

岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究

向永华, 王争荣, 曹京宜, 韩冀川, 臧勃林, 王向向

(92228 部队, 北京 100072)

摘要: 南海岛礁装备设施的服役环境恶劣、腐蚀问题严重。在分析南海岛礁装备服役环境情况的基础上, 介绍了南海岛礁装备设施的腐蚀现状, 从服役环境、装备论证、设计、鉴定、维护保养等全寿命周期角度剖析了造成南海岛礁装备腐蚀问题的原因, 并从腐蚀数据采集、装备防腐设计、防腐工艺优化、完善试验鉴定、重视维护保养、构建系统治理构架等几个方面探讨了加强岛礁装备设施腐蚀控制的对策, 就如何全面做好岛礁装备设施腐蚀防控工作进行了展望。

关键词: 岛礁; 设施设备; 腐蚀控制; 策略

中图分类号: TJ01; TB304

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)11-0028-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.004

Study on Corrosion Status and Corrosion Control Strategy for Equipment and Facilities Serving on Islands and Reefs

XIANG Yong-hua, WANG Zheng-rong, CAO Jing-yi, HAN Ji-chuan, ZANG Bo-lin, WANG Xiang-xiang

(Unit 92228, PLA, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: Islands and reefs in the South China Sea have the quite hostile corrosion environment and this seriously affects the safe operation of equipment and facilities. Based on the analysis of the service environment of island and reef equipment in the South China Sea, the corrosion status of equipment and facilities are introduced, and the corrosion causes of equipment on islands and reefs are analyzed from the life cycle angle of service environment, equipment demonstration, design, appraisal and maintenance, etc. The countermeasures for strengthening corrosion control of island and reef equipment are discussed from the aspects of corrosion data collection, equipment anti-corrosion design, anti-corrosion process optimization, improving test identification, paying attention to maintenance, and building system governance framework, etc. Finally, this paper looks forward to the future of the corrosion prevention and control of equipment and facilities on the island in a comprehensive manner.

KEY WORDS: reef; equipment facility; corrosion control; measure

南海岛礁属于热带海洋性季风气候, 各型装备面临高温、高湿、高盐雾和强紫外线辐照的考验, 与大陆、海岸及沿海相比, 岛礁的腐蚀环境更加恶劣, 材料的腐蚀速率更大。例如, 南海岛礁环境, 钢在海雾

饱和的空气中的腐蚀速率是干净大气中的 8 倍, 这导致装备设施的腐蚀率明显高于近海工程。腐蚀对岛礁装备设施的危害严重, 不仅会导致装备外观破坏、零部件尺寸减少、机械强度降低、原有功能丧失、使用

收稿日期: 2021-08-23; 修订日期: 2021-10-18

Received: 2021-08-23; Revised: 2021-10-18

作者简介: 向永华(1977—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为海洋腐蚀防护。

Biography: XIANG Yong-hua(1977—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: ocean corrosion and protection.

引文格式: 向永华, 王争荣, 曹京宜, 等. 岛礁装备设施腐蚀现状及腐蚀控制策略研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 028-034.

XIANG Yong-hua, WANG Zheng-rong, CAO Jing-yi, et al. Study on corrosion status and corrosion control strategy for equipment and facilities serving on islands and reefs[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 028-034.

寿命缩短,有些零部件甚至会出现裂纹或脆性断裂而造成严重事故,严重影响装备设施的完好率和勤务保障能力。文中结合了南海岛礁装备设施的腐蚀现状,分析其腐蚀原因,并提出了加强腐蚀控制的策略^[1-5]。

1 南海岛礁装备设施服役环境情况

南海岛礁的年平均气温为 28~30 ℃,夏季地表温度高达 60 ℃;雨量充沛,年降水量 2800 mm 以上。南沙平均相对湿度为 82%,最大为 100%,最小为 47%,全年平均相对湿度均在金属腐蚀临界湿度的 70%以上;南沙地区的风速多为 3~6 级;空气中的盐雾含量在 0.3~1.5 mg/m³ 之间,是大陆沿海地区

