

大气盐雾分布影响因素与监(检)测及评价方法

向正林¹, 向利², 陈川²

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司, 广州 510630;

2. 中国电器科学研究院股份有限公司, 广州 510663)

摘要: 阐述了大气盐雾的主要来源、影响盐雾含量和分布的主要因素、当前盐雾的主要监测技术以及与盐雾含量相对应的环境等级, 有助于对沿海地区金属设备防腐蚀设计提供参数依据。其中大气盐雾的来源主要为海洋环境, 而影响盐雾含量和分布的因素主要为离海岸距离、风速、风向等, 当前盐雾含量的主要监测技术包括大气盐雾收集和盐雾含量检测两个步骤, 盐雾的收集方式是大气盐雾含量精准度的重要指标, 根据其结果表征方式(盐雾浓度和盐雾沉降率)主要分为采气收集和沉降收集。再利用检测手段分析盐雾含量, 根据对设备腐蚀情况进行分等分级, 但是现有方法具有一定的缺陷, 如人为误差大, 且无法实时监测环境中的盐雾变化情况, 因此, 在线检测技术是未来盐雾含量监测的主要研究方向。精准地检测环境中的盐雾含量, 可为后期的腐蚀防护提出高效且经济的建议。

关键词: 大气盐雾; 盐雾沉降量; 在线监测; 盐雾影响因素; 环境等级分级

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.04.004

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)04-0020-07

Influencing Factors of Atmospheric Salt Fog Distribution and Monitoring (Inspection) and Evaluation Methods

XIANG Zheng-lin¹, XIANG Li², CHEN Chuan²

(1. China Southern Power Grid Power Generation Co., Ltd, Guangzhou 510630, China;

2. China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: The work aims to clarify the main sources of atmospheric salt fog, the primary factors affecting the content and distribution of salt fog, the current monitoring technology, and the environmental grades corresponding to the content of salt fog, so as to provide parameter basis for the anti-corrosion design of metal equipment in coastal area. Atmospheric salt fog was prevalently derived from the marine environment, and the factors affecting the content and distribution of salt fog were mainly the distance from shore, wind speed, wind direction, etc. The primary monitoring techniques of salt fog content were collection and testing. The collection method was one of the important indicators for accuracy. According to the characterization of results (salt fog concentration and salt fog sedimentation rate), it was mainly divided into gas collection and sedimentation collection. The content of salt fog was analyzed by test methods, and then the degree of equipment corrosion was classified. However, those methods have some shortcomings, such as poor data accuracy for human error, and can not get a real-time monitoring, so online

收稿日期: 2019-10-02; 修订日期: 2019-11-08

Received: 2019-10-02; Revised: 2019-11-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903700)

Fund: National Key Research and Development Projects(2017YFB0903700)

作者简介: 向正林(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水电站建设和运营管理。

Biography: XIANG Zheng-lin (1983—), Male, Master, Engineer, Research focus: construction and operation management of hydropower stations.

detection technology is the main research direction in the future for detection of salt fog content and can accurately the salt fog content in the environment and provide some high efficient and economic advices for the late anti-corrosion.

KEY WORDS: atmospheric salt fog; salt fog deposition; online monitoring; salt fog content influencing factors; environmental classification

金属设备在含有盐雾的环境中使用，腐蚀较为严重，造成性能下降，寿命缩短，甚至威胁直接或间接使用者的财产以及生命安全。盐雾主要成分为氯化钠，在相对湿度大于 70% 的潮湿环境中，NaCl 溶解在金属表面附着的微液滴中，增大溶液的导电性，加快腐蚀速率。另外氯化钠的存在易使不锈钢发生点蚀，导致管线穿孔泄露，对设备的安全运行危害极大^[1]。如盐雾对海上风电的影响，盐雾含量较高时，不仅腐蚀风电机组的基础结构，还会腐蚀紧固件等强度要求较高部件，使它们的强度降低。此外，生成的腐蚀产物使电气部件接触不良，设备运转一段时间后，出现可靠性下降等问题。如发电机出现绝缘下降，造成发电机输出电压升高，烧坏更多电气设备，引起风电机组停机，严重的腐蚀可能造成风电机组倒塌等安全事故^[2-5]。盐雾对电子器件以及输电线路危害也很严重，据相关报道表示，因盐雾造成漏电、触电，导致人生安全事故屡次发生^[6-8]。

因此，对大气中盐雾含量与金属腐蚀的相关研究一直是热点。基于这些研究，文中将从大气盐雾影响因素、主要监（检）测方法以及盐雾含量对腐蚀环境的影响等方面进行简单描述，通过对盐雾含量的监测，能在一定程度上预测腐蚀发生的趋向、材料使用寿命以及寻找合理的防护措施。

