

某东南沿海电厂钢结构腐蚀影响因素分析

郑国¹, 吴国威¹, 郑观文^{1*}, 邓培昌²

(1. 湛江电力有限公司, 广东 湛江 524099; 2. 广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088)

摘要: **目的** 对比腐蚀环境因子分布和钢结构腐蚀事件分布, 分析影响火力发电厂钢结构腐蚀的主要环境因素, 探讨火力发电厂钢结构腐蚀的机理。**方法** 以东南沿海某火力发电厂为例, 对电厂厂区进行网格化, 利用便携式温湿度计进行逐网格温、湿度监测, 逐网格收集结构物表面灰尘, 并分析其中氯离子、可溶盐、酸碱含量等, 开展腐蚀环境监测。统计从2012年至2022年10年间该电厂每一网格内的腐蚀防护工程, 如腐蚀防护器件、装备、材料购置等项目的施工或应用次数。**结果** 温度、湿度及钢结构表面灰尘中氯离子含量、可溶盐含量、灰尘浸渍水pH等因子受海洋环境、厂区结构分布、生产活动多重原因的影响, 随距海距离增加呈带状分布, 或围绕生产设施点呈辐射分布。**结论** 环境因子对钢铁结构腐蚀的影响大小顺序为结构物灰尘含盐量>结构物灰尘浸渍水pH>相对湿度>结构物灰尘氯离子含量>温度。电厂钢结构腐蚀机理为雨水或大气凝结水溶出结构物表面灰尘的可溶性盐, 含盐水经涂层缺陷输运至金属表面, 成为钢铁腐蚀原电池的离子导路, 导致钢结构发生电化学腐蚀。

关键词: 腐蚀环境; 钢结构; 网格化; 电化学腐蚀; 灰尘含盐量; 海洋环境

中图分类号: TG172 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)01-0081-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.011

Analysis of Corrosion Factors of Steel Structure in a Southeast Coastal Power Plant

ZHENG Guo¹, WU Guowei¹, ZHENG Guanwen^{1*}, DENG Peichang²

(1. Zhanjiang Power Co., Ltd., Guangdong Zhanjiang 524099, China; 2. College of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Guangdong Zhanjiang 524088, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the distribution of corrosion environmental factors and the distribution of steel structure corrosion events, analyze the main environmental factors affecting the corrosion of steel structure in thermal power plants, and explore the corrosion mechanism of steel structure in thermal power plants. Taking a southeast coastal power plant as an example, the plant area was gridded. The portable temperature and humidity meter was used to monitor the temperature and humidity grid by grid, and the dust on the surface of the structure was collected grid by grid, and the contents of chloride ions, soluble salts, acid and alkali were analyzed, so as to monitor the corrosion environment. The corrosion protection projects in each grid of the power plant during the decade from 2012 to 2022 were counted, such as the number of construction or application of corrosion protection devices, equipment and materials. The factors such as

收稿日期: 2023-10-24; 修订日期: 2023-11-14

Received: 2023-10-24; Revised: 2023-11-14

基金项目: 企业资助技术开发项目 (ZJP-PY-H2022-121)

Fund: Technology Development Project of Corporate Support (ZJP-PY-H2022-121)

引文格式: 郑国, 吴国威, 郑观文, 等. 某东南沿海电厂钢结构腐蚀影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 81-88

ZHENG Guo, WU Guowei, ZHENG Guanwen, et al. Analysis of Corrosion Factors of Steel Structure in a Southeast Coastal Power Plant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 81-88.

*通信作者 (Corresponding author)

temperature, humidity, chloride ion content, soluble salt content and dust-soaking liquid pH on the surface of steel structures were affected by multiple factors such as marine environment, factory structure distribution and production activities, and they were distributed in strips with the increase of distance from the sea or radiated around production facilities. The order of effect of environmental factors on corrosion of steel structure: soluble salt of SSSD>soluble salt of SSSD>dust-soaking liquid pH of SSSD>humidity>chloride content of SSSD>temperature. The corrosion mechanism of the steel structure in the power plant is the salt of SSSD dissolved in the rain or atmospheric condensate water, and the saline water is admitted to the surface of steel structure through the coating faults and becomes the ion conduction path of primary cells for steel corrosion and then the electrochemistry corrosion of steel is triggered or exacerbated.