的 1.5 倍^[6]。

图 1 为南海西南沙地区与其他典型环境站点的环境因素对比,可知,无论是年平均温度、降雨量、日照时间,还是年 Cl⁻ 沉降率,都显著高于其他站点地区。根据实测环境数据分析,美济礁、永暑礁、琛航岛呈现高温、高湿、强辐射的特征,普遍具有高盐雾的海洋大气环境特征,海盐粒子含量高。南海岛礁大气腐蚀严酷度较高,美济礁、永暑礁、琛航岛对钢的腐蚀等级达到了 CX 级;对铝、锌的腐蚀等级达到了 C5 级;对铜的腐蚀等级达到了 CX 或 C5 级。南海美济礁、永暑礁按黄色指数性能划分的高分子材料老化严酷度等级为 CX 级;按缺口冲击强度性能划分的高分子材料老化严酷度等级为 C4 级。

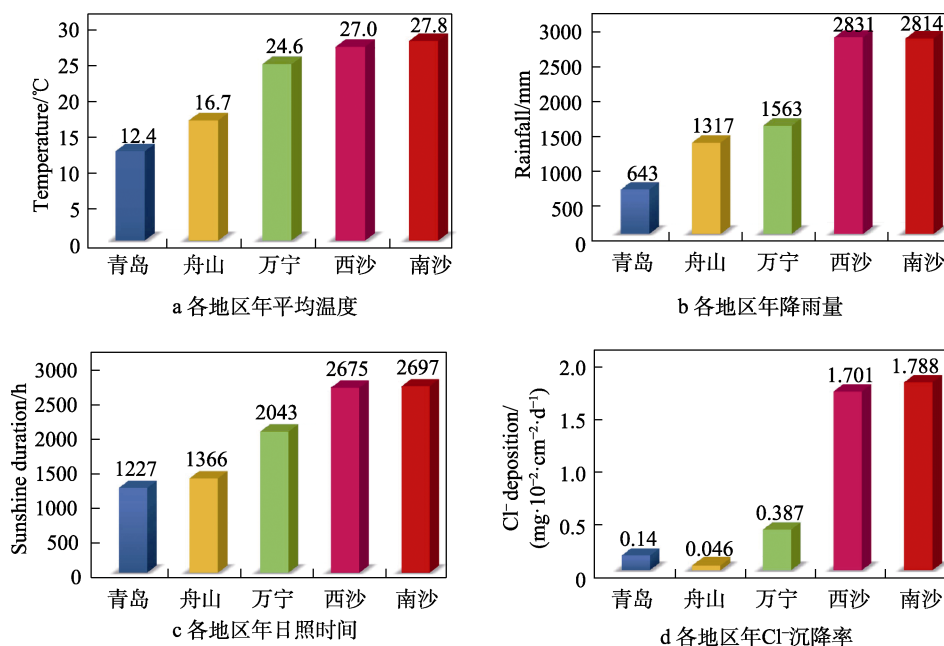


图 1 南海岛礁与国内典型站点环境因素对比

Fig.1 Comparisons of environmental factors between South China Sea and typical sites in China: a) annual average temperature of each region; b) annual rainfall of each region; c) annual sunshine duration in each region; d) annual Cl⁻ deposition in each region

