

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.11.002

热轧碳钢 SPHC 在天津大气环境中的腐蚀行为

董艇舰¹, 李柯², 陈亚军², 宋肖肖^{2*}, 任凯旭³, 张超⁴

(1. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300; 3. 中国汽车技术研究中心, 天津 300162; 4. 中国民航大学基础实验中心, 天津 300300)

摘要: 针对热轧钢 SPHC 的大气腐蚀问题, 通过在天津自然环境下开展为期 1 年的 SPHC 钢大气暴露试验, 依托腐蚀动力学分析、锈层形貌观察、腐蚀产物成分分析、电化学测试等研究了 SPHC 钢在天津大气环境中的腐蚀行为。结果表明, 在暴晒 6 个月时, SPHC 钢的腐蚀速率开始下降, 腐蚀产物主要为 γ -FeOOH、 α -FeOOH 和 Fe₃O₄, 随着暴露时间的增加 γ -FeOOH 逐渐向更稳定的腐蚀产物转化, 表面较为致密的腐蚀产物含量增多, 同时锈层不断增厚形成了双层结构, 对基体的保护性逐渐增强, 整体耐蚀性不断提高。

关键词: 热轧钢; 大气腐蚀; 试验研究; 电化学

中图分类号: TG172.3 **文献标识码:** A

Corrosion Behavior of Hot Rolled Carbon Steel SPHC in Tianjin Atmospheric Environment

DONG Tingjian¹, LI Ke², CHEN Yajun², SONG Xiaoxiao^{2*}, REN Kaixu³, ZHANG Chao⁴

(1. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin

300300, China; 3. China Automotive Technology and Research Center Co. Ltd., Tianjin 300162,

China; 4. Basic Experiment Center of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the atmospheric corrosion problem of hot-rolled steel SPHC, a one-year atmospheric exposure test was carried out in Tianjin. Relying on corrosion kinetic analysis, rust layer morphology, corrosion product analysis and electrochemical test, the atmospheric corrosion behavior of SPHC steel in Tianjin was studied. The result shows that the corrosion rate of SPHC steel begins to decrease after 6 months of exposure. The corrosion products are mainly γ -FeOOH, α -FeOOH and Fe₃O₄. As the exposure time increases, γ -FeOOH gradually transforms into more stable corrosion products, and the content of denser corrosion products on the surface increases. At the same time, the rust layer continues to thicken and form a double-layer structure, which gradually increases the protection of the substrate and the overall corrosion resistance.

Keywords: hot rolled steel; atmospheric corrosion; experimental research; electrochemistry

收稿日期: 2021-03-31

修回日期: 2021-04-19

作者简介: 董艇舰(1963—), 男, 博士, 副教授, tjdong@cauc.edu.cn.

*通信作者: 宋肖肖, xxsong@cauc.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(3122019112)

碳钢是最常用的金属材料,由于其低成本和良好的机械强度而被用于构建各种各样的结构设备及不同的实验研究中^[1-3],也是各种功能涂层性能测试、耐蚀性研究过程中常用的基体材料。其中热轧碳钢 SPHC (Steel Plate Heat Commercial) 通常被各大汽车主机厂作为基体材料涂覆锌铝涂层、聚氨酯涂层等,一方面用来对不同涂层的多方面性能进行测试研究,一方面作为实际应用过程中热轧钢的保护层,提高整体的耐腐蚀性。但是 SPHC 钢本身在加速试验及自然服役过程中,特别是在中国本土环境使用过程中的腐蚀失效问题也值得引起关注。