KEY WORDS: corrosion environment; steel structure; grid; electrochemistry corrosion; soluble salt of steel structure surface dust; marine environment

东南沿海电厂所处环境属于高温、高湿、高盐的湿热大气环境，腐蚀环境恶劣^[1]。沿海强腐蚀环境中的防腐蚀技术一直是防腐蚀领域的一个技术难题。由于电厂的生产特点，决定了该区域大气中 SO₂、NO_x、H₂S 等气体含量较高，这些因素都会加重沿海地区钢结构的腐蚀^[2-5]。

由于钢结构具有强度高、载荷大、力学性能好、加工简单以及成本低等特点，因此被广泛使用于发电厂的厂房、管道、锅炉及其辅助设施建造中^[6]。目前，结构钢大多采用低碳钢或低合金钢（如 Q235、Q345），这一类钢材的耐腐蚀性能、耐候性以及耐化学性能较差^[7-8]。相较内陆地区，沿海地区的大气环境更为恶劣，暴露在大气中的厂房、设备等构筑物的钢结构腐蚀更严重，如表 1 所示^[9]。

表 1 距海不同距离腐蚀速率对比^[9]
Tab.1 Comparison of corrosion rates at different distance from the sea^[9]

实验点	距海距离/km	腐蚀速率/ ($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)		近远海比值 (与屯昌试验点对比)	
		暴露 1 a	暴露 2 a	暴露 1 a	暴露 2 a
海口	4	65.22	46.48	1.82	1.86
文昌	10	57.83	48.11	1.61	1.92
临高	10	61.95	47.20	1.73	1.88
琼海	15	65.05	50.90	1.81	2.03
澄迈	25	34.52	26.36	0.96	1.05
定安	40	32.74	23.18	0.91	0.93
屯昌	55	35.88	25.05	1	1

碳钢 Q235 年均腐蚀速率随距海距离的增加有减小的趋势（如图 1 所示），但是在距海 15 km 以内，腐蚀速率较高，随距海距离变化较小；从距海 15 km 到 25 km，腐蚀速率明显减小；从距海 25 km 到 55 km，腐蚀速率变化较小。因此，海洋对 Q235 腐蚀的影响范围为距海 15 km。距海 15 km 内外，Q235 暴露 1 a 的平均腐蚀速率比为 1.82，Q235 暴露 2 a 的平均腐蚀速率比为 1.94。沿海电厂多分布于距海距离 5 km 以

内，部分沿海电厂区位于距海距离 1 km 以内，因此研究沿海电厂钢结构腐蚀影响因素，对沿海电厂钢结构防腐方案的优化、新防腐技术开发、新型钢结构材料开发具有重要价值。

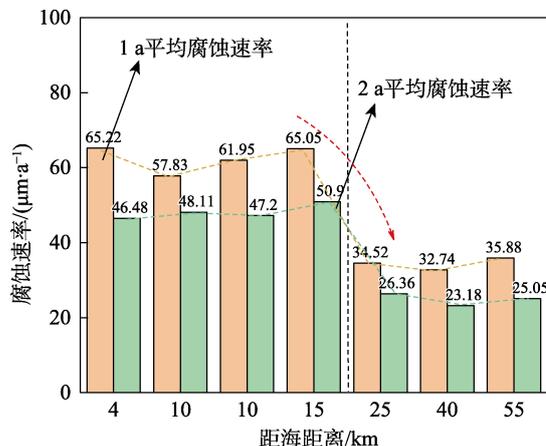


图 1 距海距离对 Q235 年均腐蚀速率的影响
Fig.1 Average annual corrosion rate of Q235 as a function of distance from the sea

1 沿海电厂腐蚀环境调查方法

电厂生产过程中伴随灰尘、污染气体、水蒸气等的排放，这些因素与海洋环境因素叠加会造成临海电厂厂区腐蚀环境分布的不均匀性。

1.1 湛江电厂温、湿度分布调查方法

电厂钢结构腐蚀机理为电化学腐蚀，钢铁表面连续液膜是腐蚀原电池的必要组成部分^[10]。液膜的形成与大气的相对湿度有关，不同物质或同一物质的不同表面状态，形成液膜所需的相对湿度条件不同^[11]。有关文献报道大气相对湿度 65%为钢铁腐蚀临界湿度^[12]，即相对湿度低于 65%，钢铁表面不能形成连续液膜，阻碍腐蚀微电池的进行，抑制钢铁腐蚀。另外，钢铁腐蚀为电化学腐蚀，温度会影响电化学腐蚀的反应速率^[13-14]，温度每升高 10 °C，电化学腐蚀反应速率提高 2~4 倍。由此可见，温、湿度是影响钢铁腐蚀的重

要环境因素, 开展温、湿度分布调研对了解影响电厂钢结构的腐蚀程度与机理有重要意义。

对电厂范围进行网格化划分, 研究电厂厂区为近长方形, 分别在长、宽等距划分 10 个格, 全域形成 100 个网格。其中, (3, 7)、(3, 10)、(7, 8)、(7, 10) 等 4 个点所围区域为燃煤堆场, 因金属结构与设备较少, 不进行环境监测, 用于环境监测的网格为 83 个 (如图 2 所示)。利用便携式温湿度计 (BENETECH GM1361, 环境温度测量范围为 -10~50 °C, 精度为 ±1 °C; 相对湿度测量范围 0%~99.9%, 精度为 ±5%) 对 83 个网格逐一进行温度、相对湿度测量。



图 2 某沿海电厂环境因素调查网格划分

Fig.2 Grid layout of the environmental investigation of a coastal power plant (A. 1# Furnace; B. 2# Furnace; C. 3# Furnace; D. 4# Furnace; E. Desulphurisation sludge treatment pond; F. Seawater cooling intake basin; G. Water treatment area)

