

船舶海水管路直流杂散电流仿真研究

邢少华¹, 杨光付², 刘广义¹, 郑斐¹, 徐传鑫¹

(1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237;
2. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100073)

摘要: 目的 针对某型船海水管路杂散电流腐蚀穿孔问题, 研究海水管路直流杂散电流密度与直流电气设备机壳绝缘电阻关系, 评估海水管路直流杂散电流腐蚀风险, 提出直流电气设备机壳绝缘电阻要求, 为船舶海水管路杂散电流控制提供技术支撑。方法 根据欧姆定律和腐蚀电化学原理, 建立船体与海水管路直流杂散电流腐蚀仿真方法, 模拟海水管路直管、弯管以及某船海水管路系统结构, 以 B10 铜镍合金极化曲线为边界条件, 开展管壁直流杂散电流密度仿真研究, 并根据法拉第定律计算直流杂散电流腐蚀速率。结果 直流电气设备接地产生的直流杂散电流大部分流入船体, 仅有少部分流入海水管路, 正常情况下, 机壳绝缘电阻大于 1 MΩ, 直流电气设备接地不会导致海水管路发生杂散电流腐蚀。结论 为避免直流电气设备接地造成海水管路杂散电流腐蚀, DC380 V 和 DC220 V 电气设备机壳绝缘电阻应分别不小于 211 Ω 和 123 Ω。

关键词: 管路; 直流杂散电流; 腐蚀; 数值仿真; 绝缘电阻; 铜镍合金

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0093-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.014

Numerical Simulation of DC Stray Current on Seawater Pipe of Ship

XING Shao-hua¹, YANG Guang-fu², LIU Guang-yi¹, ZHENG Fei¹, XU Chuan-xin¹

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China; 2. Naval Research Academy of PLA, Beijing 100073, China)

ABSTRACT: In view of the stray current corrosion perforation problem of seawater pipelines of a certain type of ship, the relationship between the DC stray current density of seawater pipelines and the insulation resistance of DC electrical equipment enclosures is studied, the risk of DC stray current corrosion of seawater pipelines is evaluated, and the insulation resistance requirements of the enclosure of DC electrical equipment are proposed to provide technical support for the control of stray currents in marine seawater pipelines. According to Ohm's law and the principle of corrosion electrochemistry, a DC stray current corrosion simulation method for ship hull and seawater pipelines was established to simulate the straight pipes, elbow pipes and the structure of the seawater pipeline system of a ship. The polarization curve of B10 cupronickel was taken as the boundary conditions, the simulation study of the DC stray current density of the pipe wall was carried out, and the corrosion rate of the DC stray current was calculated according to Faraday's law. Most of the DC stray current generated by the grounding of DC electrical equipment flowed into the hull, and only a small part flowed into the seawater pipeline. Under normal circumstances, the in-

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-02-26

Received: 2020-12-02; Revised: 2021-02-26

作者简介: 邢少华 (1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

Biography: XING Shao-hua (1981—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: marine corrosion and protection.

引文格式: 邢少华, 杨光付, 刘广义, 等. 船舶海水管路直流杂散电流仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 093-100.

XING Shao-hua, YANG Guang-fu, LIU Guang-yi, et al. Numerical simulation of DC stray current on seawater pipe of ship[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 093-100.

sulation resistance of the chassis is greater than 1 M Ω , and the grounding of the DC electrical equipment will not cause stray currents in the seawater pipeline corrosion. In order to avoid the stray current corrosion of the seawater pipeline caused by the grounding of DC electrical equipment, the insulation resistance of the enclosure of DC380 V and DC220 V electrical equipment should be no less than 211 Ω and 123 Ω , respectively.

KEY WORDS: pipe; DC stray current; corrosion; numerical simulation; insulation resistance; cupronickel

杂散电流指设计或者规定回路以外流动的电流,杂散电流导致的腐蚀称为杂散电流腐蚀。杂散电流腐蚀是导致船舶腐蚀的重要原因之一,具有破坏性强的特点,腐蚀速率是正常腐蚀速率的几十甚至上百倍,其破坏性远大于其他类型腐蚀。一旦发生杂散电流腐蚀,可在短时间内造成船体或管路腐蚀穿孔,严重威胁船舶的结构安全^[1-3]。国内外学者开展了大量的船舶建造及停靠码头期间船体杂散电流腐蚀研究,研究表明,船体杂散电流主要来源于电焊机^[2,4]、其他结构物^[5-6]以及船舶电气设备泄漏电流^[1]等,船体杂散电流腐蚀速率与海水中电位梯度密切相关^[7]。目前国内针对船体杂散电流腐蚀,建立了杂散电流测量方法^[8-10],颁布了相应的控制标准^[11]。