金属材料腐蚀性能的研究最为直接有效的办法是自然环境下的暴露试验,此方法能真实评价材料在实际大气环境服役过程中的腐蚀行为与腐蚀规律^[4]。许多学者对碳钢在不同类型大气环境的服役状态进行了大量研究。诸如在城市工业大气环境中,除了温度、相对湿度、风、降雨等自然气象因素外,SO₂也会严重影响碳钢的腐蚀行为^[5],它使得表面腐蚀产物呈现“巢”状结构;在海洋大气环境中氯化物沉积到碳钢表面参与腐蚀反应直接影响了碳钢大气腐蚀产物的成分以及锈层的整体结构,被认为是海洋大气中影响碳钢腐蚀行为的主要因素。而在沿海工业城市中,碳钢的大气腐蚀会同时受到 SO₂ 等工业污染物和海洋性氯化物的影响,有研究表明空气中的氯化物和 SO₂ 对腐蚀过程的影响取决于二者的协同作用^[6],在二者的共同作用下锈层中的腐蚀产物出现了可溶性硫酸盐,溶解后形成了贯穿锈层的裂纹,进而降低了锈层对碳钢基体的保护性^[7]。

综上可知,不同大气环境具有不同的气候条件和不同浓度的腐蚀介质,直接影响了金属材料的腐蚀产物物相成分以及形貌变化规律,使得在不同环境条件下金属材料的腐蚀行为和腐蚀规律不同。天津市位于中国北部,属于温带季风性气候,全年总体气候炎热,邻近渤海湾,海洋气候对天津市大气环境影响较为显著。同时天津市作为直辖市,较快的工业发展和北方冬季供暖造成了大量的大气污染物。高温、大量大气污染物和海洋气候影响的结合使得天津市大气腐蚀更为复杂。

因此,本文通过大气暴露试验研究了 SPHC 钢在天津海洋性工业大气环境中 1 年内的腐蚀行为变化。利用扫描电子显微镜对不同暴露时间后的腐蚀形貌进行了分析,结合 X 射线衍射仪探究了碳钢表

面腐蚀产物的主要成分组成及变化趋势,最后通过电化学测试对比分析了 SPHC 钢表面锈层在天津大气环境中的耐蚀性能的变化。

1 试验方法

1.1 试验材料

选用的试验材料 SPHC 钢的主要成分见表 1。通过线切割将材料加工成 51.8 mm×25.4 mm×2.7 mm 的矩形板,在矩形板中心打孔以方便固定在暴露平台上,根据 GB/T 14165-2008 对试样进行打磨、除污、除油以及干燥等处理,采用精度为 0.0001 g 的分析天平称量试样的原始重量并记录及编号。

表 1 SPHC 钢化学成分表(质量分数,%)

Tab.1 SPHC steel chemical composition table (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Als	N	Fe
0.02	0.01	0.18	0.012	0.008	0.015	0.0035	余量

1.2 大气暴露试验

气暴露试验地点位于天津市东丽区气象站旁,暴露期间年平均温度为 16 °C,全年平均相对湿度为 38 %;年总降水量为 1995.5 mm/a,大多集中在夏秋交替时节;大气环境中 NO₂ 年平均浓度为 45 μg/m³, SO₂ 年平均浓度为 10 μg/m³,腐蚀等级为 P₁ 等级。根据 GB/T 14165-2008,从 2019 年 1 月 18 号至 2020 年 1 月 18 号开展大气暴露试验,试样正面朝南放置于暴露平台,与地面成 45° 夹角,取样周期分别为 1、3、6、9 和 12 个月。

1.3 表征方法

根据取样周期将暴露不同时间后的试样回收,利用 HitachiS-3400N 型 SEM 及 EDS 能谱仪对腐蚀产物进行微观形貌及元素组成分析,通过 SmartLab 型号的 X 射线衍射仪表征各阶段腐蚀产物的物相组成。在 3.5 %NaCl 溶液中,使用 PARSTAT 2273 的三电极体系对腐蚀试样进行电化学测试,其中参比电极为饱和 Ag/AgCl (Sat.KCl) 电极,辅助电极为 Pt 片,先进行 20 min 的开路电位测试,阻抗谱测试频率范围为 10 mHz~100 kHz,极化曲线测量的扫描速率为 1 mV/s。参考 GB/T 16545-2015 配制除锈液,将 500 mL 盐酸和 3.5 g 六次甲基四胺溶于去离子水配制 1000 mL 溶液。除锈后利用无水乙醇进行超声清洗,干燥后称重并计算暴露不同时间后的腐蚀

