐渐转变成致密, Cl^- 穿蚀镀锌层, 造成点蚀, 锈层主要由 $Zn_4CO_3(OH)_6H_2O$ 、 $Zn(OH)_2$ 、 $Zn_5(OH)_8Cl_2H_2O$ 组成, 并伴随着基体腐蚀产物 $Fe(OH)_2$ 。

(3) 室内腐蚀试验与室外暴露试验关联度均大于 0.6, 有良好的相关性。重庆市江津区工业大气环境室内外腐蚀时间相关模型为 $T_0=23.55T$, 青岛市海洋大气环境室内外腐蚀时间相关模型为 $T_0=19.63T$ 。

参考文献

- [1] 夏晓健, 金焱, 乔汉文, 等. 输变电设备腐蚀状况调查与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(2): 121-127.
- [2] 张秀丽, 柯睿, 杨跃光, 等. 酸性湿沉降区域 500 kV 输电线路金具缺陷机理分析及防范措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 223-232.
- [3] 吴天博, 王宗江. 架空输电线路金具腐蚀失效分析研究[J]. 电气开关, 2020, 58(1): 69-72.
- [4] Fuente D, Castano J G, Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion of zinc[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1420-1436.

- [5] 张岩, 匡尹杰, 米梦芯, 等. 镀锌钢在清远黎溪变电站环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(11): 849-853.
- [6] 刘雨薇, 王振尧, 王军, 等. 输电塔杆用热浸镀锌钢在模拟酸雨大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 426-432.
- [7] Yin Q, Wang Z Y, Pan C. Initial corrosion behavior of pure zinc in simulated tropical marine atmosphere[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12): 2582-2591.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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): 369-371, 376.
- [11] 刘雨薇, 尹奇, 王振尧, 等. 热镀锌层在模拟沿海工业大气环境中的腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 87-91, 133.
- [12] 汪川, 曹公旺, 潘辰, 等. 碳钢、耐候钢在3种典型大气环境中的腐蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(1): 39-46.
- [13] Wang Y, Mu X, Dong J H A, et al. Insight into atmospheric corrosion evolution of mild steel in a simulated coastal atmosphere[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 76: 41-50.
- [14] 刘雨薇, 王振尧, 曹公望, 等. Zn在模拟酸雨大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 375-383.
- [15] 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.
- [16] 赵朋飞, 郭文营, 陶阳, 等. 含镀层合金钢循环盐雾加速腐蚀行为与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 236-246.
- [17] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
- [18] 樊栋, 曾佳俊, 张三平, 等. 热镀锌、渗锌层在城市及化工大气环境中的大气腐蚀与加速腐蚀相关性[C]// 2017全国腐蚀新材料应用技术发展研讨会论文集, 2017: 68-71.
- [19] 张丹, 王振尧. 在盐湖地区暴露48个月纯锌的腐蚀行为[J]. 材料研究学报, 2019, 33(8): 603-613.
- [20] Almeida E, Morcillo M, Rosales B. Atmospheric corrosion of zinc part 2: Marine atmospheres[J]. British Corrosion Journal, 2000, 35(4): 289-296.
- [21] Ligier V, Wéry M, Hihn J Y, et al. Formation of the main atmospheric zinc end products: $\text{NaZn}_4\text{Cl}(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Zn}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_4\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ in $[\text{Cl}^-]$ $[\text{SO}_4^{2-}]$ $[\text{HCO}_3^-]$ $[\text{H}_2\text{O}_2]$ electrolytes[J]. Corrosion Science, 1999, 41(6): 1139-1164.
- [22] Qu Q, Yan C, Wan Y, et al. Effects of NaCl and SO_2 on the initial atmospheric corrosion of zinc[J]. Corrosion Science, 2002, 44(12): 2789-2803.