

海洋大气环境下 Q235 钢表面氯离子 沉积量分布规律研究

贺琼瑶^{1,2,3}, 吴遥^{1,2}, 刘聪^{1,2,3}, 郭赞洪^{1,2}, 李旭^{1,2},
张利娟⁴, 李景育³, 赵方超^{1,2,3}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400039;
3.海南万宁大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 海南 万宁 571522;
4.重庆航天职业技术学院, 重庆 400000)

摘要: **目的** 研究海洋大气环境下氯离子在 Q235 钢表面的沉积分布规律。**方法** 使用便携式 X 射线荧光光谱仪测试 Q235 钢在海南岛不同地点大气环境暴露后的表面氯离子沉积, 然后采用插值算法绘制氯离子在 Q235 钢表面沉积分布图和海南岛不同地点氯离子在 Q235 钢表面平均沉积量分布图, 并根据氯离子沉积分布图分析氯离子在 Q235 钢表面的沉积量分布规律。**结果** 氯离子在 Q235 钢表面呈不均匀分布特征。在环境暴露试验前 6 个月, Q235 钢表面氯离子含量逐渐增加; 暴露 6~12 个月, Q235 钢表面的氯离子含量总体变化不大。从整个海南岛看, 内陆地区氯离子在 Q235 钢表面的沉积量低, 而在沿海环岛区域的沉积量高。在海南岛沿海地区, Q235 钢表面氯离子沉积量随季风风向的变化而变化。**结论** 氯离子在 Q235 钢表面呈不均匀沉积分布, Q235 钢表面氯离子沉积量在海南岛不同地点呈“中间低、两边高”的沉积分布规律, 内陆地区沉积量低, 而沿海环岛区域沉积量高, 并且沿海地区的氯离子沉积易受季风风向的影响。

关键词: 氯离子沉积; 海洋大气环境; Q235 钢; X 射线荧光光谱; 插值算法; 腐蚀

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)11-0158-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.11.020

Distribution Law of Chloride Ion Deposition on the Surface of Q235 Steel under Marine Atmospheric Environment

HE Qiong-yao^{1,2,3}, WU Yao^{1,2}, LIU Cong^{1,2,3}, GUO Zan-hong^{1,2}, LI Xu^{1,2},
ZHANG Li-juan⁴, LI Jing-yu³, ZHAO Fang-chao^{1,2,3}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Environmental Effects and Protection, Chongqing 400039, China; 3. Wanning Materials Corrosion National Observation and Research Station, Hainan Wanning 571522, China; 4. Chongqing Aerospace Polytechnic, Chongqing 400000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the distribution law of chloride ion deposition on Q235 steel surface in marine atmos-

收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-06-15

Received: 2023-04-06; Revised: 2023-06-15

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2021jcyj-msxmX1185)

Fund: Natural Science Foundation of Chongqing (cstc 2021jcyj msxmX1185)

引文格式: 贺琼瑶, 吴遥, 刘聪, 等. 海洋大气环境下 Q235 钢表面氯离子沉积量分布规律研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 158-165.

HE Qiong-yao, WU Yao, LIU Cong, et al. Distribution Law of Chloride Ion Deposition on the Surface of Q235 Steel under Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 158-165.

pheric environment. First of all, a portable X-ray fluorescence spectrometer was used to test the chloride ion deposition on the Q235 steel surface exposed to the atmospheric environment at different places in Hainan Island, and then the interpolation algorithm was used to draw the distribution map of chloride ion deposition on the Q235 steel surface and the distribution map of the average chloride ion deposition on the Q235 steel surface at different places in Hainan Island. Finally, according to the distribution maps, the distribution law of chloride ion deposition on the Q235 steel surface was analyzed. The distribution of chloride ions on the surface of Q235 steel was uneven. In the first six months of the environmental test, the content of chloride ions on the surface of Q235 steel gradually increased, and the content of chloride ions on the surface of Q235 steel exposed for 6-12 months had little overall change. In the whole Hainan Island, the amount of chloride ions deposited on the surface of Q235 steel in the inland area was low, while the amount of chloride ions deposited in the coastal roundabout area was high. In the coastal area of Hainan Island, the chloride ion deposition on the surface of Q235 steel changed with the change of monsoon wind direction, resulting in the chloride ion deposition in different directions of Hainan Island changing with the seasons. The chloride ions are unevenly distributed on the surface of Q235 steel. The chloride ion deposition on the surface of Q235 steel at different places in Hainan Island is "low in the middle and high on both sides". The deposition in inland areas is low, while the deposition in coastal roundabout areas is high, and the chloride ion deposition in coastal areas is easily affected by monsoon wind direction.

