

模拟海洋与工业大气环境下结构钢腐蚀行为

舒赣平¹, 陈 尧², 卢瑞华¹, 武成凤¹

(1. 东南大学 土木工程学院混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 江苏科技大学 土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 分别采用室内盐雾试验模拟海洋大气环境、周浸试验模拟工业大气环境, 研究碳素结构钢在两种不同模拟环境下的腐蚀行为。通过 SEM 扫描电镜分析了碳素结构钢在两种不同环境下的腐蚀微观形貌差异, 采用三维非接触表面形貌仪获得腐蚀试样点蚀深度分布模型和点蚀深度变异系数。结果表明: 两种不同大气环境下碳素结构钢腐蚀形貌有明显差异; 平均腐蚀深度与时间呈幂函数关系; 点蚀深度近似服从正态分布, 点蚀深度变异系数随腐蚀时间的增长有减小趋势, 可作为碳素结构钢腐蚀特征评价指标之一。进一步采用灰色系统理论对碳素结构钢室内外腐蚀相关性进行分析, 验证了室内模拟加速腐蚀试验的合理性, 并建立了室内外腐蚀相关性预测模型, 可用于碳素结构钢在海洋大气和工业大气环境下腐蚀程度的预测。

关键词: 碳素结构钢; 微观形貌; 点蚀深度; 变异系数; 相关性模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0475-07

Corrosion behavior of structural steel in simulated marine and industrial atmosphere environment

SHU Ganping¹, CHEN Yao², LU Ruihua¹, WU Chengfeng¹

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212100, China)

Abstract: The corrosion behavior of carbon structural steel in two different simulated environments were studied by simulating marine atmosphere with salt spray test and industrial atmosphere with alternate immersion test. The corrosion micro morphology of carbon structural steel in two different environments was analyzed by SEM. The pitting depth distribution model and variation coefficient of pitting depth were obtained by three-dimensional non-contact surface morphology analyzer. The results show that the corrosion morphology of carbon structural steel is obviously different in two different atmospheric environments. The relationship between average corrosion depth and time is a power function. The pitting depth approximately follows the normal distribution, and the variation coefficient of pitting depth decreases with the increase of corrosion time, which can be used as one of the evaluation indexes of carbon structural steel corrosion characteristics. Then, the gray system theory was used to analyze the correlation between indoor and outdoor corrosion of carbon structural steel, which verified the rationality of indoor simulated accelerated corrosion test. The correlation prediction models of indoor and outdoor corrosion were established, which can be used to predict the corrosion depth of carbon structural steel in marine atmosphere and industrial atmosphere.

Key words: carbon structural steel; microscopic morphology; pitting depth; variable coefficient; correlation model

根据中国工程院重大咨询项目“我国腐蚀状况及控制战略研究”的调查结果表明: 2014 年, 我国全行业腐蚀总成本为 21 278.2 亿元人民币, 约占当年国内生产总值(GDP)的 3.34%^[1]。特别是土

木工程中的结构钢材腐蚀, 不仅会造成巨大的经济损失, 也将给工程结构带来难以预测的安全隐患和耐久性风险, 值得高度关注。

我国大气环境分为乡村大气、城市大气、工

收稿日期: 2022-06-01

修改稿日期: 2022-08-08

基金项目: 江苏省节能减排(建筑节能)专项资金奖补项目(KT12-1); 江苏科技大学青年科技创新项目(2021TJ170J)

第一作者: 舒赣平(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 钢结构理论与设计。E-mail: shuganping@seu.edu.cn

通信作者: 陈 尧(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 钢结构耐久性与全寿命。E-mail: chenyaoy0727@just.edu.cn

业大气和海洋大气^[2]。其中,工业大气环境下的腐蚀速率可高达 1.0 mm/a;海洋大气环境下的腐蚀速率可高达 5.0 mm/a,腐蚀情况极其严重。目前,大气暴露腐蚀试验是研究结构钢在真实环境中腐蚀行为最可靠、最精确的方法之一。但存在试验周期长、区域性强、重现性差等缺点,该方法不利于重复性试验推广。

我国已对 17 种碳钢、低合金钢和耐候钢等钢材进行了长达 16 a 的户外大气暴露腐蚀试验研究^[3],积累了一定的钢材大气暴露腐蚀实测数据,为研究钢材腐蚀机理及其防治技术、验证室内加速腐蚀试验方法的科学性与相关性奠定了良好的技术基础。室内模拟加速腐蚀试验可以弥补大气暴露试验的不足,具有重现性好、周期短、相关性好的特点。

