

特约专栏

海军装备腐蚀仿真技术现状、挑战和展望

冯亚菲, 方志刚, 赵 伊

(中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072)

摘 要: 海军装备腐蚀防护能够降低装备维护成本, 减小腐蚀对装备安全和战备的影响。自然环境试验、实验室加速试验、模拟仿真试验是材料与装备腐蚀及其规律研究及预测的 3 个最主要的手段, 由于模拟仿真试验具有成本低、时间短、可应用于复杂系统等优势, 越来越受到人们的青睐。国外已经发展了有限微分法、有限差分法、有限元法、边界元法等数值方法, 建立了多种类型的腐蚀数据库。我国也开展了数十年自然环境腐蚀数据积累工作, 已经在导弹、飞机、舰船等方面开展了腐蚀仿真研究, 但是目前装备腐蚀仿真技术发展还缺乏全局规划和评价体系, 仿真精度和可靠度有待提高。未来装备腐蚀仿真研究应该加强数据积累和相关规范、标准的建立, 朝着全寿命、全尺寸、互操作性、可信性、重用性及大数据挖掘等趋势发展。

关键词: 腐蚀; 仿真; 预测; 海军装备; 舰船

中图分类号: O242.1; E919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)03-0179-06

Status, Challenge and Prospect of the Technology of Corrosion Simulation on Navy Equipment

FENG Yafei, FANG Zhigang, ZHAO Yi

(Unit 92228 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

Abstract: Equipment corrosion protection can reduce the cost of equipment maintenance and the impact of corrosion on equipment safety and combat readiness. Natural environment test, laboratory accelerated test and simulation test are the three most important means for investigating corrosion and its regularity of materials and equipment. Because of the advantages of low cost, short time and application in complex systems, simulation test is becoming more and more popular. Foreign countries have developed many numerical methods such as finite differential method, finite difference method, finite element method and boundary element method, and established various corrosion databases. Our country has also carried out decades of accumulation of natural environmental corrosion data. Corrosion simulation studies have been carried out in missiles, aircrafts, ships, etc. However, there is still a lack of research planning and evaluation systems. Also, simulation accuracy and reliability need to be improved. In the future, equipment corrosion simulation test should strengthen data accumulation and standard development, and develop towards the direction of full life, whole size, interoperability, credibility, reusability and big data mining.

Key words: corrosion; simulation; forecast; navy equipment; vessels

1 前 言

海军装备因其独特的海洋服役环境而易受到海洋大气、海水等介质的腐蚀, 从而装备的可靠性及安全性降低, 经济性也受到严重的影响。为降低维护成本, 减小腐蚀对装备安全和战备的影响, 应对装备在全寿命期内进

行腐蚀防护控制。传统的方法通常依靠实验室以及自然环境等试验暴露问题后再寻求补救措施, 这种方法不能有效地预测并减少腐蚀损失^[1]。随着仿真技术的不断发展, 其优势已逐渐显现: 既可以对实际试验难以完成的多种复杂问题进行模拟, 又可以对装备防腐设计方案甚至整机系统进行虚拟仿真分析, 提前暴露可能出现的问题, 弥补实际试验的不足^[2]。目前, 仿真技术在腐蚀防护控制领域已得到了人们的广泛关注, 研究逐渐从材料级、部件级向系统级、体系级过渡。然而, 在实现腐蚀仿真试验技术工程化应用之前, 仍有许多问题需要解决。

收稿日期: 2019-06-28 修回日期: 2019-10-30

第一作者: 冯亚菲, 女, 1981 年生, 工程师

通讯作者: 方志刚, 男, 1966 年生, 研究员,

Email: 13701026773@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201906040

2 国内外发展概况

2.1 国外发展概况

由于仿真技术具备低成本、耗时短、可适用范围广等特点,计算机仿真技术已经应用于先进国家的军事领域,在近年来呈现迅猛发展的趋势。美军早在 20 世纪中期就认识到了模拟仿真的重要作用。1965 年 6 月美国空军顾问委员会的报告中指出:“预测装备的战斗效能必须要利用试验数据、使用分析程序才能做到。这种分析一般都要涉及模型、仿真或方法”^[2]。