1 盐雾来源以及影响盐雾分布的主要因素

大气中的盐雾是指由含盐微小液滴所构成的弥散系统。大多数人认为，大气中盐雾主要来源于海洋，约占 90%，其余部分如含盐尘土、植物燃烧等。由于盐雾容易随风等外界因素四处迁移，环境中盐雾含量是多变的，且分布范围较广，即便同一地区，大气中盐雾含量也存在较大差异^[9]。影响盐雾含量的因素较多，目前大致可分为本质因素和外界因素两点。

本质因素，如海水含盐量、地理位置、盐雾颗粒大小、离海岸距离等，这些因素变化较为单一，遵循一定的规律，测量较为容易^[10]。研究表明，大气盐雾含量与海水含盐量正相关，即海水中盐浓度越高，大气中盐雾浓度相对较高，反之亦然^[11]。盐雾含量还与盐雾颗粒大小有关。Gustafsson 等人^[12]研究了瑞典西南部沿海地区海洋气溶胶干沉降模型，结果发现，沉积的盐雾中包括大液滴和微小液滴，其中大颗粒沉降较为迅速，小颗粒的易被海风带到陆地。另外

离岸距离也是氯离子含量的重要影响因素，盐雾沉降量与距海距离呈反比。离海越近，盐雾含量越高；离海越远，盐雾沉降量越小。这主要是因为，在传送过程中，盐雾一直在沉降，所以离海岸越远，含量相对越低^[11,13-14]。

外界因素如气候环境，具体为风向、风速、晴雨、温度、湿度等，这些因素变化复杂。比如风向，由于风向无定向，造成不同区域盐雾含量差异较大。研究发现，盐雾含量与风速正相关，随风速（风力）增大，沿海和内陆含盐量迅速增大^[13-14]。Gustafsson 等人^[12,15]研究发现，大气中的盐雾大多是垂直分布，其依赖于风向和风速。宋金明等人^[16]研究了青岛雾水中的氯离子及其分布规律，结果表明，大气中氯离子浓度与风速呈正比关系，氯离子迁移量与风的动能呈正比。氯离子沉降量与风向关系紧密，当风吹向岸边时，氯离子含量增加，风吹向海面时，氯离子浓度降低^[17-18]。氯离子沉降速率还受海水飞溅和风速的共同影响，与大气温度和相对湿度的相关性较差，随大气温度和相对湿度的升高而增大。大气中氯离子含量随季节的波动很大，主要是由于高温、高湿有利于氯离子的扩散作用^[19-20]。唐其环^[21-22]对以前测试数据中的氯离子浓度进行了灰色聚类分析，万宁大气中氯离子浓度冬天高，夏天低，青岛则是春秋较高，冬夏较低。盐雾含量还与气温相关，主要是由于温度高，海水蒸发快，产生的盐雾量多^[14]。此外，盐雾含量还与天气有关，有雾时氯离子含量高，有雨天气由于湿度大，空气中氯离子含量也比较高^[23-24]。由于影响盐雾含量因素较多，因此各个地区盐雾含量差异较大，只有精确掌握各个地区盐雾含量，才能更好地为金属防腐提供好的数据依据。

2 主要的盐雾监（检）测方法

大气盐雾含量监（检）测主要包括两个步骤，大气盐雾的收集以及盐雾含量检测。

2.1 盐雾主要收集方式

就收集方式而言，可根据盐雾含量表征方式（盐雾浓度和盐雾沉降率）分为采气收集法和沉降收集法。

采气收集法一般是定体积收集空气。采气收集法如图 1 所示^[25]，利用采气收集法收集的盐雾结果用盐雾浓度表达，用 S_c 表达：

$$S_c = (C_1 - C_0) \cdot V / Q \cdot t \quad (1)$$

式(1)中: S_c 为盐雾浓度, mg/m^3 ; C_1 为采气后吸收液的氯离子浓度, mg/L ; C_0 为空白吸收液的氯离子浓度, mg/L ; V 为样液定容体积, L ; Q 为大气采样器采样流速, L/min ; t 为采样时间, min 。