目前,国内外学者通过合理、科学地调整腐蚀溶液的配比实现针对某一特殊环境的近似模拟^[4-9],并取得了很好的模拟效果。Montoya^[5]、田玉琬等^[6]和王振尧等^[7]通过调整腐蚀溶液的配比,主要从腐蚀动力学特征、锈层微观形貌和腐蚀产物方面验证了室内加速腐蚀与户外暴露腐蚀具有较好的相关性。但是,对于腐蚀后三维表面形貌没有进行深入统计分析。盛杰^[8]、童乐为^[9]、郑山锁等^[10]主要运用室内加速腐蚀手段获取一定腐蚀程度的试样和构件,缺少与环境之间现象的对比和表面形貌的分析。徐善华等^[11]、王友德^[12]研究模拟环境与一般大气环境下锈蚀的表面形貌差异,并对试样蚀坑参数进行统计总结,但缺少与户外暴露腐蚀情况的对比和相关性预测。

因此,针对结构钢在海洋大气和工业大气环境下的腐蚀最为严重的情况,本文根据海洋大气和工业大气环境腐蚀介质的差异,分别采用盐雾试验模拟海洋大气环境、周浸试验模拟工业大气环境,研究碳素结构钢(以下简称“碳钢”)在两种不同环境下的腐蚀动力特征和差异,并依次通过 SEM(扫描电子显微镜)和 JR25(三维非接触形貌仪)分析试样腐蚀后的微观形貌和三维表面形貌,揭示两种不同大气环境下碳钢表面形貌随时间的演变规律和差异。最后,通过对室内加速腐蚀与户外大气暴露腐蚀动力特征进行相关性分析,建立室内外相关性预测模型,研究成果可用于对碳钢在户外海洋和工业

大气环境腐蚀情况的预测。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验选用 Q235 碳素结构钢,试验前采用火花直读光谱仪对碳钢试样进行合金元素化学成分检测,主要化学成分检测结果见表 1。

表 1 Q235 碳钢主要化学成分 /%

Tab. 1 Chemical composition of Q235 carbon steel /%

化学成分	C	Si	Mn	P	S
质量分数	0.208	0.248	0.508	0.017	0.006
化学成分	Cr	Ni	Cu	Mo	Als
质量分数	0.026	0.010	0.008	0.003	0.025

采用数控线切割机床切成 150 mm×70 mm×2 mm(长×宽×厚)^[13]试样,试验数量和周期详见表 2。通过盐雾试验模拟海洋大气环境,共 7 个周期,总腐蚀时间为 4 200 h;周浸试验模拟工业大气环境,共 5 个周期,总腐蚀时间为 960 h。试验前对所有试样进行丙酮去油,再用酒精脱水后烘干,并采用精度为 0.1 mg 的分析天平进行称重,得到试样腐蚀前的初始质量。

表 2 试验设计

Tab. 2 Test design

试样尺寸 /mm	试验 方法	模拟 环境	试验 周期	时间 /h	试样 数目
150×70×2	盐雾 试验	海洋 大气	7	4 200	14
150×70×2	周浸 试验	工业 大气	5	960	10
总计					24

注:盐雾试验 7 个试验周期分别为 600 h、1 200 h、1 800 h、2 400 h、3 000 h、3 600 h 和 4 200 h;周浸试验 5 个试验周期分别为 120 h、240 h、480 h、720 h 和 960 h。

1.2 试验过程

采用标准盐雾箱(YWX/Q-250)进行盐雾试验。根据文献[6]研究结果表明:采用 3.5% NaCl + 0.001 mol/L NaHSO₃ 腐蚀溶液模拟海洋大气环境具有较好的相关性。每个周期平行试样数目为 2 个,其他试验工况详见表 3。试样放置角度与试验箱约为 25°,定期对试样进行翻转,确保试样两面锈蚀程度接近。其他盐雾试验条件依据规范^[13],具体见表 3。试样在盐雾箱内的情况如图 1 所示。

表 3 腐蚀试验环境

Tab. 3 Corrosion test environment

试验手段	大气环境	试验条件
盐雾试验	海洋	溶液: 3.5%NaCl+0.001 mol/L NaHSO ₃ ; 温度: 35±2 ℃; 湿度: >95%RH; PH 值: 6.5~7.2; 喷气压力: 120±5 MPa; 循环周期: 12 h(喷雾 6 h, 停喷 6 h)
周浸试验	工业大气	溶液: 0.01 mol/L NaHSO ₃ +0.001 mol/L NaCl; 温度: 45±2 ℃; 湿度: 70%±5% RH; PH 值: 4.4~4.8; 循环周期: 2 h(注水 18 min, 浸润 20 min, 排水 18 min, 风干 8 min, 烘干 50 min, 冷却 6 min)

采用标准干湿循环试验箱(NELD-VS830)进行周浸试验模拟工业大气环境, 腐蚀溶液为 0.01 mol/L NaHSO₃ + 0.001 mol/L NaCl^[14], 每个周期平行试样数目为 2 个, 定期补充腐蚀溶液, 确保试样能被腐蚀溶液完全浸泡. 其他周浸试验条件依据规范^[15], 试样在周浸箱内的情况如图 2 所示.

