船舶及海洋工程装

海南湿热海洋大气环境 Q235 钢腐蚀行为 研究及严酷度评估

『覃粒¹,吴德权¹,胡涛¹,贺琼瑶¹,唐蔓夕¹,赵方超¹,杨明波²

(1.西南技术工程研究所,重庆 400039,2. 重庆理工大学,重庆 400054)

摘要:目的 探究我国典型湿热海洋大气环境特征,以 Q235 钢为标杆材料,评估并可视化展示海南湿热海 洋大气环境严酷度。方法 以海南岛为典型湿热海洋地区,基于分布全岛全域的 13 个站点开展自然大气环 境试验,采集各站点大气环境数据与 Q235 钢材料性能数据。通过分析表观形貌、腐蚀质量损失等性能,探 究 Q235 钢在海南大气环境的腐蚀行为规律及其在全岛不同区域的腐蚀程度差异。基于大气环境因素与 Q235 钢腐蚀行为间相关性研究,筛选腐蚀敏感环境因素,构建"腐蚀质量损失-敏感环境因素"映射模型。基于 Q235 钢海南各地区腐蚀质量损失数据,通过 Griddata 插值,计算绘制腐蚀质量损失分布地图。结果 掌握了 Q235 钢在海南各地区腐蚀行为差异,可视化展示了海南大气腐蚀严酷度。结论 影响 Q235 钢海南地区腐蚀 的敏感环境因素为离海距离及湿度大于 80%的时间。海南地区沿海岸及东部地区大气环境腐蚀严酷度高, 中部及西部地区严酷度低。

关键词:Q235 钢;海南;湿热海洋大气环境;腐蚀;相关性 中图分类号:TG172 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2023)07-0090-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.012

Corrosion Behaviors of Q235 Steel and Severity Evaluation for Humid and Hot Marine Atmosphere Environmental in Hainan

QIN Li¹, WU De-quan¹, HU Tao¹, HE Qiong-yao¹, TANG Man-xi¹, ZHAO Fang-chao¹, YANG Ming-bo²

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the typical characteristics of hot and humid marine atmospheric environment in China and evaluate and visualize the severity of hot and humid marine atmospheric environment in Hainan with Q235 steel as the benchmark material. With Hainan Island as a typical humid and hot marine atmosphere area, the natural atmospheric environment test was carried out based on 13 stations distributed throughout the island, and the atmospheric environment data and Q235 steel material performance data of each station were collected. By analyzing the apparent morphology, corrosion weight loss and other properties, the corrosion behavior rules of Q235 steel in Hainan atmospheric environment and the corrosion degree differences in different areas of Hainan were explored. Based on the correlation between atmospheric environmental factors and Q235

收稿日期: 2023-01-16; 修订日期: 2023-02-28

Received: 2023-01-16; Revised: 2023-02-28

作者简介: 覃粒 (1996—), 男, 硕士。

Biography: QIN Li (1996-), Male, Master.

引文格式: 章粒, 吴德权, 胡涛, 等. 海南湿热海洋大气环境 Q235 钢腐蚀行为研究及严酷度评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 090-097. QIN Li, WU De-quan, HU Tao, et al. Corrosion Behaviors of Q235 Steel and Severity Evaluation for Humid and Hot Marine Atmosphere Environmental in Hainan[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 090-097.

steel corrosion behaviors, the corrosion sensitive environmental factors were screened and the mapping model of "corrosion weight loss-sensitive environmental factors" was constructed. Based on the corrosion weight loss data of Q235 steel in various regions of Hainan, the distribution map of corrosion weight loss was calculated and drawn through Griddata interpolation. The corrosion behavior differences of Q235 steel in various regions of Hainan was mastered, and the severity of atmospheric corrosion in Hainan was visually displayed. The sensitive environmental factors affecting the corrosion of Q235 steel in Hainan are the distance from the sea and the period with humidity greater than 80%. The severity of atmospheric corrosion is high in the coastal and eastern areas of Hainan, and low in the central and western areas.