速率。

2 试验结果与讨论

2.1 腐蚀动力学

腐蚀速率是描述材料腐蚀动力学结果的重要指标之一,其中年化腐蚀厚度损失率是评价金属材料在大气暴露试验中的腐蚀速率的常用参数,计算方法如下:

$$r_{\text{corr}} = 8.76 \frac{\Delta m}{1000 \times S \times t \times \rho} \quad (1)$$

式中: r_{corr} 为腐蚀速率, $\mu\text{m/a}$; Δm 为试样的腐蚀失重量, g ; S 为试样的暴露面积, m^2 ; t 为暴露时间, h ; SPHC 钢密度为 $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$ 。

图 1 所示为 SPHC 大气腐蚀速率随暴露时间的变化规律。由腐蚀动力学结果可以看出,暴露前 6 个月 SPHC 钢的腐蚀速率逐渐增大,这是由于这段时间内试样表面发生局部腐蚀,不完全或很薄的腐蚀产物并未形成对基体的保护,反而一定程度上增大了表面粗糙度为腐蚀介质的沉积提供了条件;但是随着暴露时间的延长,试样表面被腐蚀产物完全覆盖,在暴露 6~9 个月时出现了腐蚀速率增长的平缓期,锈层对基体已经呈现出一定的保护性;之后随着腐蚀产物在厚度方向继续堆积,腐蚀介质向内部基体扩散的速率在一定程度受到延缓,使得锈层对基体的保护性逐渐增强,腐蚀速率开始呈现减弱的趋势,符合一般碳钢的大气腐蚀规律^[7-9]。

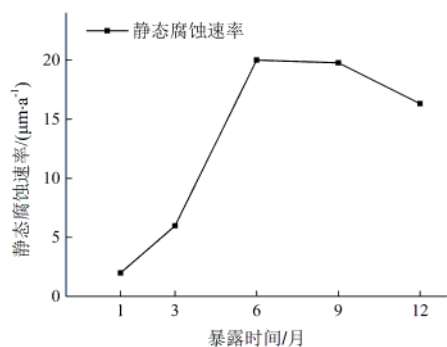


图 1 SPHC 大气腐蚀速率随暴露时间的变化规律

Fig.1 Changes of SPHC atmospheric corrosion rate with exposure time

2.2 腐蚀产物形貌及成分

碳钢在大气环境中产生的腐蚀产物常见的有:棒状、蠕虫状、燕窝状、球状等形态的 $\gamma\text{-FeOOH}$, 针

状、棱柱状等形态的 $\alpha\text{-FeOOH}$, 雪茄状、管状等形态的 $\beta\text{-FeOOH}$, 圆环状等形态的 Fe_3O_4 等^[10]。图 2 为 SPHC 钢表面典型腐蚀产物形貌。由图 2(a)和(c)可以看出,在暴露周期内 SPHC 钢表面形成了杆状、球状以及针片状的腐蚀产物,一方面这类腐蚀产物具有较大的孔隙率,难以阻止腐蚀介质向内部基体的扩散;另一方面它们也增大了表面的局部粗糙度,为大气中水分及腐蚀性离子的沉积提供了条件,一定程度上加重了材料的腐蚀。图 2(b)所示为暴露 6 个月后的球状腐蚀产物放大后的形貌,放大后可以发现棉球状产物表面上生长了大量细长的针尖状腐蚀产物,使得材料表面在微观尺度上为大气中悬浮的各类腐蚀性盐离子的附着提供了场所;同时由于腐蚀的不均匀性以及物理环境的差异,使得产物在暴露过程中出现非均匀生长,不同成分的腐蚀产物也可能发生相转化^[11],两者共同使得锈层无法维持统一而逐渐产生微观裂纹。而后随着暴露时间的延长,表面腐蚀产物逐渐向化学性质较为稳定的相转化,图 1(d)所示为暴露 12 个月后观察到的腐蚀产物,相较于腐蚀初期的产物形貌,暴露 12 个月后存在树根状的腐蚀产物,整体形貌较为致密,可能是 $\text{Fe}_3\text{HO}_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ^[12]。