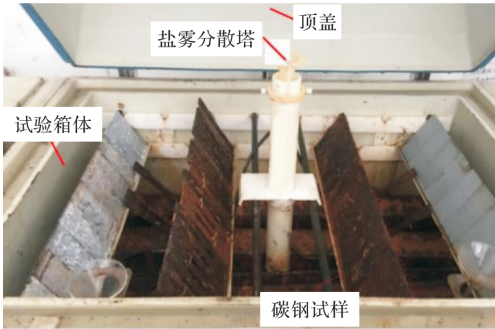


图 1 盐雾试验箱内部

Fig. 1 Interior of salt spray test chamber



图 2 周浸试验箱内部

Fig. 2 Interior of alternate immersion test chamber

2 试验结果分析

2.1 腐蚀现象

碳钢在盐雾试验条件下(模拟海洋大气环境), 表面腐蚀形貌的变化见图 3. 腐蚀初期(600 h), 锈蚀颜色较浅(橙色)、锈层薄, 附着在试样表面. 随着腐蚀时间的增长(1 200 h→2 400 h), 颜色逐渐加深(橙色→红褐色), 锈层逐渐增厚, 腐蚀后期锈层颜色由红褐色变为黑褐色, 并且锈层中间出现空鼓、局部松软、掉角现象.

碳钢在以 NaHSO₃ 溶液为主的周浸试验条件下(模拟工业大气环境), 形成的锈层较薄, 外层酥脆, 呈分层状态, 有明显鼓泡或裂纹现象, 见图 4. 呈现不同腐蚀形貌的原因归结为氢原子向钢基体渗透过程中遇到空隙、夹渣和裂纹等缺陷时造成体积膨胀. 当缺陷在钢材表面时形成鼓泡; 在钢材深层时出现裂纹.

可以看出, 碳钢在模拟海洋大气环境与工业大气环境的腐蚀外观形貌有很大差异.

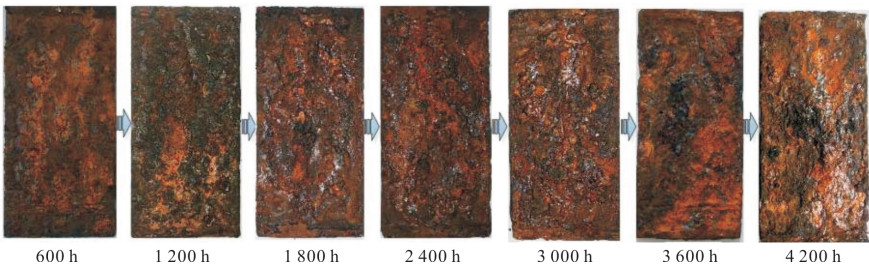


图 3 模拟海洋大气环境碳钢试样腐蚀形貌

Fig. 3 Corrosion morphology of carbon steel sample in simulated marine atmospheric environment

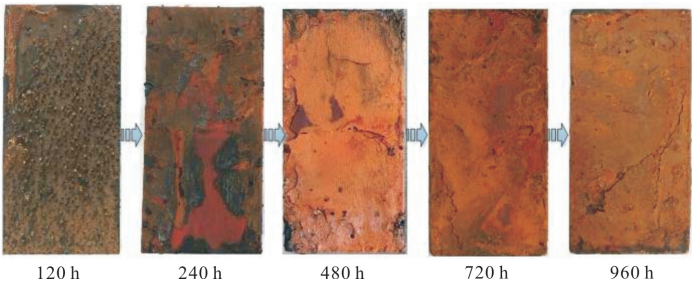


图 4 模拟工业大气环境碳钢试样腐蚀形貌

Fig. 4 Corrosion morphology of carbon steel sample in simulated industrial atmospheric environment

2.2 表面微观形貌分析

通过 SEM 扫描电镜对腐蚀初期和后期的试样进行锈层表面微观形貌观察,结果如图 5、图 6 所示。盐雾试验条件下,碳钢腐蚀初期(600 h,图 5(a)),试样表面出现了纵横细小裂纹,且有球状铁氧化物生成,说明腐蚀速率加快是由于裂纹出现使氧气侵入。腐蚀后期(4 200 h,图 5(b)),试样表面球状氧化产物已积累很多填满裂纹,可有效阻止氧气和腐蚀性介质渗透,内部出现空鼓。

