

模拟海水管路的电偶效应数值仿真研究

张宇, 李相波, 刘广义, 李开伟, 谭振江, 侯健

(洛阳船舶材料研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: **目的** 研究钛合金模拟海水管路与船体间在不同电连接方式下的电位以及腐蚀电流密度分布, 明确防腐措施。**方法** 针对钛合金模拟海水管路与船体结构, 基于有限元建立仿真模型, 开展两者的电偶效应数值仿真计算, 重点研究两者电连接状态、接触界面绝缘状态和所有结构体单元绝缘状态的电位和电流密度分布情况。**结果** 在船体钢与钛合金管路系统电连接时, 船体钢处于加速腐蚀状态, 且与海水管路交界面处腐蚀最为严重, 而海水管路处于阴极保护状态。当海水管路结构与船体结构之间绝缘时, 船体与海水管路均呈现出自腐蚀状态, 两系统间不存在电偶腐蚀。当海水管路结构与船体结构之间绝缘, 且海水管路的各单元间也绝缘时, 船体与管路海水管路各单元均呈现出自腐蚀状态, 两系统间以及海水管路各单元间不存在电偶腐蚀。**结论** 钛合金管路与船体钢电连接, 将会导致船体钢发生电偶腐蚀, 尤其是两者交界面处, 腐蚀最为严重。异种金属间的绝缘处理可以阻止电偶腐蚀的发生, 且只需要将异种金属之间绝缘, 无需将同种材质的结构体之间进行绝缘处理。

关键词: 海水管路; 电偶腐蚀; 数值仿真

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0101-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.04.016

Numerical Simulation Research on Galvanic Effect of Simulating Seawater Pipeline

ZHANG Yu, LI Xiang-bo, LIU Guang-yi, LI Kai-wei, TAN Zhen-jiang, HOU Jian

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the potential and corrosion current density distribution between the titanium alloy simulated seawater pipeline and the ship hull under different electrical connections and clarify the anti-corrosion measures. Aiming at the titanium alloy simulating seawater pipeline and hull structure, a simulation model was established based on finite element to carry out the numerical simulation calculation of the galvanic effect of the two, focusing on the electrical connection state of the titanium alloy simulating seawater pipeline and hull structure, the insulation state of the contact interface, and the potential of the insulation state of all structural units. The distribution of current density and current density play a guiding role in suppressing galvanic corrosion in actual projects. The simulation results show that when the hull steel is electrically connected to the titanium alloy pipeline system, the hull steel is in a state of accelerated corrosion, and the corrosion at the interface with the seawater pipeline is the most serious, while the seawater pipeline is in a cathodic protection state. When the seawater pipeline

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2020-03-22

Received: 2021-01-22; Revised: 2020-03-22

作者简介: 张宇 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀防护。

Biography: ZHANG Yu (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion protection.

引文格式: 张宇, 李相波, 刘广义, 等. 模拟海水管路的电偶效应数值仿真研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 101-107.

ZHANG Yu, LI Xiang-bo, LIU Guang-yi, et al. Numerical Simulation Research on Galvanic Effect of Simulating Seawater Pipeline[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 101-107.

structure is insulated from the hull structure, both the hull and seawater pipeline appear to be self-corrosive, and there is no galvanic corrosion between the two systems. When the seawater pipeline structure is insulated from the hull structure and the seawater pipeline and the units are also insulated, each unit of the ship's hull and pipeline seawater piping is in a self-corrosive state, and there is no galvanic corrosion between the two systems and between the seawater pipeline units. The electrical connection of titanium alloy piping and hull steel will cause galvanic corrosion of hull steel, especially at the interface between the two, where the corrosion is the most serious. The insulation treatment between dissimilar metals can prevent the occurrence of galvanic corrosion, and only needs to insulate the dissimilar metals, and there is no need to insulate the structures of the same material.

KEY WORDS: sea water pipeline; galvanic corrosion; numerical simulation

船体海水管路系统非常复杂,分布在船体的各个部分,主要包括各种管路、阀体、冷却装置和附属设备,对船体的冷却、动力起到重要作用,是各设备正常运行的基础保障。由于目前船体的海水管路设计不够系统,因此船体管路的各个部分的材料多种多样,金属材料的不同,将导致其接触海水后的电位存在差异,发生电偶腐蚀,导致严重的腐蚀穿孔问题,危及行船安全。因此,近几十年,船体海水管路的电偶腐蚀问题成为各大船厂和设计公司的关注重点^[1-5]。