1.2 沿海电厂结构物表面灰尘调研

沿海电厂生产过程中, 由于能源材料运输、炉灰的转运等环节会产生一些灰尘。灰尘沉落于结构物表面后, 受雨水、凝结水等浸渍, 造成雨水、凝结水成分发生较大变化, 使得金属表面的 pH 值降低, 从而影响结构物表面涂层材料的性能、结构钢的腐蚀速率与腐蚀类型^[15-16]。因此, 开展临海电厂结构物表面灰尘组成及分布特征, 对了解影响电厂钢结构腐蚀程度与机理有重要意义。

利用毛刷轻轻扫集每一网格内钢结构物表面灰尘样品, 贮存于试剂袋中, 待分析。随后, 利用 0.000 1 g 精度分析电子天平从灰尘样品中称量 1.000 0 g 灰尘, 将其置于 250 mL 烧杯中, 加入 100 mL 蒸馏水, 充分搅拌, 用保鲜膜封口, 静置 24 h。

1) 灰尘中可溶出氯离子含量分析方法。分别配制 5.0、10.0、25.0、50.0、100.0、500.0 mg/L 氯离子标准溶液, 以硫酸亚汞电极为参比电极、氯离子选择电极为测试电极, 测试氯离子标准溶液的电位。以氯

离子标准溶液浓度的对数为横坐标、氯离子标准溶液的电位为纵坐标, 绘制氯离子测定标准曲线 (如图 3 所示), 经拟合得氯离子测定标准方程为:

$$E = -70.87 \lg C_{Cl^-} - 86.184, R^2 = 0.9998$$

测试灰尘浸渍水中的氯离子质量浓度 c_{Cl^-} ^[17], 得灰尘中可溶出氯离子含量为 w_{Cl^-} 。

$$w_{Cl^-} = \frac{c_{Cl^-} \times 0.1 L}{1 g}$$

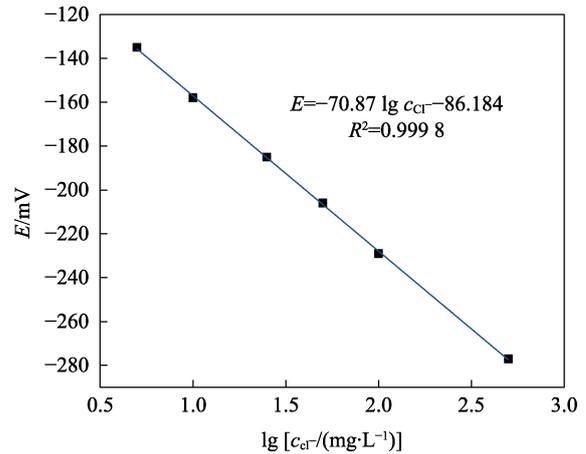


图 3 氯离子测定标准曲线

Fig.3 Standard curve for the determination of chloride ions

2) 灰尘中可溶出盐含量分析方法。利用盐度计 (希玛 AR8012 盐度计, 测量范围为 0~10 000 mg/L、测量精度为 ±3%) 分析灰尘浸渍水的盐度。灰尘中可溶出盐的质量分数为:

$$w_{salt} = \frac{S \times 0.1 kg}{1 g} \times 100\%$$

式中: S 为盐度计测得的盐度, g/kg; 0.1 kg 为灰尘浸渍水的质量; 1 g 为灰尘的质量。

3) 灰尘浸渍水酸碱性分析。利用酸度计 (雷磁 PHSJ-3F 型, 测量范围为 -2~20 pH, 测量精度为 ±0.01) 分析灰尘浸渍水的 pH 值。

2 沿海电厂钢结构腐蚀调查方法

火力发电厂作为一个大型综合能源企业, 其厂区结构复杂, 装置设备众多, 使用材料繁杂。各种装置、结构、材料的起始使用时间、维修保养时间不同, 开展直接的腐蚀调查较为困难, 也难以获得腐蚀程度分布规律。本研究中使用了大数据统计方法开展沿海电厂腐蚀情况调查。

以 2012—2022 年间某沿海电厂所有腐蚀防护工程项目、腐蚀防护器件、装备、材料购置项目为数据源, 分析腐蚀防护工程施工区域、腐蚀防护器件、装备、材料应用区域, 统计电厂不同区域腐蚀防护施工或材料应用次数, 利用不同区域腐蚀防护施工或材料应用次数多少来反映该区域的腐蚀严重程度。

3 某沿海电厂腐蚀环境因子与腐蚀程度分布规律

3.1 温、湿度

某沿海电厂厂区 2023 年 2 月 1 日温、湿度分布如图 4、5 所示。温度分布规律是从近海到远海区域逐渐降低, 在 1#炉区域温度异常高, 1#炉区域比其他区域温度高 2 °C 左右。在冬、春季节, 海水温度高于大气温度, 海水对大气加温, 因此在冬、春季节, 近海区域大气温度高于远海区域大气温度。该电厂是一个火力发电厂, 主要燃料为煤。2023 年 2 月份, 其 3#机组处于大修维保阶段, 而 1#机组处于运行工作阶段, 因此 1#炉区域明显高于其他区域。火力发电机组工作期间, 其所处区域大气温度高于邻近区域大气温度。