2 南海岛礁装备设施腐蚀现状

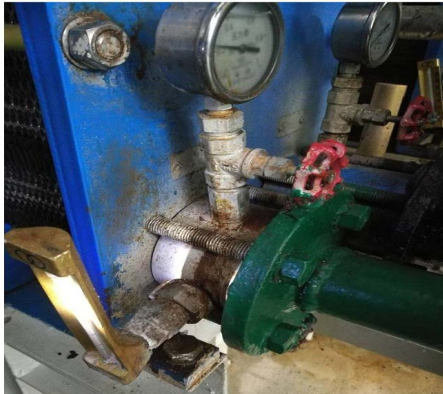
2.1 金属材料

装备设施金属基材表面主要存在表面锈蚀、点蚀、剥层等腐蚀现象。岛礁装备设施的腐蚀通常从薄弱部位开始,然后逐步向其他部位蔓延。腐蚀薄弱部位通常出现在一些接缝、凹槽、内表面、内角等不易保养的部位,以及法兰、焊缝、螺栓连接部位等。车辆装备腐蚀比较严重的部位是底盘、车轮、挡泥板、车底板等,这些部位常与泥砂、矿石和水气接触,极易划伤漆膜,破坏其完整性、连续性,使金属裸露,一旦接触到水、氧气和氯离子,就会引发锈蚀。装备的排气管、消声器等在运行时处于高温状态,工作时

达 600 ℃ 以上,目前普遍采用有机硅铝粉漆进行涂装,但防腐效果不理想,存在排气管涂膜龟裂、脱落,基材锈蚀严重等问题。图 2 为南海岛礁钢结构装备设施的腐蚀情况。

2.2 橡胶、塑料、合成材料等非金属材料

装备设施中非金属基材主要存在老化加速、强度减少、变脆易碎等情况。电子装备的腐蚀主要是由电路板、线路接头、插头等的氧化引起的,从而导致线路打火、短路、断路、连接不稳定、装备性能下降等问题发生,影响装备的使用。对于电路板受腐蚀损坏的情况,属元器件受损的,由修理部门更换电子元器件进行修复;电路板损毁无法修复的,采取换件方式修理。对于接头、插头出现的氧化情况,主要采取去



a 电站海水管路



b 海水淡化设备

图2 南海岛礁装备设施锈蚀情况

Fig.2 Corrosion conditions of equipment and facilities serving on reefs of the South China Sea: a) seawater pipeline of power station; b) seawater desalination equipment

除氧化层的方式进行保养。对于部分装备光电部件，有时也采取定期通电检查、短时运行等方法除湿防潮。

3 南海岛礁装备设施腐蚀原因初探

造成岛礁装备腐蚀问题频发的原因是多方面的，主要包括以下几点^[7-11]：

1) 服役环境十分严酷，这是导致其腐蚀问题严重的客观原因。

2) 在装备设施的前期部署论证中，对热带海洋环境影响效应的考虑不够充分，顶层指标论证缺失。

3) 装备本身材料、工艺结构设计、生产等方面带来的缺陷。受技术水平限制，装备设施在设计阶段中的结构选材、防腐蚀设计和防腐蚀工艺存在较大不足，加之针对南海岛礁环境的环境适应性考核验证不充分，导致材料的选择及结构的设计等方面存在“先天不足”。

4) 对装备设施的环境试验鉴定考核不充分，无法充分暴露装备在南海岛礁环境中腐蚀的薄弱环节。多型装备按照国军标标准开展了岛礁环境适应性的改进鉴定试验，但依然在短时间内爆发故障。

5) 腐蚀防控工作针对性不强。现有装备设施运行时间短，维护及管理人员对腐蚀规律的研究不够，检查与使用维护规程等有关技术文件多参考历史服役数据，与岛礁严酷的腐蚀环境不匹配。另外，在使用维护与腐蚀监控方面也缺少有效的技术措施。

6) 后期维护使用过程中缺乏行之有效的防腐配套产品及相关实施标准、规范，现有大部分腐蚀维护方案及耗材（材料、工艺、清洗、缓蚀、原位修理等）未经有效腐蚀试验验证即投入使用，其防护效能及寿命无法得到有力保障。

4 岛礁设施设备腐蚀控制策略研究

4.1 加强南海岛礁地区的环境及腐蚀数据采集与应用^[12]

环境数据采集：加强系统收集南海岛礁环境大气及装备局部区域的气象环境因素及介质环境因素等数据。按环境因素对装备的作用强度、作用时间统计分析，建立各区域气象环境因子、介质环境因子的数学模型或函数关系，编制南海岛礁地区大气及局部腐蚀环境谱，为装备腐蚀防护论证和指标设计提供了真实有效的信息。