KEY WORDS: chloride ion deposition; marine atmospheric environment; Q235 steel; X-ray fluorescence spectrometer; interpolation algorithm; corrosion

金属材料是现代工业使用极为广泛的材料之一,但是大多数金属会与大气介质发生化学或电化学反应,从而引发金属材料的腐蚀,造成桥梁、管道、舰船、电子设备等性能退化,影响工业安全,并造成严重的经济损失^[1-2]。大气环境腐蚀是一种最广泛的金属腐蚀形式,其导致的腐蚀损失约占腐蚀总经济损失的 1/2^[3-6]。在海洋大气环境地区,材料的腐蚀现象尤为突出^[7-11]。高盐度环境是海洋大气环境腐蚀重要原因之一,海洋中的氯离子会由于海水飞溅,被风携带并沉降到金属材料表面。一方面,沉降的氯离子具有吸湿性,在一定湿度的湿度下,水汽会在材料表面凝聚形成薄液膜;另一方面,氯离子会增加材料表面的电导率,进而加速材料的腐蚀^[12-14]。因此,监测氯离子在金属材料表面的沉积对金属材料大气环境腐蚀机理研究具有重要意义。另外,大气环境的氯离子沉积具有鲜明的地域环境特征,其会随着地形地貌、离海距离、主导风向、高度等因素的变化而变化,不同区域的氯离子在材料表面的沉积量会有显著差异^[15-17]。开展氯离子在区域大气环境中的分布变化规律研究,有利于指导金属材料大气环境防腐蚀策略的差异化制定。

目前为止,已有部分相关学者对大气环境中氯离子的沉积影响因素开展了系列研究^[18-21],发现氯离子沉积受地形地貌、海水有效波高、离海距离、风速风向等因素的影响较大,但是对氯离子直接沉积在材料表面的分布规律的研究较少。本文创新性地通过便携式 X 射线荧光光谱仪对沉积在材料表面的氯离子进行原位表征,重点研究了海洋大气环境下氯离子在材料表面的沉积分布,直观地展示了氯离子在材料表面的沉积分布规律,以及不同地域、暴露时间对沉积分布的影响。便携式 X 射线荧光光谱仪主要由激发 X

射线的 X 射线光电管、接受荧光信号的 X 射线荧光探测器和其他信号处理模块组成。便携式 X 射线荧光光谱仪元素测量方法是一种十分成熟的方法,现已广泛应用于地质、采矿品位检测、土壤重金属监测、食品检测等领域^[22-23]。当激发的 X 射线照射到样品表面时,会与表面原子产生碰撞,激发表面元素的 X 射线荧光。在 X 射线荧光特征能量谱中,元素 X 射线荧光能量与元素种类一一对应,因此只需要确定 X 射线荧光特征能量谱中 X 射线荧光的能量位置就能确定元素的种类。此外,元素 X 射线荧光的强度与元素含量有关,元素 X 射线荧光的强度越强,元素含量越高,以此对样品表面的元素进行定性和定量分析。

本文通过 X 射线荧光光谱法观测大气环境暴露 Q235 钢表面的氯离子沉积,然后再通过网格化、插值算法和 MATLAB 绘图,得到 Q235 钢表面氯离子沉积分布图和海南岛海洋大气环境不同地点氯离子在 Q235 钢表面沉积量分布图,分析了氯离子在 Q235 钢表面的沉积分布规律及其影响因素。

1 试验

1.1 样品

试验选择 2020 年 5 月~2021 年 5 月在海南省的万宁、海口、琼海、文昌、东方、临高、昌江、三亚、白沙、保亭和屯昌共 11 个站点分别暴露 3、6、9、12 个月的 Q235 钢为研究对象,样品尺寸为 50 mm×100 mm×2 mm,共计 44 个样品。在样品投放前,用去离子水和乙醇溶液对样品进行反复清洗,用吹风机吹干,在运输、存放过程中,全程用密封袋保

存。暴露站点分布在海南各个区域,能够基本反映海南大气环境下氯离子在 Q235 钢表面的沉积分布情况。海南各站点地理与 2020 年 5 月~2021 年 5 月气象数据见表 1。

1.2 检测方法

当样品完成自然环境暴露试验后,将样品回收,回收的样品产生了严重的腐蚀,其中三亚站大气环境暴露样品如图 1 所示。

表 1 海南各站点地理与 2020 年 5 月~2021 年 5 月气象数据

Tab.1 Geological conditions of stations in Hainan and meteorological data from May 2020 to May 2021

台站名称	平均风速/(m·s ⁻¹)	海拔/m	平均相对湿度/%	平均温度/℃	累积降水量/mm	日照时间/h
万宁	2.35	39.90	82.86	25.11	2 750.10	1 936.00
海口	2.70	63.50	80.92	25.17	1 909.50	1 725.70
琼海	2.32	23.30	81.95	25.23	1 924.80	1 743.10
屯昌	1.26	118.30	78.95	25.03	1 978.60	1 900.00
文昌	1.63	21.70	82.55	25.32	2 015.10	1 700.00
保亭	1.19	68.60	77.89	25.59	2 128.70	2 012.00
东方	3.37	7.60	76.73	25.99	759.10	2 425.00
临高	1.94	31.70	80.04	24.91	1 574.00	1 703.00
昌江	1.63	98.10	73.59	25.64	2 034.90	1 734.00
三亚	3.80	20.00	90.00	22.90	1 347.50	1 641.30
白沙	1.15	215.60	78.76	24.45	1 804.80	1 627.80