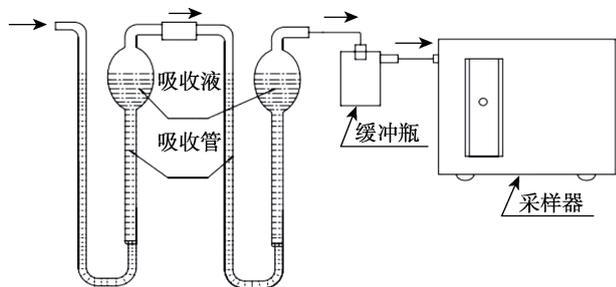


图1 采气收集装置
Fig.1 Gas collection device

因该方法获得的数据较为直观, 应用较多^[23,26]。如戚苓等人^[27]利用大气采样器收集南京大学楼顶大气, 发现早晚高, 中午低, 可能是由于中午温度高, 有利于污染物扩散。考虑到采样易受风速、风向等因素的影响, 修光利等人^[28]利用分级采样仪和大流量采样器采集上海市某大学楼顶大气, 研究大气中环境污染物氯离子浓度。这种方法采样迅速, 采样量大, 便于分时段测试, 测试数据更为精准。此外还有便携式大气采样器, 适合各种环境测试, 携带方便, 操作简单^[29]。为了使采样更为精准, 大量研究者开始对大气采样器进行改进。如在流量口处加设大气参数转换器, 消除温度、气压等环境因素^[30]。加装防止倒吸装置, 可以防止采样倒吸现象, 使得采样结果更精准^[31]。目前大气采样器还在进一步优化中, 为大气盐雾含量精准测试做出贡献。

我国国家标准发布的大气中盐雾收集方法——干片法和湿烛法属于沉降收集法^[32], 是目前常用的大气盐雾含量检测方法。

干片法和湿烛法应用比较广泛, 干片法如图2所示。利用干纱布收集的盐雾结果以氯离子的沉积率表达, 用 $S_{d,p}$ 表示:

$$S_{d,p} = (m_1 - m_0) / A \cdot t \quad (2)$$

式(2)中: m_1 为投放一定时间后纱布上沉积的氯离子质量, mg ; m_0 为空白干纱布中含有的氯离子质量, mg ; A 为暴露纱布面积, m^2 ; t 为暴露时间, d 。

湿烛法如图3所示。结果以氯离子沉积率表达, 用 $S_{d,c}$ 表示:

$$S_{d,c} = (m_1 - m_0) / A \cdot t \quad (3)$$

式(3)中: m_1 为投放一定时间后湿烛中收集的氯离子的质量, mg ; m_0 为空白湿烛中含有的氯离子质量, mg ; A 为暴露纱布面积, m^2 ; t 为暴露时间, d 。

胡杰珍等人^[19]利用湿烛法采集大气中的氯离子, 用离子选择电极法分析采集液中的氯离子含量, 获得

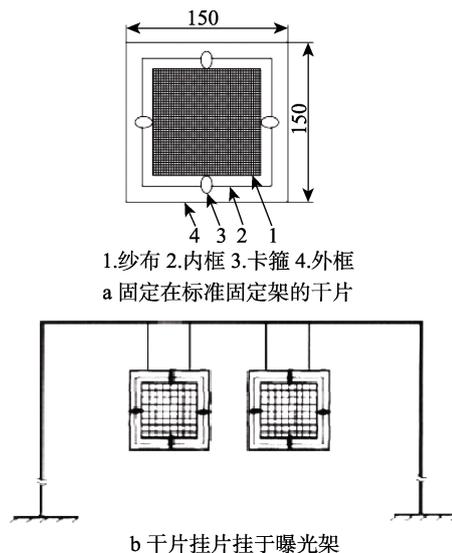


图2 干片法示意

Fig.2 Diagram of dry plate: a) dry plate fixed in standard fixed frame; b) dry plate hanging on exposure frame

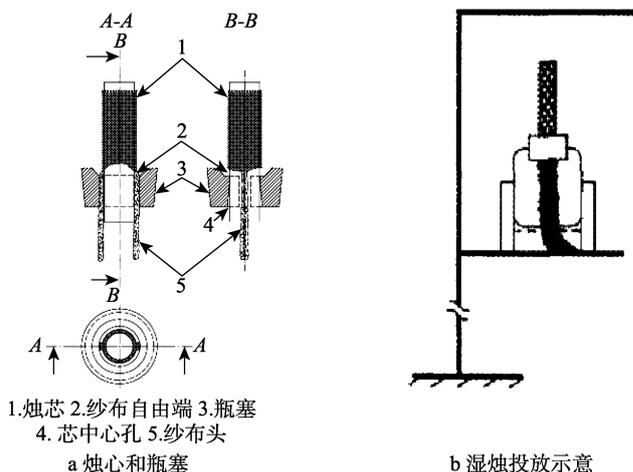


图3 湿烛法示意

Fig.3 Diagram of wet candle method: a) candle wick and cork; b) diagram of putting wet candle