KEY WORDS: Q235 steel; Hainan; humid and hot marine atmosphere environmental; corrosion; correlation

腐蚀广泛存在于国民生产生活之中。每年因各类 腐蚀带来的直接经济损失高达国民生产总值的 2%~4%,其总损失更是超过5%,而金属腐蚀造成的 经济损失占到各种材料腐蚀经济损失的1/2以上^[1-2]。 Q235 钢作为典型碳钢材料,广泛应用于工业生产领 域,是环境评估、标准设立的标尺与基准^[3-5],为材 料设计相关研究提供数据支撑,为施用单位制定腐蚀 防护策略提供重要参考。

我国海南地区因其高温、高湿、高盐雾、强辐照 的湿热海洋气候特征,是金属材料腐蚀的"重灾区"。 据研究表明,碳钢材料在海南地区长期暴露下的腐蚀 速率是我国内陆干燥大气环境的 2~6 倍,是我国东南 沿海(如广东)的 3 倍左右^[6-8]。近年来,大量建设 性工程项目在海南开展,设施材料在海南地区使用安 全亟需保障。海南湿热海洋大气环境腐蚀性评估问题 已被众多专家提上议程,研究典型金属材料在海南地 区的腐蚀行为,掌握金属材料在海南各地腐蚀差异及 时空分布规律,对金属材料腐蚀进行预测预判,以便有 效地指导金属设施设备在海南的安全使用和精准防护。

目前,金属材料在海南湿热海洋大气环境中的腐 蚀行为机制得到较多研究,典型材料海洋大气环境腐 蚀数据持续积累。研究人员大多通过在海南典型站 点(如琼海、万宁等)开展自然环境试验,对比典 型站点金属的腐蚀行为与机制,粗略地评估海南腐 蚀等级^[9-12]。如冯立超等^[13]在海洋大气试验中发现, 氯离子能破坏金属氧化膜,从而加速金属腐蚀。金属 在海洋大气环境下易受到大气污染物(如 SO42-、NO3-和 NH₄+) 与富 Cl⁻耦合作用, 进一步影响金属材料的 腐蚀^[14]。然而自然环境试验成本高, 仅通过典型站点 环境试验产生的数据量较少,有限的自然环境数据难 以精细化描述海南全域的环境差异。同时,由于可视 化表征手段的匮乏,小规模数据难以支撑数据资源的 深层次开发, 难以转化为工程化应用的便捷产品, 无 法高效指导设备应用[15]。这一现状使得材料腐蚀数据 可视化技术成为迫切需求。

随着计算机技术的飞速发展,新型软件及算法等 在材料行为模型构建、小样本环境材料数据深度挖掘 方面逐渐得到应用^[16-20]。其中,地理信息系统等平台 是广泛应用的环境信息数据载体,可以通过高效处 理,可视化展示不同坐标的环境信息。基于数字化可 视化的思想,通过相关数据分析软件,将海南全域自 然环境试验数据转化为数字地图,精细化展示海南腐 蚀分布,提高腐蚀数据的利用效率。

本文在海南 13 个站点开展大规模自然环境试 验,通过采集 Q235 的腐蚀数据及环境数据,基于环 境因素及环境效应相关性分析,建立了对海南大部分 气候环境具有普适性的可视化"环境-材料"对应模 型。以 Q235 腐蚀质量损失作为严酷度评价指标,绘 制了海南严酷度空间分布图,并预警了腐蚀严重地 区。该研究为海南地区装备设施安全服役、金属选材 及防护提供了重要支撑。

1 试验

1.1 Q235 钢海南地区自然环境试验

通过自然环境试验采集 Q235 钢腐蚀质量损失数据,研究其腐蚀行为。自然环境试验按照 GB/T 24516.2—2009 在海南13个城市的大气环境试验站进行,时间为 2021—2022 年,样品回收周期为 3、6、9、12 月,共4个周期。13 个站点位于东方、琼海、临高、儋州、昌江、定安、保亭、文昌、白沙、屯昌、万宁、海口、三亚,如图 1 所示。

海南省地处华南地区,位于热带边缘,属热带季风性气候,是典型的湿热海洋大气环境条件。试验时间为 2021 年 4 月—2022 年 4 月,海南各站点的气象数据见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 皮尔逊(Pearson)相关性分析

Pearson 相关分析用于计算气候因素之间的相关 性,其计算过程如式(1)所示。相关性系数 r 描述 2 个变量之间的线性相关程度, r 的值在-1 和+1 之间。 如果 r>0,表明 2 个变量正相关; r<0,则表示 2 变量 负相关。r 的绝对值越大,相关性越强。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X}) \left(Y_i - \overline{Y} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \overline{Y})^2}}$$
(1)