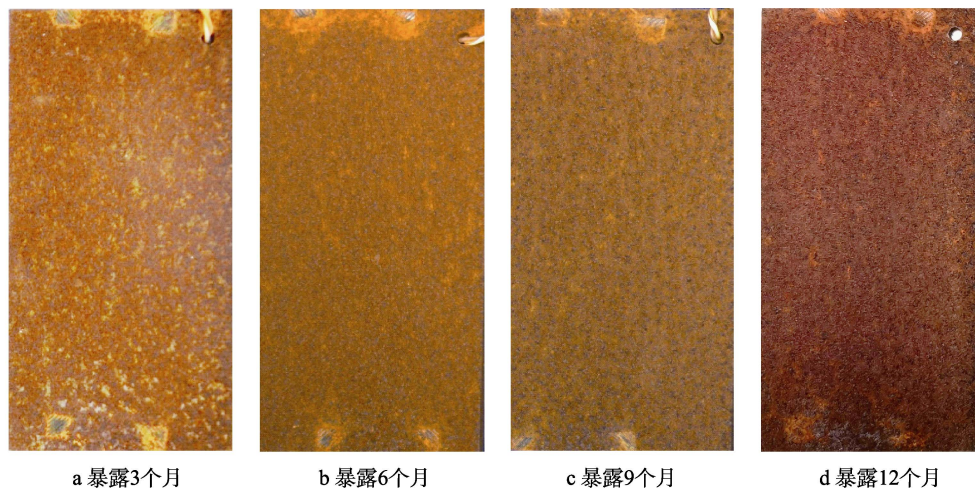


图 1 三亚站大气环境暴露样品

Fig.1 Test samplesexposed toatmospheric environment in Sanya station: a) exposure for 3 months; b) exposure for 6 months; c) exposure for 9 months; d) exposure for 12 months

利用便携式 X 射线荧光光谱仪 (PXRF) 表征不同暴露周期、不同测试站点样品表面的氯离子沉积量。X 射线光电管发射的高能 X 射线照射到样品表面,激发氯离子产生的 X 射线荧光强度与材料表面氯离子的沉积量成正比,由此实现氯离子沉积量的表征,如图 2a 所示。与传统的氯离子沉积测试方法(如干片法和湿蚀法)相比, PXRF 能实现氯离子的原位测量,准确度高^[24]。在用于样品测量之前,首先需要对 PXRF 进行标定。对一套氯离子标准样品进行测试,以氯离子标准样品的特征峰面积为横坐标,标准样品中氯离子含量为纵坐标,绘制氯离子特征峰面积与氯离子含量的标准曲线,如图 2b 所示。根据测得样品的氯离子标准曲线,计算样品表面氯

离子沉积量。

在测试过程中, PXRF 被固定搭载到一个可移动样品台的正上方,样品台通过电机控制沿 X 和 Y 方向上移动,如图 3a 所示。通过设置样品平台移动时间间隔、移动间距和移动总量程,就可以使样品平台沿着预设好的路径移动,完成对样品表面氯离子沉积浓度的自动连续观测。将回收的样品平放在可移动的电动平台上,设置 PXRF 工作电压为 20 kV,电流值为 200 nA,单点扫描时间为 60 s,样品平台 X 轴和 Y 轴移动间距均为 4 mm,水平 X 轴移动总长度为 80 mm, Y 轴纵向移动总长度为 40 mm,对所有样品的整个面进行全扫描。样品扫描测试路径如图 3b 所示,每个样品共测量 231 个点。