海水管路系统是船舶的重要组成部分,承担着冷却主辅机、消防、压载和清洗等任务,对船舶主要设备正常运行、安全及平衡等方面起着重要保障作用。船舶安装有众多电气设备,且为保证人员安全,大部分电气设备与船体连接,电气设备漏电流会不可避免地流入船体,由于海水管路系统与船体处于电连接状态,流入船体的杂散电流同样会流入海水管路。为避免海水管路系统异种金属间电偶腐蚀,不同种金属材料间采用绝缘法兰(如图1所示)进行绝缘处理。在绝缘法兰处,海水管路杂散电流流入管路内部海水,通过海水流过绝缘法兰后,又流回管路,杂散电流流出管路部位,管路发生阳极极化加速腐蚀,而杂散电流流回管路部位发生阴极极化,受到保护,腐蚀速率减小。文献[12]分析了某船B10管路的异常腐蚀,结果表明,主要是由于杂散电流腐蚀导致。文献[13]研究了不同频率杂散电流对B10管路腐蚀影响,结果表明,杂散电流腐蚀速率随着电压幅值的增加而增加,但随着频率的增加而减小,形成的氧化亚铜腐蚀产物膜对杂散电流腐蚀具有一定抑制作用。由于杂散电流具有偶然性、随机性特征,海水管路系统管壁杂散电流大小、海水中杂散电流大小、电气设备接地电流大小等难以测量。国内外关于船舶海水管路系统杂散电流与电气设备接地电流大小关系鲜见报道,无法阐明电气设备产生多大的对地(船体)电流才会对海水管路产生杂散电流腐蚀影响,制约了船舶海水管路系统杂散电流风险分析,导致从设计、控制等角度防控海水管路系统杂散电流缺乏依据。数值仿真技术具有不受时间和空间限制的优点,可快速模拟计算各种状态下管路及海水中电流密度分布,并用于城市轨道

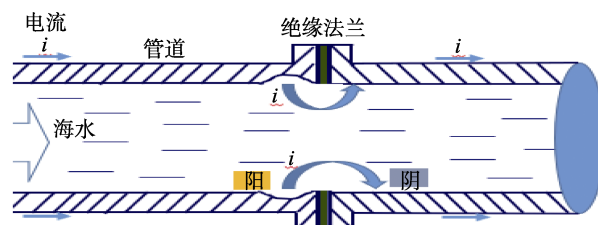


图1 海水管路杂散电流腐蚀原理

Fig.1 Schematic diagram of stray current corrosion of seawater pipeline

交通^[14-17]、船舶^[18]、管道^[19-20]杂散电流仿真研究。

与交流杂散电流腐蚀相比,直流杂散电流持续对金属结构产生电解腐蚀,其破坏作用显著大于交流杂散电流影响。因此,文中采用数值仿真方法研究了船舶海水管路直流杂散电流密度大小与直流电气设备机壳绝缘电阻的关系,分析提出直流电气设备机壳绝缘电阻要求,为船舶海水管路系统直流杂散电流腐蚀防护提供技术支撑。

1 直流杂散电流仿真

1.1 仿真模型

根据船舶海水管路系统杂散电流产生机理可知,仿真模型包括船体、管路、杂散电流泄漏点和回流点、管路与船体的连接部位、管路绝缘部位等。根据实船调研结果,管路绝缘部位主要位于异种金属连接部位,如管路与冷却设备连接部位、管路与截止阀连接部位等,管路与船体的连接部位主要位于穿舱部位。模拟实船海水管路系统结构、与船体连接状态、管路构件间绝缘状态,建立了直管段、弯管段以及实船结构的直流杂散电流仿真模型,如图2所示。图2a和图2b采用3块400 mm×400 mm钢板模拟船体结构,图2a两段 $\phi 57$ mm×197.5 mm直管通过 $\phi 57$ mm×5 mm聚四氟乙烯垫片绝缘,图2b中 $\phi 57$ mm×100 mm弯管入口通过 $\phi 57$ mm×5 mm聚四氟乙烯绝缘垫片与 $\phi 57$ mm×147.5 mm直管绝缘,弯管出口直接与直管连接。图2c为模拟某型船一段船体和管路结构,船体直径为20 m,管路长度为10 m,管路规格包括DN100、DN50和DN32通径直管和90°弯头、DN100-DN50异径三通、DN100-DN32异径三通。管路绝缘部位见图2d,绝缘材料同样为5 mm厚的聚四氟乙烯。

