船舶海水管路冲刷腐蚀仿真分析及预测

彭文山',赵建仓',孙佳钰^{1,2},邢少华',刘峰'

(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.中国石油大学(华东)材料科学与工程学院 山东 青岛 266580)

摘要:目的 获取船舶海水管路系统中弯管在不同因素影响下的冲刷腐蚀规律,预测其冲刷腐蚀速率。方法 采 用试验测试和数值仿真相结合的方法,研究管路系统中弯管在不同海水流速、管径、弯径比影响下的冲刷 腐蚀规律,采用灰色关联分析各因素对冲刷腐蚀影响的严重程度,最后建立冲刷腐蚀速率预测方程。结果 随 流速增加,最大冲刷腐蚀速率先增大、后趋于平稳;随管径增加,管壁最大冲刷腐蚀速率逐渐减小;随弯 径比增加,管壁最大冲刷腐蚀速率先减小后略有增加。不同因素对冲刷腐蚀速率影响的严重程度由大到小 为弯径比、流速、管径。结论 数值仿真方法可快速获取管路参数变化对冲刷腐蚀速率的影响,基于仿真结 果建立的冲刷腐蚀速率预测方程可以很好地预测不同因素影响下的弯管冲刷腐蚀,有较高的预测精度。 关键词:海水管路;冲刷腐蚀;仿真;腐蚀预测 中图分类号: TG172.5 文献标识码: A

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.09.010

文章编号: 1672-9242(2021)09-0064-08

Simulation Analysis and Prediction of Erosion-corrosion of Seawater Pipelines in Ships

PENG Wen-shan¹, ZHAO Jian-cang¹, SUN Jia-yu^{1,2}, XING Shao-hua¹, LIU Feng¹

(1. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute (LSMRI), Qingdao 266237, China; 2. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: This paper aims to obtain the erosion-corrosion law of the bend in the marine pipeline system under the influence of different factors and predict the erosion-corrosion rate. Based on the combination of test and numerical simulation, the scour corrosion regularity of bend in pipeline system under the influence of different seawater velocity, pipe diameter and ratio of bending radius to diameter is studied. Grey correlation analysis is used to analyze the influence of various factors on erosion-corrosion. Finally, the prediction equation of erosion-corrosion rate is established. With the increase of flow rate, the maximum erosion-corrosion rate first increases and then tends to be stable; with the increase of pipe diameter, the maximum erosion-corrosion rate of pipe wall gradually decreases; with the increase of ratio of bending radius to diameter, the maximum

收稿日期: 2021-05-22; 修订日期: 2021-06-30

Received: 2021-05-22; Revised: 2021-06-30

基金项目:河南省自然科学基金(212300410306)

Fund: Natural Science Foundation of Henan (212300410306)

作者简介:彭文山(1987—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为海洋环境腐蚀、多相流冲蚀及腐蚀/冲蚀仿真。

Biography: PENG Wen-shan (1987-), Male, Ph.D., Senior engineer, Research focus: marine environment corrosion, multiphase flow erosion and corrosion/erosion simulation.

引文格式:彭文山、赵建仓,孙佳钰,等.船舶海水管路冲刷腐蚀仿真分析及预测[J].装备环境工程,2021,18(9):064-071.

PENG Wen-shan, ZHAO Jian-cang, SUN Jia-yu, et al. Simulation analysis and prediction of erosion-corrosion of seawater pipelines in ships[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 064-071.

erosion-corrosion rate of pipe wall first decreases and then slightly increases. The sequence of the influence of different factors on the erosion-corrosion rate from high to low is the ratio of bending radius to diameter, velocity and pipe diameter. Numerical simulation method can quickly obtain the influence of pipeline parameters on erosion-corrosion rate. The prediction equation of erosion-corrosion rate based on the simulation results can predict the erosion-corrosion under the influence of different factors and has high prediction accuracy.

KEY WORDS: seawater pipeline; erosion-corrosion; simulation; corrosion prediction

海水管路系统是船舶推进系统、电力系统和辅助 系统的重要组成部分,承担着消防、主辅机冷却、压 载、清洗等任务^[1-3],在保证船舶主要设备正常运行^[4]、 安全及平衡等方面起着重要作用。海水管路系统分布 广,种类多,维修保养困难^[5-6],且大都处于恶劣环 境中,常常出现海水管系腐蚀泄漏、污损堵塞等问题, 严重影响到船舶的安全运行。海水管路抗流动海水腐 蚀性能是最为重要的技术要求之一,海水管路在流动 海水中的腐蚀速率大小,以及是否出现早期冲刷腐蚀 损伤,是决定其使用寿命的关键因素。海水管路系统 腐蚀损伤,将影响设备正常运行,甚至船舶航行的安 全性^[7]。