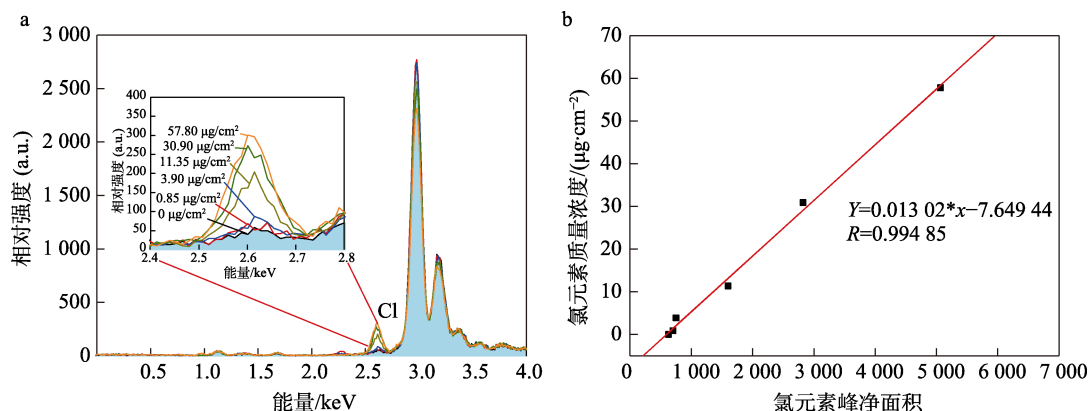
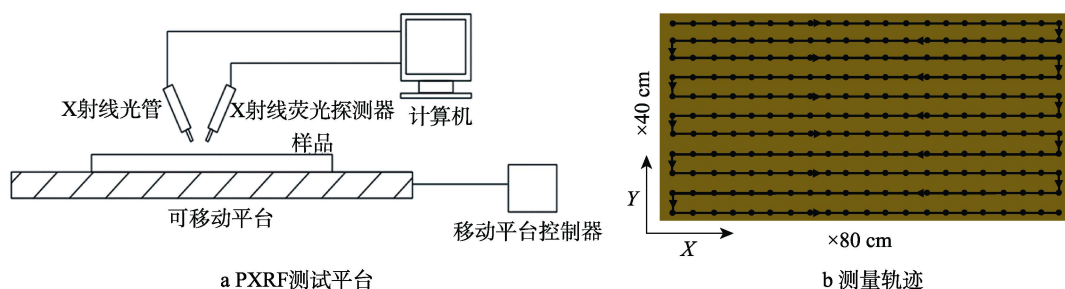


图 2 氯离子 X 射线荧光强度随氯元素含量变化 (a) 和氯离子标准曲线 (b)

Fig.2 Variation of chloride ion X-ray fluorescence intensity with chloride ion content (a) and standard curve of chloride ion (b)



a PXRF测试平台

b 测量轨迹

图 3 PXRF 测试平台及 Q235 钢表面氯离子含量测量轨迹

Fig.3 Schematic diagram of PXRF test platform (a) and trace diagram of chloride ion content measurement on Q235 steel surface (b)

1.3 数据处理方法

使用 MATLAB 对不同暴露期的 Q235 钢样品表面全扫描后得到的数据进行处理计算。由于 Q235 钢表面氯离子环境因素数据在空间分布上并不均匀, 因此在进行空间分布图谱绘制前, 首先须将数据进行网格化处理, 即将空间上不均匀分布的数据归算成规则网格中的代表值。将 Q235 钢表面 80 mm×40 mm 的测量区域按照 0.1 mm×0.1 mm 的精度对其网格化划分, 根据坐标将扫描测量得到的数据在网格上进行定位, 而对于网格上无数据的空白处, 采用克里金方法对现有数据进行插值计算预测得到。最后将区域网格化数据图网格中不同数值的氯离子含量赋予不同的颜色标示, 得到 Q235 钢表面氯离子沉积量分布图。

克里金插值法主要原理是根据相邻变量的值, 利用变差函数所揭示的区域化变量的内在联系来估计空间变量数值^[25], 如式 (1) 所示。

$$z_0 = \sum_{i=0}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

式中: z_0 对应为坐标 (x_0, y_0) 处表面氯离子数据的估计值; λ_i 是权重系数, 取决于测量点、预测位置的距离和预测位置周围测量值之间的空间关系。采用克里金方法可在保证对象的估计值满足无偏性条件和最小方差条件的前提下求得估计值, 适用于各种类型的离散数据。

海南岛海洋大气环境不同地点氯离子在 Q235 钢

表面沉积量分布图的绘制方法与 Q235 钢表面氯离子沉积分布图的绘制方法类似。数据来源于海南岛各站点大气环境暴露的 Q235 钢样品, 采用同一批次投放的样品, 将样品回收后采用相同的测量方法, 能减小数据误差, 保证结果的准确性。对不同站点回收的 Q235 钢样品表面进行全扫描, 得到样品表面 231 个点的氯离子沉积量, 对这 231 个数据取平均值, 得到样品表面平均氯离子沉积量, 将其作为该地点的大气环境氯离子在 Q235 钢上的沉积量。按经纬度 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格精度对海南岛进行划分, 建立 31×41 的二维数组。按照经纬度坐标, 将不同暴露地点得到的氯离子沉积量数据存入数组中, 生成网格化的数据文件。然后采用克里金方法对网格数据空白处进行克里金插值计算处理, 得到海南岛海洋大气环境不同地点氯离子在 Q235 钢表面沉积量分布图网格数据。将数据网格中不同数值的氯离子量赋予不同的颜色标示, 即可得到海南岛海洋大气环境不同地点氯离子在 Q235 钢表面沉积量分布图。