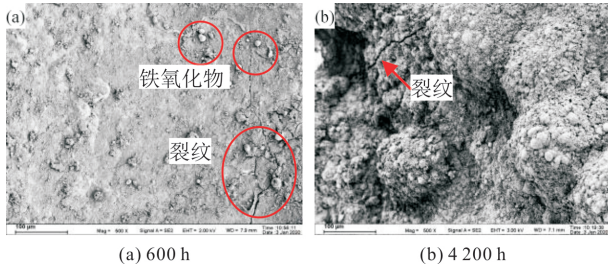


图 5 试样表面微观形貌—模拟海洋大气环境

Fig. 5 Surface micromorphology of sample- simulated marine atmospheric environment

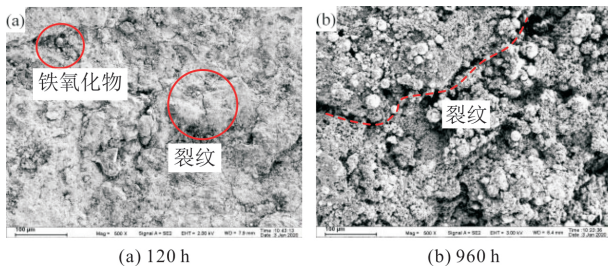


图 6 试样表面微观形貌—模拟工业大气环境

Fig. 6 Surface micromorphology of sample- simulated industrial atmospheric environment

在周浸试验条件下,碳钢腐蚀初期(120 h,图 6(a)),试样表面与盐雾试验条件下相似,见图 5(a),有纵横裂纹出现,区别在于周浸试验条件下的裂纹宽度数量较多、深度较窄浅,并伴随少量球状产物。腐蚀后期(960 h,图 6(b)),试样表面已布满很多球状产物,且尺寸较腐蚀初期得到快速发展。与通过肉眼观察到的试样(图 4, 960 h)腐蚀现象吻合,锈层表面疏松,伴有裂纹、分层现象。

2.3 点蚀深度测量及统计分析

采用 JR25(三维非接触表面形貌仪)对除锈后试样扫描,扫描区域 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,扫描步长 $150\text{ }\mu\text{m}$,每个试样可获取 10 201 个蚀坑参数信息。试样三维扫描结果如图 7 所示(以盐雾试验 3 600 h, F06 试样为例)。

图 7(a)、(b)分别为试样 2D 和 3D 扫描形貌;图 7(c)为扫描蚀坑深度分布概率直立方图;图 7(d)为正态分布检验图;图 7(e)为最大名义蚀坑深度 h_{\max} 位置,分别沿 X、Y 两个方向的腐蚀 2D 断面轮廓图。

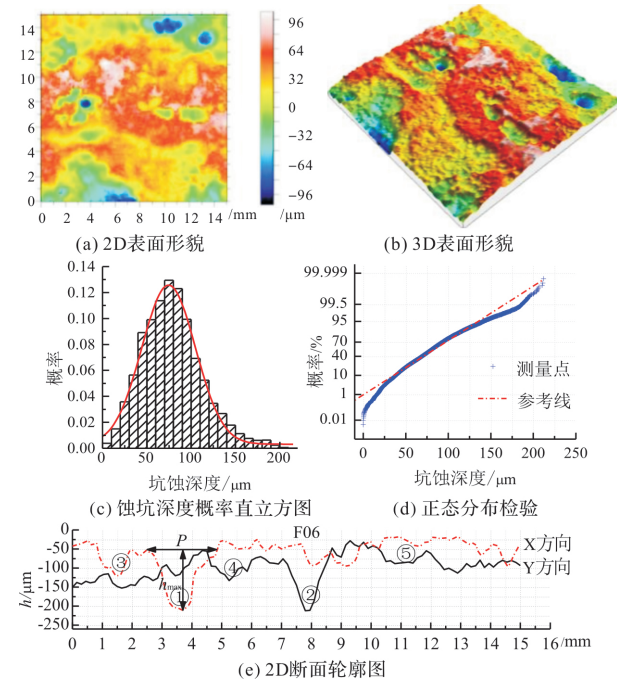


图 7 试样腐蚀后表面形貌扫描结果(盐雾 3 600 h)

Fig. 7 Scanning results of surface morphology of the sample after corrosion (Salt spray 3 600 h)

试样腐蚀后的断面形貌如图 8 所示。 h_{\max} 为名义最大蚀坑深度(以 0 参考面为基准面); d 为平均腐蚀深度(以初始参考面为基准面); P 为蚀坑坑口直径。