图 1 海南各站点位置及万宁站环境试验架

Fig.1 Locations of stations in Hainan and the shelf for environment tests at Wanning station

站点	海拔 高度/m	年均 温度/℃	年均 湿度/%	年降水 总量/mm	年降水总 时间/h	年日照 时间/h	湿度>80% 总时间/h	年均风速 /(m·s ⁻¹)	年均气压 /hPa
万宁	39.9	25.11	82.86	2 750.1	931	1 936	5 666.00	2.35	1 006.54
海口	63.5	25.17	80.92	1 909.5	682	1 725.7	5 247.00	2.70	1 003.96
琼海	23.3	25.23	81.95	1 924.8	755	1 743.1	5 500.00	2.32	1 008.63
屯昌	118.3	25.03	78.95	1 978.6	887	1 900	4 937.00	1.26	997.73
定安	53.3	24.95	80.74	1 877.8	717	1 670	5 345.00	2.41	1 005.20
文昌	21.7	25.32	82.55	2 015.1	848	1 700	5 656.00	1.63	1 008.94
保亭	68.6	25.59	77.89	2 128.7	778	2 012	4 451.00	1.19	1 003.00
东方	7.6	25.99	76.73	759.1	401	2 425	3 635.00	3.37	1 010.09
临高	31.7	24.91	80.04	1 574	572	1 703	5 141.00	1.94	1 007.53
昌江	98.1	25.64	73.59	2 034.9	533	1 734	3 762.00	1.63	999.66
三亚	20.0	22.90	90.00	1 347.5	800	1 641.3	5 277.00	3.80	1 007.35
儋州	169.0	24.88	77.00	2 049.8	793	1 873.2	4 585.00	1.56	991.72
白沙	215.6	24.45	78.76	1 804.8	781	1 627.8	5 058.00	1.15	986.57

表 1 海南各站点气象数据 Tab.1 Climate dates of testing stations in Hainan

式中: r 表示相关性系数, $X \setminus Y$ 分别表示两个变量, $\overline{X} \setminus \overline{Y}$ 分别表示 2 个变量的均值。

1.2.2 灰色关联度分析

腐蚀可以看作是环境这个复杂系统对金属材料 作用而产生的一个过程机制不清晰的灰色系统,它通 过统计方法将多个环境因素自变量序列和材料性能 因变量序列的几何形状相似程度排序^[21],计算过程如 式(2)所示。通过环境因素数据矩阵与材料腐蚀变 量间灰色相关性系数,挑选对材料腐蚀影响较大的环 境因素。

$$\xi_{i}(k) = \frac{\min_{i} \min_{k} |X_{0}(k) - X_{i}(k)| + \rho \max_{i} \max_{k} \Delta_{i}(k)}{\Delta_{i}(k) + \rho \max_{i} \max_{k} \Delta_{i}(k)}$$
(2)

式中: X_i(k)为自变量序列; Δ_i(k)为自变量与因变量的差值序列; i 为第 i 个环境因素; k 为该因素中第

k 个样本值; min 为向量最小值; max 为向量最大值; ρ 为分辨系数取 0.5。

2 结果与分析

2.1 海南地区 Q235 钢腐蚀行为分析

通过跟踪测量 Q235 钢在 13 个大气站点暴晒 3、 6、9、12 个月期间的表观形貌腐蚀情况与腐蚀质量 损失,表征 Q235 钢在海南典型地区腐蚀行为,如图 2 所示。

图 2a--d 分别为三亚、东方、海口和万宁站 Q235 钢样品暴露在大气环境下 3、6、9 及 12 月(从左到 右)后的腐蚀外观形貌。可以看出,金属在腐蚀初期 腐蚀面积就达到 100%,腐蚀层呈棕红色,表面完全 腐蚀。在整个腐蚀过程当中,外观形貌难以准确量化 Q235 钢腐蚀程度。



图 2 (a) 三亚、(b) 东方、(c) 海口与(d) 万宁 Q235 钢外观形貌与(e) 各站点腐蚀性能随暴晒时间变化 Fig.2 Corrosion appearance and performances of Q235 steel as a function of exposure time in Sanya (a), Dongfang (b), Haikou (c), and Wanning (d)