20 世纪 90 年代以后,随着这工业基础的发展,铜基合金的发展迅速,由于其良好的耐蚀性,且焊接技术的提升,大量运用在船体的海水管路系统中。在 21 世纪初,钛基合金由于其具备更好的耐蚀性,成为铜基合金的替代品而广泛使用。但铜基合金和钛基合金的电位偏正,在与船体钢接触的位置会发生电偶腐蚀,将会导致船体钢加速腐蚀,腐蚀问题严重,出险多起危险事故。因此,近 10 年,各国家船体设计公司将腐蚀设计重心转移至异种金属的电偶腐蚀方面^[6-14]。

近几十年,随着数学计算方法和计算机技术的飞速发展,数值仿真技术在电偶腐蚀计算领域得到了广泛应用,包括有线差分法、有限元和边界元法等,成为腐蚀领域等预测电偶腐蚀的有效手段之一。与传统的经验方法相比,数值模拟计算可以预测被研究系统的电偶腐蚀倾向,更直观地观察到电偶腐蚀严重的区域,更有针对性地对电偶腐蚀区域进行特定的绝缘处理等优点。因此,利用数值仿真模拟对海水管路中的异种金属的电偶腐蚀情况进行研究具有重要意义^[15-21]。

本文针对模拟的简易管路系统,通过 CP manager 软件建立管路的仿真模型,利用电化学工作站对涉及材料的电极试样进行极化曲线测定,确定仿真计算边界条件,分别对电连接状态、异种金属接触处绝缘和所有结构体之间都绝缘的 3 种工况进行仿真计算,研究以上不同位置的绝缘方式对海水管路的电偶腐蚀的抑制效果,为实际工况的海水管路中的异种金属防电偶腐蚀设计作预测指导。

1 建模

1.1 对象结构概况

本项目针对简易船体及其内部简易海水管路为仿真模拟对象,整体透视图见图 1,海水管路渲染图如图 2 所示。其中,海水管路采用多段管组合的方式连接,所有管段的材料都为 Ti75,简易船体为高强度 907。

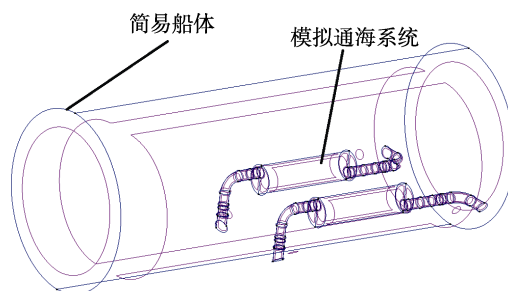


图 1 船体和海水管路整体透视图
Fig.1 Overall perspective view of the hull and seawater pipeline

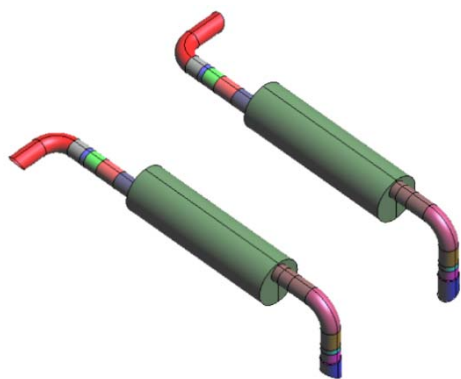


图 2 海水管路简化结构渲染图
Fig.2 Rendering diagram of simplified structure of seawater pipeline

1.2 边界条件测定

海水管路全部采用 Ti75 材料,船体为高强度 907,将材料加工成 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,

一端钻 M3 mm×5 mm 的螺孔, 用螺钉拧上铜导线。然后将试样用环氧树脂进行封样, 只留取非钻孔端面为工作面, 待树脂完全固化后, 用水砂纸将工作面依次打磨至 1200#。用乙醇擦拭试样表面, 冷风吹干, 制备出电极试样。

采用三电极体系进行电化学测试, 管线钢试样、饱和甘汞电极、铂片依次为工作电极、参比电极和辅助电极, 动电位极化的极化扫描速率为 10 mV/min, 测试采用 AMETEK VersaSCA 工作站。经工作站测定, 907 试样和 Ti75 的极化曲线如图 3 所示。将极化曲线数据导入仿真软件中, 生产边界条件调入计算参数中。在数值仿真过程中, 极化曲线的电位与电流对应关系分别作为船体和管路的电位和电流计算的已知条件。

1.3 基础模型建立

海水管路在工况一模式下为所有结构体都电连接状态, 工况二为海水管路 with 船体的交界面进行绝缘处理, 其他结构体之间电连接, 工况三为研究体系内所有的结构体单元都进行绝缘处理, 如图 4 所示, 图