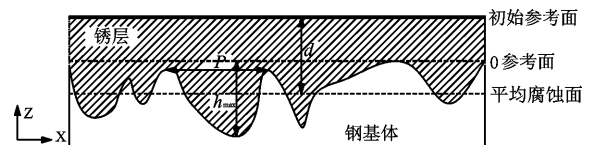


图 8 腐蚀试样断面形貌

Fig. 8 Cross section morphology of corrosion sample

蚀坑深度分布模型检验结果见表 4,从表 4 和图 7(c)可以看出,两种大气环境下蚀坑深度均服从正态分布。通过计算可以进一步得到不同腐蚀时间点蚀深度变异系数 $COV(COV=\sigma/\mu)$ 。可以看出,随着腐蚀时间增长,蚀坑深度逐渐增大,点蚀深度值初期离散性较大,后期离散型变小,变异系数逐渐有减小趋势。模拟海洋大气环境下的点蚀深度变异系数小于模拟工业大气环境(除 480 h 试样)。

表 4 试样蚀坑深度分布模型检验结果

Tab. 4 Test results of pitting depth distribution model

试样/h	正态分布参数			
	$\mu/\mu\text{m}$	σ	R-square	COV
600	7.159	3.349	0.960 2	0.468
1 200	17.143	8.217	0.953 5	0.479
1 800	28.413	13.521	0.968 5	0.476
2 400	35.425	15.258	0.961 4	0.431
3 000	42.347	16.502	0.986 3	0.390
3 600	74.543	30.281	0.985 5	0.406
4 200	162.193	49.888	0.981 9	0.308
120	5.762	3.183	0.967 5	0.552
240	8.689	4.759	0.977 4	0.548
480	13.665	3.992	0.996 9	0.292
720	22.412	9.292	0.953 6	0.415
960	24.432	12.408	0.971 1	0.508

因此, 可以采用平均蚀坑深度和点蚀深度变异系数作为碳钢不同腐蚀时间的腐蚀特征评估指标。

2.4 平均腐蚀深度

对腐蚀后试样采用物理和化学相结合的方法除锈^[16], 具体除锈过程详见文献^[17]。采用精度为 0.1 mg 分析天平称重, 利用失重法得到试样平均腐蚀深度。

$$d(T)=\frac{m_0-m_1}{\rho A_0}\times 10^4 \quad (1)$$

式中: $d(T)$ 为试样平均腐蚀深度, μm ; m_0 为试样初始质量, g; m_1 为试样腐蚀后剩余质量, g; ρ 为钢材密度, 等于 7.85 g/cm^3 ; A_0 为试样表面积 cm^2 , 为两个表面积之和, 由于板厚较薄, 忽略横截面积影响。

碳钢在不同模拟大气环境下, 腐蚀深度与时间的关系如图 9 所示(不同周期取 2 个平行试样平均值)。可以看出, 碳钢腐蚀速率随时间增长而降低, 平均腐蚀深度与时间呈非线性关系。

对碳钢在不同模拟环境下, 腐蚀深度值进行拟合, 拟合结果分别见公式(2)和公式(3)。

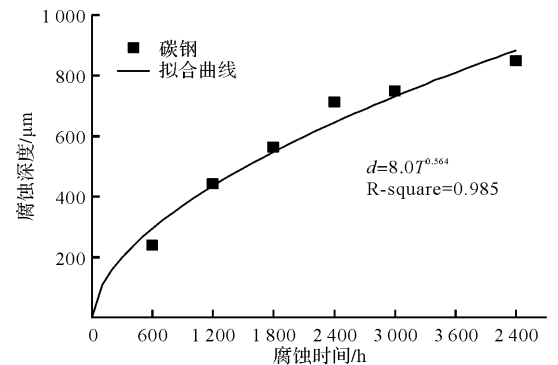
模拟海洋大气环境

$$d=8.0T_c^{0.564} \quad (2)$$

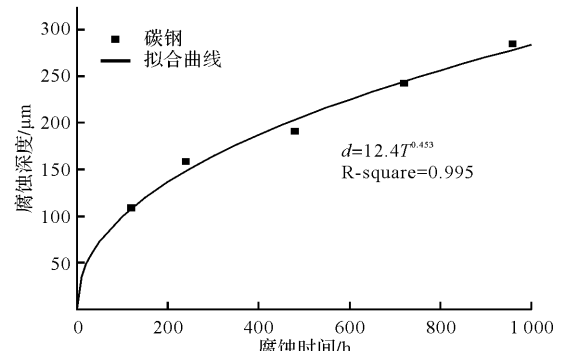
模拟工业大气环境

$$d=12.4T_c^{0.453} \quad (3)$$

式中: d 为碳钢腐蚀深度, μm ; T_c 为碳钢加速腐蚀时间, h。



(a) 模拟海洋大气环境



(b) 模拟工业大气环境

图 9 试样腐蚀深度与时间关系曲线

Fig. 9 Relation curves between corrosion depth and time of samples

3 碳钢室内模拟加速腐蚀与户外大气暴露的相关性

3.1 灰色系统理论

根据灰色系统理论, 不同数据列 $X_1, X_2 \cdots$ 与参与数列 X_0 之间的灰色关联度系数, 可以描述两个数集的关联程度^[6,18], 即

$$y_i : y = X_i : X_{\text{average}} \quad (4)$$

$$\gamma = \sum \frac{\min \min(y_0 - y_i) + \rho \max \max(y_0 - y_i)}{(y_0 - y_i) + \rho \max \max(y_0 - y_i)} \quad (5)$$