图 3 所示为 SPHC 钢在天津大气环境中暴露不同时间后的腐蚀产物成分变化。可以看出,SPHC

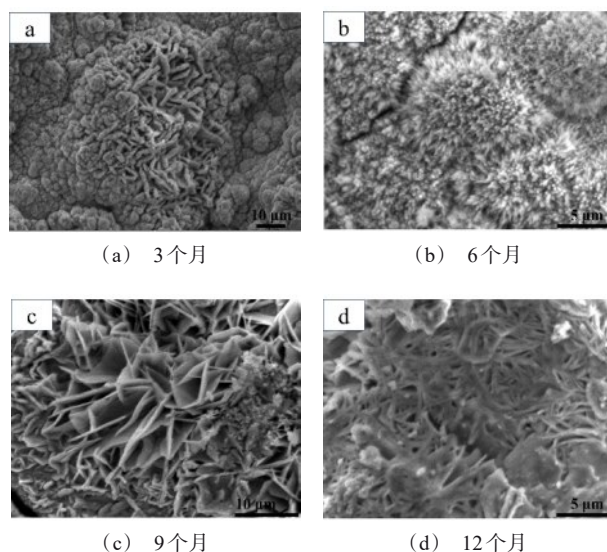


图 2 SPHC 表面典型大气腐蚀产物形貌

Fig.2 Morphology of typical atmospheric corrosion products on SPHC surface

钢的腐蚀产物由 γ -FeOOH、 α -FeOOH、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 结晶相组成。碳钢在大气暴露过程中生成的不稳定的 γ -FeOOH大多位于锈层外部,而 α -FeOOH等较为致密的成分均较为靠近基体,因此在各个暴露时间内通过XRD检测出的锈层表面腐蚀产物均以 γ -FeOOH为主^[13-15]。腐蚀初期,大气中的水蒸气被吸附至表面逐渐积聚成液膜,为表面的电化学反应提供了条件,表面腐蚀产物以 γ -FeOOH为主^[16],在3个月时XRD仍能检测出大量的Fe基体,这是因为SPHC钢表面的非均匀腐蚀导致腐蚀初期腐蚀产物生长不够完全,并未完整覆盖基体,仍存在大量Fe裸露出来。随着暴露时间的延长,具有较强还原性的 γ -FeOOH会逐渐向更稳定的 α -FeOOH或 Fe_3O_4 转化^[12,17], γ -FeOOH的相对含量逐渐减少, α -FeOOH的相对含量逐渐增加,锈层的稳定性逐渐增强,一定程度上提高了对内部基体的保护性。

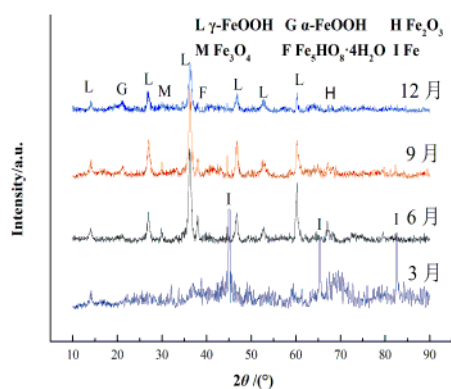


图3 SPHC表面腐蚀产物XRD谱图

Fig.3 XRD pattern of corrosion products on SPHC surface

图4为SPHC钢在不同暴露时间后的截面形貌。由图4可以看出,SPHC钢的锈层出现了明显的分层。腐蚀初期,腐蚀产物最开始于基体表面产生,如图4(a)所示,在3个月时部分基体表面已经形成了较为均匀的锈层,但厚度仅为9.39 μm ,随着暴露时间的增加,锈层完全覆盖基体表面并转而逐渐向厚度方向生长,在6个月时增厚至22.91 μm ,对基体形成了第一层保护,并且出现了部分锈层与基体脱离的现象,部分锈层与基体之间出现裂缝,为腐蚀介质提供了储存空间;而后腐蚀介质向内渗透,锈层内