中深色区域表示绝缘处理。

1.4 网格划分

将建立模型导入到 CPManager 中, 在软件中设置网格尺寸, 网格尺寸为 50~100 mm, 软件自动进行网格的划分, 如图 5 所示。

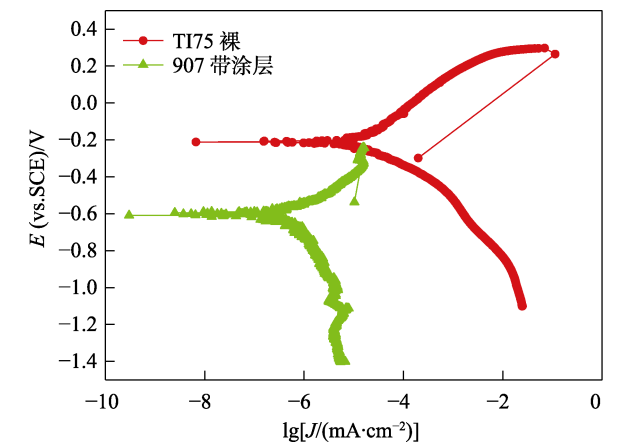


图 3 极化曲线
Fig.3 Polarization curve

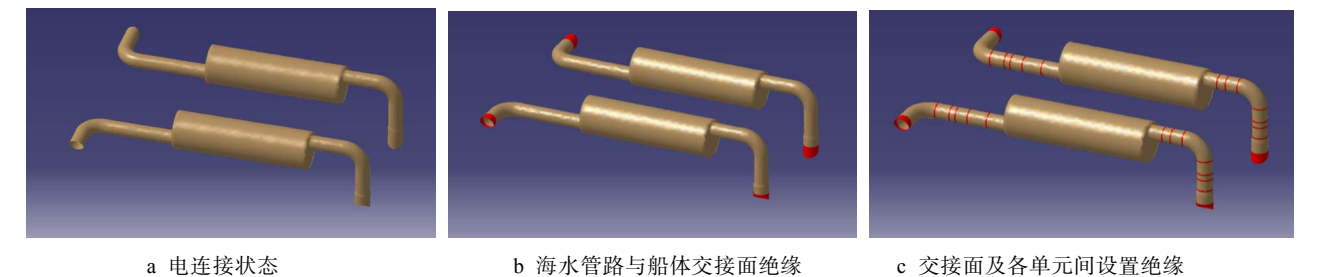


图 4 3 种工况下海水管路模型

Fig. 4 Model diagram of seawater pipeline under three working conditions: a) electrical connection state; b) seawater pipeline and hull interface insulation; c) interface and insulation between units

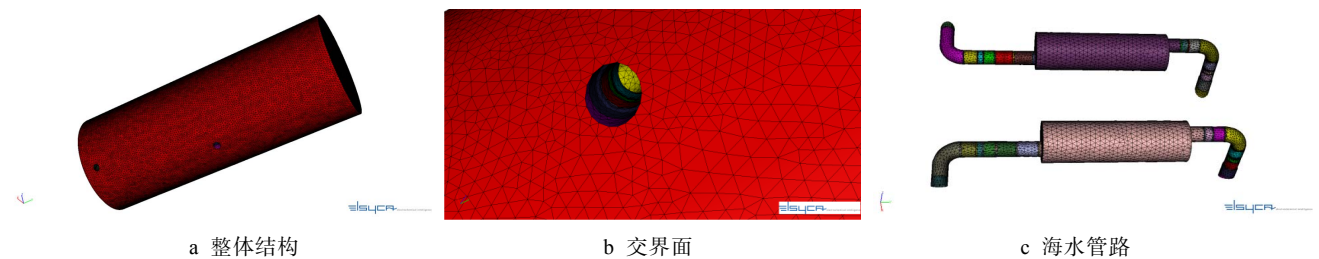


图 5 整体结构、交界面和海水管路的网格

Fig.5 Grid diagram of overall structure (a), interface (b) and sea water pipeline (c)

2 结果与讨论

2.1 电连接状态

计算电导通状态, 即系统中各个部件及系统与船体之间保持电导通, 计算钛合金管路对船体钢 (尤其是两者交接处) 电偶腐蚀影响, 包括管路和船体的腐

蚀电位分布及电流密度分布。

在 CPmanager 软件中计算船体结构与海水管路存在电连接情况时的结构电位以及电流密度分布。将计算结果在 XPlorer 中进行查看分析, 见图 6—8。根据计算结果可知, 船体结构电位分布区间为-384.69~-388.79 mV (vs. SCE, 下同), 电流密度分布区间为 0.098 8~0.103 3 mA/m², 呈电流流出状态, 加速