式中: N 为数据数目; ρ 为分辨率, 取 0.5; γ 为灰色关联度, 数值值越大, 数集关联度越大, 当 $\gamma > 0.6$ 时, 表明数集具有较好关联性^[6]; $\min \min(y_0 - y_i)$ 、 $\max \max(y_0 - y_i)$ 为两级最小差和最大差。

3.2 模拟腐蚀与户外腐蚀关联度

将本文中采用盐雾试验模拟海洋大气环境与实际海洋大气环境(青岛——湿润型海洋性气候、万宁——高温高湿型海洋性气候)进行相关性分析。采用公式(2)得到模拟加速腐蚀 600 h、1 200 h、2 400 h、4 800 h 和 9 600 h 的腐蚀深度值, 并根据文献^[3]得到碳钢(Q235、A3、3C 和 20 钢)在青岛和万宁地区 16 a 的大气暴露数据; 最后根据公式(5)

计算腐蚀关联度系数 γ , 结果见表 5 和表 6.

表 5 模拟海洋大气与青岛海洋大气腐蚀灰色关联度

Tab. 5 Grey correlation degree between simulated marine atmosphere and Qingdao marine atmosphere corrosion

时间	青岛腐蚀关联度系数 $\gamma/\mu\text{m}$				
	Q235	A3	3C	20	X_1
1 a(600 h)	79.0	74.9	58.9	71.5	295.0
2 a(1 200 h)	114.0	105.5	81.4	96.6	436.1
4 a(2 400 h)	209.2	118.0	120.0	147.2	644.7
8 a(4 800 h)	288.0	199.2	191.2	236.0	953.1
16 a(9 600 h)	320.0	332.8	316.8	432.0	1 409.1
关联度 γ	0.630	0.595	0.743	0.780	-

表 6 模拟海洋大气与万宁海洋大气腐蚀灰色关联度

Tab. 6 Grey correlation degree between simulated marine atmosphere and Wanning marine atmosphere corrosion

时间	万宁腐蚀关联度系数 $\gamma/\mu\text{m}$				
	Q235	A3	3C	20	X_1
1a(600 h)	71.2	49.0	34.6	45.3	295.0
2 a(1 200 h)	156.5	89.3	52	71.0	436.1
4 a(2 400 h)	480.8	193.2	151.6	221.2	644.7
8 a(4 800 h)	-	731.2	670.4	1 000.8	953.1
16 a(9 600 h)	-	-	-	2 022.4	1 409.1
关联度 γ	0.698	0.762	0.779	0.745	-

从表中可以看出, 采用本文盐雾试验方法模拟碳钢在海洋大气环境的腐蚀动力学行为, 与万宁高温高湿海洋大气环境相关性较好, Q235 钢的灰关联系数为 0.698, A3 钢为 0.762, 3C 钢为 0.779, 20 钢为 0.745; 与青岛湿润型海洋性气候除 A3 钢外, 其他碳钢相关性均大于 0.6, 相关性较好.

采用上述方法, 计算模拟工业大气环境与江津—工业大气环境的相关性. 并通过文献[3]获得碳钢(Q235、A3、3C 和 20 钢)在江津地区 16 a 的大气暴露腐蚀数据; 进一步得到腐蚀关联度系数 γ , 计算结果见表 7.

表 7 模拟工业大气与江津工业大气腐蚀灰色关联度

Tab. 7 Grey correlation degree between simulated industrial atmosphere and Jiangjin industrial atmosphere corrosion

时间	江津工业大气腐蚀灰色关联度 $\gamma/\mu\text{m}$				
	Q235	A3	3C	20	X_2
1 a(240 h)	88.0	69.0	58.3	80.6	159.4
2 a(480 h)	116.3	105.8	94.8	128.8	193.6
4 a(720 h)	208.0	129.6	112.8	154.0	285.8
8 a(1 920 h)	262.4	173.6	147.2	-	622.4
关联度 γ	0.648	0.727	0.697	0.651	-

从表 7 可以看出, 采用本文周浸试验方法模拟工业大气环境, 满足室内外腐蚀增长一致性, 其

关联度系数均大于 0.6.