从图 2e 中可以看出, Q235 钢的腐蚀质量损失随 暴露时间的增加而增加, 且腐蚀质量损失的增量呈现 先快后慢的趋势。其中, 万宁、文昌、海口及琼海等 海南东北部沿海站点得到的金属腐蚀质量损失在暴 露 1 a 后达到了 300 g/m²以上, 在海南各站点中腐蚀 程度较严重。保亭、儋州、白沙及昌江等海南西南部站 点得到的金属腐蚀质量损失在暴露 1 a 后不足 150 g/m², 腐蚀程度较轻。本文以 Q235 钢 1 a 的腐蚀质 量损失量为指标,评价湿热海洋环境严酷度。

2.2 Q235 钢腐蚀敏感环境因素研究

海南大气环境对 Q235 钢的作用机制目前没有明 晰的数学模型,海南环境数据也可以看作是一个信息 模糊、变量多维的集合。通过回归分析、灰色关联分 析等数学方法,定量分析海南环境因素,包括地理因 素(如海拔高度、经度、纬度、离海距离等)及气候 因素(如平均相对湿度、平均温度、降水小时数、日 照时间、年均风速、年均大气压、降水量)与 Q235 钢材料腐蚀性能(腐蚀质量损失)之间的相关性,寻 找影响 Q235 钢腐蚀敏感的环境因素。

2.2.1 Pearson 相关性分析环境因素间关联

各环境因素并非独立变量,通过 Pearson 分析海 南地区环境因素间相互影响程度,为筛选敏感环境因 素提供数据支撑。正相关表示两环境因素间存在一定 促进作用,负相关则表示两环境因素间存在一定抑制 作用。结果显示,湿度>80%的时间与经度的相关性 高达 0.840,与平均相对湿度以及降雨时间的相关度 也分别达到 0.722、0.691。离海距离与风速负相关 (-0.662),离海距离与海拔高度则密切正相关 (0.710)。对于关联性较强的多个环境因素,可合理 挑选其中一个作为影响材料腐蚀的敏感环境因数,避 免建模过程变量冗余。因此,湿度>80%时间、平均 相对湿度、降雨时间可以选择一个作为与湿度相关的 大气环境变量,离海距离与海拔高度可以选择一个作 为地理信息变量。

2.2.2 灰色关联度分析 Q235 钢腐蚀敏感环境因素

本项目以 Q235 钢在海南大气环境下暴露 1 a 的 腐蚀质量损失作为环境效应数据因变量序列,以环境 因素作为自变量序列进行灰色关联分析。通过 MATLAB软件编程计算 Q235 钢腐蚀质量损失与环境 变量间的灰色关联度,将相关度结果按照从大到小排 序,结果如图 3 所示。各环境因素与 Q235 钢腐蚀质 量损失间灰色关联度排序(从大到小):离海距离、 湿度>80%时间、平均相对湿度、日照时间、累积降 水量、降水小时数、平均气压、风速、平均气温、经 度、纬度以及海拔高度。

2.2.3 Q235 钢腐蚀质量损失敏感环境因素研究

线性回归分析可用于定量计算 2 个变量间的线 性相关程度,是判断 2 个变量能否建立线性函数的前 提。这里通过散点图探究湿热海洋大气 13 个站点 6 个典型环境因素数据与 Q235 钢腐蚀质量损失间的线 性关联程度,建立线性回归方程,如图 4 所示。计算 各环境因素与腐蚀质量损失间的回归方程,通过对比 拟合优度(*R*²)、Pearson 相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC),量化比较各环境因素与 Q235 钢 腐蚀质量损失间关联程度大小。

由图 4 可知,各线性回归方程的拟合优度最高为 0.72,低于 0.85 阈值,表明各环境因素与 Q235 钢腐 蚀质量损失间并没有统计意义上的严谨线性关联^[22], 说明线性方程并不能很好建立环境因素与 Q235 钢腐 蚀性能间的映射关系。对拟合优度 *R*²大小进行排序, 用于比较各因素与 Q235 钢腐蚀质量损失间相关性的 大小,结果表明,敏感的环境因素排序为离海距离、 平均相对湿度、湿度>80%时间。