20 世纪 60 年代后期,研究人员第一次使用计算机仿真技术进行腐蚀预测,采用的是有限微分法。随后,因在许多场合下,有限差分法比有限微分法具有更高的精度而被应用于腐蚀问题预测,但因有限差分法不适用于三维图形模拟,70 年代开始使用有限元法。相比于有限微分法,有限元法在编程解决问题方面更加容易。但是,使用有限元法需要生成有限单元网格,该过程极其烦琐而且耗时耗力,尤其针对典型的腐蚀问题。因此,在 70 年代后期,边界元法被广泛使用,它是数值技术的另一种形式,常用于分析、设计和优化阴极保护系统。80 年代后期至 90 年代后期的 10 年间,边界元法应用于船体阴极保护系统的文献可以分为两类:设计分析和案例研究。设计分析是处理一般的设计问题以及恰当的边界元相关工具的分析开发,案例研究是使用现有的技术来分析现有的系统并将结果与可靠的实验数据进行比较^[3-6]。

边界元法的原理是:首先基于格林定理将待求解的数学物理问题的微分控制方程变换成边界上的积分方程,然后采取边界单元离散和分片插值技术对边界进行离散,从而将边界积分方程离散为代数方程,再采取数值方法求解出原问题中边界积分方程的数值解。采用边界元法可以将边界积分方程离散后再进行分析,这样可以降低所考虑问题的维数。对于边界元法,关键在于其数学模型的建立需要合理的假设,同时需要一定的边界条件对数学模型进行求解。2005 年,有报道指出国外已采用边界元法对全尺寸舰船进行了防腐优化设计,报道主要描述了通过计算机建模来预测杂散电流的腐蚀,文中对利用边界元法建模来设计和优化船舶防腐阴极保护系统进行了讨论^[7]。

自 20 世纪 60 年代开始,国外就开始建设腐蚀数据库供从事与腐蚀防护工作相关的技术人员使用。美国的 NACE 和 NBS 合作建立了腐蚀数据库, NACE 又陆续开发了 COR. SUB 和 COR. AB 腐蚀数据库,其中 COR. SUB 是关于 25 种常用的工程金属材料在 1000 种介质中不同温度和浓度下的腐蚀数据库; COR. AB 包括《Corrosion Ab-

stracts》杂志自 1962 年创刊至今的全部内容。德国也建立了类似的腐蚀数据库 DECHEMA^[8]。

20 世纪 80 年代中期,人工神经网络得到了迅速的发展并应用于腐蚀与防护领域,用来预测腐蚀类型和腐蚀性能等,如金属材料腐蚀类型的预测、金属应力腐蚀断裂预测、非金属材料老化预测等。

腐蚀专家系统是计算机在腐蚀科学技术中应用的又一个重要方面。如 ACHILLES 腐蚀专家系统包括海洋应用材料、涂料涂层、腐蚀监测、大气腐蚀、生物腐蚀、阴极保护等 9 个子系统,美军的阴极保护专家系统主要是针对地下结构管道、贮罐等进行阴极保护设计、维护等^[8]。

近来,美国 GCAS 公司开发了一种基于模拟仿真的“加速腐蚀专家模拟器”系统^[9],简称 ACES 系统。该系统被美国陆军首先用于模拟轮式车辆由于腐蚀而随时间延长的性能劣化趋势,模拟结果与实际加速腐蚀试验数据具有非常高的相关度。该系统对整个全尺寸车辆进行了三维模拟,然后进行全面检测确定故障并提出修复措施。后来,美国海军对 ACES 系统进行了扩展,开发了点蚀、剥蚀和应力腐蚀开裂 3 种腐蚀形式的仿真模型,以及一个带有学习算法的知识自动获取模块^[10]。目前,ACES 系统已经用于预测美国陆军装备的腐蚀程度。总之,ACES 系统代表了全尺寸评估对象腐蚀倾向和模拟方面的重大进步。

值得注意的是,美军在利用加速腐蚀仿真系统预测装备腐蚀状况的同时,高度重视仿真数据与实际环境试验数据的相关性。一方面是由于实际环境试验(尤其是自然环境试验)在美军装备研制中的重要地位;另一方面,与实际环境试验数据的相关程度能验证仿真模型的精确度以及仿真数据的可靠性。