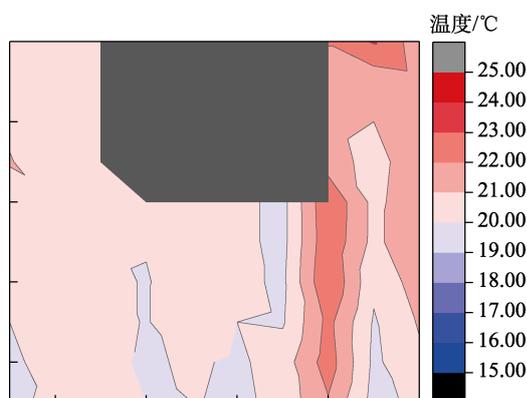


图 4 某沿海电厂厂区温度分布

Fig.4 Temperature distribution of a coastal power plant

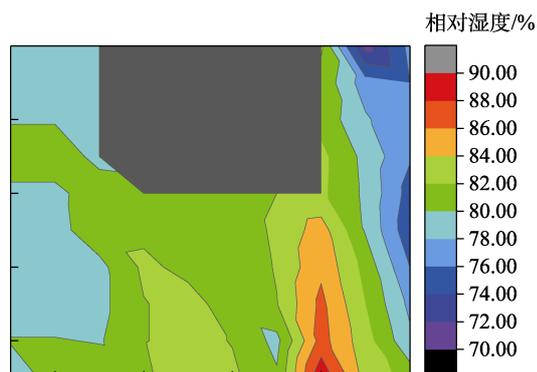


图 5 某沿海电厂厂区相对湿度分布

Fig.5 Relative humidity distribution of a coastal power plant

大气相对湿度分布规律是从近海到远海区域逐渐升高, 在 1#、2#炉区域, 其相对湿度明显高于其他区域, 甚至比临海码头区域的相对湿度高 15%。在冬、春季节且处于降温天气下, 从近海到远海区域, 湿度逐渐升高; 在冬、春季且处于升温天气下, 近海区域的大气相对湿度高于远海区域; 在夏、秋季节, 从近海到远海区域, 相对湿度逐渐降低。2023 年 2

月份, 其 3#机组处于大修维保阶段, 而 1#机组处于运行工作阶段, 热力发电机组在工作期间会排放大量水蒸气, 因此 1#、2#炉区域的相对湿度明显高于其他区域。

电厂钢结构腐蚀机理为电化学腐蚀, 电化学腐蚀过程是化学反应过程。因此, 温度会影响腐蚀速度, 温度每升高 10 °C, 化学反应速度增加 1 倍。电化学腐蚀机理中导电电解质是腐蚀原电池的必要条件, 相对湿度高于临界湿度(大约 70%)时, 在金属表面才会形成液膜, 满足腐蚀原电池的连续电解质条件^[18]。温度与湿度之间会相互影响, 相互促进^[19]。根据温、湿分布规律图可知, 在热力发电机组区域温度高、湿度高, 两条件皆促进或加速了钢铁材料腐蚀。

3.2 结构物表面灰尘浸渍水组成成分

3.2.1 可溶性氯离子

在大气环境中, 常用的碳钢很容易受到氯离子的侵蚀而发生点蚀^[20-21]。氯离子是影响钢铁、铝合金等金属材料腐蚀的重要因素。灰尘中可溶性氯离子在经雨水或大气冷凝水的浸渍下会溶出, 与水一起作用金属表面, 对金属钝化膜有很强的破坏作用^[4,22]。

临海电厂结构物表面灰尘中可溶性氯离子含量分布如图 6 所示。可以看出, 结构物表面灰尘中可溶性氯离子含量从近海区域到远海区域逐渐降低, 且近海区域灰尘中的可溶性氯离子含量是远海区域的 5~10 倍^[23]。海水冷却循环水泵区域灰尘中, 可溶性氯离子含量最高, 达到 5 mg/g, 是因为该部分区域缺少了码头房屋、装置对海风的阻滞。1#炉区域灰尘中, 相对邻近区域, 可溶性氯离子含量明显偏高, 高而密集的装备设施对来自于海洋的盐产生了较为明显的阻滞, 使该区域灰尘中可溶性氯盐含量偏高。受到 1#炉区域对海源盐的阻滞, 2#~4#炉区域灰尘中的可溶性氯盐含量明显下降。