对于 Q235、A3、3C 和 20 钢 4 种碳钢而言, 在相同大气环境下, 腐蚀动力学过程基本一致, 可近似采用统一的腐蚀预测模型.

3.3 室内外腐蚀相关性预测模型

室内加速腐蚀试验加速比 K , 为达到相同腐蚀量时室内外加速腐蚀所需时间之比.

$$K = \frac{T}{T_c} = \left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{n_0}} T_c^{\frac{n}{n_0}-1} \quad (6)$$

式中: X_0 、 n_0 为大气暴露腐蚀数据拟合曲线的常系数和常指数; X 、 n 为室内加速腐蚀试验数据拟合曲线的常系数和常指数; T 、 T_c 为分别为大气暴露腐蚀时间和室内加速腐蚀时间.

腐蚀加速比 K 并非常量, 而是随室内加速腐蚀时间的延长而变化. 因此, 碳钢在青岛为湿润型海洋大气、万宁为高温高湿型海洋大气、江津为工业大气环境的腐蚀模型分别见公式(7)~(9).

青岛大气环境, 碳钢腐蚀深度

$$D_{\text{QD}} = 69.5 T^{0.578} \quad (7)$$

万宁大气环境, 碳钢腐蚀深度

$$D_{\text{WN}} = 37.5 T^{1.463} \quad (8)$$

江津大气环境, 碳钢腐蚀深度

$$D_{\text{JJ}} = 80.2 T^{0.415} \quad (9)$$

式中: D 为碳钢大气暴露腐蚀深度, μm ; T 为大气暴露腐蚀时间, a;

令碳钢室内加速腐蚀量等于户外大气暴露腐蚀量, 即

海洋大气: $d = D_{\text{QD}}$; $d = D_{\text{WN}}$, d 见公式(2);

工业大气: $d = D_{\text{JJ}}$, d 见公式(3).

得到两种不同大气环境下, 室内外腐蚀相关性模型, 见表 8.

表 8 室内加速腐蚀与户外腐蚀相关性模型

Tab. 8 Correlation model between indoor accelerated corrosion and outdoor corrosion

大气环境	室内腐蚀环境	相关性模型
湿润型海洋		$T_c = 46.25 T_{\text{QD}}^{1.025}$
大气	3.5% NaCl + 0.001	为公式(10)
高温高湿型	mol/L NaHSO ₃	$T_c = 15.49 T_{\text{WN}}^{2.594}$
海洋大气		为公式(11)
工业大气	0.01 mol/L NaHSO ₃ +	$T_c = 61.62 T_{\text{JJ}}^{0.916}$
	0.001 mol/L NaCl	为公式(12)

注: T_c 为预测碳钢大气暴露腐蚀程度所对应的室内加速腐蚀时间/h; T_x 为某种大气环境下, 暴露腐蚀时间/a.

其中, 公式(10)可以预测与青岛相似湿润型海洋大气环境; 公式(11)可以预测与万宁相似高温高湿型海洋大气环境; 公式(12)可以预测与江津

相似亚热带湿润型酸雨工业大气环境。可以看出,通过室内加速模拟腐蚀试验可以针对某特定环境下钢材的腐蚀状态和失效年限进行近似预测。

4 结论

通过室内加速腐蚀试验开展了碳钢在模拟海洋大气与工业大气环境下的腐蚀行为。主要得到以下结论:

(1)碳钢在模拟海洋大气与工业大气环境下的腐蚀形貌存在差异。在模拟海洋大气环境下,锈蚀产物内部疏松,外部坚硬,蚀坑呈球冠状;模拟工业大气环境下,锈蚀产物表面疏松呈层片状,蚀坑呈圆锥形;

(2)碳钢点蚀深度近似服从正态分布;模拟海洋大气与工业大气环境下,蚀坑径深比分别为26~175和50~75;点蚀深度变异系数随腐蚀时间的增长有减小趋势,建议采用平均腐蚀深度和点蚀深度变异系数作为碳钢腐蚀特征评估指标;

(3)碳钢在模拟海洋大气与工业大气环境下的腐蚀动力特征与户外大气暴露腐蚀具有良好的相关性,验证了本文室内加速腐蚀方法的合理性;通过灰色系统理论建立了碳钢室内模拟加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性预测模型。

参考文献 References

- [1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2018, 1-56.
HOU Baorong. The cost of corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2018, 1-56.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防腐技术规程: JGJ/T 251—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
MOHURD. Technical specification for anticorrosion of building steel structure: JGJ/T 251-2011[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [3] 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.
LIANG Caifeng, HOU Wentai. Atmospheric sixteen-year corrosion of carbon and low alloy steels[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(1): 1-6.
- [4] MELCHERS R E. A review of trends for corrosion loss and pit depth in longer-term exposures[J]. Corrosion and Materials Degradation, 2018, 1(1): 42-58.
- [5] MONTROYA P, Díaz I, GRANIZO N. An study on accelerated corrosion testing of weathering steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 142(1): 220-228.