2.2 国内发展概况

近年来,在装备仿真技术研究领域,我国已经在导弹、飞机、舰船等方面开展了仿真研究。但在仿真技术发展的全局规划、试验数据积累、数据集成等研究方面明显落后于发达国家,缺乏对数据的开发利用及仿真结果的可靠性验证等原因制约了仿真技术的发展。

数据库是建立模型的基础,我国在腐蚀数据库建设上有一定的基础。我国已经开展了数十年的自然环境腐蚀数据积累工作,得到了大量的宝贵数据,但是目前大部分数据尚没有被充分开发和利用。如:北京化工大学开发的金属材料和非金属材料腐蚀数据库^[11, 12]、北京科技大学开发的大气腐蚀数据库^[13]、中国科学院金属研究所开发的大气腐蚀数据库^[14]以及中船重工 725 所开发的多层分布式海洋腐蚀与防护数据库等^[15]。如果能够利用

现代数据分析技术对这些数据进行开发, 建立地域相关腐蚀模型, 则会产生显著的社会和军事效益。

我国在材料以及部件级腐蚀仿真方面取得了较大的进步。如: 海军航空工程学院利用模拟仿真技术对 ZL115 铸铝合金、C41500 黄铜、7B04 铝合金和 7B04 铝合金/涂层体系等进行了电偶腐蚀和缝隙腐蚀问题的研究^[16-18]; 中船重工 719 所对 B10 合金与高强钢两种舰船结构材料的电偶腐蚀行为进行了研究, 并对其耦合的电绝缘判据进行了评估^[19], 仿真结果显示, 当 B10 合金与高强钢电偶对之间的绝缘电阻高于 4 k Ω 时, 可有效控制电偶腐蚀; 中船重工 725 所对钛合金及铜合金管路的电偶腐蚀行为进行了数值仿真研究^[20], 探索了材料间电偶腐蚀电位和电流密度的分布规律, 指出电偶腐蚀速率与管径和介质流速都呈正相关关系; 上汽通用五菱汽车股份有限公司利用电化学仿真方法^[21], 分析车身漆膜厚度状况, 对车身结构进行优化设计, 提高产品的防腐性能; 哈尔滨工程大学以及中船重工 725 研究所等单位也对阴极保护及其相关技术进行了模拟仿真研究^[22]; 海军工程大学还对水下船体因腐蚀产生的电场信号进行了数值仿真研究^[23, 24]。研究人员利用有限元法, 通过对潜艇外加电流阴极保护条件下的潜艇腐蚀相关静电场进行数值建模, 求解非线性极化条件下潜艇水下腐蚀相关静电场。结果指出: 当螺旋桨涂层发生局部破损时, 会有效降低潜艇腐蚀相关静电场, 降低潜艇被发现和触发水中武器的可能性, 为舰艇电场隐身提供了一种新的思路^[24]。

自 2001 年来, 海军研究院联合大连理工大学围绕舰船结构及其防护技术进行了大量的仿真研究。如: 阴极保护系统对螺旋桨叶根紧固螺栓开裂的影响、潜艇上层建筑结构防腐系统模拟、铝合金舰艇阴极保护系统模拟、某型驱逐舰轴系及其附件阴极保护电位分布及其影响研究以及舰轴紧固件腐蚀疲劳试验研究等。仿真结果为舰船结构腐蚀防护设计提供技术手段和支撑, 提高了舰船综合腐蚀防护能力。

2.2.1 阴极保护系统对螺旋桨叶根紧固螺栓开裂的影响

运用数值仿真方法, 通过 ANSYS 软件对船体及其附件(含螺旋桨及其紧固螺栓)进行 3D 建模, 计算水下船体结构外表面的保护电位分布, 见图 1。并根据仿真计算结果, 分析阴极保护系统对螺旋桨叶根紧固螺栓开裂的影响。模拟结果表明: 在 10 年的保护周期内, 螺旋桨叶根紧固螺栓保护电位变化较小, 螺栓的保护电位一直低于 800 mV; 由于阴极保护系统的存在, 因此不会直接导致螺栓处析氢反应的发生。以 10 年为一个保护周期, 原方案在第 8 年后会出现过保护问题, 需要增大阳极屏面积。