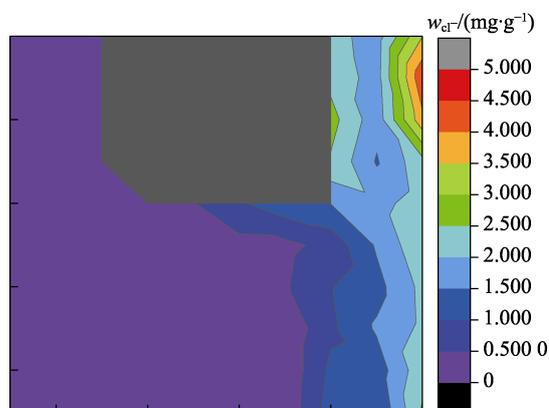


图 6 某沿海电厂结构物表面灰尘中可溶性氯离子含量分布

Fig.6 Distribution of soluble chloride ions in the surface dust of the structures of a coastal power plant structure

3.2.2 可溶性盐

钢铁材料在海洋大气中的腐蚀主要为电化学腐蚀, 并且是一个短路原电池, 电解质溶液作为离子导体, 其电阻会影响腐蚀电化学反应的速率。因此, 结构物表面灰尘可溶性盐会影响金属表面液膜的导电性, 从而影响金属的腐蚀。临海电厂结构物表面灰尘中可溶性盐的含量分布如图 7 所示。灰尘中可溶性盐含量较高的有 3 个区域, 分别为近海区域、炉区和中水处理区域。近海区域结构物表面灰尘中的可溶性盐主要来源于海洋, 因此呈现随距海距离增加灰尘中可溶性盐含量逐渐降低的变化规律。炉区灰尘中可溶性盐含量的最高点出现在脱硫污泥处理池区域, 以此为中, 向外逐渐降低。脱硫污泥处理中利用大量的碱, 在处理过程中转化为盐。脱硫污泥处理池附近有多个排灰口, 煤炭燃烧后的炉灰中含有可溶性盐, 随灰尘扩散后, 降落于附近区域。

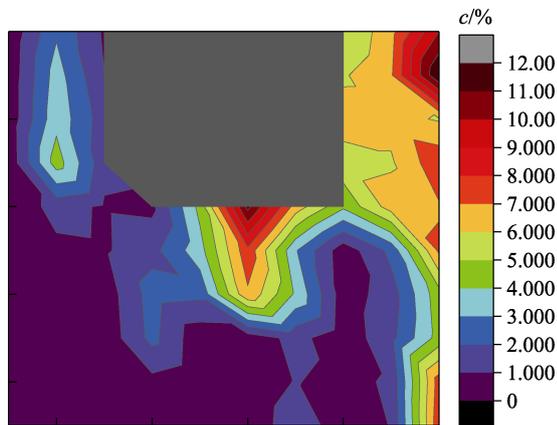


图 7 某沿海电厂结构物表面灰尘可溶性盐含量分布
Fig.7 Distribution of the soluble salts in the surface dust of a coastal power plant structure

3.2.3 浸渍水 pH

结构物表面液膜的 pH 值不但可以直接影响结构金属的腐蚀, 还会影响涂层材料的稳定性。如常用的聚氨酯涂层材料, 其降解分为水降解、热降解、热氧降解、紫外光降解、微生物降解、溶剂降解等^[24]。其中, 水降解中的降解产物皆有酸, 如式 (1)、(2) 所示, 碱性溶液环境将促进聚氨酯涂层材料的降解。

酯基的水解反应:



氨基甲酸酯的水解反应:



环氧树脂可在酸、碱催化下发生水解。

临海电厂结构物表面灰尘浸渍水 pH 值分布如图 8 所示。在近海区域, 随距海距离增加, 浸渍水 pH 值逐渐降低。这表明近海区域结构物表面灰尘主要受海源物资影响或受到海水飞溅颗粒影响, 海水 pH 值在 8 左右, 造成浸渍水 pH 值高于 7 小于 8。灰尘浸渍水 pH 值最高点在脱硫污泥处理池区域, 达到 8。

脱硫污泥处理中利用了大量的碱, 影响了灰尘浸渍水的 pH 值。中水处理中心出现灰尘浸渍水 pH 值最低点, 达到 6.6。

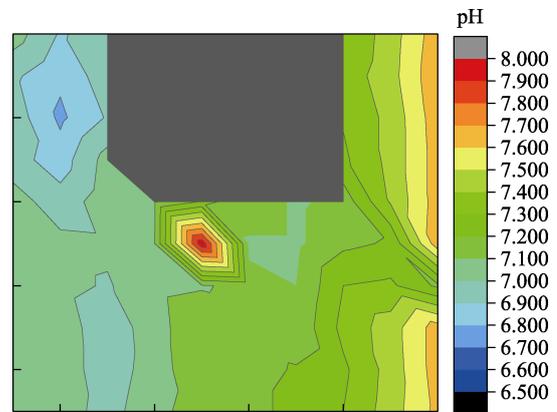


图 8 某沿海电厂结构物表面灰尘浸渍水 pH 值分布图
Fig.8 pH distribution of dust-soaking liquid on the surface of a coastal power plant structure