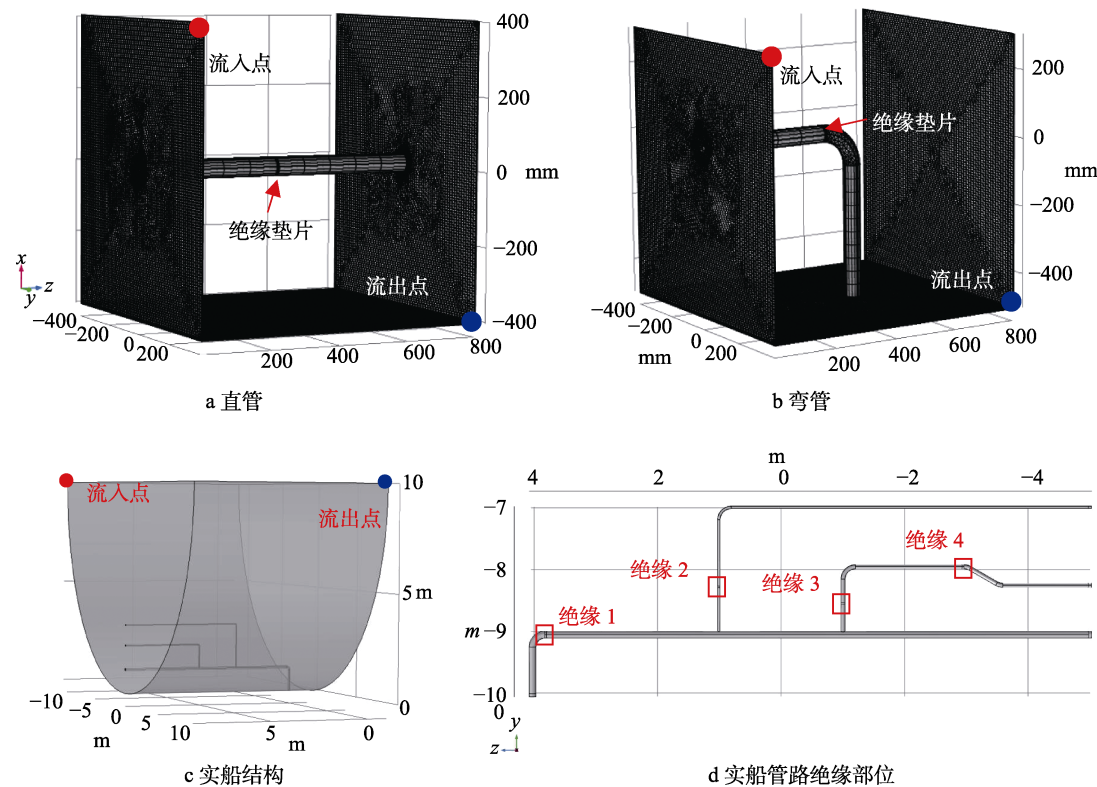


图 2 海水管路直流杂散电流仿真模型

Fig. 2 Numerical simulation model of DC stray current: a) straight line; b) elbow; c) practical structure; d) insulation position of practical structure

1.2 计算方法

根据欧姆定律和腐蚀电化学原理，船体和管路中电流分布满足欧姆定律，海水中电位和电流分布满足式（1）和式（2）。采用 comsol 软件，计算船体、管路和管路内部海水中的电流、电位分布。

$$\mathbf{i}_1 = -\sigma \nabla \phi_1 \tag{1}$$

$$\nabla i_1 = 0 \tag{2}$$

式中： $\mathbf{i}_1$ 为海水中电流密度矢量， A/m^2 ； σ_1 为海水电导率， S/m ； ϕ_1 为电位梯度， V/m 。

1.3 计算边界条件

船体材料为 10CrNiCu 低合金钢，海水管路材料为 B10 铜镍合金，管路内部流动介质为海水，两种金属材料 and 海水电导率见表 1。聚四氟乙烯垫片为绝缘材料，电导率为 0。

表 1 不同材料电导率值
Tab.1 Conductivity of different materials

材质/介质	船体	管路	海水	聚四氟乙烯
电导率 ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.02×10^7	5.71×10^7	4	0

设置流入船体的直流杂散电流强度分别为 0.1、1、10、100 A。根据电荷守恒定律，流入和流出船体的直流杂散电流大小相同，则流出船体的直流杂散电

流强度分别为-0.1、-1、-10、-100 A。

管路内壁在直流杂散电流作用下，发生电解腐蚀，腐蚀过程中产生电化学电阻，采用如图 3 所示的极化曲线计算 B10 电解腐蚀过程中的电化学电阻。

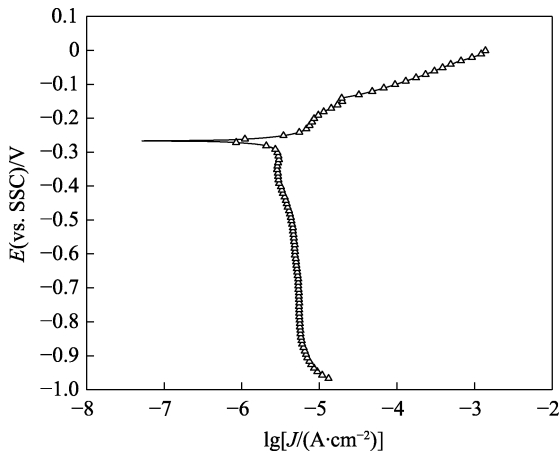


图 3 B10 管路静态海水极化曲线
Fig. 3 Polarization curve of B10 in static seawater

2 管路直流杂散电流仿真

2.1 直管

采用如图 2 所示的仿真模型、表 1 和图 3 所示的边界条件，计算管路存在一处绝缘、与船体两处穿舱

连接状态时的管路直流杂散电流分布。根据船舶电气设备接地要求,所有工作电压高于 50 V 以上的电气设备均要求接地,即电气设备的金属外壳和与金属船体做可靠电气连接。正常状态下,电气设备机壳绝缘电阻达到 1 M Ω 以上,电气设备与船体间电流很小,但舱内潮湿大气、绝缘组件老化等,电气设备机壳绝缘电阻可能失效,产生较大的杂散电流。采用数值仿真方法,计算直流杂散电流强度分别为 0.1、1、10、100 A 时(380 V 电气设备对应机壳绝缘电阻分别为 3800、380、38、3.8 Ω , 220 V 电气设备对应机壳绝缘电阻分别为 2200、220、22、2.2 Ω),管路内表面电流密度模值和腐蚀电位空间分布特征如图 4 所示,图中①、②、③、④颜色标尺分别表