部基体表面形成微型原电池,发生腐蚀电化学反应并逐渐产生蚀坑如图4(c)所示。随着腐蚀加剧,如图4(d)所示在12个月时各个蚀坑产物连接到一起形成与基体紧密结合的第二层锈层,双层锈层的结构使得腐蚀介质愈发难以接触到基体,进一步提高了材料的耐蚀性能,锈层平均总厚度达到了38.85 μm 。

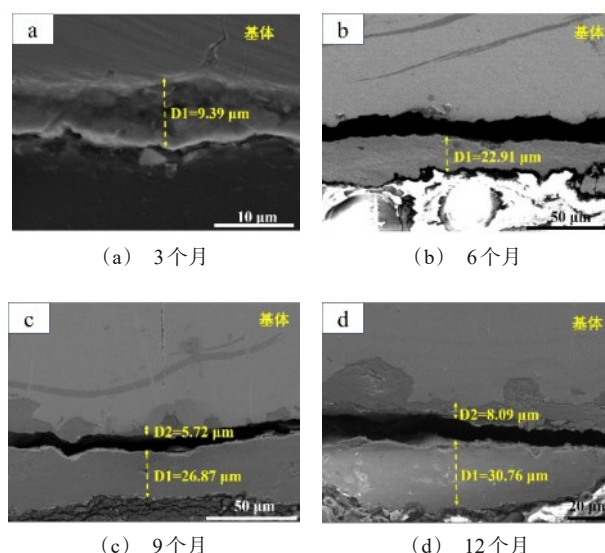


图4 SPHC在不同暴露时间后的锈层截面形貌

Fig.4 Cross-section morphology of rust layer of SPHC after different exposure time

2.3 电化学分析

电化学测试是表征腐蚀电化学反应的主要手段之一,其中极化曲线和交流阻抗曲线是衡量金属材料、涂层等耐蚀性能的重要方法^[18]。图5为不同暴露时间后的SPHC钢在3.5 wt% NaCl溶液中的动电位极化曲线。自腐蚀电流密度是极化曲线中评价材料发生腐蚀时腐蚀速率大小的重要参数,根据Tafel外推法对极化曲线进行拟合处理得到了SPHC钢不同暴露时间后的自腐蚀电流密度变化规律如表2所示。暴露3个月的SPHC钢自腐蚀电流密度高于原始试样,这是由于一方面在腐蚀初期尚未形成完全覆盖基体的锈层,另一方面污染物更易在有锈层覆盖的表面沉积停留,一定程度上加剧了腐蚀产物在表面的横向生长,进而使试样整体耐蚀性呈降低趋势。暴露6个月时的自腐蚀电流密度急剧减小,这是因为基体表面完全覆盖了锈层,腐蚀产物转而开

始沿厚度方向纵向生长,锈层厚度达到了 $22.91\ \mu\text{m}$, 为暴露 3 个月锈层厚度的 2.44 倍。而后随着暴露时间的增加,自腐蚀电流密度保持下降的趋势,锈层厚度的不断增厚并形成双层结构以及较为稳定的腐蚀产物逐渐积累减缓了内部基体的腐蚀速率,整体耐蚀性得到逐渐提高。

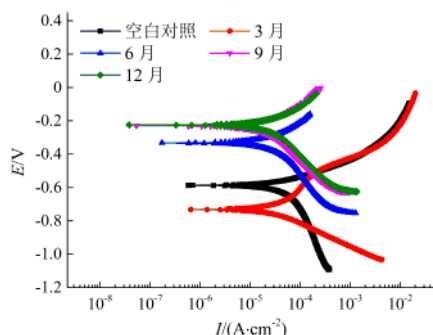


图5 SPHC在不同暴露时间后带锈试样的极化曲线

Fig.5 Tafel curve of SPHC after different exposure time

表2 天津大气环境下暴露不同时间后的SPHC钢电化学拟合结果

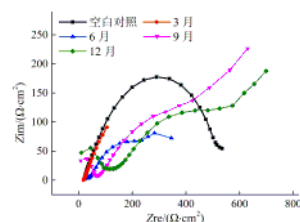
Tab.2 Tafel fitting results of SPHC after different exposure time in Tianjin