- [6] 田玉琬, 程学群, 李晓刚. 海洋大气腐蚀的室内模拟加速试验方法研究[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(8): 781-784.
TIAN Yuwan, CHENG Xuequn, LI Xiaogang. A study of simulated indoor accelerated testing method for marine atmospheric corrosion[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(8): 781-784.
- [7] 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.
GUO Mingxiao, PAN Chen, WANG Zhenyao, et al. A study on the initial corrosion behavior of carbon steel exposed to a simulated coastal-industrial atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(1): 65-75.
- [8] 盛杰. 荷载与地下环境耦合作用下 H 型钢梁锈蚀特征及力学性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
SHENG Jie. Study on surface characteristics and mechanical properties of corroded H steel beam under coupling action of load and underground environment [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [9] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 53-60.
SHI Weizhou, TONG Lewei, CHEN Yiyi, et al. Experimental study on influence of corrosion on behavior of steel material and steel beams[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 53-60.
- [10] 郑山锁, 张晓辉, 黄威曾, 等. 近海大气环境下锈蚀平面钢框架抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 62-73.
ZHENG Shansuo, ZHANG Xiaohui, HUANG Weizeng, et al. Experimental research and finite element analysis on the seismic behavior of corroded plane steel frames under offshore atmospheric environment [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 62-73.
- [11] 徐善华, 宋翠梅, 李晗. 模拟海洋和一般大气环境下锈蚀钢材表面形貌差异研究[J]. 材料导报, 2021, 35(2): 2125-2132.
XU Shanhua, SONG Cuimei, LI Han. Difference in surface characteristics of corroded steel under simulated marine and general atmosphere environment[J]. Materials Reports, 2021, 35(2): 2125-2132.
- [12] 王友德. 一般大气环境下锈蚀钢框架抗震性能退化与评定[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
Wang Y D. Deterioration and evaluation of seismic performance of corroded steel frames under general atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.

(下转第 490 页)

- 107-115.
- [10] Robert Tremblay. Inelastic seismic response of steel bracing members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58:665-701.
- [11] ZHANG Yaochun, LIAN Weian, ZHANG Wenyuan. Factors affecting the low cycle fatigue behavior around the weak axis of welded I-section bracing members [C]//Proceeding of the international conference on fracture and damage mechanics. Harbin: Key Engineering Materials 2006.
- [12] REMENNIKOV A M, WALPOLE W R. Seismic behavior and deterministic design procedures for steel V-braced frames[J]. Earthquake Spectra. 1998, 14(2): 335-355.
- [13] 中国工程建设标准化协会. 建筑工程抗震性态设计通则: CECS 160: 2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- CECS. General Rule for Performance-Based Seismic Design of Buildings; CECS 160: 2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [14] ASCE. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures; ASCE/SEI 7-16 [S]. Reston, Virginia: ASCE, 2017.
- [15] STEWART J P, CHIOU S J, BRAY J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2002, 22: 765-772.
- [16] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 69-78, 116. LV Hongshan, ZHAO Fengxin. Site coefficients suitable to China site category [J]. ACTA Seismologica Sinica. 2007, 29(1): 69-78, 116.
- (编辑 沈 波)

(上接第 481 页)

- [13] 中国国家标准化管理委员会. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests: GB/T 10125—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [14] 中华人民共和国铁道部. 铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法: TB/T 2375—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Test method for periodic infiltration corrosion of weathering steel for railway: TB/T 2375—1993 [S]. Beijing: China Standards Press, 2003.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀盐溶液周浸试验: GB/T 19746—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of metals and alloys-Alternate immersion test in salt solution: GB/T 19746—2018 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2018.
- [16] The Standards Policy and Strategy Committee. Corrosion of metals and alloys-removal of corrosion products from corrosion test specimens; ISO 8407—2014 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.
- [17] 陈尧. 腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- CHEN Yao. Research on the degradation of steel structures for the needs of structural life-cycle design and time-dependent reliability in corrosive environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [18] 唐其环. 低合金钢大气腐蚀数据的拟合及预测-GM (1,1)模型与回归模型的对比[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 210-213.
- TANG Qihuan. Fitting and prediction of atmospheric corrosion data of low alloy steel comparison between GM (1,1) model and regression model[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1995, 7 (3): 210-213.
- (编辑 沈 波)