示杂散电流强度分别为 0.1、1、10、100 A 时杂散电流和腐蚀电位大小。由图 4a 可知,管路直流杂散电流最大值位于绝缘组件两侧,距离绝缘组件越近,电流密度越大。管路最大直流杂散电流密度随流入船体直流杂散电流增加而线性增加(如图 5 所示),大部分直流杂散电流通过船体回流,流入管路中的直流杂散电流较小,约占流入船体直流杂散电流的 0.003%。由图 4b 可知,直流杂散电流从管壁流入海水部位发生阳极极化,加速腐蚀,而直流杂散电流从海水流入管壁部位发生阴极极化,腐蚀受到抑制。管路最大阳极极化电位与船体直流杂散电流关系如图 5 所示,阳极极化电位随着船体直流杂散电流强度的增加而线性增加。

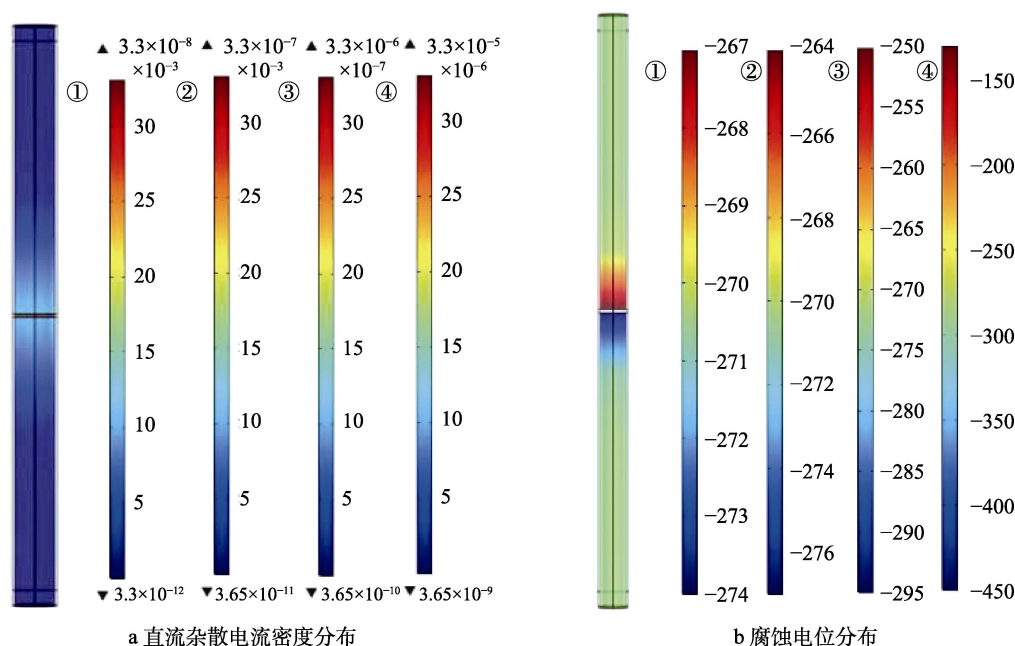


图 4 直管管壁直流杂散电流仿真结果

Fig.4 DC current density and corrosion potential distribution on pipe influenced: a) DC current density distribution; b) corrosion potential distribution

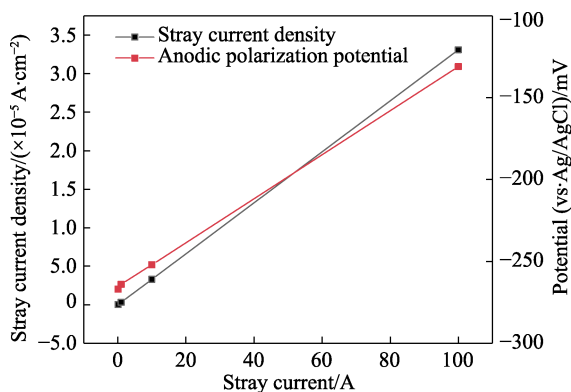


图 5 直管最大直流杂散电流密度及阳极极化电位与船体直流杂散电流关系

Fig.5 Relationship between DC stray current density/anodic polarization potential of pipe and DC stray current on hull

根据法拉第定律,采用式(3)计算管路直流杂散电流腐蚀速率,管路最大直流杂散电流腐蚀速率与船体直流杂散电流关系如图 6 所示。由图 6 可知,管路直流杂散电流腐蚀速率随着船体直流杂散电流强度的增加而增加。B10 管路在静态海水中的腐蚀速率约为 7 μ m/a,根据计算结果,当船体直流杂散电流达到 1.8 A 时(即 380 V 和 220 V 电气设备机壳绝缘电阻分别为 211 Ω 和 123 Ω 时),管路直流杂散电流腐蚀速率与其自腐蚀速率相当。

$$v = 10 \times \frac{JtM}{nF\rho} \quad (3)$$

式中: v 为直流杂散电流腐蚀速率, mm/a; J 为管壁中最大直流杂散电流密度, A/cm 2 ; t 为常数, 为

一年时间对应的秒数, 即 31 536 000 s; M 为铜原子量, g/mol; n 为 1 mol 金属溶解时参与电极反应的电子摩尔数; F 为法拉第常数, C/mol, ρ 为管路密度, g/cm³。