腐蚀数据采集：采集岛礁外场暴露试验数据，包括钢质结构、电子设备、附件等使用的材料及涂层层，如结构钢、铝合金、复合材料、橡胶、塑料、隐身涂层、防护涂层、密封剂、镀层等；典型结构件，如承力部位、紧固连接件、油箱、机箱、机柜、半封闭构件、传感器、插接件等，补充部分试验，对数据统计分析，总结腐蚀规律，为腐蚀损伤容限及腐蚀控制方案的制定提供数据与工作基础。

采集和分析岛礁地区环境及腐蚀数据，可为装备材料体系的设计及防腐蚀技术的应用等提供准确输入，是提高材料选择及防腐蚀技术应用的针对性和有效性的前提。

4.2 装备设计阶段应充分考虑腐蚀预防与控制

在装备设计阶段，选择材料时，要全面考虑装备设施的功能、加工要求、设计使用寿命、使用环境、可能发生的腐蚀类型和腐蚀破坏的后果等因素；加强新型耐蚀材料和防腐技术的应用，包括改进结构材料的材质，用不锈钢、各种合金、耐蚀非金属材料替代普通碳钢；采用新型重防腐覆层技术，如各种热喷涂技术、长效重防腐涂料、复合材料保护层以及达克罗技术等；采用联合保护，即采用牺牲阳极或外加电流的阴极保护技术，有时需要将电化学保护与涂料、缓蚀剂保护联合起来，以取得更好的防腐效果；高度重视密封材料及防锈油的选用。除上述措施外，还应注意对去湿干燥技术、物理隔离技术、防腐包装技术、

金属表面处理技术等的应用。

在结构设计时,应将腐蚀预防与控制作为重要的考虑因素,比如在容易发生均匀腐蚀的部位要预留足够的腐蚀裕量;尽量避免袋形结构设计,保持封闭系统通风和排水良好,以规避腐蚀介质的聚集;消除死角和缝隙,避免缝隙腐蚀;尽量避免使用两种电位不同的金属材料连接,防止电偶腐蚀,如无法避免,应采取必要的绝缘措施;对于外露件,应考虑相应的防护措施;设计零件时要避免出现突然的变化或尖角,应有足够的过渡圆弧,以避免因应力集中而导致应力腐蚀等^[13-17]。

4.3 改进防腐施工工艺,完善防腐工序,严格质量管理

装备承制工厂要严格按照设计采用的防腐材料、施工工艺进行防腐施工;严格执行质量管理体系,将装备腐蚀防护设计指南、腐蚀防护设计技术要求等文件规范贯彻落实。

装备结构件的腐蚀与防腐质量有很大关系。主要表现为:1)表面处理不彻底,造成漆膜脱落,基材锈蚀;2)焊缝处理不当,造成焊缝部位锈蚀严重;3)未按涂刷程序进行,涂刷厚度不足或渗色;4)刮腻子过厚,致使涂膜机械性能下降,容易剥落;5)材料进厂检验、防腐施工质量检查不落实,给装备腐蚀留下隐患。尤其是前处理工艺,需要严格检查和监管,确保除油除锈彻底、磷化膜完整、表面粗糙度等达到规定要求,以防止涂层早期脱落和生锈。

为了达到良好的涂装效果,要对防腐涂装全过程实施质量监管。如涂装前,需对涂料进行质量抽检,检验其是否达到设计说明书中的性能要求;涂装过程中,应根据实际情况采用恰当的涂装工具、涂装方法及涂装工艺。涂装过程中及涂装完成后,应对影响涂装质量的关键参数,如湿膜厚度、干膜厚度、附着力、涂层针孔等进行检测,以控制涂层质量达到规定的性能要求。因此,制订科学合理的防腐施工工序至关重要,每道工序各司其职,把好装备防腐的每道关口。装备全部装配完成后,还要专门设立一个工位,对装配过程中涂层受损的零部件进行补漆;对外露的缝隙、锐边等部位涂覆密封胶;对无法封闭的空腔、发动机舱、车门铰链、各种螺帽等部位涂防锈油或防锈蜡^[18-21]。