热带海岛大气中氯离子沉降速率。结果表明, 热带海岛大气中氯离子的沉降速率较大。为了使沉积数据更为精准, 杨建炜^[33]发明了一种大气中氯离子沉积率的检测装置, 利用纱布收集大气中的盐粒子, 再利用硝酸银滴定法测得氯离子浓度, 从而换算出大气中氯离子沉积率。该方法使得氯离子收集更为精准, 测试数据更为准确。李鑫^[34]研究出了适合海上风力发电机组用氯离子沉降率测试系统及海上风力发电机组, 能为现有海上风力发电机组的防腐改善工作提供参考数据, 也能够为后续新机型防腐等级的制定提供参考数据, 提高风力发电机组的防腐能力及可靠性。有人研究了湿烛法与干片法的优缺点, 研究表明: 湿烛法投样无方向性, 其纱布长期保持湿润, 纱布不透风; 干片法投样有方向性, 其纱布湿润度与空气湿度有关, 纱布透风, 相比之下, 纱布干片法更容易饱和^[35]。利

用两种方法分别测试了万宁试验站海洋平台、近海试验场、内试验场和不同离海距离屋顶的氯离子沉降速率，对比研究了湿润、透风、采样的方向性、氯离子污染程度对两种采样方法监测结果的影响。结果表明，湿烛法监测的氯离子沉降速率高于干片法^[36-38]，但湿烛法同样存在缺陷，烛心影响纱布透气性，使得数据也存在误差。张孔林等人^[39]对湿烛法装置进行了改进，采用多孔烛心，使其纱布透气，测试结果更为精准。

2.2 盐雾含量主要监（检）测方法

大气盐雾主要成分为氯盐，因此检测一般检测氯离子。常用的氯离子检测方法较多，如氯离子选择性电极法、硝酸银滴定法、摩尔法、电位滴定法、汞盐滴定法、分光光度计法、离子色谱法、目视比浊法等^[40]。除了这些大气氯离子检测方法外，还有一些正在开发的方法。如查娜^[41]利用以波导魔 T 为核心装置对盐雾沉积率进行测试，主要根据微波相位法测极性分子浓度的基本原理，采用卡尔曼滤波算法对测得的浓度参数进行拟合，通过贝塞尔拟合算法对测得的浓度参数进行拟合，时域积分后即可得到盐雾沉积率。该方法较为复杂、设备成本较高，且还在试验阶段。南方电网与中国电器院共同研究了一种加速腐蚀装置，通过对大气氯离子富集，使富集的氯离子对高纯银进行腐蚀，同时外部施加电源，形成牺牲阳极加速腐蚀过程，腐蚀结束后，利用电化学还原法表征腐蚀产物膜厚，再进一步转化为氯离子含量。这种方法测试周期短，数据可重复性高，但易受其他污染物影响，当其他外界可溶性腐蚀物较多时，误差较大。目前该方法还在修正中，离实际应用还有一段距离^[42]。

以上这些方法都存在一些缺陷，如大气采样法，采样时间短，但采样易受风速、风向等因素影响。干片法、湿烛法通常需要 1 个月，然后送至实验室称量、溶解、提取，再利用其他方法，测出氯离子含量。这些方法采样误差大，样品存储易损失，费时费力，而新型方法成本较高，操作复杂，或受外界干扰影响较大，且这些方法均不能很好地反映大气盐粒子实时变化的特点。因此，在线检测技术越来越受到重视。

美国 URG 公司研制出在线检测盐粒子设备，通过大气中气溶胶及气体组分在线离子色谱监测系统，可实时在线监测大气气溶胶（颗粒物）浓度，主要流程如图 4 所示。大气采样器将大气中的盐雾气流收集，经过一系列处理后送入离子色谱系统中，测试氯离子色谱峰面积，再结合氯离子色谱峰面积与氯离子浓度标准曲线，就可得出氯离子含量，即检测出大气中盐雾含量。饶仲群^[43]研究了离子色谱仪在线监测氯离子在核电厂的应用情况，该设备具有高精确性及在线监测仪器的连续自动化可操作性，操作简单，测试