2 结果与讨论

2.1 Q235 钢表面氯离子沉积量分布

表征氯离子在材料表面的沉积分布特征, 对于深入理解材料腐蚀机理具有重要意义。Q235 钢在三亚暴露 3、6、9、12 个月后的表面氯离子含量分布如图

4所示,观测区域尺寸为80 cm×40 cm。在图4中,每张图由231个表面氯离子数据的插值组成。同时,数据点图的颜色对应表面氯离子含量的高低。通过表面氯离子分布图可以较为直观地看出氯离子在Q235钢表面的分布特征。从图4可以看出,在一定暴露时

间下,Q235钢表面的氯离子沉积量呈现不均匀分布的特征,在产品表面某些点或区域的氯离子含量较高,这种区域可能加剧产品表面腐蚀发生;某些区域氯离子含量较低,环境损伤相对较轻,这可能是造成材料表面不均匀腐蚀的重要原因。

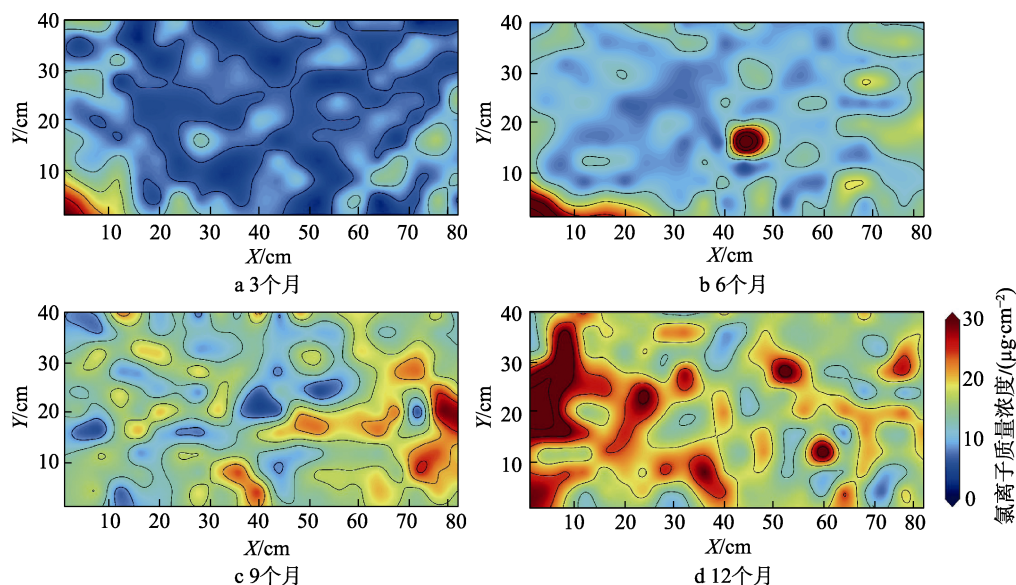


图4 Q235钢在三亚站分别暴露不同时间后表面氯离子的含量分布

Fig.4 Distribution diagram of chloride ion content on Q235 steel surface exposed in Sanya station for different times: a) 3 months; b) 6 months; c) 9 months; d) 12 months

2.2 氯离子在海南岛不同地点 Q235 钢表面沉积量规律

Q235钢在海南岛不同站点、不同暴露期下的表面平均氯离子含量变化趋势如图5所示。可以看出,在暴露前6个月,随着环境试验时间的变化,Q235钢表面氯离子含量呈增多的趋势;在暴露6~12个月后,Q235钢表面的氯离子沉积量总体变化不大,说明在氯离子在Q235钢表面的沉积具有时间累积性,主要集中在前半年。各站点Q235钢表面氯离子含量的差异性很大,东方、三亚、万宁等地区表面氯含量

较高,均位于海南岛沿海区域,而在昌江、屯昌、保亭等离海较远地区,表面氯含量较低。

为了更直观地观察在海南岛不同地点氯离子在Q235钢表面的沉积量变化规律,以插值后的数据为基础,采用Matlab软件绘制在海南岛不同暴露期下Q235钢表面平均氯离子沉积含量的分布热力图及等值线图,如图6所示。可以看出,Q235钢表面的氯离子含量整体上呈现“中间低、两边高”的分布规律,即海南岛内陆地区氯离子在Q235钢表面的沉积含量低,而沿海环岛区域的氯离子沉积含量高。在氯离子的传输过程中,离海距离会显著影响氯离子向地面的沉积速率,这与刘溅洪等^[19]得到的研究结果相同。