4.4 修改、完善装备在南海岛礁环境下试验的鉴定方法、标准

亟需针对特殊腐蚀环境特点,完善现有的试验鉴定体系,包括结构抗腐蚀评定、各类装备及其设施抗腐蚀评定等内容。根据装备特点、安装位置及主要腐蚀因素,以装机状态或相应关键部件模拟件进行实验室综合试验和外场自然环境试验鉴定,评价装备能够

满足南海岛礁腐蚀环境适应性指标。

4.5 高度重视装备储存、使用和维护过程中的防腐^[22-24]

4.5.1 装备长久不用时要妥善封存

装备长久不用时,要彻底清洗,避免日晒雨淋,有条件的一定要在库房中储存,适当进行防腐包装,库房内应适时通风防潮,尽可能避免剧烈的温湿度变化。对于高价值资产,除储存在库房外,还可施加特别的防腐包装,且配备空调系统,以控制库内温湿度处于规定要求。如:20℃时,库房的相对湿度降低到50%左右就可以防止金属锈蚀。另外,在储存期间要经常检查,按要求更换包装内的气相缓蚀剂等,检测包装完好性。装备露天存放时,应采取有效措施,防止阳光直射、雨淋、风吹等^[10]。

4.5.2 正确使用装备,用后及时清洗

装备在使用过程中,经常暴露在海洋大气中,受到海盐粒子、珊瑚尘或含盐土壤等污染并未及时清洗,大大加速了装备的腐蚀。因此,装备使用后必须及时清洗,以减少锈蚀的机会。清洗装备外表面时,最好使用高压水或淡水加清洗剂、缓蚀剂进行冲洗,尽量少用地下水或被污染过的水,洗后要用干布擦拭。对于粘附在车体上的斑点、油污,要经常擦拭干净。清洗时,要疏通装备各部位的排水孔,使其保持畅通,以避免积水并引起腐蚀。

4.5.3 定期检查,及时维护保养

制订并下发装备维护保养手册,根据需要采取定期保养和视情保养,将防腐蚀措施作为每次维护保养的核心内容,通过保养消除或减少缝隙腐蚀和盐沉积等加速装备腐蚀的因素。有些腐蚀与日常保养有很大关系。如:某些部位不能涂刷涂料,只能涂防锈油来防腐。因此,一定要定期检查这些部位的防锈油情况,及时做好防护。装备上使用的各种密封垫、密封胶产品,也要定期检查,发现老化失效的,及时更换。另外,还要经常检查装备是否有较小的损伤,如有损伤应及时进行修理,发现防腐涂层出现缺损,其涂膜完整性遭到破坏时,应立即用涂料修补,以防止腐蚀蔓延,并做好补漆前的表面处理。

4.6 构建南海岛礁装备设施腐蚀防控系统工程框架

4.6.1 加强腐蚀防控顶层设计与管控

构建全寿命阶段腐蚀防控技术文件体系,包括在论证阶段,甲方提出的腐蚀防护与控制要求;研制阶段,设计单位根据甲方的相关要求,编制的腐蚀防护与控制大纲。研制阶段,承制单位根据腐蚀与控制大纲编写的腐蚀控制设计指南、腐蚀控制制造技术要

求、腐蚀控制维护维修手册、腐蚀控制人员培训手册等文件,要建立专门的腐蚀防控考核验证机构,对上礁装备开展严格的腐蚀防控考核验证;要实现现役装备腐蚀防控相关工作的制度化、体系化和常态化(如定期开展腐蚀普查),摸清现役装备设施腐蚀防护与控制方面的底数,及时发现使用维修中存在的问题,总结规律,提出解决措施;要针对现役装备设施抗腐蚀能力不足的问题开展专项研究,解决急需,比如研发腐蚀防控相关的新设备、新材料,研究新技术,革新维修模式,改进维修手段等^[25-27]。