周期耗时短，具有较高的先进性，但是设备较为昂贵，维护成本高，不利于大规模应用。曾健华^[44]研究了一种离子色谱结合采用流动注射法的氯离子在线检测仪，该仪器测试时间短，使用试剂量少，但操作较为复杂，需提前预判氯离子浓度范围，高浓度与低浓度采用方法不同，容易造成误差等。科思特开发出 CST1604 盐雾浓度监测仪，通过监测阻抗变化来监测空气中的盐雾含量和沉降速率。该方法具有高灵敏度的特点，大气中氯离子含量轻微变化，即可在数据上表现出来。该方法同样存在缺陷，因为大气中可溶性腐蚀物较多，对阻抗数据影响较大，很难分离干扰，容易造成误差。随后，中国电器研究院研制出了一种结合分光光度计的在线监测盐雾含量的技术，可持续监测环境中氯离子的变化情况，采样周期短，操作简单，但目前还在调试阶段^[45]。盐雾含量在线监测技术是未来盐雾粒子含量检测的主要研究方向，有望大规模应用于生活生产中，为设备安全保障提供重要数据依据。

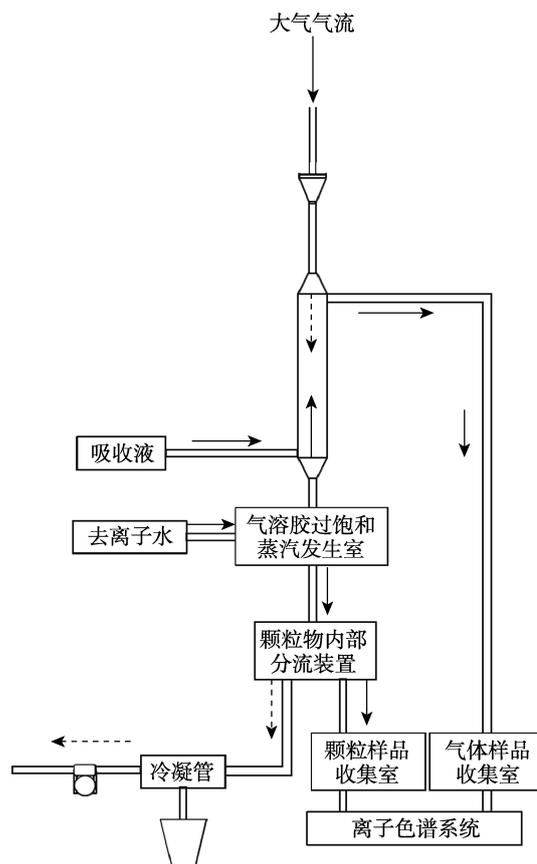


图 4 大气气溶胶及气体组分在线离子色谱监测系统
Fig.4 Aerosol and gas components of online ion chromatography monitoring system

3 盐雾含量等级分级

盐雾是环境中的重要污染物，相关研究对其含量给出了分级。盐雾沉降率 S_d 在 ≤ 3 、 $3 \sim 60$ 、 $60 \sim 300$ 、

300~1500 mg/(m²·d)对应等级分别为 S0、S1、S2、S3^[46]。其中,大气中的盐雾含盐量是根据 ISO 9225 中规定的湿蚀法计算而来,氯离子沉积速率是通过年平均速率换算而来。因为短时间测试依赖天气影响较强,测试数据较为多变。大气盐雾含量与影响海盐内陆运输的变量密切相关,如风向、风速、局部地形、暴露地点与海面的距离等。该处环境等级为 S0—S3,当氯离子含量超过这个范围,认为其典型特征是强烈的海洋飞溅区和喷雾环境。此外,干片法与湿蚀法测试的数据存在 $S_{d,c}=2.4S_{d,p}$ 关系^[47]。

4 结语

大气盐雾主要来源于海洋环境,盐雾含量与分布影响因素较多,主要为风速、风向、离岸距离等。合理研究这些影响因素可更精准地研究大气盐雾含量。大气盐雾含量检测主要分为大气盐雾收集和盐雾含量检测两个步骤。收集方式根据盐雾含量表征方式(盐雾含量和盐雾沉降率)分为采气收集和沉降收集,检测方法较多,如氯离子选择性电极法、电位滴定法、分光光度计法、离子色谱法等。不同的收集方法配合不同的检测方法,使得大气盐雾含量检测方法多种多样。除了将样品储存,带回测试外,直接检测的在线监测技术成为目前的研究重点。在线监测技术可实时监测环境中盐雾的变化情况,是未来盐粒子含量检测的主要研究方向,但就现有技术设备,还需要进一步优化,才有望大规模生产与应用。

参考文献:

- [1] 李阳恒. 应力作用下缓蚀离子与氯离子竞争吸附对小孔腐蚀的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LI Yang-heng. The Effect of the Competition between Chloride Ions and Inhibition Ions on the Pitting Corrosion under Strain[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [2] 梁志强, 莫银锋, 李添宾. 盐雾对风力发电机组的危害及对策[J]. 电器工业, 2011(5): 4-5.
LIANG Zhi-qiang, MO Yin-feng, LI Tian-bin. The Harm of Salt Spray to Wind Turbine and Its Countermeasures[J]. China Electrical Equipment Industry, 2011(5): 4-5.
- [3] 王强, 卢果, 郑解良, 等. 高盐雾条件下板翅式空冷器的防腐研究[J]. 自动化应用, 2015(11): 34-35.
WANG Qiang, LU Guo, Zheng Jie-liang, et al. Anti-corrosion Study of Plate-fin Air Cooler under High Salt Spray Condition[J]. Automation Application, 2015(11): 34-35.
- [4] 陈健, 王洪波, 马贤好, 等. 风力发电机绝缘系统耐盐雾性能研究[J]. 绝缘材料, 2011, 44(5): 43-45.
CHEN Jian, WANG Hong-bo, MA Xian-hao, et al. Salt Spray Resistance of Wind Turbine Generator Insulation System[J]. Insulating Materials, 2011, 44(5): 43-45.
- [5] 李慧, 黄海军, 王俊, 等. 湿热沿海地区环境条件对风电机组的影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 17-21.
LI Hui, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Influence of Environment Conditions on Wind Generating Set in Hot and Humid Coastal Areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 17-21.
- [6] 刘钧泉, 夏延桑. 氯离子介质中不锈钢失效案例及安全浓度浅述[C]// 2009 穗港澳科技·产业(腐蚀防护)发展论坛论文集. 广州: 中国腐蚀防护学会, 2009.
LIU Jun-quan, XIA Yan-shen. Failure Cases and Safe Concentrations of Stainless Steel in Ionic Medium[J]. 2009 Guangzhou Hong Kong and Macao Science and Technology (Corrosion Protection) Industrial Development BBS. Guangzhou: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009.
- [7] 杜迎, 朱卫良. 盐雾对集成电路性能的影响[J]. 半导体技术, 2004, 29(5): 56-58.
DU Ying, ZHU Wei-liang. The Infection of Salt Fog for IC's Performance[J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(5): 56-58.
- [8] 郑晓燕, 于芳, 吴文清. 氯离子对钢筋混凝土桥梁的危害与防护[J]. 华东公路, 2003(2): 36-39.
ZHENG Xiao-yan, YU Fang, WU Wen-qing. The Harm and Protection of Chloride Ion on Reinforced Concrete Bridge[J]. East Road, 2003(2): 36-39.
- [9] HEO K Y, HA K J. A Coupled Model Study on the Formation and Dissipation of Sea Fogs[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4): 1186-1205.
- [10] GB/T 4797.6—2013, 环境条件分类 自然环境条件 尘、沙、盐[S].
GB/T 4797.6—2013, Classification of Environmental Conditions—Environmental Conditions Appearing in Nature—Dust, Sand, Salt Mist[S].
- [11] 曾菊尧. 关于我国沿海地区近地面大气中的盐雾及其分布[J]. 特殊电工, 1982(4): 18-23.
ZENG Ju-yao. The Salt Fog and Its Distribution in the Atmosphere Near the Surface in Coastal Areas of China[J]. Special Electrician, 1982(4): 18-23.
- [12] GUSTAFSSON M E R, LARS G F. Dry Deposition and Concentration of Marine Aerosols in a Coastal Area, SW Sweden[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(6): 980-989.
- [13] OHBA R, OKABAYASHI K, YAMAMOTO M, et al. A Method for Predicting the Content of Sea Salt Particles in the Atmosphere[J]. Atmospheric Environment Part A General Topics, 1990, 24(4): 925-935.
- [14] TEDESCHI G, VAN EIJK A M J, PIAZZOLA J, et al. Influence of the Surf Zone on the Marine Aerosol Concentration in a Coastal Area[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2017, 163(2): 327-350.
- [15] WAI K M, TANNER P A. Wind-dependent Sea Salt