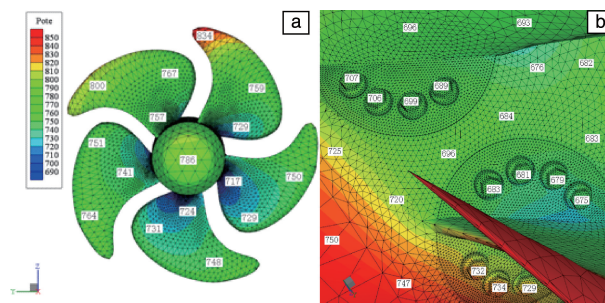


图 1 电位分布图: (a)螺旋桨, (b)螺栓

Fig. 1 Potential distribution diagrams: (a) propeller, (b) bolts

2.2.2 潜艇上层建筑结构防腐系统模拟

采用边界元法, 针对易受腐蚀的潜艇上层建筑内舱结构中表面、设备表面、管道表面以及牺牲阳极表面等建立计算模型^[25], 见图 2。并根据现行防腐系统的实际状态, 优化设计牺牲阳极系统。模拟结果表明: 采用一定初始质量和数量的铝合金牺牲阳极(设计寿命为 5 年), 对不同保护电流密度下的保护电位范围的变化趋势进行计算, 得到了上层建筑内舱结构阴极保护系统的关键参数, 证明了该阳极系统能够使上层建筑结构表面在 5 年保护周期中处于良好的防腐状态。

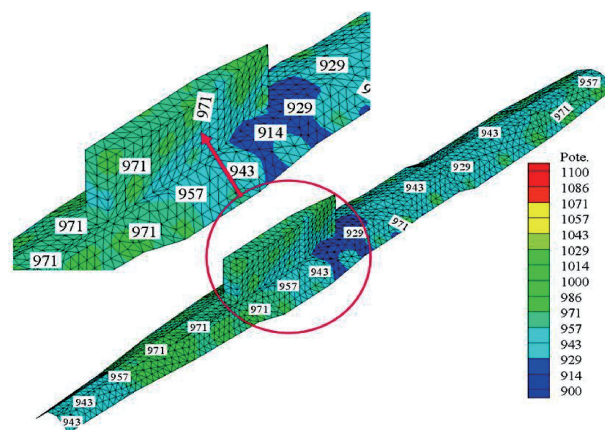


图 2 潜艇上层建筑表面保护电位分布^[25]

Fig. 2 Protection potential distribution of submarine superstructure surface^[25]

2.2.3 铝合金舰艇阴极保护系统模拟

考虑多种航行状态以及假设几种防腐涂层损伤的情况下, 采用边界元法模拟了铝合金船体表面保护电位分布、保护电流密度分布以及牺牲阳极消耗速度^[26]。该方法不仅优化了船体阴极保护系统的设计, 还预测了船体保护状态和牺牲阳极状态, 确定了牺牲阳极的有效极限体积, 保证整个船体表面的保护电位值在各种航速下都处于有效范围内, 确保船体在使用寿命内采取可靠的防腐措施。

上述的仿真研究对装备腐蚀模拟研究来说, 既有共

性问题也存在个性问题。其共性问题是,对不同装备进行腐蚀模拟既要从实际需要模拟的问题入手,选择合适的仿真方法;又要充分考虑装备真实的服役环境,合理建立模型和设置边界条件。例如:对于潜艇上层建筑的牺牲阳极系统进行模拟研究应采用边界元法设计,还需考虑干湿交替的问题。对不同的装备腐蚀问题进行模拟研究又面临各自的关键问题,如对潜艇上层建筑结构腐蚀防护系统进行模拟时,其关键问题有 3 点:①“屏蔽效应”问题,在潜艇上层建筑的牺牲阳极阴极保护系统中,产生“屏蔽效应”的原因主要来自两个方面,一是耐压壳及非耐压壳的隔挡板结构、各类设备等对诱导电场中电流的传播起阻碍作用;二是潜艇表面形成的保护电流会弱化潜艇结构的防腐效果,这是由于贵金属设备与潜艇之间处于电流短接状态时,会在其表面形成保护电流的“汇”。②潜艇浮出水面航行时的防腐问题,当潜艇浮出水面航行时,具有防腐作用的牺牲阳极系统失效,而潮湿的空气环境会加剧结构表面的腐蚀倾向,为了有效地缓解潜艇浮出水面航行时的腐蚀倾向,当潜艇潜水航行时,牺牲阳极系统需要在保证结构表面处于有效保护状态的同时,在结构表面上形成“钙质层”。③过保护问题,当牺牲阳极系统的作用使结构表面的局部区域处于过保护状态时,将加快防腐涂层出现损伤的过程,甚至导致结构材料发生氢脆而影响到潜艇的安全。针对上述关键问题,在采用边界元技术的基础上,为了减少因隔挡板等结构使牺牲阳极阴极保护系统的诱导电场模型复杂而造成的误差,可以进一步采用“分块边界元”技术实现正确的数值模拟计算。