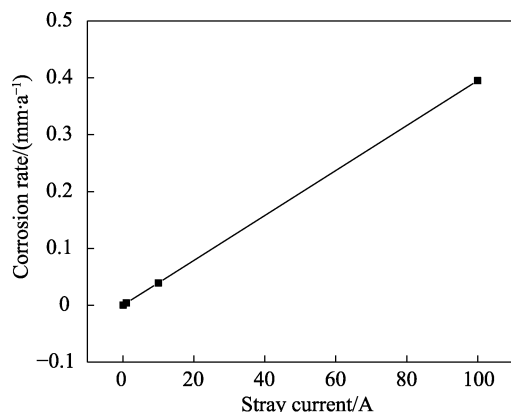
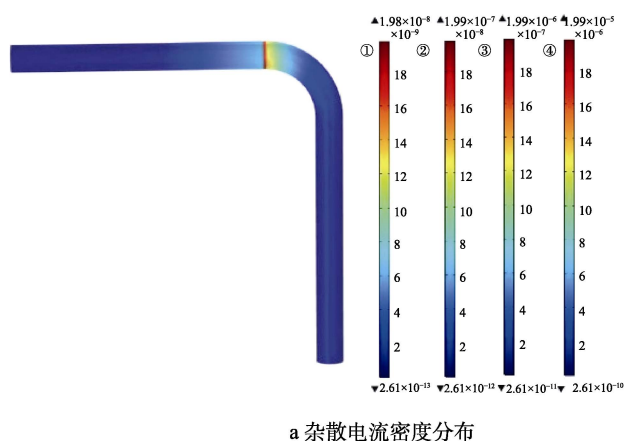
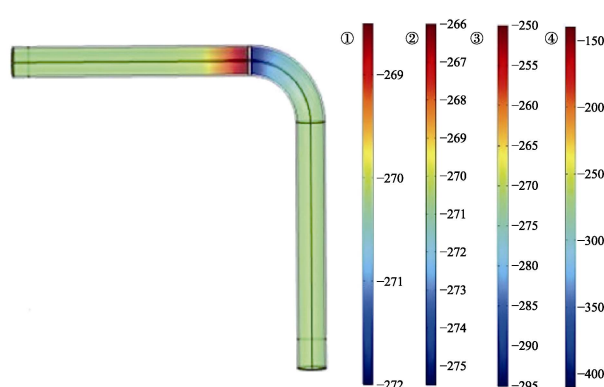


图 6 直管最大直流杂散电流腐蚀速率与船体直流杂散电流关系

Fig.6 Relationship between DC stray current corrosion rate of pipe and DC stray current on hull



a 杂散电流密度分布



b 腐蚀电位分布

图 7 弯管管壁直流杂散电流仿真结果

Fig.7 DC current density and corrosion potential distribution on elbow: a) DC current density distribution; b) corrosion potential distribution

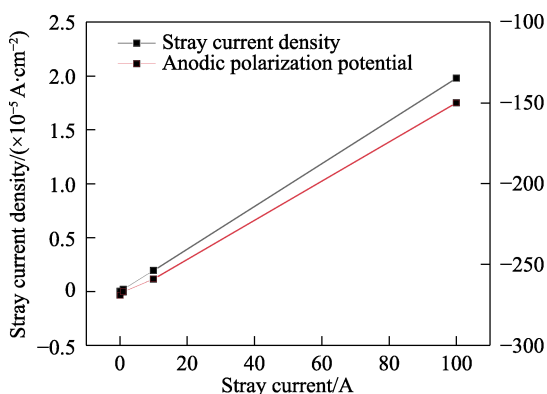


图 8 弯管最大直流杂散电流密度及阳极极化电位与船体直流杂散电流关系

Fig.8 Relationship between DC stray current density/anodic polarization potential of elbow and DC stray current on hull

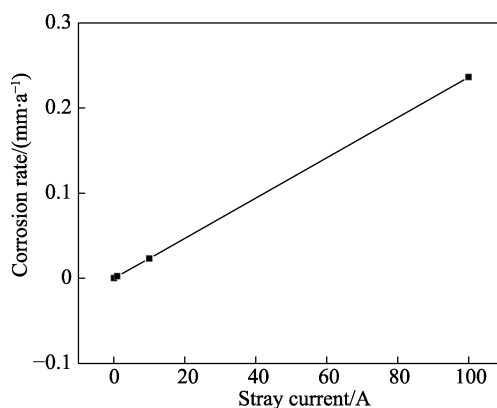


图 9 弯管最大直流杂散电流腐蚀速率与船体直流杂散电流关系

Fig.9 Relationship between DC stray current corrosion rate of elbow and DC stray current on hull