线性回归分析中, Pearson 系数表明 2 个变量间 的统计学意义上的相关性^[22],而从图 4 中可知,各环 境因素与 Q235 钢腐蚀质量损失间无显著相关性。这 是因为海南地区 13 个样本数据较少,且 Q235 钢在 大气环境下腐蚀受多种环境因素的综合影响。其中,









离海距离与腐蚀质量损失之间的 Pearson 系数达到最高--0.85,表明相比于其他环境因素,离海距离与 Q235 钢腐蚀的关联较大。其次为平均相对湿度、湿度>80%时间,分别与腐蚀质量损失 Pearson 系数达到了 0.70、0.66。

从图 3 可以看到,平均相对湿度与湿度>80%时间两项的关联度达到 0.722,表明平均相对湿度与湿度>80%时间表达信息较接近。基于金属材料腐蚀机理,高湿度下金属表面形成的薄液膜是金属腐蚀的主要原因。因此,相比于年平均湿度,选择湿度>80%时

间作为海南地区 Q235 腐蚀的高相关性环境因素^[23-25]。

综合考虑上述 Pearson 相关性、灰色关联、线性 回归等各方法计算得到的相关性较高的环境因素,优 先选择离海距离、湿度>80%时间作为 Q235 钢腐蚀敏 感环境因素。

2.3 Q235钢腐蚀质量损失与敏感环境因素 模型研究

海南 13 个站点收集得到在海南湿热海洋大气环境下暴露 1 a 的 Q235 钢腐蚀质量损失数据如图 5 a 所示。基于上述湿热海洋地区环境因素分析及影响金属



腐蚀质量损失腐蚀敏感环境因素筛选,以离海距离、湿度>80%时间为关键环境因素变量,以Q235钢1a腐蚀速率作为环境效应变量,构建环境因素与环境效应之间模型,通过曲面拟合,呈现"环境因素-材料性能"模型函数映射关系,如图5b所示。从模型三维图像中可以看出,湿度>80%时间的增加促进了金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离越近,金属腐蚀质量损失增加;离海距离



a 腐蚀质量损失分布

b敏感环境-色差映射关系

图 5 海南地区 Q235 钢腐蚀质量损失分布与敏感环境-色差映射关系 Fig.5 Distribution map of corrosion weight loss (a) and mapping plot for the relation between sensitive environment factors and corrosion rate (b) of Q235 steel in Hainan

2.4 基于 Q235 钢腐蚀质量损失的分布地 图绘制

通过 Matlab 软件,输入暴露在湿热海洋大气环 境下 3、6、9、12 个月金属腐蚀质量损失值,对海南 13 个站点进行 Griddata 插值计算,得到海南 Q235 钢 不同暴露时间下质量损害分布地图,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,自然环境试验 3 个月,Q235 腐蚀程度小,腐蚀质量损失分布并没有明显差异;自 然环境试验 6 个月,海南中部及南部地区腐蚀程度依 然较轻,而滨海地区腐蚀程度开始加重;自然环境试 验 9 个月,中南部金属腐蚀质量损失较小,而东部较 高;自然环境试验 12 个月,海南东部与北部金属腐 蚀程度较之前显著增加。

以上分布表明,Q235 在海南东部及北部地区腐 蚀较严重,而岛南部及中部地区腐蚀较轻。这是因为 受海洋湿气、含盐粒子、季风等环境因素的影响,海 南长期受到来自东北及东南方向季风,如冬季为来自 大陆方向的南下冷空气,夏季为来自南海的湿热气 流,仅秋季有短期来自西南方向季风,因此海南北部、



图 6 海南地区 Q235 钢质量损失分布地图 Fig.6 Weigh loss distribution plots of Q235 steel in Hainan for 3 months (a), 6 months (b), 9 months 6 (c) and 12 months (d) respectively

东部受湿气及盐沉积影响更大,腐蚀严酷度更高。海 南中部为山地,森林覆盖率高,植被对大气有一定调 控作用,一定程度上减轻了腐蚀严酷性。

3 结论

1)采集 Q235 钢在海南 13 个站点暴露大气 3、6、 9、12 个月样品,分析其形貌特征及腐蚀质量损失数 据发现,试验初期样品表面即全面锈蚀,难以通过锈 层颜色对比评价各地的腐蚀差异。腐蚀质量损失随着 试验时间逐渐增加,并趋于稳定。其中,海南东北部 站点 12 个月试验后金属腐蚀程度较严重,腐蚀质量损 失达到了 300 g/m²以上,海南西南部则不足 150 g/m²。