3.2.4 某沿海电厂防腐蚀工程次数分布规律

根据某沿海电厂从 2012 年至 2022 年 10 年间所有腐蚀防护工程项目、腐蚀防护器件、装备、材料购置项目的施工或应用区域, 统计电厂每一网格内防腐工程次数。某沿海电厂防腐工程次数分布如图 9 所示。可以看出, 10 年内高防腐工程次数主要分布于 3 个区域, 分别为炉区、海水冷却采水泵区和中水处理区域。在炉区, 防腐工程次数为 6~12 次, 即炉区核心区域每年都有平均 1 次以上防腐工程; 循环水采水泵区, 平均每 2 年有 1 次防腐工程; 中水处理区域, 平均每 3~5 年有 1 次防腐工程。炉区防腐工程次数最高点出现在 3#与 4#燃烧炉区, 以燃烧炉区为核心, 向外防腐工程次数逐渐降低。厂区其他区域防腐工程次数很少, 这与电厂结构、装备分布区域相关, 以上 3 个区域是结构、装备密集区域, 其他区域是绿化场地、道路、或简易厂房, 结构、装备少, 因此防腐工程少。

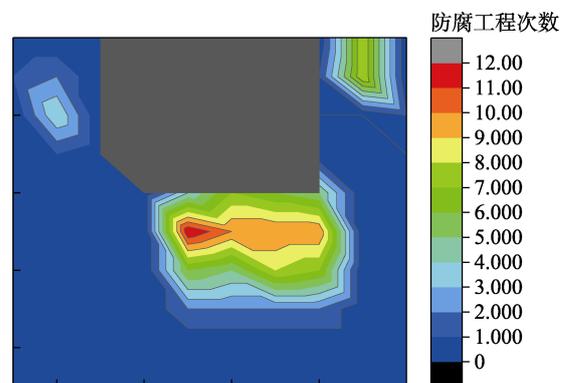


图 9 某沿海电厂防腐工程次数分布
Fig.9 Distribution of the number of corrosion protection works in a coastal power plant

4 某沿海电厂腐蚀影响因素分析

经腐蚀环境因子分布图和防腐工程次数分布图对比可以发现,防腐工程次数分布区域与结构表面灰尘中的含盐量、灰尘浸渍水 pH 值的分布区域高度一致,与灰尘中的可溶性氯离子含量分布和相对湿度分布区域部分重合,而与温度分布区域的一致性较低。这种相关性结果受到环境因素调研方法的影响,温、湿度是利用便携式温湿度计,在2月份的一天对厂区温湿度的测量。因此,测量值具有较高的时效特征,与长期、平均值分布相差较大,受短期天气影响较大。结构物表面灰尘是经过较长时间的沉积,是较长一段时间的累积结果。综合以上对比分析,对钢铁结构腐蚀的影响大小顺序为,结构物灰尘含盐量>结构物灰尘浸渍水 pH>相对湿度>结构物灰尘氯离子含量>温度。

5 某沿海电厂钢铁材料腐蚀机理分析

沿海电厂使用的金属材料有碳钢、不锈钢、铝合

金、镀锌钢、钛合金等,其中碳钢占比最大^[25]。对使用碳钢的设备、设施,皆采用了涂层保护的方式进行防腐蚀防护^[26]。涂层作为隔离层,阻止水、氧等接触碳钢,从而抑制碳钢的腐蚀^[27]。从涂层材料本身和涂层施工等多角度,涂层材料难以达到完全阻隔:1)涂层材料本身有一定的空隙率;2)涂层涂制过程中存在气孔缺陷;3)带涂层结构件安装应用阶段的碰撞、摩擦造成缺陷。钢铁表面涂层存在缺陷是一种常态。

钢铁表面含缺陷涂层情况下的腐蚀机理如图10所示。电厂钢铁结构物表面沉积一定量的灰尘,雨水或大气凝结水溶出灰尘中的可溶性盐,经涂层缺陷输运到金属表面,与金属接触,成为钢铁腐蚀原电池的电解质溶液,闭合钢铁腐蚀原电池的离子通路,发生电化学腐蚀。雨水或大气凝结水溶解的盐降低了电解质溶液的电阻,加大了电化学腐蚀速率;雨水或大气凝结水溶解的氯离子促使钢铁钝化膜的破坏,加大电化学腐蚀速率。钢铁电化学腐蚀形成的腐蚀产物使涂层材料鼓泡、开裂、剥离,形成分布更广的涂层缺陷,引起大范围的钢铁腐蚀。