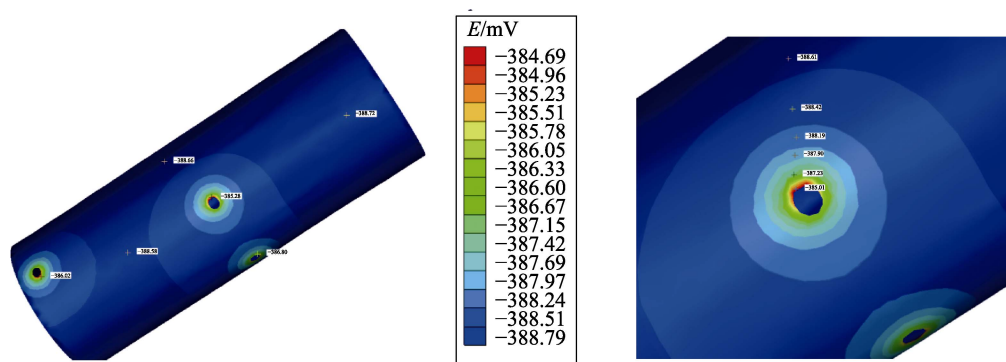


图 6 船体电位分布 (工况一)
Fig.6 Hull potential distribution diagram (condition I)

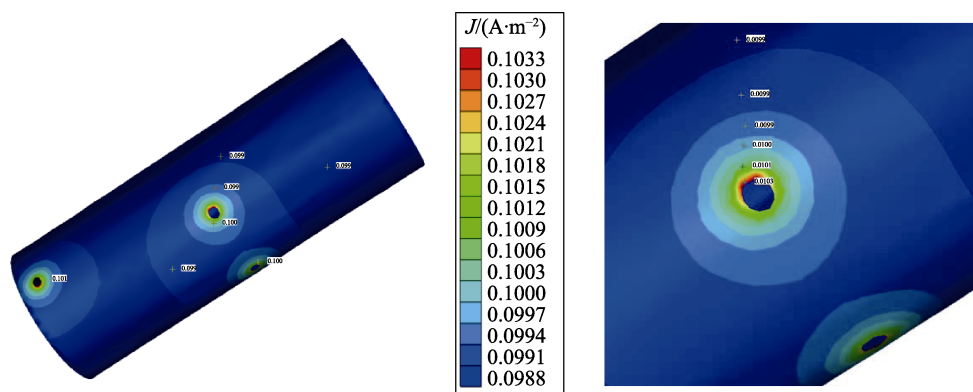


图 7 船体电流密度分布 (工况一)
Fig.7 Hull current density distribution map (condition I)

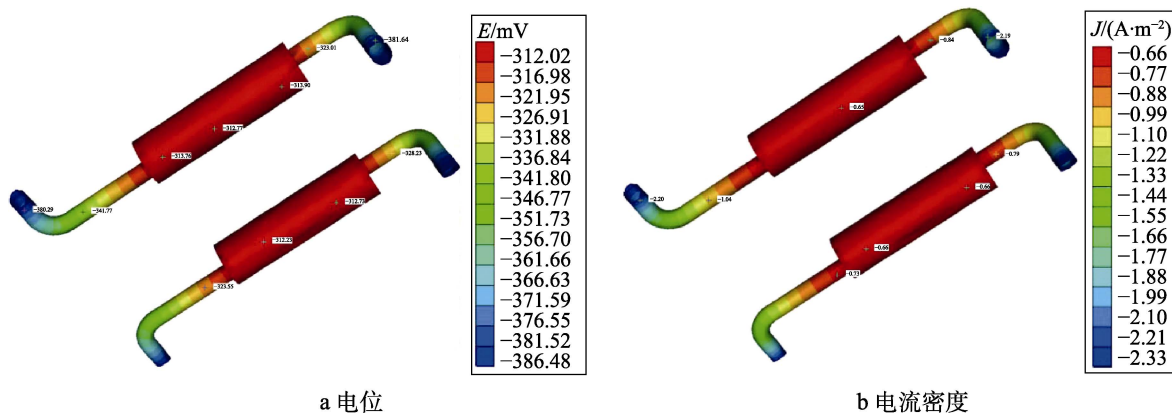


图 8 海水管路的电位和电流密度分布 (工况一)
Fig.8 Potential (a) and current density (b) distribution diagram of seawater pipeline (condition I)