在海南海洋大气环境下,海洋中的氯离子会由于海水飞溅,被风携带并沉降到材料表面,所以海南岛沿海地区Q235钢表面氯离子沉积量易受季风风向影响。海南岛3、4月到8、9月主导风向一般为西南风,也会有南风 and 东南风的影响,9、10月到次年2、3月的主导风向一般为东北风^[26]。暴露时间为5~7月时,海南岛主导风向为西南风,海南岛西南方向东方站的氯离子沉积量最高,达21.4984 μg/cm²,如图6a所示。暴露时间为5~10月时,在暴露时间段内,Q235钢表面氯离子沉积量既可能受西南风的影响,也可能受东北风的影响,反映到图中则表现为在海南岛东方站、万宁站和文昌站的氯离子沉积浓度均比较高,如图6b所示。暴露时间为5月到次年1月时,在取样

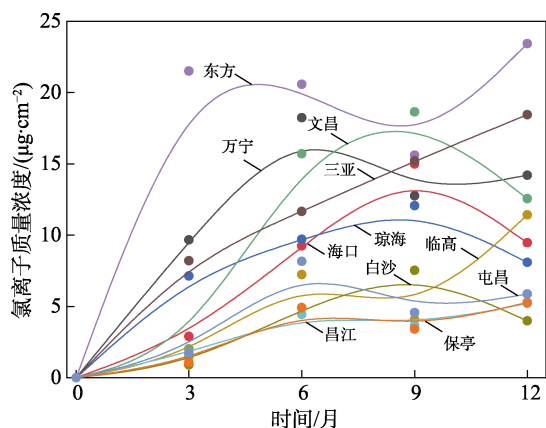


图5 海南不同站点Q235钢表面平均氯离子沉积含量变化
Fig.5 Variation of average chloride ion deposition on Q235 steel surface at different stations in Hainan

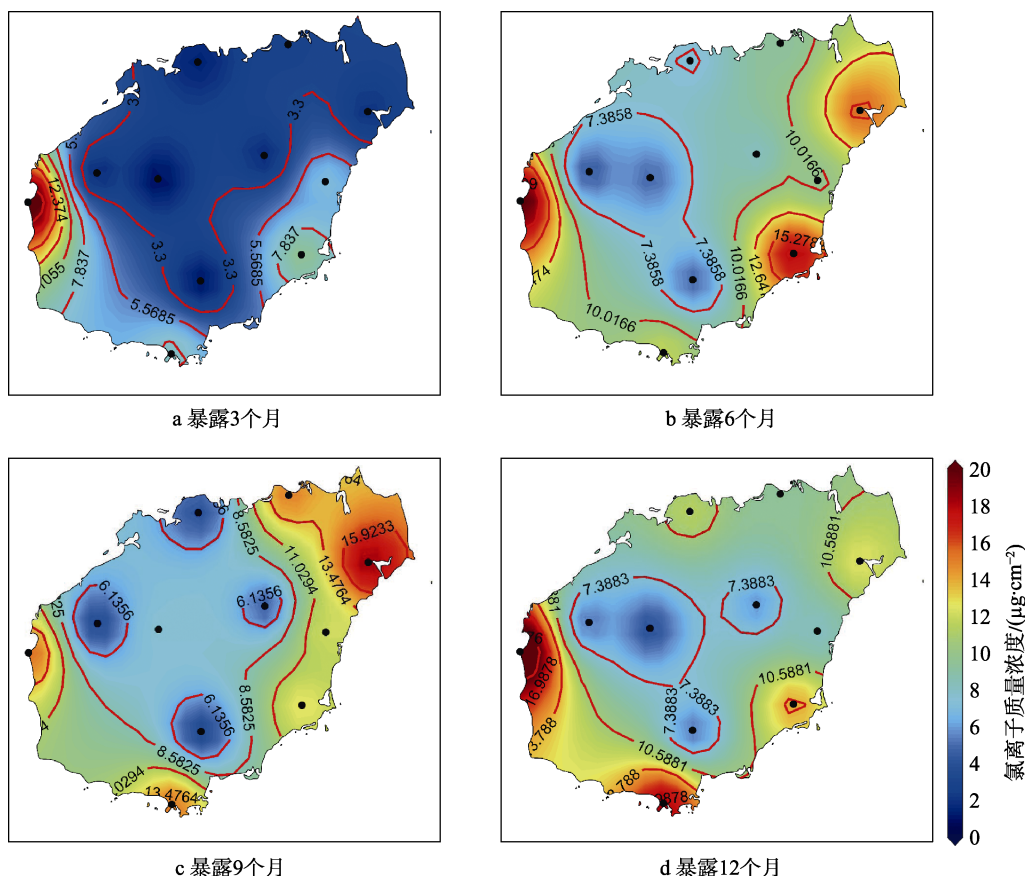


图6 海南不同暴露期下 Q235 钢表面平均氯离子沉积含量分布热力图

Fig.6 Thermal diagram of the distribution of average chloride ion deposition on the surface of Q235 steel under different exposure periods in Hainan: a) exposure for 3 months; b) exposure for 6 months; c) exposure for 9 months; d) exposure for 12 months