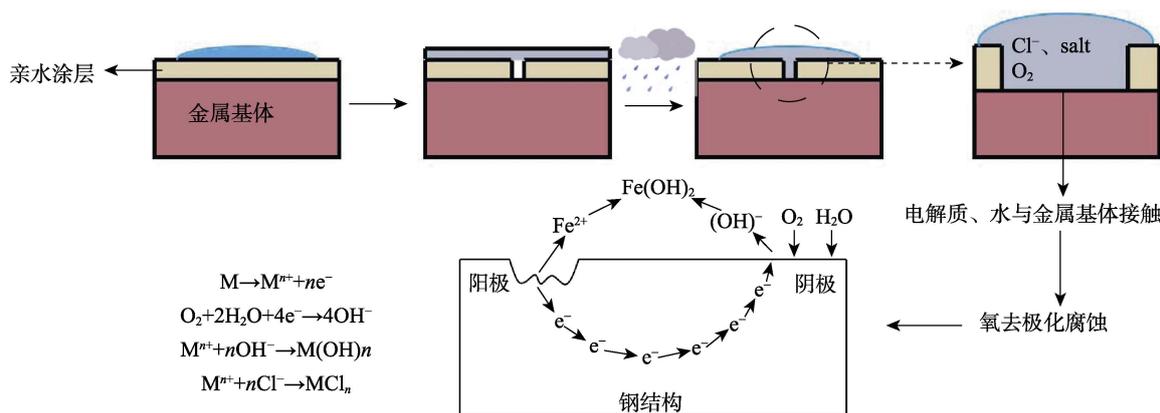


图10 钢铁表面含缺陷涂层情况下的腐蚀机理

Fig.10 Corrosion mechanism of a steel surface with defective coatings

6 结论

1)影响钢结构腐蚀的温度、湿度及结构物表面灰尘中氯离子含量、可溶盐含量、浸渍水 pH 等因子受海洋环境、厂区结构分布、生产活动多重原因的影响,随距海距离增加呈带状分布。温、湿度在1#机组东侧明显偏高,结构物表面灰尘可溶盐含量和浸渍水 pH 在2#、3#机组区域及碱回收池区域明显偏高,结构物表面灰尘氯离子含量在海水冷却加药池区域明显偏高。

2)环境因子对钢铁结构腐蚀的影响大小顺序为,结构物灰尘含盐量>结构物灰尘浸渍水 pH>相对湿度>结构物灰尘氯离子含量>温度。

3)电厂钢结构腐蚀机理为,液态水溶出灰尘中的可溶性盐经涂层缺陷输送至金属表面,加剧金属电化学腐蚀,金属腐蚀加剧涂层劣化,恶性循环导致大

范围的钢铁腐蚀。

参考文献:

- [1] 李子运, 邓培昌, 胡杰珍, 等. 热带海洋大气环境冷轧钢板锈蚀规律[J]. 钢铁, 2019, 54(9): 99-105.
LI Z Y, DENG P C, HU J Z, et al. Corrosion Law of Cold Rolled Steel Plate in Tropical Ocean Atmospheric Environment[J]. Iron & Steel, 2019, 54(9): 99-105.
- [2] 车瑶, 王谦, 刘若溪, 等. 凝露条件下热镀锌钢在二氧化硫气体中的腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(17): 1175-1179.
CHE Y, WANG Q, LIU R X, et al. Corrosion Behavior of Hot-Dip Galvanized Steel Exposed to Sulfur Dioxide with Moisture Condensation[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(17): 1175-1179.
- [3] LI X H, CAO G W, GUO M X, et al. Influence of Cl⁻ and