2.2 弯头

采用相同的仿真方法, 弯管内表面电流密度模值和腐蚀电位空间分布特征计算如图 7 所示。由图 7 可知, 管路直流杂散电流最大值位于绝缘组件两侧, 距离绝缘组件越近, 电流密度越大, 杂散电流流出管壁部位阳极极化越严重, 杂散腐蚀越严重。船体直流杂散电流对管壁最大直流杂散电流密度及阳极极化电位影响如图 8 所示。大部分杂散电流通过船体回流, 只有 0.002% 杂散电流流入管路中。与直管路相比, 弯头处杂散电流密度减小, 说明对于弯管结构, 杂散电流更多通过船体回流, 弯头杂散电流密度和阳极极化电位同样随着船体杂散电流增加而线性增加。弯管直流杂散电流腐蚀速率随着船体直流杂散电流强度增加而线性增加, 如图 9 所示。船体直流杂散电流相同条件下, 弯管直流杂散电流腐蚀速率小于直管直流杂散电流腐蚀速率。通过线性拟合分析, 当船体直流杂散电流达到 3.0 A 时 (即 380 V 和 220 V 直流电气设备机壳绝缘电阻分别为 127 Ω 和 73 Ω 时), 弯头处直流杂散电流腐蚀速率与其自腐蚀速率相当。

2.3 实船管路结构

以某船发生杂散电流腐蚀的一段管路为研究对象,其结构和尺寸如图 2c、d 所示,管壁直流杂散电流密度和极化电位分布仿真结果如图 10 所示。由于电气设备泄漏电流为 0.1、10 A 时,管壁阴阳极极化程度很小,图 10b 仅给出了电气设备泄漏电流为 10、100 A 时的腐蚀电位分布。由仿真计算结果可知,直流杂散电流主要在第一个绝缘点处流向海水,导致管路腐蚀,距离第一个绝缘点越近,管壁直流杂散电流密度越大,电流从管壁流向海水部位阳极极化越严重,腐蚀越快。

实船管路直流杂散电流密度、阳极极化电位与船体直流杂散电流强度关系如图 11 所示。实船管路中

直流杂散电流密度、阳极极化电位随着船体直流杂散电流增加而增加,但由于管路长度增加,海水管路系统电阻增加,船体直流杂散电流相同条件下,实船管路中直流杂散电流密度和阳极极化电位显著减小,仅为直管直流杂散电流密度的 0.38%。不同船体直流杂散电流影响下,实船管路直流杂散电流腐蚀速率如图 12 所示。船体直流杂散电流达到 100 A 时,实船管路最大直流杂散电流腐蚀速率不超过 $1 \mu\text{m/a}$,远小于 B10 管路海水中腐蚀速率,可以忽略不计。对图 12 所示仿真结果进行线性拟合后分析可知,当船体直流杂散电流达到 776 A 时(即 380 V 和 220 V 直流电气设备机壳绝缘电阻分别为 0.5Ω 和 0.3Ω 时),管路系统直流杂散电流腐蚀速率与其自腐蚀速率相当。

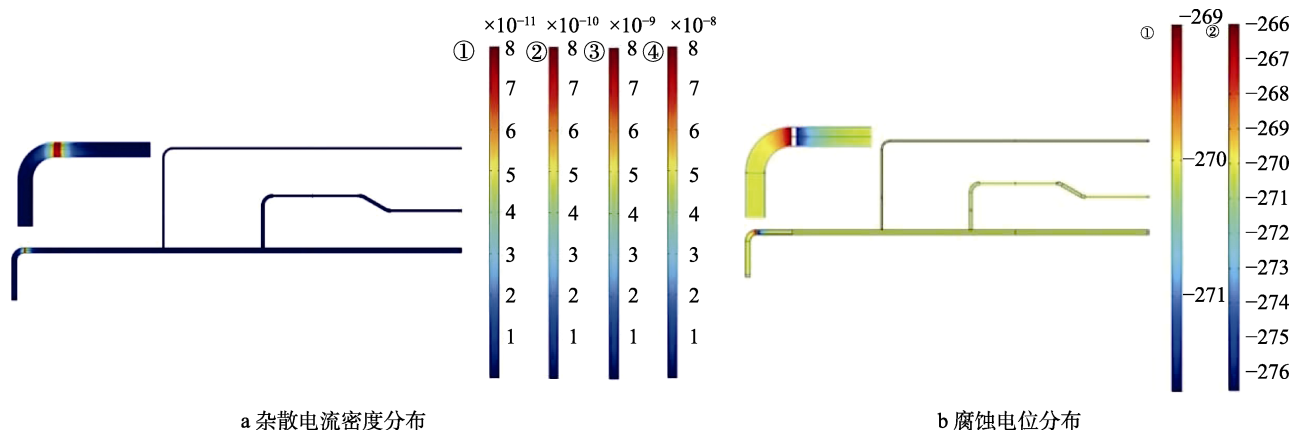


图 10 实船管路直流杂散电流仿真结果

Fig.10 DC current density and corrosion potential distribution on practical pipeline: a) DC current density distribution; b) corrosion potential distribution