腐蚀；管路电位分布区间为 $-312.02 \sim -386.48$ mV，电流密度分布区间为 $-0.66 \sim -2.33$ mA/m²，呈电流流入状态，阴极保护。根据极化曲线以及计算结果分析，由于船体结构为钢，自腐蚀电位更负。当钛合金管路与船体结构电连接时，船体结构电位正向偏移，发生加速腐蚀现象，尤其是交界面处，腐蚀较为严重，而管路的电位负向偏移，处于阴极保护状态。

2.2 只交界面进行绝缘措施

计算界面进行绝缘措施状态，即在前面模型基础

上，在钛合金系统与船体界面处（即阀门与杯形管节交接处）施加 $1\ 000\ \Omega$ 电阻，计算有绝缘措施后海水管路

与船体界面船体的腐蚀电位分布及电流密度分布。在 CPmanager 软件中计算工况二（即船体结构与海水管路存在绝缘措施情况时）结构电位以及电流密度分布，结果见图 9 和图 10。船体结构电位分布均为 -608.41 mV，电流密度分布均为 0 mA/m²，结构表面无电流流入流出；海水管路 A 结构电位分布均为 -220.11 mV，电流密度分布均为 0 mA/m²，结构表面无电流流入流出。根据极化曲线以及计算结果分析，

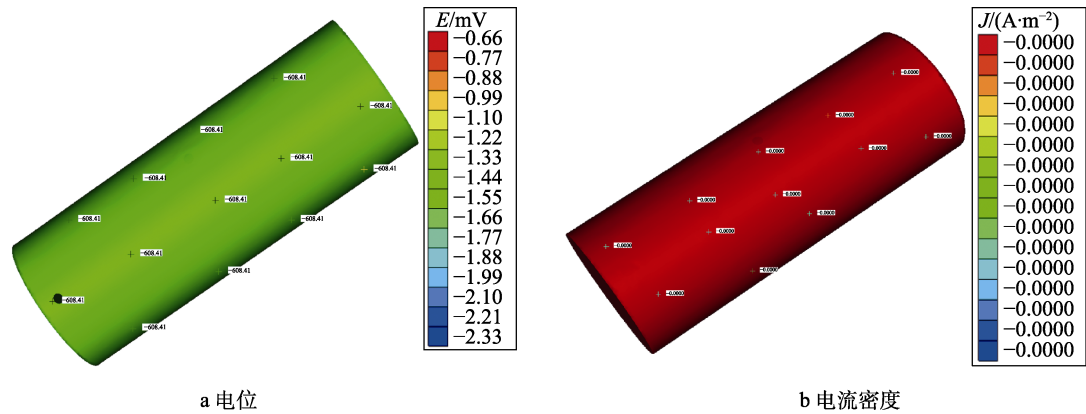


图 9 船体电位和电流密度分布 (工况二)
Fig.9 Potential (a) and current density (b) distribution diagram of Hull (condition II)

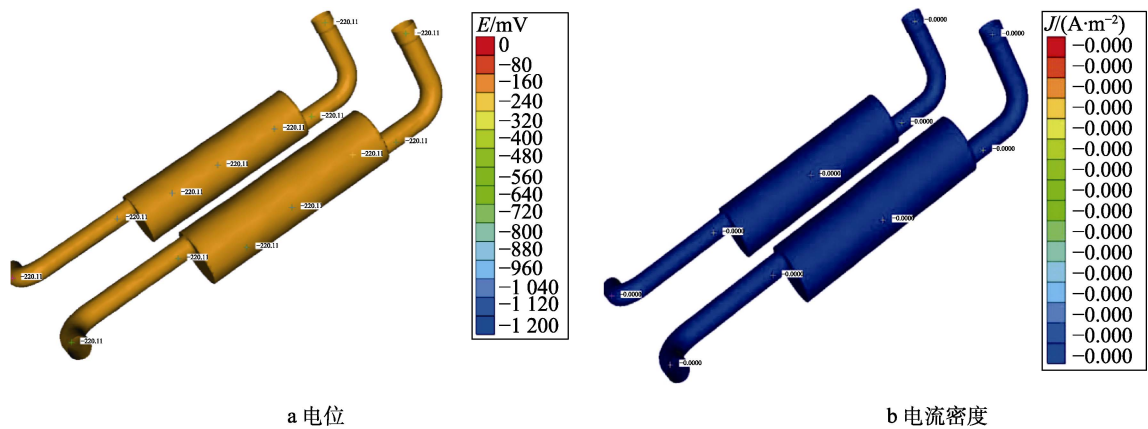


图 10 海水管路电位和电流密度分布 (工况二)
Fig.10 Potential (a) and current density (b) distribution diagram of seawater pipeline (condition II)