海水管路冲刷腐蚀非常复杂,冲刷腐蚀与管路中 介质成分、介质流动状态、管路结构、管材等诸多因 素有关^[8]。海水管路冲刷腐蚀大多发生在管道弯头、 三通、法兰接头等位置^[9-10],流体流动状态的剧烈变 化使得这些部位易遭受严重冲刷腐蚀。在管路冲刷 腐蚀方面, 部分学者采用试验方法研究了管路腐蚀 规律[11-15]。研究主要集中在海水流速对铜镍合金管钝 化膜形成的影响[12],海水流速对铜镍合金管冲刷腐蚀 形貌影响[13]等方面。冲刷腐蚀试验周期长、工作量大、 试验条件复杂,弯头、变径管等特殊部位的腐蚀电化 学行为也难以获取,并不能有效预测并减少腐蚀损 失,而数值仿真具有成本低、时间短、可应用于复杂 系统等优势^[16],可以弥补实际试验的不足。国内对海 水管路冲刷腐蚀仿真研究成果较少,大部分研究集中 于海水管路内压力及流速仿真[17-19]。杨元龙[19]基于 CFD 数值模拟研究了冷却水管路系统压力场和流速 场运行特性,得到了弯头、三通管等易损部位的流速、 湍动能、剪切应力和压力的参数分布,预测了管路中 易受冲刷腐蚀的区域。陈艳等人[20]以流速作为弯管冲 刷腐蚀的主要影响因素,基于 FLUENT 和神经网络 预测海水弯管冲刷腐蚀的模型,模型预测和验证试验 结果表明,最严重腐蚀破坏均出现在截面角度 30°进 口附近。以上数值模拟研究主要求解管内流场,以此 来判断腐蚀严重部位,并未直接获取冲刷腐蚀速率。 另外,不同管路的环境参数和结构参数对冲刷腐蚀速 率的影响程度方面也研究较少。文中以 B10 铜镍合金 管路为仿真对象,研究流动海水中 90°弯管在不同影 响因素下的冲刷腐蚀规律,并获取不同因素对冲刷腐 蚀影响的程度大小,最终建立冲刷腐蚀速率预测方

程。研究可为预测船舶海水管路的冲刷腐蚀速率提供 思路,对于发现设计中的薄弱环节,进而提出相关技 术建议及优化设计方案,提高海水管路抗冲刷腐蚀能 力具有重要意义。

1 数值仿真模型及边界条件

1.1 控制方程

海水管路冲刷腐蚀仿真计算过程中,需要考虑连续性方程、动量方程和湍流模型。选择 k-e 湍流模型 和"稳态"的物理场,湍流模型类型选择 RANS 模式, 湍流模型选择标准 k-e 模型。k-e 模型应用较多,计算 量适中,有比较高的精度。

流动控制方程为:

| $\rho \nabla \cdot (u) = 0$ | (1) |
|---|-----|
| $\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F$ | (2) |

式中: ρ 为海水密度, kg/m³; u 为瞬时速度, m/s; p 为压力, Pa; μ 为黏度, Pa·s; I 为单位张量; F 为 附加源项。

标准 k-ε 模型形式为:

$$\begin{cases} \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla_k \right] + P_k - \rho \varepsilon \\ \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla_\varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases}$$
(3)

其中:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)]$$
(5)

式中: k 为湍流动能, J; ε 为湍流耗散率, W/m³; σ_k 为 k 方程的湍流 Prandtl 数, 取为 1.0; σ_ε 为 ε 方程 的湍流 Prandtl 数, 取为 1.3; P_k 为由于平均速度梯度 引起的湍动能 k 的产生项; $C_{\varepsilon 1}$ =1.44, $C_{\varepsilon 2}$ =1.92, C_{μ} =0.09 为经验常数。

1.2 数值仿真边界条件

管路内部海水流速仿真边界条件主要有入口流 速、湍流强度(见式(6)、(7))、水力直径、流体密 度、黏度等。对于管路冲刷腐蚀仿真,另外一个比较 重要的仿真边界即为不同流速下 B10 铜镍合金材料的

| 冲刷腐蚀速率,本研究采用室内i | 试验方法获取该信息。 |
|-------------------|------------|
| $I=0.16Re^{-1/8}$ | (6) |

| $Re = \frac{\rho u D}{\rho u}$ | (7) |
|--------------------------------|-----|
| | (.) |

1.3 仿真几何模型

管径为 D, 上下游管长为 L, 中心线的半径为 R, 上下游长度 L 为 15D。利用多物理场计算软件 COMSOL 完成数值仿真计算。弯管几何结构如图 1 所示,管内流体流动方向如图 2 所示。