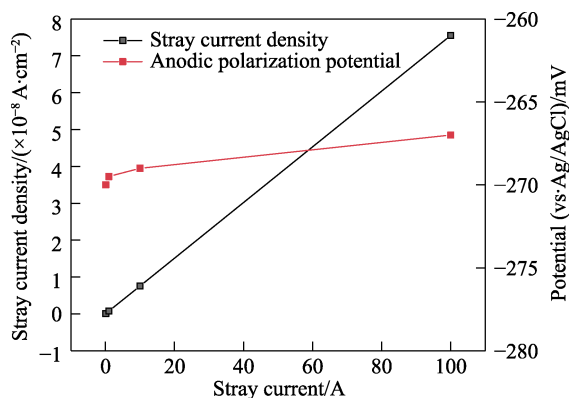


图 11 实船管路最大直流杂散电流密度及阳极极化电位与船体直流杂散电流关系

Fig.11 Relationship between DC stray current density/anodic polarization potential of practical pipeline and DC stray current on hull

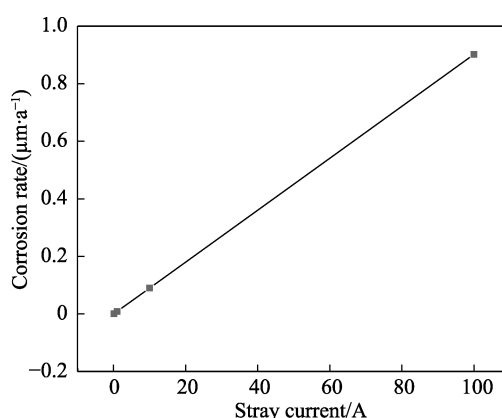


图 12 实船管路最大直流杂散电流腐蚀速率与船体直流杂散电流关系

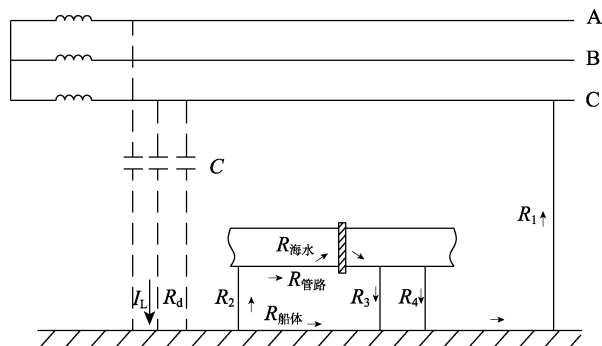
Fig.12 Relationship between DC stray current corrosion rate of polarization potential and DC stray current on hull

3 直流杂散电流控制分析

船舶上安装有大量的直流电气设备,包括直流发电机、电力拖动设备等。为保障艇员人身安全,所有

工作电压高于 50 V 的电气设备均要求接地,即电气设备的金属外壳和与船体进行可靠电气连接。通常情况下,直流电气设备输入端、控制端和输出端对机壳绝缘电阻均大于 $1 \text{ M}\Omega$,即直流电气设备元器件对船

体电阻大于 $1\text{ M}\Omega$ 。对于 380 V 电气设备, 船体电流小于 0.38 mA ; 对于 220 V 电气设备, 船体电流小于 0.22 mA 。根据数值仿真结果, 其对管路腐蚀的影响可忽略不计。当直流电气设备机壳与内部元器件绝缘失效后, 电气设备与艇体电阻减小, 电气设备流向艇体电流 I_L 增加, 直流电气设备产生漏电, 流至船体。然后从船体与管路连接部位流入管道, 在管道绝缘处流入海水, 产生杂散电流腐蚀, 再通过管道流回负极, 如图 13 所示。通过对直管、弯管以及实船管路直流杂散电流腐蚀仿真分析可知, 对 380 、 220 V 直流电气设备, 只要机壳绝缘电阻不小于 211 、 $123\ \Omega$, 其泄漏产生的直流杂散电流所引起的管路直流杂散电流腐蚀速率小于其自腐蚀速率, 即 380 、 220 V 直流电气设备机壳绝缘电阻不应小于 211 、 $123\ \Omega$ 。



R_1 ——艇体与电力系统负极电阻; R_2 、 R_3 、 R_4 ——船体与管路多个电连接点的连接电阻; R_d ——电气设备接地电阻; $R_{船体}$ ——杂散电流流经船体电阻; $R_{管路}$ ——杂散电流流经海水管路电阻; $R_{海水}$ ——杂散电流流经海水电阻

图 13 电气设备漏电流导致管路杂散电流腐蚀等效电路
Fig.13 Equivalent circuit of stray current formation on hull and pipe

4 结论

通过直流杂散电流仿真研究, 分析了管路直流杂散电流密度与船体直流杂散电流强度关系, 讨论了直流电气设备机壳绝缘电阻要求, 得到的主要结论如下:

1) 根据欧姆定律和腐蚀电化学原理, 建立了海水管路直流杂散电流腐蚀仿真方法, 实现了不同直流杂散电流强度下海水管路直流杂散电流腐蚀仿真。

2) 电气设备接地产生的直流杂散电流大部分通过船体回流, 只有少部分通过海水管路回流。正常状态下, 直流电气设备机壳绝缘电阻海水管路不会发生直流杂散电流腐蚀。

3) 对 380 、 220 V 直流电气设备, 机壳绝缘电阻分别减小至 211 、 $123\ \Omega$ 时, 管路直流杂散电流腐蚀速率与自腐蚀速率相当。