暴露时间/月	0	3	6	9	12
$i_{\text{corr}}/(10^{-5}\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	5.47	6.49	1.23	1.01	0.97

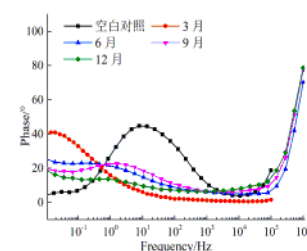
图6为SPHC钢在不同暴露时间后的电化学阻抗谱测试结果。从Nyquist图可以看出腐蚀初期容抗弧逐渐减小,而后随着暴露时间的增加,在中低频区出现了斜率大约为 45° 的直线,说明此时锈层具备了Warburg扩散阻抗的典型特征,反映出在SPHC钢的大气腐蚀过程中逐渐从电化学电荷转移控制变为扩散控制^[19]。

采用 $R(C(R(CR)))$ 和 $R(C(R(C(RW))))$ 等效电路对电化学阻抗谱进行了拟合如表3所示,其中 R_t 为电荷转移电阻, R_r 为锈层电阻, R_{total} 为 R_t 和 R_r 之和。 R_r 反映了锈层的致密性及对腐蚀介质离子穿过锈层的阻碍能力,是评价腐蚀产物对基体保护能力的重要参数, R_t 反映了内部基体发生电化学反应的难易程度^[20],而 R_{total} 则反映了材料整体的耐蚀性变化^[19]。由表3可以看出,在3~6个月时 R_{total} 出现了略微的下降,这是因为电化学测量的数据是在特定时间点获得的^[19],易受到测试环境的影响而出现细小的误差。但整体上来说, R_r 和 R_t 均随暴露时间的增加而出现增大的趋势, R_{total} 也呈现出不断增大

的趋势,说明锈层对基体的保护作用增强,材料整体耐蚀性提高,进一步解释了腐蚀速率下降的原因。



(a) Nyquist曲线



(b) Bode曲线

图6 SPHC在不同暴露时间后带锈试样的交流阻抗曲线

Fig.6 AC impedance curve of rusted specimens after different exposure time of SPHC

表3 拟合电路中的 R_r 和 R_t

Tab.3 R_r and R_t in the fitted circuit

暴露时间/月	$R_r/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_t/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$R_{\text{total}}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
3	25.43	150.5	175.93
6	35.87	132.8	168.67
9	70.97	128.6	199.57
12	115.9	226.8	342.7

3 结论

(1)随着暴露时间的延长,SPHC钢的腐蚀速率呈现先增加后减小的趋势。其在不同暴露时间下的腐蚀产物均以 $\gamma\text{-FeOOH}$ 为主,随着暴露时间的增加 $\gamma\text{-FeOOH}$ 逐渐向更稳定的腐蚀产物转化,表面逐渐出现较为致密的腐蚀产物。锈层在暴露过程中逐渐形成双层结构,进一步提高了锈层对基体的保护性。