前的一段时间内,海南岛的主导风向为东北风,所以海南岛东北方向的文昌站 Q235 钢表面氯离子沉积量最高,而西南方向东方站 Q235 钢表面氯离子沉积量较上一个取样周期降低,如图 6c 所示。暴露时间为 5 月到次年 4 月时,在取样前一段时间,海南岛主导风向为西南风,所以海南岛东方站和三亚站 Q235 钢表面氯离子沉积量较高,如图 6d 所示。海南岛中部地区 Q235 钢表面氯离子沉积量受风向的影响较小,沿海城市站点明显高于非沿海城市站点。

3 结论

1) 在一定暴露时间下, Q235 钢表面的氯离子沉积分布呈现不均匀分布特征。

2) 氯离子在 Q235 钢表面沉积具有时间累积性。从 2020 年 5 月到 2021 年 5 月,在环境暴露试验前 6 个月, Q235 钢表面氯离子含量逐渐增加;暴露 6~12 个月, Q235 钢表面的氯离子含量总体变化不大。

3) 在海南岛, Q235 钢表面氯离子沉积整体上呈现“中间低、两边高”的分布规律,即海南岛内陆地区氯离子含量低,而沿海环岛区域的氯离子含量高,且海南岛沿海地区产品表面氯离子沉积易受季风风向影响。

参考文献:

- [1] 何成峰, 宋佳莹, 黄华. 浅析电子装备在大气环境中的腐蚀与防护[J]. 环境技术, 2022, 40(5): 183-187.
HE Cheng-feng, SONG Jia-ying, HUANG Hua. The Brief Analysis of Corrosion and Protection of Electronic Equipment in Atmospheric Environment[J]. Environmental Technology, 2022, 40(5): 183-187.
- [2] 姚琼, 陈俊航, 宋玉红, 等. 不锈钢波纹管在海洋大气环境下的腐蚀失效分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 86-94.
YAO Qiong, CHEN Jun-hang, SONG Yu-hong, et al. Corrosion Failure of Stainless Steel Bellows in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 86-94.
- [3] PARANGUSAN H, BHADRA J, AL-THANI N. A Review of Passivity Breakdown on Metal Surfaces: Influence of Chloride- and Sulfide-Ion Concentrations, Temperature, and pH[J]. Emergent Materials, 2021, 4(5): 1187-1203.
- [4] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵, 等. 大气环境腐蚀下钢结构力学性能研究综述[J]. 材料导报, 2020, 34(11): 11162-11170.
CAO Chen, ZHENG Shan-suo, HU Wei-bing, et al. Review of Research on Mechanical Properties of Steel Structure under Atmospheric Environment Corrosion[J].