在工况二情况下, 船体与海水管路 A 均呈现出自腐蚀状态, 两系统间不存在电偶腐蚀。

2.3 所有界面都绝缘

计算系统绝缘状态, 在工况二建模基础上, 除系统与船体交界面进行绝缘措施外, 系统每个部件与其他部件接触法兰设为绝缘, 计算系统内部, 尤其是海水管路、船体电位分布及腐蚀电流密度大小。

在 CPmanager 软件中计算工况三即船体结构与海水管路存在绝缘连接, 且海水管路内部各结构之间也绝缘情况时结构电位以及电流密度分布, 结果见图 11—13。船体结构电位分布均为 -608.41 mV, 电流密度分布均为 0 mA/m², 结构表面无电流流入流出; 海水管路 A 结构电位分布区间均为 -219.56 mV, 电流密度分布均为 0 mA/m², 结构表面无电流流入流出。根据极化曲线以及计算结果分析, 在工况三情况下,

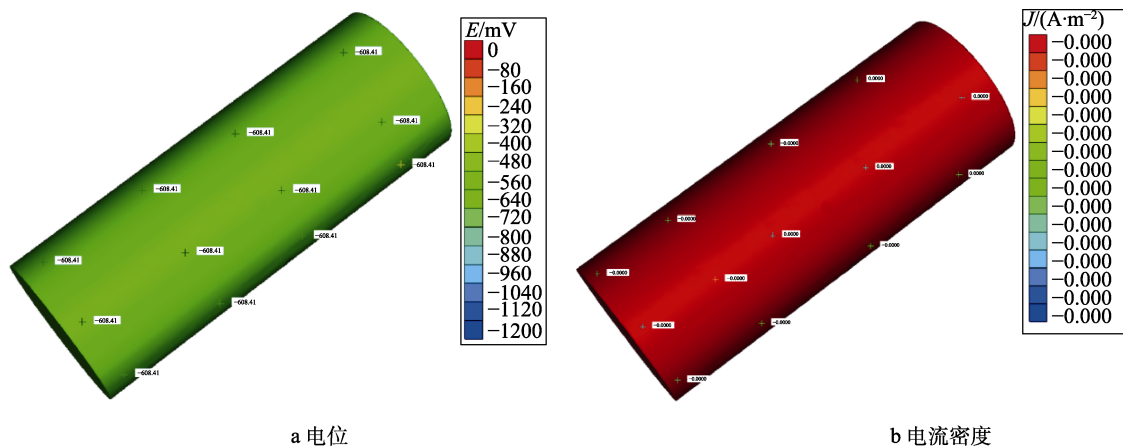


图 11 船体电位和电流密度分布 (工况三)
Fig.11 Potential (a) and current density (b) distribution diagram of Hull (condition III)

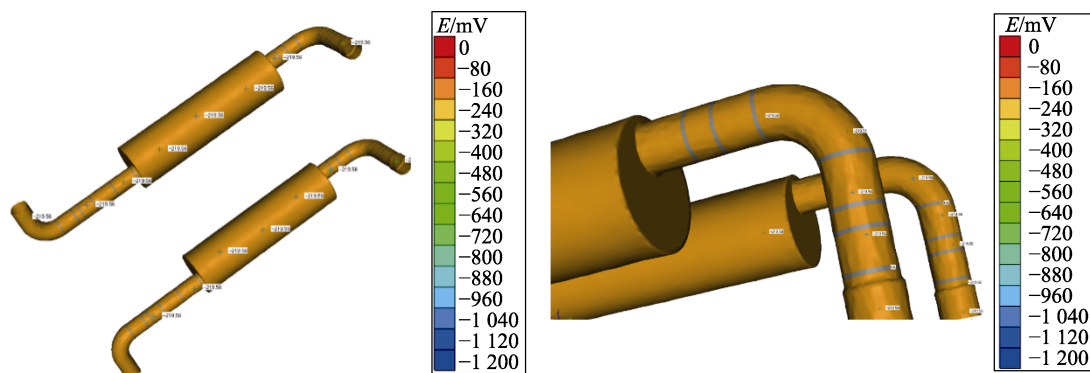


图 12 海水管路电位分布 (工况三)

Fig.12 Potential distribution diagram of seawater pipeline (condition III)