(2)SPHC钢在天津大气环境中的腐蚀行为逐渐从电化学电荷转移控制变为扩散控制,随着暴露时间的延长,锈层电阻 R_r 不断增加,整体耐蚀性逐渐提高。

参考文献

- [1] 田永, 韦俊. 汽车金属制件腐蚀机理与试验介绍[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(9):39-42.
Tian Y, Wei J. Introduction of corrosion mechanism and test for car metal parts[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(9):39-42(in Chinese).
- [2] 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.
Zhang L, Zhao C Y, Wang Z Y, et al. Studies on corrosion behaviors of carbon steel and weathering steel in simulated industrial atmospheric environment[J]. Plating and Finishing, 2015, 37(4):38-41 (in Chinese).
- [3] Li X G, Zhang D W, Liu Z Y, et al. Materials science: Share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527: 441-442.
- [4] Morcillo M, Díaz I, Cano H, et al. Atmospheric corrosion of weathering steels. overview for engineers. part I: basic concepts[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 723-737.
- [5] Han W, Pan C, Wang Z Y, et al. Initial atmospheric corrosion of carbon steel in industrial environment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(2): 864-874.
- [6] Perez, Corvo F. Atmospheric corrosion of steel in a humid tropical climate-influence of pollution, humidity, temperature, solar radiation and rainfall [J]. Corrosion, 2012, 40(4):170-175.
- [7] 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): 24-28,34.
Cao G W, Liu Y W, Zhang D D, et al. Corrosion behavior of Q235 and Q345 carbon steel in hongyanhe atmosphere[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(1):24-28,34 (in Chinese).
- [8] Raffo S, Vassura I, Chiavari C, et al. Weathering steel as a potential source for metal contamination: metal dissolution during 3-year of field exposure in a urban coastal site[J]. Environmental Pollution, 2016, 213:571-584.
- [9] Fuente D, Diaz I, Simancas J, et al. Long-term atmospheric corrosion of mild steel[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2):604-617.
- [10] Alcántara J, Chico B, Simancas J, et al. An attempt to classify the morphologies presented by different rust phases formed during the exposure of carbon steel to marine atmospheres[J]. Materials Characterization, 2016, 118:65-78.
- [11] 宋学鑫, 黄松鹏, 汪川, 等. 碳钢在红沿河海洋工业大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1355-1365.
Song X X, Huang S P, Wang C, et al. The initial corrosion behavior of carbon steel exposed to the coastal-industrial atmosphere in hongyanhe[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(10):1355-1365(in Chinese).
- [12] Alcántara J, Chico B, Díaz I, et al. Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel[J]. Corrosion Science, 2015, 97:74-88.
- [13] Okada T, Ishii Y, Mizoguchi T, et al. Mossbauer studies on particle volume distribution of α -FeOOH in rust formed on weathering steel[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(6A):3382-3391.
- [14] Kamimura T, Nasu S, Tazaki T, et al. Mossbauer spectroscopic study of rust formed on a weathering steel and a mild steel exposed for a long term in an industrial environment[J]. Materials Transactions, 2002, 43(4):694-703.
- [15] Morcillo M, González-Calbet J M, Jiménez J A, et al. Environmental conditions for akaganeite formation in marine atmosphere mild steel corrosion products and its characterization[J]. Corrosion, 2015, 71(7):872-886.
- [16] 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.
Liu Y W, Zhao H T, Wang Z Y. Initial corrosion behavior of carbon steel and weathering steel in nansha marine atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9):1247-1254 (in Chinese).
- [17] Jia J H, Wu W, Cheng X Q, et al. Ni-advanced weathering steels in maldives for two years: corrosion results of tropical marine field test[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245:118463.
- [18] 吕耀辉, 刘玉欣, 何东昱, 等. 电化学阻抗技术在金属腐蚀及涂层防护中的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(6):22-28.
Lyu Y H, Liu Y X, He D Y, et al. Development on electrochemical impedance spectroscopy technology in metal corrosion and coating anticorrosion[J]. Plating and Finishing, 2018, 40(6):22-28(In Chinese).
- [19] Liu P, Hu L L, Zhao X Y, et al. Investigation of microstructure and corrosion behavior of weathering steel in aqueous solution containing different anions for simulating service environments[J]. Corrosion Science, 2020, 170:108686.
- [20] Nishimura T, Noda K, Kodama T, et al. Electrochemical behavior of rust formed on carbon steel in a wet/dry environment containing chloride ions[J]. Corrosion, 2000, 56(9):935-941.