4) 管路直流杂散电流腐蚀速率随着船体直流杂散电流强度的增加而线性增加。

参考文献:

- [1] 刘宾. 案例法浅析船舶杂散电流腐蚀问题[J]. 中国水产, 2009(10): 64-65.
LIU Bin. Case analysis of stray current corrosion of ship[J]. China fisheries, 2009(10): 64-65.
- [2] 张安明, 曲本文, 孙小舟, 等. 船舶杂散电流腐蚀研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(11): 51-54.
ZHANG An-ming, QU Ben-wen, SUN Xiao-zhou, et al. Stray current corrosion research status of the ship[J]. Total corrosion control, 2015, 29(11): 51-54.
- [3] 黎峰, 晋文菊, 张明杰. 船舶杂散电流腐蚀问题及其防控[J]. 船舶设计通讯, 2019(1): 22-25.
LI Feng, JIN Wen-ju, ZHANG Ming-jie. Problem and its prevention measures of ship stray current corrosion[J]. Journal of ship design, 2019(1): 22-25.
- [4] 张文毓. 杂散电流的腐蚀与防护[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(5): 1-6.
ZHANG Wen-yu. Stray current corrosion and protection[J]. Total corrosion control, 2017, 31(5): 1-6.
- [5] 陈立剑, 吴顺平. 船舶 LNG 加注系统防静电及杂散电流研究[J]. 船电技术, 2014, 34(6): 24-27.
CHEN Li-jian, WU Shun-ping. Study on static electricity and stray current prevention of LNG bunkering system[J]. Marine electric & electronic engineering, 2014, 34(6): 24-27.
- [6] 王璐. 钢板桩码头靠泊船杂散电流腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
WANG Lu. The stray current corrosion research on the ship berthing at the steel sheet dock[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2008.
- [7] 任厚珉, 张振邦, 梁成浩, 等. 修造船期间杂散电流腐蚀的电力线分布研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(6): 369-372.
REN Hou-min, ZHANG Zhen-bang, LIANG Cheng-hao, et al. Distribution of power line for stray current corrosion during repairing and building ships[J]. Corrosion science and technology protection, 1999, 11(6): 369-372.
- [8] 郑志建, 尹鹏飞, 张伟. 船舶杂散电流的检测与防护[C]//2014 年全国腐蚀电化学及测试方法学术交流会论文集. 哈尔滨, 2014.
ZHENG Zhi-jian, YIN Peng-fei, ZHANG Wei. Inspection & assessment and defense of the stray current corrosion on ships[C]// Proceedings of 2014 national symposium on electrochemistry testing methods. Harbin: [s. n.], 2014.
- [9] 程文华, 刘广义, 张繁. 用于船舶海水管路的杂散电流自动检测排流方法及装置: 中国, CN108169547A[P]. 2018-06-15.
CHENG Wen-hua, LIU Guang-yi, ZHANG Fan. Stray current automatic detection and releasing method and device for ship seawater pipeline: China, CN108169547A[P]. 2018-06-15.
- [10] 张挺, 杨锋, 罗宁昭, 等. 船舶海水管路腐蚀及监测技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(13): 1-5.
ZHANG Ting, YANG Feng, LUO Ning-zhao, et al.

- Overview on corrosion of marine sea-water pipelines and a crucial monitoring technology[J]. Ship science and technology, 2019, 41(13): 1-5.
- [11] CB/T 3712—2013, 船体杂散电流腐蚀的防护方法[S]. CB/T 3712—2013, Protection method for hull stray current corrosion[S].
- [12] 杨辉, 杨瑞. 某船海水管路泄漏失效原因分析[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(3): 28-32.
YANG Hui, YANG Rui. Failure analysis of leaking of seawater tube in a ship[J]. Development and application of materials, 2016, 31(3): 28-32.
- [13] QIU Wei wei, PAGANO M, ZHANG G, et al. A periodic voltage modulation effect on the corrosion of Cu-Ni Alloy[J]. Corrosion science, 1995, 37(1): 97-110.
- [14] 张明帅. 城市轨道交通杂散电流腐蚀预测技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
ZHANG Ming-shuai. Research on stray current corrosion prediction technology for urban rail transit[D]. Xuzhou, China: China University of Mining and Technology, 2014.
- [15] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- LI Wei. Technology for stray current corrosion monitoring and control of subway[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2004.
- [16] TREVELYANA J, HACK H P. Analysis of stray current corrosion problems using the boundary element method[C]//Boundary element technology IX. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1994.
- [17] METWALLY I A, AL-MANDHARI H M, GASTLI A, et al. Factors affecting cathodic-protection interference[J]. Engineering analysis with boundary elements, 2007, 31(6): 485-493.
- [18] 杨清勇. 杂散电流腐蚀问题基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
YANG Qing-yong. The basic research on the stray current[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [19] SANTANA-DIAZ E, ADEY R. Computer simulation of the interference between a ship and docks cathodic protection systems[EB/OL]. www.beasy.com
- [20] ZHAO Xiao-dong, YANG Jie, XING Shao-hua. Study of influence of stray current on potential distribution of pipeline by numerical simulation[J]. Advanced materials research, 2010, 154-155: 265-268.