2)通过 Pearson 相关性分析,在湿度>80%时间、 平均相对湿度、降雨时间 3 个环境因素中,可以选择 1 个作为与湿度相关变量,离海距离与海拔高度可以 选择 1 个作为地理信息变量。通过灰色关联度分析与 线性回归分析,与 Q235 钢腐蚀质量损失关联度较强 的因素为离海距离、湿度>80%时间、平均相对湿度。 综合分析筛选出影响 Q235 钢的腐蚀敏感环境因素分 别为湿度>80%时间、离海距离。

3)将筛选得到的湿度>80%时间和离海距离作为 Q235 钢海南腐蚀敏感环境因素,构建"环境-材料" 间映射关系模型。通过插值法将 Q235 钢不同周期腐 蚀质量损失数据以分布地图形式可视化表达,结果显 示,海南东部及沿海地区严酷度高,海南中部及西部 地区严酷度低。

参考文献:

 [1] 侯保荣.海洋环境腐蚀规律及控制技术[J]. 科学与管理, 2004, 24(5): 7-8.
 HOU Bao-rong. Corrosion Law and Control Technology of Marine Environment[J]. Science and Management, 2004, 24(5): 7-8.

- [2] 柯伟.中国工业与自然环境腐蚀调查[J]. 全面腐蚀控制, 2003, 17(1): 1-10.
 KE Wei. Current Investigation into the Corrosion Cost in China[J]. Total Corrosion, 2003, 17(1): 1-10.
- [3] 何建新,秦晓洲,易平,等. Q235 钢海洋大气腐蚀暴露 试验研究[J]. 表面技术, 2006, 35(4): 21-23.
 HE Jian-xin, QIN Xiao-zhou, YI Ping, et al. Corrosion Exposure Study on Q235 Steel in Marine Atmospheric[J]. Surface Technology, 2006, 35(4): 21-23.
- [4] 王际东,陈旭,王志斌,等. Q235 钢在含硫污水中的腐 蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(5): 485-491.
 WANG Ji-dong, CHEN Xu, WANG Zhi-bin, et al. Corro-

sion Behavior of Q235 Steel in Sour Water[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(5): 485-491.

[5] 高向宇, 杜海燕, 张惠, 等. 国标 Q235 热轧钢材防屈 曲支撑抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(3): 91-95.

GAO Xiang-yu, DU Hai-yan, ZHANG Hui, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Buck-

ling-Restrained Brace Made of Q235 Hot-Rolled Steel in China[J]. Building Structure, 2008, 38(3): 91-95.

- [6] 王洪伦,杨华,蔡辉,等. Q235 钢在海南濒海同区域户 外暴晒环境和棚下环境的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防 护学报, 2023, 43(3): 677-682.
 WANG Hong-lun, YANG Hua, CAI Hui, et al. Corrosion Behavior of Q235 Steel by Outdoor Exposure and under Shelter in Atmosphere of Hainan Coastal[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(3): 677-682.
 [7] 王成章 汪学华 秦晓洲 磁钢及低合全钢在重压和万
 - [7] 王成章,汪学华,秦晓洲.碳钢及低合金钢在重庆和万 宁地区大气腐蚀规律研究[J].装备环境工程,2006, 3(2):23-28.

WANG Cheng-zhang, WANG Xue-hua, QIN Xiao-zhou. Research on Atmospheric Corrosion Rule of Carbon Steel and Low Alloy Steel in Chongqing and Wanning Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(2): 23-28.