- Aerosol in a Western Pacific Coastal Area[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(8): 1167-1171.
- [16] 宋金明, 李鹏程, 詹滨秋. 青岛雾水中的氯离子[J]. *海洋环境科学*, 1992(4): 14-22.
SONG Jin-ming, LI Pen-cheng, ZHAN Bin-qiu. Chlorine Ions in the Fog of Qingdao[J]. *Marine Environmental Science*, 1992(4): 14-22.
- [17] 赵恒强. 连云港滨海大气中水溶性阴离子的研究[D]. 连云港: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
ZHAO Heng-qiang. Water-soluble Anions in the Atmosphere of Lianyungang Coastal Area[D]. Lianyungang: First Institute of Oceanography, 2018.
- [18] DRAAIJERS G P J, EK R V, BLEUTEN W. Atmospheric Deposition in Complex Forest Landscapes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 69(4): 343-366.
- [19] 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): 463-467.
HU Jie-zhen, LIU Quan-bing, HU Huan-huan, et al. Cl Sedimentation Rate in Atmosphere of Tropical Island[J]. *Corrosion and Protection*, 2018, 39(6): 463-467.
- [20] 刘军, 邢锋, 丁铸. 环境参数对大气氯离子作用的影响[J]. *低温建筑技术*, 2008, 30(6): 4-6.
LIU Jun, XING Feng, DING Zhu. The Influence of Environment Parameter on Atmospheric Chloride[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2008, 30(6): 4-6.
- [21] 唐其环. 大气中氯离子浓度的灰色聚类分析[J]. *腐蚀与防护*, 1996(4): 22-24.
TANG Qi-huan. Grey Clustering Analysis of Chlorine Ion Concentration in Atmosphere[J]. *Corrosion and Protection*, 1996(4): 22-24.
- [22] 唐其环. 万宁、青岛大气氯离子灰色聚类特征[J]. *环境技术*, 2002, 20(3): 22-24.
TANG Qi-huan. The Grey Clustering Characteristic of Concentration in Wanning & Qingdao Atmosphere[J]. *Environmental Technology*, 2002, 20(3): 22-24.
- [23] 张永义, 王贵兵. 某核电厂附近大气中氯离子、总悬浮物的监测[J]. *辐射防护通讯*, 1999(3): 25-28.
ZHANG Yong-yi, WANG Gui-bing. Monitoring of Chloride Ions and Total Suspended Matter in the Atmosphere Near a Nuclear Power Plant[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 1999(3): 25-28.
- [24] CORVO F, MINOTAS J, DELGADO J, et al. Changes in Atmospheric Corrosion Rate Caused by Chloride Ions Depending on Rain Regime[J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(4): 883-892.
- [25] GB/T 10593.2—2012, 电工电子产品环境参数测量方法 第2部分: 盐雾[S].
GB/T 10593.2—2012, Method of the Measuring Environmental Parameters for Electric and Electronic Products—Part 2: Salt Mist[S].
- [26] 陈孝渝, 杨德模, 凌勇, 等. 大亚湾核电站地区大气腐蚀性污染物检测与分析[J]. *核科学与工程*, 2005, 25(3): 193-200.
CHEN Xiao-yu, YANG De-mo, LING Yong, et al. Measurement and Analysis of Pollutant on Corrosivity of Atmospheres in Daya Bay Nuclear Power Station Area[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2005, 25(3): 193-200.
- [27] 戚苓, 莫天麟. 空气中氯离子浓度的测定[J]. *上海环境科学*, 1985(7): 32-33.
QI Ling, MO Tian-lin. Determination of Chloride Ion Concentration in Air[J]. *Shanghai Environmental Science*, 1985(7): 32-33.
- [28] 修光利, 施双燕, 张大年. 大气微小颗粒物中汞的污染特性初步研究[J]. *上海环境科学*, 2003(5): 310-312.
XIU Guang-li, SHI Shuang-yan, ZHANG Da-nian. Preliminary Study on the Pollution Characteristics of Mercury in Small Atmospheric Particles[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2003(5): 310-312.
- [29] 李世奎, 陶琳. 一种携带方便的大气采样器[J]. *气象*, 1980, 6(3): 41.
LI Shi-kui, TAO Lin. A Portable Atmospheric Sampler[J]. *Aerography*, 1980, 6(3): 41.
- [30] 赵志远. 大气采样器的改进[J]. *环境化学*, 1986(6): 11.
ZHAO Zhi-yuan. Improvement of Atmospheric Sampler[J]. *Environmental Chemistry*, 1986(6): 11.
- [31] 杨攀, 史海华. 大气采样用防倒吸装置: 中国, 206787872[P]. 2017-12-22.
YANG Pan, SHI Hai-hua. Anti-suction Device for Atmospheric Sampling: China, 206787872[P]. 2017-12-22.
- [32] GB/T 19292.3—2018, 金属和合金的腐蚀大气腐蚀性第3部分 影响大气腐蚀性环境参数的测量[S].
GB/T 19292.3—2018, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Part 3: Measurement of Environmental Parameters Affecting Corrosivity of Atmospheres[S].
- [33] 杨建伟, 曹建平, 张建强, 等. 一种大气中氯离子沉积率的检测装置: 中国, 204594951[P]. 2015-08-26.
YANG Jian-wei, CAO Jian-ping, ZHANG Jian-qiang, et al. The Invention Relates to a Detection Device for the Deposition Rate of Chloride Ions in the Atmosphere: China, 204594951[P]. 2015-08-26.
- [34] 李鑫. 氯离子沉降率测试系统及海上风力发电机组: 中国, 207122384[P]. 2018-03-20.
LI Xin. Chloride Ion Sedimentation Rate Test System and Offshore Wind Generator Set: China, 207122384[P]. 2018-03-20.
- [35] 马长李, 刘聪, 马瑞萍. 某系统贮存环境中微量盐雾监测[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(10): 78-81.
MA Chang-li, LIU Cong, MA Rui-ping. Monitoring of Trace Salt Fog in a System Storage Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(10): 78-81.
- [36] 陈建琼, 唐其环, 郭赞洪, 等. 海洋大气氯离子监测方法—湿烛法与干片法对比研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(6): 77-83.
CHEN Jian-qiong, TANG Qi-huan, GUO Zan-hong, et al. A Comparative Study of the Monitoring Method of Chloride Ions in Marine Atmosphere: China, 207122384[P]. 2018-03-20.