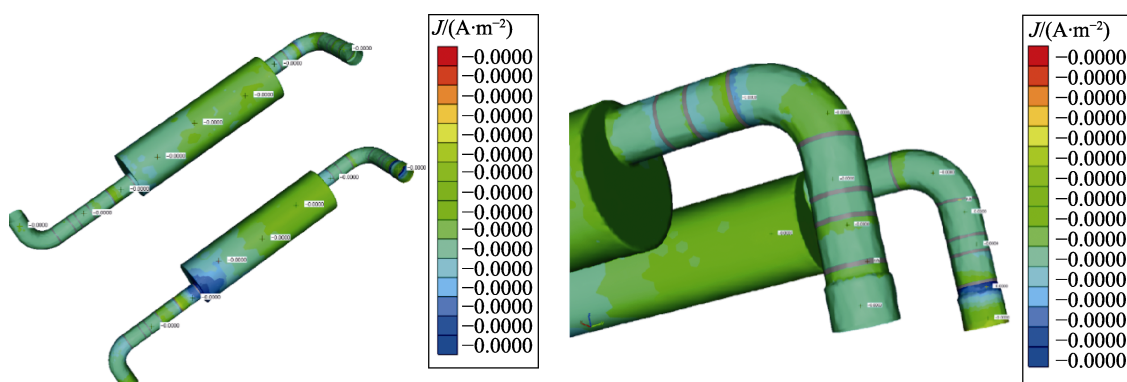


图 13 海水管路电流密度分布 (工况三)

Fig.13 Current density distribution map of seawater pipeline (condition III)

船体与海水管路 A 均呈现出自腐蚀状态, 两系统间不存在电偶腐蚀。

3 结论

本项目采用数值模拟方法, 利用 CPmanager 软件对船体及与之相连接的海水管路进行仿真模拟, 计算船体结构与管路结构之间存在绝缘以及电连接状态的电位以及电流密度分布情况。计算结果表明:

1) 在船体钢和钛合金海水管路系统电导通状态, 即系统中各个部件及系统与船体之间保持电导通, 钛合金管路电位负移, 电流方向为流入, 处于阴极保护状态; 而船体结构的电位正移, 电流方向为流出, 处于加速腐蚀状态, 尤其是船体钢与海水管路接触面处, 电偶腐蚀最为严重。

2) 在海水管路和船体结构的界面处进行绝缘处理时, 船体与海水管路均呈现出自腐蚀状态, 无电流流入流出, 两系统间不存在电偶腐蚀; 在海水管路结构与船体结构之间绝缘且海水管路各单元间也进行绝缘处理时, 船体与海水管路各单元均呈现出自腐蚀状态, 无电流流入流出, 两系统间以及系统各单元间不存在电偶腐蚀。

3) 异种金属间的绝缘处理可以阻止电偶腐蚀的发生, 且只需要将异种金属之间绝缘, 无需将同种材质的结构体之间进行绝缘处理。

参考文献:

- [1] 杨光付, 裘达夫, 潘金杰, 等. 舰船海水管路腐蚀风险分析与综合评估方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 142-148.
YANG Guang-fu, QIU Da-fu, PAN Jin-jie, et al. Corrosion Risk Assessment and Comprehensive Evaluation of Ship Sea Water Pipe Systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 142-148.
- [2] 黄璐琼, 武兴伟. 铜镍合金管在舰船海水管路中的应用[J]. 船舶, 2011, 22(1): 40-43.
HUANG Lu-qiong, WU Xing-wei. Application of the Ablate Pipe in the Marine Seawater Pipe System[J]. Ship & Boat, 2011, 22(1): 40-43.
- [3] 常辉, 王向东, 周廉. 钛合金及其在舰船装备上的应用现状与趋势[J]. 中国材料进展, 2014, 33(S1): 603-607.
CHANG Hui, WANG Xiang-dong, ZHOU Lian. Present Situation and Development Trend of Titanium Alloy and Its Applications in Ships[J]. Materials China, 2014, 33(S1): 603-607.