4.6.2 制定和实施岛礁装备设施防腐技术规范

构建与岛礁服役严酷环境匹配的腐蚀防护与控制技术指标体系,建立相关的腐蚀防护与控制标准,在研制中提出腐蚀防护与控制的定性和定量指标要求,以提升装备设施本身的抗腐蚀能力。目前,岛礁装备设施生产厂家在生产过程中采用的防腐技术文件多为企业自行制订的防腐技术要求或涂漆工艺。几家工厂制订的防腐技术要求或涂漆工艺各有侧重,但表述的内容都集中在表面处理和涂装工艺等方面。存在的主要问题有:1)表面处理和涂装工艺等要求不够全面,内容不细,可操作性不强;2)对各道漆膜的干膜厚度未做要求,涂膜总厚度简单参照了 GJB 1379—92 的厚度要求,并不适合岛礁装备特点;3)对防腐材料进厂检验、涂装质量验收标准等未见涉及;4)关于防腐蚀结构设计、防腐材料选材、维护保养等内容均无涉及。因此,急需针对岛礁装备设施的设计、生产、试验、使用、维修等各阶段制定相应的防腐技术规范。特别是针对影响涂装质量的涂料进厂检验、表面处理工艺、涂装工艺、涂装施工监理等几个重要环节制定操作性强的技术要求和质量控制文件^[28]。

4.6.3 建立装备腐蚀损伤管理系统

实现对南海岛礁环境地区服役装备腐蚀损伤的动态管理,包括腐蚀检测、监控、预测评估和修理等,为确定最佳维修时间及方案提供依据。建立腐蚀损伤故障数据库,收集整理基本信息、结构腐蚀部位、电子及其附件、材料、腐蚀类型、腐蚀尺寸、图片以及原因分析和处理方法等。采用腐蚀在线监测传感器,对不易观察及检测的关键部位进行监测。建立腐蚀预测方法,基于数据库和试验场站积累或补充开展的试验数据,建立装备典型材料、涂镀层、紧固件、连接件、电路线缆、插接件、天线、外露传感器、密封橡胶等腐蚀共性部位的预测模型,科学制定腐蚀维修时间、周期和方案。

5 展望

南海岛礁腐蚀环境恶劣,装备设施面临严峻考验。目前,我国在岛礁装备设施相关材料腐蚀数据的

积累与应用、重点装备设施的腐蚀防控、腐蚀防护相关标准和规范的制定实施,以及腐蚀防控信息管理等 方面还需持续发力、久久为功。随着我国建设海洋强国战略的实施,对于远海岛礁装备设施在长时间、远距离工况下运行的安全性要求将大幅提升。为实现岛礁装备设施的全面腐蚀控制,并提高其腐蚀防护水平,需要论证并组织岛礁装备设施全寿命周期的腐蚀防护技术科研、试验评估和技术管理工作,积极构建岛礁装备设施腐蚀防护技术研究、试验评估、成果推广、技术管理、资源共享的机制与平台,实现岛礁装备设施全寿命周期内腐蚀问题的有效预防与控制,整体提升其腐蚀防护水平。

参考文献:

- [1] 韩恩厚. 海洋工程材料和结构的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
HAN En-hou. Corrosion and protection of marine engineering materials and structures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [2] 黄云, 胡其高, 张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究[J]. 国防科技, 2018, 39(3): 50-63.
HUANG Yun, HU Qi-gao, ZHANG Shuo-yun. Research on the marine environmental impact on reef structures maintenance[J]. Defense technology review, 2018, 39(3): 50-63.
- [3] 程玉峰, 杜元龙. 电子设备的大气腐蚀[J]. 材料保护, 1995, 28(12): 16-19.
CHENG Yu-feng, DU Yuan-long. Atmospheric corrosion of electronic devices[J]. Materials protection, 1995, 28(12): 16-19.
- [4] 彭文山, 侯健, 郭为民, 等. 西沙海洋大气环境中典型材料腐蚀形貌识别[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 1-7.
PENG Wen-shan, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Corrosion morphology identification of typical materials in Xisha marine atmospheric environment[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(7): 1-7.
- [5] 金伟晨. 以南海环境为例的海洋环境下装备适应性研究[J]. 船舶物资与市场, 2018(5): 35-39.
JIN Wei-chen. Research on equipment adaptability in marine environment[J]. Marine equipment/materials & marketing, 2018(5): 35-39.
- [6] 曾辉, 李雄峰, 屈洪刚. 南海方向海洋气候对防空武器系统性能的影响研究[J]. 地面防空武器, 2013, 44(2): 62-64.
ZENG Hui, LI Xiong-feng, QU Hong-gang. Study on the influence of marine climate in the South China Sea on the performance of air defense weapon system[J]. Land-based air defence weapons, 2013, 44(2): 62-64.
- [7] 张春和, 张大鹏, 蔡志强. 沿海地区汽车腐蚀的原因与防护方法探析[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(12): 542-544.
ZHANG Chun-he, ZHANG Da-peng, CAI Zhi-qiang. An analysis of the cause of corrosion of vehicles and its pro-

- tection method in wet region along the coast[J]. *Corrosion & protection*, 2003, 24(12): 542-544.
- [8] 吴剑锋, 王兆军, 苏海涛, 等. 军用特种装备表面涂层防腐对策[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(5): 165-168.
WU Jian-feng, WANG Zhao-jun, SU Hai-tao, et al. Anti-corrosion countermeasures of military special equipment surface coatings[J]. *Equipment environmental engineering*, 2010, 7(5): 165-168.
- [9] 倪余伟, 王建宇, 李永, 等. 洞库金属油罐防腐研究[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(4): 45-48.
NI Yu-wei, WANG Jian-yu, LI Yong, et al. Research on anticorrosion system of metal oilcan[J]. *Equipment environmental engineering*, 2008, 5(4): 45-48.
- [10] 王争荣, 向永华, 杨潇, 等. 岛礁油料装备的腐蚀特性及全寿命腐蚀控制策略[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(10): 14-19.
WANG Zheng-rong, XIANG Yong-hua, YANG Xiao, et al. Corrosion characteristics and life cycle corrosion control strategy for oil equipment on islands and reefs[J]. *Equipment environmental engineering*, 2020, 17(10): 14-19.
- [11] 倪余伟, 许胜利, 陈建国, 等. 军用车辆防腐工艺存在的主要问题及改进措施[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(6): 69-72, 81.
NI Yu-wei, XU Sheng-li, CHEN Jian-guo, et al. Existing problems and improvements of anticorrosion process for military vehicle[J]. *Equipment environmental engineering*, 2009, 6(6): 69-72, 81.
- [12] 赵鹏飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Accelerated corrosion test spectrum of typical reef atmospheric environment[J]. *Equipment environmental engineering*, 2019, 16(12): 14-21.
- [13] 张梦龙, 赵志敏. 东南海域岛礁环境对武器装备的影响及对策研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(10): 20-25.
ZHANG Meng-long, ZHAO Zhi-min. The influence and countermeasures study of weapon equipment influenced by island-reef environment in the southeastern sea[J]. *Equipment environmental engineering*, 2020, 17(10): 20-25.
- [14] 滕克难, 欧阳中辉, 洪亮. 海洋环境下装备可靠性与环境适应性技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
TENG Ke-nan, OUYANG Zhong-hui, HONG Liang. *Equipment reliability and environmental adaptability technology in marine environment*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [15] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(5): 416-422, 397.
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The environmental worthiness requirements with respect to weapon materials[J]. *Spacecraft environment engineering*, 2008, 25(5): 416-422, 397.
- [16] 刘丹. 大型电子产品热带海洋环境适应性设计与使用[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2013, 31(6): 64-67.
LIU Dan. Design of environmental adaptability and use of large electronic products for tropical ocean[J]. *Electronic product reliability and environmental testing*, 2013, 31(6): 64-67.
- [17] 庞志兵, 高强, 魏赫. 提高武器装备环境适应性对策研究[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(1): 68-71, 76.
PANG Zhi-bing, GAO Qiang, WEI He. Research on environment adaptive countermeasures for weapons and equipment[J]. *Equipment environmental engineering*, 2014, 11(1): 68-71, 76.
- [18] 王本汉, 王瑶, 李倩. 沿海地区原油储罐、码头钢结构腐蚀与防护完整性技术研究[C]//第三届中国油气储运技术交流大会论文集. 北京: 中国石油学会, 2012.
WANG Ben-han, WANG Yao, LI qian. Study on corrosion and integrity protection technology of steel structure of crude oil storage tank and wharf in coastal area[C]// 3rd China oil and gas storage and transportation technology exchange conference proceedings. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2012.
- [19] 王建平, 刘锦红, 侯晓峰. 关于远海岛礁工程腐蚀防护问题的思考[C]//2015 年全国海洋工程腐蚀与防护技术研讨会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2015:1-5.
WANG Jian-pin, LIU Jing-hong, HOU Xiao-feng. Thoughts on corrosion protection of offshore islands and reefs[C]// Proceedings of 2015 national offshore engineering corrosion and protection technology seminar. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015:1-5.
- [20] 王建平, 魏英华, 刘锦红, 等. 远海岛礁金属结构的腐蚀防护技术研究[C]// 2015 年全国海洋工程腐蚀与防护技术研讨会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2015:6-13.
WANG Jian-pin, WEI Ying-hua, LIU Jing-hong, et al. Study on corrosion protection technology of metal structures of offshore islands and reefs[C]// Proceedings of 2015 national offshore engineering corrosion and protection technology seminar. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015:6-13.
- [21] 徐安桃, 李锡栋, 周慧. 岛屿环境下车辆金属材料的腐蚀及防护对策研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(7): 66-69.
XU An-tao, LI Xi-dong, ZHOU Hui. Corrosion and protection of vehicle metals in island environment[J]. *Equipment environmental engineering*, 2018, 15(7): 66-69.
- [22] 郁大照, 张代国, 王琳, 等. 南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(7): 8-12.
YU Da-zhao, ZHANG Dai-guo, WANG Lin, et al. Corrosion of airborne electronic equipment and field protection measures in marine environment of South China Sea[J]. *Equipment environmental engineering*, 2019, 16(7): 8-12.