3 面临的挑战

我国已经在材料、结构等方面进行了大量的腐蚀仿真模拟研究工作,积累了大量的数据;在装备的系统级、体系级仿真研究中,也积累了一些宝贵的经验。但与国外相比,仍存在以下不足:

(1)腐蚀仿真技术发展缺乏全局规划,管理机制不健全、技术规范缺乏。腐蚀仿真软件资源多、分布散,缺乏仿真软件集成的统一标准;缺乏模型和数据共享机制,数据互通存在障碍;缺乏全面、持续开展腐蚀仿真工作的管理制度和长效机制,如腐蚀仿真研究管理考核方法、数据共享策略、数据的补充机制等;缺乏相关的仿真试验评价的技术、方法、规范等。

(2)数据匮乏,难以支撑腐蚀仿真研究开展。多年来各单位已经积累了一些自然环境腐蚀数据,但装备种类多、使用环境复杂、贮存时间长,已有数据仍不能满足装备腐蚀防护控制设计分析及支撑全面开展装备腐蚀

仿真工作的需要。此外,对环境数据采集的不全面、不规范也造成了环境数据的交流困难,导致无法实现共享。缺乏全面、系统、规范的自然和平台环境的基础数据的支撑,已成为制约装备腐蚀仿真研究进一步深入开展的最重要因素。

(3)仿真精度和可靠度有待提高。在腐蚀仿真模拟方面,需要加强环境数据以及模型数据的积累,进一步提高仿真精度及可靠度。

4 发展趋势

对于装备腐蚀仿真技术的发展,应朝着全寿期、全尺寸、互操作性、可信性、重用性及大数据挖掘的方向发展。装备腐蚀仿真是一项系统工程,应系统有序地开展建模仿真工作,从材料级开始,逐步实现部件级、系统级,最终实现全寿期、全尺寸整机的建模仿真。建立全寿期、全尺寸模型往往系统复杂、成本高,因此提高模型系统的互操作性和重用性可以降低成本、节省建模时间。建模与仿真技术和大数据相结合,可以增强仿真结果的可信性和预测能力。

4.1 全寿期、全尺寸建模与仿真

腐蚀仿真模拟研究应贯穿装备的全寿期,从设计、制造到维护,如:选材、结构优化、工艺优化、防护技术优化等。仿真级别逐渐从以材料级、部件级为主转向以系统级、体系级为主。不断扩大腐蚀仿真技术的应用范围,最终实现全寿期、全尺寸、多种类、多型号的海军装备腐蚀倾向预测,为腐蚀仿真技术在工程上应用提供技术支撑。

4.2 环境建模与仿真

装备腐蚀离不开环境的影响。环境建模与仿真是指依靠包括陆地、海洋、大气和太空在内的整个自然环境空间领域具有权威性、完整性、多态性和一致性的数据,进行模型建立与仿真,为国防领域建模仿真提供有力的环境数据与模型数据的支撑。环境仿真的研究趋势将主要集中于综合自然环境数据、模型和仿真的互操作性、可信性与重用性,包括:环境数据模型和公共数据模型框架的搭建;环境数据的表示、映射与交换;环境数据库模型。

4.3 高性能与可信性仿真技术

仿真可信度是仿真的重要指标,迭代完善是行之有效的技术途径。倘若仿真失去可信度,对装备腐蚀的仿真就毫无意义。仿真可信度技术未来发展趋势聚焦在加强对仿真系统生命周期的校核、验证与确认的管理以及充分利用采集的外场试验数据加强模型验证等几个方面。