- [4] 黎理胜, 徐文珊, 陈万宏, 等. 钛合金在铝合金舰船海水管路系统的应用[J]. 船舶, 2016, 27(3): 27-33.
LI Li-sheng, XU Wen-shan, CHEN Wan-hong, et al. Application of Titanium Alloy in Seawater Piping of Aluminum Alloy Warship[J]. Ship & Boat, 2016, 27(3): 27-33.
- [5] 钱江, 赵满. 美国舰船钛合金海水管路设计考虑与陆上试验研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(15): 153-157.
QIAN Jiang, ZHAO Man. Design Consideration and Land Test Study of Titanium Seawater Piping Systems Used in US Naval Ships[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(15): 153-157.
- [6] FRED A K. Application of Titanium for Shipboard Seawater Piping Systems[R]. El Segundo: Norflok Computer Sciences Corporation, 2009.
- [7] SHIFLER D A. Advanced Measures to Control Galvanic Corrosion in Piping Systems[R]. [s.l.]: Defense Technical Information Center, 1999.
- [8] 陈光章, 吴建华, 许立坤, 等. 舰船腐蚀与防护[J]. 舰船科学技术, 2001, 23(2): 38-43.
CHEN Guang-zhang, WU Jian-hua, XU Li-kun, et al. Corrosion and Protection of Ships[J]. Ship Science and Technology, 2001, 23(2): 38-43.
- [9] 罗雯军, 彭戈, 蔡淑艳. 舰船海水管路系统电偶腐蚀控制技术[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(15): 98-100.
LUO Wen-jun, PENG Ge, CAI Shu-yan. Summary of Research on Galvanic Corrosion Control Technology of Seawater Pipeline System[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(15): 98-100.
- [10] 曾荣辉, 彭玉辉, 张威. 船舶海水管路防腐蚀研究[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(3): 74-76.
ZENG Rong-hui, PENG Yu-hui, ZHANG Wei. Protection Measures Against Erosion of Seawater Pipeline of Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(3): 74-76.
- [11] 李斌, 郭嵩, 李伟, 等. 海水管路破损原因分析及防治措施[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 177-181.
LI Bin, GUO Song, LI Wei, et al. Research on Breakage Cause of Sea-Water Supply Pipe and Control Measures[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(7): 177-181.
- [12] 高康林, 朱杰山. 船舶海水管路腐蚀机理分析与防护措施[J]. 中国修船, 2002, 15(1): 38-39.
GAO Kang-lin, ZHU Jie-shan. Analysis and Protective Measures to Corrosion Mechanism of Marine Sea-Water Pipe[J]. China Shiprepair, 2002, 15(1): 38-39.
- [13] 王广夫, 董彩常, 吴恒, 等. 某型舰船淡化海水管路腐蚀失效原因及治理建议[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(1): 54-56.
WANG Guang-fu, DONG Cai-chang, WU Heng, et al. Corrosion Reason and Management Advice for Desalination Seawater Piping in a Certain Ship[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(1): 54-56.
- [14] 刘国栋, 杨银清, 杜章林, 等. 舰船常用海水管材电化学腐蚀及电绝缘问题[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(3): 122-128.
LIU Guo-dong, YANG Yin-qing, DU Zhang-lin, et al. Discussion on Electrochemical Corrosion and Electrical Insulation of Common Marine Pipes[J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(3): 122-128.
- [15] 兰志刚. 海洋石油平台导管架阴极保护数值仿真研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
LAN Zhi-gang. Studies on Cathodic Protection Modeling for Offshore Jackets[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [16] 郭宇. 船舶与海洋结构物阴极保护电位数仿真与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
GUO Yu. Numerical Simulation and Optimization of Cathodic Protection for Ship and Ocean Structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [17] 张鹏. 滨海电厂凝汽器阴极保护数值仿真研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
ZHANG Peng. Research on Numerical Simulation of Cathodic Protection for Coastal Power Plant Condenser[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [18] 张明. 电厂海水冷却系统泵体阴极保护数值仿真和优化设计[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
ZHANG Ming. Numerical Simulation and Optimization Design of Pump of Power Plant Cooling System under Cathode Protection[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [19] 邢少华, 彭衍磊, 张繁, 等. 压载舱阴极保护系统性能仿真及优化[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 5-9.
XING Shao-hua, PENG Yan-lei, ZHANG Fan, et al. Numerical Simulation and Optimization of Ballast Tank's Cathodic Protection System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 5-9.
- [20] 王振华, 白杨, 马晓, 等. 钛合金和铜合金管路电偶腐蚀数值仿真[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(4): 403-408.
WANG Zhen-hua, BAI Yang, MA Xiao, et al. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion for Couple of Ti-Alloy with Cu-Alloy in Seawaters[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(4): 403-408.
- [21] 郑俊涛. 船用上层建筑与管路典型材料海水腐蚀研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2009.
ZHENG Jun-tao. Seawater Corrosion Research of the Typical Ship Superstructure and Pipe Materials[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2009.

责任编辑: 刘世忠