- [8] 毛海荣,区国昌,黄少仪,等.碳钢及低合金钢在广州 大气暴露腐蚀规律研究[J].环境技术,2001,19(3):5-7. MAO Hai-rong, OU Guo-chang, HUANG Shao-yi, et al. Study on Corrosion Law of Carbon Steel and Low Alloy Steel Exposed to Atmosphere in Guangzhou[J]. Environmental Technology, 2001, 19(3): 5-7.
- [9] 王光雍, 舒启茂. 材料在大气、海水、土壤环境中腐蚀 数据积累及腐蚀与防护研究的意义与进展[J]. 中国科 学基金, 1992, 6(1): 40-45.
 WANG Guang-yong, SHU Qi-mao. Studies on Corrosion Data Accumulation, Corrosion and Protection of Materials in Atmosphere, sea Water, Soil Environments[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 1992, 6(1): 40-45.
- [10] 王建军, 郭小丹, 郑文龙, 等. 海洋大气暴露 3 年的碳 钢与耐候钢表面锈层分析[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(7): 288-291.
 WANG Jian-jun, GUO Xiao-dan, ZHENG Wen-long, et al. Analysis of the Corrosion Rust on Weathering Steel

al. Analysis of the Corrosion Rust on Weathering Steel and Carbon Steel Exposed in Marine Atmosphere for Three Years[J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(7): 288-291.

- [11] 王玲, 牟献良, 朱蕾, 等. 大气环境腐蚀性分类分级研究综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 24-27.
 WANG Ling, MU Xian-liang, ZHU Lei, et al. Review of Atmospheric Corrosivity Classification[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 24-27.
- [12] 苏艳,李凌杰,舒畅,等. 高强铝合金海洋大气环境剥 层腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 180-182. SU Yan, LI Ling-jie, SHU Chang, et al. Research on Corrosion Characters and Mechanism of 7B04 Aluminum Alloy in Marine Atmosphere Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 180-182.
- [13] 冯立超, 贺毅强, 乔斌, 等. 金属及合金在海洋环境中的腐蚀与防护[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 13-17.
 FENG Li-chao, HE Yi-qiang, QIAO Bin, et al. Corrosion and Protection of Metal and Alloy in Marine Environ-

ment[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(24): 13-17.

- [14] WANG Jun, HU Zi-mei, CHEN Yuan-yuan, et al. Contamination Characteristics and Possible Sources of PM10 and PM2.5 in Different Functional Areas of Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 68: 221-229.
- [15] 李晓刚. 材料腐蚀信息学: 材料腐蚀基因组工程基础 与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
 LI Xiao-gang. Informatics for Materials Corrosion and Protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [16] LIU Han, ZHOU Ming-yong, ZHOU Yu-li, et al. Aging Life Prediction System of Polymer Outdoors Constructed by ANN. 1. Lifetime Prediction for Polycarbonate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 105: 218-236.
- [17] FIGUEIRA PUJOL J C, ANDRADE PINTO J M. A Neural Network Approach to Fatigue Life Prediction[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(3): 313-322.
- [18] TESFAMARIAM S, MARTÍN-PÉREZ B. Bayesian Belief Network to Assess Carbonation-Induced Corrosion in Reinforced Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(11): 707-717.
- [19] CALEYO F, VELÁZQUEZ J C, VALOR A, et al. Probability Distribution of Pitting Corrosion Depth and Rate in Underground Pipelines: A Monte Carlo Study[J]. Corrosion Science, 2009, 51(9): 1925-1934.
- [20] OSSAI C I, BOSWELL B, DAVIES I J. Estimation of Internal Pit Depth Growth and Reliability of Aged Oil and

Gas Pipelines—A Monte Carlo Simulation Approach[J]. CORROSION, 2015, 71(8): 977-991.

- [21] 鲁庆. 基于数据挖掘的材料自然环境腐蚀预测研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
 LU Qing. Research on Corrosion Prediction of Materials in Natural Environment via Data Ming[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [22] CHAN J W K, TONG T K L. Multi-Criteria Material Selections and End-of-Life Product Strategy: Grey Relational Analysis Approach[J]. Materials & Design, 2007, 28(5): 1539-1546.
- [23] 戴明强, 宋业新. 数学模型及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2015.
 DAI Ming-qiang, SONG Ye-xin. Mathematical Model and Its Application[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [24] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
 CAO Chu-nan. Natural Environment Corrosion of China Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [25] 刘凯吉.大气腐蚀环境的分类及腐蚀性评定[J].全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 26-27.
 LIU Kai-ji. Classification and Evaluation of Environment of Atmospheric Corrosion[J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(10): 26-27.

责任编辑:刘世忠