4.4 基于区块链的建模仿真技术

装备腐蚀仿真产生的数据具有典型的大数据特

性^[27], 然而目前大数据仍存在数据易被篡改和数据格式不统一等问题。利用区块链技术与大数据相结合, 激活了大数据的海量、全面、时效等固有优点, 弥补了其数据格式不统一及缺乏有效共享等缺陷, 为腐蚀仿真技术的快速发展提供了一个新思路。

5 展 望

为了进一步发展装备腐蚀仿真技术, 全面推进基于模拟仿真技术的装备腐蚀预测工作, 需要从以下几个方面着手:

(1) 规范数据积累、仿真流程及试验验证, 包括对腐蚀数据的收集范围、整理格式、存储方式等进行统一规定; 规范仿真流程及试验验证, 使其标准化, 以建立系统化、规范化的装备腐蚀数据库; 建立腐蚀数据的交流共享机制, 避免同类腐蚀数据的重复获取和整理, 减少不必要的时间浪费, 为建设装备材料全系统腐蚀数据库提供基础数据支持; 建立腐蚀数据库运行及维护机制, 保证数据库的正常运行, 并且对数据库进行定期维护, 及时补充新的腐蚀数据, 及时更正出现的问题数据, 以保证装备腐蚀数据库的准确性和适用性。

(2) 在现有模拟仿真系统基础上, 进行核心、关键部件和系统级、体系级模拟系统的建设, 充分研究全寿期各阶段试验数据, 充分验证仿真试验与实际试验结果的相关度, 提高仿真的可信度^[28]。

(3) 在建立了系统化、精细化腐蚀数据库后, 研究不同因素对装备耐蚀性的影响规律, 如: 服役环境、工艺、组织、成分等, 采用先进的数据分析技术, 再结合腐蚀数据库, 建立装备腐蚀模型和开发服役寿命预测的软件, 从而对整个装备的腐蚀性能做出快速评价以及对其服役寿命进行快速预测, 并为新型装备的研制提供指导方案。

参考文献 References

- [1] 李相波, 陈光章, 王洪仁, 等. 装备环境工程[J], 2006, 3(4): 70-73.
LI X B, CHEN G Z, WANG H R, *et al.* Equipment Environmental Engineering[J], 2006, 3(4): 70-73.
- [2] 朱蕾, 王连杰, 许明, 等. 装备环境工程[J], 2007, 4(3): 91-97.
ZHU L, WANG L J, XU M, *et al.* Equipment Environmental Engineering[J], 2007, 4(3): 91-97.
- [3] ZAMANI N G, CHUANG J M. Optimal Control Applications & Methods[J], 1987, 8(4): 339-350.
- [4] STEVEN HOU L, SUN W. International Journal for Numerical Methods in Engineering[J], 1994, 37(16): 2779-2796.
- [5] TREVELLYAN J, HACK H P. Analysis of Stray-Current Corrosion Problems using the Boundary Element Method [M/OL]// Boundary Element Technology IX. London: WIT Press, 1994: 347-356. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-modelling-and-simulation/8/11225>
- [6] DEGIORGI V G, THOMAS E D, LUCAS K E, *et al.* A Combined Design Methodology for Impressed Current Cathodic Protection Systems [M/OL]. Boundary Element Technology XI. London: WIT Press, 1996: 335-345. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-modelling-and-simulation/15/8745>
- [7] 汪新宇, 孙建红. 国外舰船工程[J], 2005(4): 44.
WANG X Y, SUN J H. International Ship Engineering [J], 2005 (4): 44.
- [8] 刘晓方, 黄淑菊, 王汉功, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 1998, 10(4): 141-148.
LIU X F, HUANG S J, WANG H G, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology[J], 1998, 10(4): 141-148
- [9] 文邦伟, 朱玉琴. 装备环境工程[J], 2011, 8(1): 42-47.
WEN B W, ZHU Y Q. Equipment Environmental Engineering [J], 2011, 8(1): 42-47.
- [10] 刘静, 罗勇, 周漪, 等. 装备环境工程[J], 2014, 11(6): 124-129.
LIU J, LUO Y, ZHOU Y, *et al.* Equipment Environmental Engineering [J], 2014, 11(6): 124-129.
- [11] 王光耀, 张国强, 郑晓梅. 北京化工大学学报[J], 1995, 22(2): 71-75.
WANG G Y, ZHANG G Q, ZHENG X M. Journal of Beijing University of Chemical Technology [J], 1995, 22(2): 71-75.
- [12] 王光耀, 张国强, 郑晓梅, 等. 全面腐蚀控制[J], 1995, 9(4): 7-10.
WANG G Y, ZHANG G Q, ZHENG X M, *et al.* Total Corrosion Control [J], 1995, 9(4): 7-10.
- [13] 屈祖玉, 李长荣, 王光雍, 等. 北京科技大学学报[J], 1994, 40(1): 68-72.
QU Z Y, LI C R, WANG G Y, *et al.* Journal of University of Science and Technology Beijing [J], 1994, 40(1): 68-72.
- [14] 李洪锡, 张淑勤, 刘寿荣. 腐蚀科学与防护技术[J], 1992, 4(3): 200-203.
LI H X, ZHANG S Q, LIU S R. Corrosion Science and Protection Technology [J], 1992, 4(3): 200-203.
- [15] 邓春龙, 孙明先, 李文军, 等. 腐蚀科学与防护技术[J], 2005, 17(6): 422-424.
DENG C L, SUN M X, LI W J, *et al.* Corrosion Science and Protection Technology [J], 2005, 17(6): 422-424.
- [16] 陈跃良, 赵红君, 王安东, 等. 失效分析与预防[J], 2017, 12(4): 210-215.
CHEN Y L, ZHAO H J, WANG A D, *et al.* Failure Analysis and Prevention [J], 2017, 12(4): 210-215.
- [17] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 装备环境工程[J], 2017, 14(3): 39-46.

- WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, *et al.* Equipment Environmental Engineering[J], 2017, 14(3): 39-46.
- [18] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 材料开发与应用[J], 2017, 32(1): 80-88.
- WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, *et al.* Development and Application of Materials[J], 2017, 32(1): 80-88.
- [19] 雷冰, 胡胜楠, 卢云飞, 等. 腐蚀与防护[J], 2019, (7): 497-501.
- LEI B, HU S N, LU Y F, *et al.* Corrosion and Protection[J], 2019 (7): 497-501.
- [20] 王振华, 白杨, 马晓, 等. 中国腐蚀与防护学报[J], 2018, 38(4): 97-102
- WANG Z H, BAI Y, MA X, *et al.* Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection[J], 2018, 38(4): 97-102.
- [21] 刘强强, 黄宗斌, 廖毅. 新技术新工艺[J], 2017(11): 29-31.
- LIU Q Q, HUANG Z B, LIAO Y. New Technology & New Process [J], 2017(11): 29-31.
- [22] 郭宇. 船舶与海洋结构物阴极保护电位数值仿真与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- GUO Y. Numerical Simulation and Optimization Design of Cathodic Protection Potential for Ships and Marine Structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [23] 杨振, 王向军, 张民. 系统仿真学报[J], 2009, 21(19): 6029-6032.
- YANG Z, WANG X J, ZHANG M. Journal of System Simulation[J], 2009, 21(19): 6029-6032.
- [24] 刘春阳, 汪小娜, 王向军, 等. 中国舰船研究[J], 2018, 13(S1): 185-191.
- LIU C Y, WANG X N, WANG X J, *et al.* Chinese Journal of Ship Research[J], 2018, 13(S1): 185-191.
- [25] 方志刚, 刘斌. 潜艇结构腐蚀防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 280.
- FANG Z G, LIU B. Corrosion Protection of Submarine Structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 280.
- [26] 方志刚, 黄一. 船舶工程[J], 2012, 34(4): 73-76.
- FANG Z G, HUANG Y. Ship Engineering[J], 2012, 34(4): 73-76.
- [27] 王赞, 蔡帆. 兵工自动化[J], 2015, 34(7): 15-20.
- WANG Y, CAI F. Ordnance Industry Automation[J], 2015, 34(7): 15-20.
- [28] 曹建国. 推进技术[J], 2018, 39(5): 961-970.
- CAO J G. Journal of Propulsion Technology[J], 2018, 39(5): 961-970.

(编辑 惠 琼)