- ride Ion in Ocean Atmosphere—Wet Candle Method and Dry Slice Method[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(6): 77-83.
- [37] 文静, 唐其环, 陈建琼, 等. 干片采样法在海滩大气氯离子监测中的饱和现象浅析[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(1): 51-56.
WEN Jing, TANG Qi-huan, CHEN Jian-qiong, et al. Analysis of Saturation Phenomenon in Monitoring Atmospheric Chloride Ion in Beach by Dry Sheet Sampling Method[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(1): 51-56.
- [38] 刘聪, 唐其环, 赖丽勤. 海洋大气氯离子采集过程饱和现象研究[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(1): 26-28,39.
LIU Cong, TANG Qi-huan, LAI Li-qin. Study of Saturation of Chloride Sampling in Marine Atmosphere[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(1): 26-28,39.
- [39] 张孔林, 林德源, 陈云翔, 等. 大气环境中氯离子沉积量测定的采集装置: 中国, 205015201[P]. 2016-02-03.
ZHANG Kong-lin, LIN De-yuan, CHEN Yun-xiang, et al. A Collection Device for the Determination of Chloride Ion Deposition in Atmospheric Environment: China, 205015201[P]. 2016-02-03.
- [40] 安泰莹, 文庆珍, 朱金华. 氯离子测定方法研究进展[J]. *河南化工*, 2013, 30(6): 8-11.
AN Tai-ying, WEN Qing-zhen, ZHU Jin-hua. Advances in the Determination of Chloride Ions[J]. *Henan Chemical*, 2013, 30(6): 8-11.
- [41] 查娜. 近海环境配电箱温度控制和盐雾沉积率监测系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHA Na. Study on Temperature Control and Salt Spray Deposition Rate Monitoring System of Distribution Box in Offshore[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [42] 李定林, 陈满, 向正林, 等. 一种海洋大气氯盐粒子含量的检测方法及其检测系统: 中国, 201910312985.4[P]. 2019-04-18.
LI Ding-lin, CHEN Man, XIANG Zheng-lin, et al. The Invention Relates to a Method and a Detection System for the Content of Chlorine Salt Particles in the Ocean Atmosphere: China, 201910312985.4[P]. 2019-04-18.
- [43] 饶仲群. 离子色谱仪在核电厂在线监测氯离子的应用[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015(6): 31-33.
RAO Zhong-qun. Ion Chromatograph for On-line Monitoring of Chloride Ions in Nuclear Power Plants[J]. *Automation and Instrumentation*, 2015(6): 31-33.
- [44] 曾健华, 王建伟, 洪凌成. 氯离子在线检测仪的研制[J]. *分析仪器*, 2005(4): 1-4.
ZENG Jian-hua, WANG Jian-wei, HONG Ling-cheng. Development of On-line Chloride Ion Detector[J]. *Analytical Instrument*, 2005(4): 1-4.
- [45] 陈川, 向利, 王俊, 等. 一种用于在线检测大气盐雾含量的装置及检测方法: 中国, 201910278937.8[P]. 2019-04-09.
CHEN Chuan, XIANG Li, WANG Jun, et al. The Invention Relates to a Device and a Method for On-line Detection of Atmospheric Salt Fog Content: China, 201910278937.8[P]. 2019-04-09.
- [46] ISO 9223, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres Classification, Determination and Estimation. Classification of Corrosivity[S].
- [47] ISO 9225, Corrosion of metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres Measurement of Environmental Parameters Affecting Corrosivity of Atmospheres[S].