- SO₂ on Carbon Steel Q235, Pipeline Steel L415 and Pressure Vessel Steel 16MnNi Corrosion Behavior in Industrial and Marine Atmosphere Environment[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021, 16(12): 21126.
- [4] 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.
- [5] 顾晨, 赵瑜. 中国燃煤电厂大气污染物排放研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4352-4361.
GU C, ZHAO Y. Research Progress of Air Pollutant Emissions of Chinese Coal-Fired Power Plants[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4352-4361.
- [6] 曹公望, 王振尧, 刘雨薇, 等. 碳钢在三种大气环境中的应力腐蚀[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(4): 6-10.
CAO G W, WANG Z Y, LIU Y W, et al. Stress Corrosion of Carbon Steel in Three Different Atmospheric Environments[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2015, 12(4): 6-10.
- [7] 赵书彦, 童鑫红, 刘福春, 等. 沿海电厂露天钢架结构涂层大气腐蚀失效分析[J]. *全面腐蚀控制*, 2019, 33(10): 98-104.
ZHAO S Y, TONG X H, LIU F C, et al. Failure Analysis of Atmospheric Corrosion of Outside Steel Coatings in Coastal Power Plants[J]. *Total Corrosion Control*, 2019, 33(10): 98-104.
- [8] 郭铁明, 张延文, 秦俊山, 等. 桥梁钢 Q345q 在 3 种模拟大气环境中的腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2019, 39(4): 319-330.
GUO T M, ZHANG Y W, QIN J S, et al. Corrosion Behavior of Q345q Bridge Steel in Three Simulated Atmospheres[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2019, 39(4): 319-330.
- [9] 白玉峰, 赵忠贤, 孙伟鹏, 等. 沿海电厂钢结构防腐蚀技术现状及发展趋势[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(4): 293-298.
BAI Y F, ZHAO Z X, SUN W P, et al. Current Status and Development Trend of Anti-Corrosion Technology for Steel Structures in Coastal Power Plants[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(4): 293-298.
- [10] 梁利花. 微液滴现象在大气腐蚀过程中的作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
LIANG L H. The Role of Micro-Droplets Phenomenon in Atmospheric Corrosion Process[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [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 Z Y, GE F, WANG X. 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] 容宇媚, 张际标, 陈春亮, 等. 热带滨海景观设施的腐蚀特征及其影响因素简析[J]. *装备环境工程*, 2021, 18(7): 62-69.
RONG Y M, ZHANG J B, CHEN C L, et al. Corrosion Characteristics of Tropical Coastal Structures and Analyses of Their Influencing Factors[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(7): 62-69.
- [13] 江旭, 柳伟, 路民旭. 钢铁海洋大气腐蚀试验方法的研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2007, 19(4): 282-286.
JIANG X, LIU W, LU M X. Review of Research on Experimental Methods for Marine Atmosphere Corrosion of Steel[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2007, 19(4): 282-286.
- [14] 葛秋辰, 汪兵, 刘清友, 等. 高湿热海洋大气环境下温度和湿度对 Q345 钢耐蚀性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(8): 49-53.
GE Q C, WANG B, LIU Q Y, et al. Effects of Temperature and Humidity on Corrosion Resistance of Q345 Steel under High Temperature and Humidity Marine Atmosphere[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(8): 49-53.
- [15] 杜钢, 李光茂, 朱晨, 等. 不同环境条件下可溶性沉积盐对金属大气腐蚀的影响[J]. *环境技术*, 2021, 39(5): 94-100.
DU G, LI G M, ZHU C, et al. The Impact of Environmental Factors on the Atmospheric Corrosion of the Metal Material Covered with Salt[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(5): 94-100.
- [16] 蔡勤, 王磊. 海洋工业大气环境下应力腐蚀开裂机理分析[J]. *全面腐蚀控制*, 2013, 27(6): 9-12.
CAI Q, WANG L. Analyse on the Mechanism of Stress Corrosion Cracking in Marine and Industrial Atmospheric Environment[J]. *Total Corrosion Control*, 2013, 27(6): 9-12.
- [17] 胡杰珍, 刘泉兵, 胡欢欢, 等. 热带海岛大气中氯离子沉降速率[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(6): 463-466.
HU J Z, LIU Q B, HU H H, et al. Cl⁻ Sedimentation Rate in Atmosphere of Tropical Island[J]. *Corrosion & Protection*, 2018, 39(6): 463-466.
- [18] 苏雷. 选煤厂的钢结构腐蚀因素分析及预防措施[J]. *环境技术*, 2023, 41(2): 128-132.
SU L. Analysis of Corrosion Factors of Steel Structure in Coal Preparation Plant and Preventive Measures[J]. *Environmental Technology*, 2023, 41(2): 128-132.
- [19] YAMASHITA M, KONISHI H, KOZAKURA T, et al. In Situ Observation of Initial Rust Formation Process on Carbon Steel under Na₂SO₄ and NaCl Solution Films with Wet/Dry Cycles Using Synchrotron Radiation X-Rays[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(10): 2492-2498.
- [20] WAN Y, TAN J, ZHU S T, et al. Insight into Atmospheric Pitting Corrosion of Carbon Steel via a Dual-Beam FIB/SEM System Associated with High-Resolution TEM[J]. *Corrosion Science*, 2019, 152: 226-233.
- [21] 万晔, 宋芳龄, 李立军. 基于海洋大气环境因素影响下的碳钢腐蚀特征研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022,

- 42(5): 851-855.
WAN Y, SONG F L, LI L J. Corrosion Characteristics of Carbon Steel in Simulated Marine Atmospheres[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(5): 851-855.
- [22] 黄涛. 耐候钢在南海海洋大气环境下的腐蚀行为研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2018.
HUANG T. Research on Corrosion Behavior of Weathering Steel in Marine Atmosphere of the South China Sea[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2018.
- [23] CORVO F, HACES C, BETANCOURT N, et al. Atmospheric Corrosivity in the Caribbean Area[J]. Corrosion Science, 1997, 39(5): 823-833.
- [24] 刘凉冰. 聚氨酯的化学降解[J]. 弹性体, 2003, 13(1): 53-56.
LIU L B. The Chemical Degradation of Polyurethane[J]. China Elastomers, 2003, 13(1): 53-56.
- [25] 夏晓健, 蔡建宾, 林德源, 等. 沿海变电站设备腐蚀状况及其腐蚀机理与防护[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(5): 697-704.
XIA X J, CAI J B, LIN D Y, et al. Corrosion Status, Corrosion Mechanisms and Anti-Corrosion Measures in Coastal Substations[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(5): 697-704.
- [26] 柯伟, 董俊华. Mn-Cu 钢大气腐蚀锈层演化规律及其耐候性的研究[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1365-1378.
KE W, DONG J H. Study on the Rusting Evolution and the Performance of Resisting to Atmospheric Corrosion for Mn-Cu Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1365-1378.
- [27] 张显程, 巩建鸣, 涂善东, 等. 涂层缺陷对涂层失效与基体腐蚀行为的影响研究[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(6): 922-926.
ZHANG X C, GONG J M, TU S D, et al. Study on the Effect of Coating Defects on the Coating Failure and Corrosion Behavior of Substrate[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21(6): 922-926.