- Materials Reports, 2020, 34(11): 11162-11170.
- [5] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 7050 高强铝合金在我国四种典型大气环境下腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 49-53.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, SU Yan, et al. Corrosion Behavior of 7050 High-Strength Aluminum Alloy in Four Typical Atmospheric Environments in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 49-53.
- [6] 徐永祥, 严川伟, 高延敏, 等. 大气环境中涂层下金属的腐蚀和涂层的失效[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4): 249-256.
- XU Yong-xiang, YAN Chuan-wei, GAO Yan-min, et al. Underfilm Corrosion of Metals and Failure of Organic Coatings in Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(4): 249-256.
- [7] 胡玉婷, 董鹏飞, 蒋立, 等. 海洋大气环境下 TC4 钛合金与 316L 不锈钢铆接件腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 167-174.
- HU Yu-ting, DONG Peng-fei, JIANG Li, et al. Corrosion Behavior of Riveted Joints of TC4 Ti-Alloy and 316L Stainless Steel in Simulated Marine Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(2): 167-174.
- [8] 张晓云, 刘明, 汤智慧, 等. 40CrNi₂Si₂MoVA 超高强度钢海洋大气环境腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(5): 413-419.
- ZHANG Xiao-yun, LIU Ming, TANG Zhi-hui, et al. Marine Atmospheric Corrosion of 40CrNi₂Si₂MoVA High Strength Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(5): 413-419.
- [9] 林臻, 李国璋, 白鸿柏, 等. 金属材料海洋环境腐蚀试验方法研究进展[J]. 新技术新工艺, 2013(8): 68-74.
- LIN Zhen, LI Guo-zhang, BAI Hong-bai, et al. Review of Research on Experimental Methods for Marine Environmental Corrosion of Metal Materials[J]. New Technology & New Process, 2013(8): 68-74.
- [10] 邹士文, 许文, 卢松涛, 等. 典型高强紧固件海南雨水环境腐蚀及防护研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(5): 523-528.
- ZOU Shi-wen, XU Wen, LU Song-tao, et al. Corrosion Behavior and Protection Measures of Typical High-Strength Fasteners in Hainan Rain Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(5): 523-528.
- [11] 崔中雨, 葛峰, 王昕. 几种苛刻海洋大气环境下的海工材料腐蚀机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 403-409.
- CUI Zhong-yu, GE Feng, WANG Xin. Corrosion Mechanism of Materials in Three Typical Harsh Marine Atmospheric Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 403-409.
- [12] 沈剑, 丁星星, 宋凯强, 等. 海洋大气环境下装备材料的腐蚀与防护研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 103-109.
- SHEN Jian, DING Xing-xing, SONG Kai-qiang, et al. Research Progress on Corrosion and Protection of Equipment Materials in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 103-109.
- [13] 魏雄. 海洋大气环境下液滴对金属腐蚀[J]. 化工管理, 2013(18): 197.
- WEI Xiong. Corrosion of Metal by Liquid Droplets in Marine Atmospheric Environment[J]. Chemical Engineering Management, 2013(18): 197.
- [14] ALCÁNTARA J, DE LA FUENTE D, CHICO B, et al. Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review[J]. Materials, 2017, 10(4): 406.
- [15] 张涛, 李鸿飞, 刘静, 等. 濒海大气环境氯离子高度分布规律研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 137-142.
- ZHANG Tao, LI Hong-fei, LIU Jing, et al. Height Distribution Law of Chlorine Ions in Coastal Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 137-142.
- [16] GUAN H, LOVE A J, SIMMONS C T, et al. Factors Influencing Chloride Deposition in a Coastal Hilly Area and Application to Chloride Deposition Mapping[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(5): 801-813.
- [17] 张波, 徐敏, 陈云霞, 等. 湛江临海区域氯离子沉降速率对比研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1): 129-133.
- ZHANG Bo, XU Min, CHEN Yun-xia, et al. Comparative Study of Cl⁻ Sedimentation Rates in Coastal Areas of Zhanjiang[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(1): 129-133.
- [18] 郭赞洪, 梁少燕, 唐其环, 等. 空气中氯离子沉积速率的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 124-130.
- GUO Zan-hong, LIANG Shao-yan, TANG Qi-huan, et al. Analysis of Factors Influencing Chloride Deposition Rate in Air[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 124-130.
- [19] 刘溅洪, 张凯, 易平, 等. 万宁地区近地面氯离子沉积速率的影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 139-145.
- LIU Jian-hong, ZHANG Kai, YI Ping, et al. Effect Factors of Chloride Deposition Rate Near Ground in Wanning[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 139-145.
- [20] 侯梦莹, 李芊芊, 袁甜甜, 等. 南方滨海地区盐雾沉降的时空分布——以福建古雷半岛为例[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2524-2530.
- HOU Meng-ying, LI Qian-qian, YUAN Tian-tian, et al. Spatiotemporal Distribution of Salt Spray Deposition in the Coastal Areas of South China: A Case Study of the Gulei Peninsula, Fujian[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2524-2530.
- [21] DAVIES P J, CROSBIE R S. Mapping the Spatial Distribution of Chloride Deposition across Australia[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 76-88.
- [22] 汤菊, 戴子云, 李新宇, 等. 基于 X 射线荧光光谱仪的

- 儿童沙坑重金属污染特征调查研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(12): 3879-3882.
- TANG Ju, DAI Zi-yun, LI Xin-yu, et al. Investigation and Research on the Characteristics of Heavy Metal Pollution in Children's Sandpits Based on XRF Detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(12): 3879-3882.
- [23] 李小莉, 高新华, 王毅民, 等. X 射线荧光在地质材料卤族元素分析中的应用评介[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 997-1009.
- LI Xiao-li, GAO Xin-hua, WANG Yi-min, et al. Review on the Application of X-Ray Fluorescence Spectrometry in Halogen Elements Analysis in Geological Materials[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 997-1009.
- [24] 杨晓红, 陈丽琼, 刘婉秋. X 射线荧光光谱法在环境监测中的发展与应用[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(7): 861-868.
- YANG Xiao-hong, CHEN Li-qiong, LIU Wan-qiu. Development and Application of X-Ray Fluorescence Spectrometry in Environmental Monitoring[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B (Chemical Analysis)), 2022, 58(7): 861-868.
- [25] 叶洪超, 刘纪平, 徐胜华. 改进时空克里金插值的气体扩散体可视化[J]. 测绘科学, 2022, 47(11): 96-103, 112.
- YE Hong-chao, LIU Ji-ping, XU Sheng-hua. Volume Visualization of Gas Spread Based on Improved Spatio-Temporal Kriging Interpolation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(11): 96-103, 112.
- [26] 王静, 苗峻峰, 冯文. 海南岛沿海近地面风时空分布特征的观测分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(3): 226-238.
- WANG Jing, MIAO Jun-feng, FENG Wen. An Observational Analysis of Spatial and Temporal Characteristics of Near-Surface Wind over the Coastal Area of the Hainan Island[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 8(3): 226-238.

责任编辑: 刘世忠