- [23] 陈群志, 鞠明, 余文波, 等. 严酷环境下飞机外场腐蚀防护对策与措施[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 1-7.
CHEN Qun-zhi, JU Ming, YU Wen-bo, et al. Countermeasures for aircraft field corrosion protection under the severe environment condition[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(3): 1-7.
- [24] 刘振华, 王程, 赵吉敏. 长效封存技术应用于岛礁环境下器材装备防护研究[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 253-257.
LIU Zhen-hua, WANG Cheng, ZHAO Ji-min. Long-acting packaging technology for equipment protection in islands[J]. Packaging engineering, 2019, 40(3): 253-257.
- [25] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39, 123.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive corrosion control of naval aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(6): 35-39, 123.
- [26] 曹立荣, 佟文清. 电子装备南海环境适应性改进设计研究[J]. 环境技术, 2013, 31(6): 21-24.
CAO Li-rong, TONG Wen-qing. Study on anti-corrosion design of electronic equipment in the South China Sea[J]. Environmental technology, 2013, 31(6): 21-24.
- [27] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Corrosion control technology of electronic facility in marine atmosphere[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(4): 59-63.
- [28] 邹新河, 谭敦海, 郭文军, 等. 关于制订以西沙永兴岛为基地辐射西南中沙群岛各岛礁的工程建设标准的建议[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(3): 133-135.
ZOU Xin-he, TAN Dun-hai, GUO Wen-jun, et al. Suggestion on the construction of the engineering standards for the reefs of the Xisha, Nansha, and Zhongsha Islands based on the Yongxing Island of Xisha[J]. China water transport, 2013, 13(3): 133-135.