Fig.1 Schematic diagram of the pipe bend structure



图 2 管道内流体的流动方向 Fig.2 Flow direction of fluid in the pipe bend

弯管规格为 DN25~DN400 (D为 27~406 mm), 管内海水流速为 1~5 m/s。管内流体为天然海水,海 水密度为 1013.8 kg/m³, 黏度为 0.001 023 9 kg/(m·s), 管道材质为 B10 铜镍合金,弯管具体工况参数见表1。

几何参数的变化也会影响管内流动,从而最终影 响冲刷腐蚀速率计算结果。因此,需要确定合适的网 格,在保证结果精确的同时,尽可能提高计算效率。 面网格采用自由四边形网格划分方法,边界层数为5, 边界层的拉伸因子为1.2,自动形成第一层厚度,厚 度调节因子为3。体网格在面网格的基础上扫掠完成, 计算用网格如图3所示。

| Tab.1 Erosion-corrosion conditions of 90° pipe bend | | | |
|---|-------------------------|-------|------|
| 项目 | 流速/(m·s ⁻¹) | 管径/mm | 弯径比 |
| 1 | 1 | 54 | 1.33 |
| 2 | 2 | 54 | 1.33 |
| 3 | 3 | 54 | 1.33 |
| 4 | 4 | 54 | 1.33 |
| 5 | 5 | 54 | 1.33 |
| 6 | 1 | 27 | 1.24 |
| 7 | 1 | 103 | 1.38 |
| 8 | 1 | 213 | 1.43 |
| 9 | 1 | 406 | 1.50 |
| 10 | 1 | 54 | 2 |
| 11 | 1 | 54 | 3 |
| 12 | 1 | 54 | 4 |
| 13 | 1 | 54 | 5 |

表 1 90°弯管冲刷腐蚀工况



图 3 计算用仿真模型网格 Fig.3 Simulation model grid for calculation: a) plane mesh; b) body grid

2 仿真边界的试验确定

2.1 试验条件

试验材料为 B10 铜镍合金,试样经切割、打磨后,

• 0.16

用无水乙醇清洗,吹干,然后测量试样尺寸和试验前 质量。冲刷腐蚀试验介质为青岛海域天然海水。使用 旋转冲刷腐蚀试验装置进行流动海水冲刷腐蚀试 验,试验装置见文献[21]。使用塑料螺栓将试样镶嵌 固定在试验装置圆筒内转轮的周边。试验装置圆筒 内部均匀布置 6 块挡板,转盘周边的线速度作为试 样与圆筒内海水的相对速度。试验流速范围为 0~5 m/s。试验结束后,参照 GB T 16545-2015 要求, 配制除锈液,去除试样表面腐蚀产物,进行质量损失 测量,进而计算冲刷腐蚀速率。

2.2 冲刷腐蚀速率

B10 铜镍合金的冲刷腐蚀速率见表 2。由腐蚀速 率结果可知,随着冲刷流速的增加,冲刷腐蚀速率开 始时增大较快,超过3.5 m/s 后,腐蚀速率增长缓慢, 逐渐趋于稳定。将 B10 冲刷腐蚀速率试验测试结果以 分段三次插值曲线形式导入到 COMSOL 中,进行冲 刷腐蚀仿真计算。

Tab.2 Erosion-corrosion rate of B10 Cu-Ni alloy 流速/ 0 1 2 3.5 5 $(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$ 腐蚀速率/ $0.006 \ 99 \quad 0.080 \ 02 \quad 0.090 \ 18 \quad 0.100 \ 58 \quad 0.101 \ 51$ $(mm \cdot a^{-1})$ **^**0.08 0.08 0.07 0.06 0.05 0.04 0.03 0.02 0.01 7.91×10^{-:} a 1 m/s图 5 **▲**1.36 1.2 1.3 1.2 1.1 1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 1.0 0.8 0.6 04 0.2

₹8.43×10⁻³

表り B10 铜镍合金冲刷腐蚀速率

3 弯管冲刷腐蚀仿直分析

3.1 流速对冲刷腐蚀影响分析

管内海水流速对于弯管冲刷腐蚀速率有重要影 响。由图 4 可知, 随流速增加, 冲刷腐蚀速率先增加、 后趋于平稳。流速超过 3 m/s 后,冲刷腐蚀速率增长 减缓。海水流进弯头后,由于管道内压力的变化,使 得外侧的流速降低,腐蚀速率减小。最大冲刷腐蚀速 率出现在弯头内拱侧位置,如图5所示。这主要是由于 此处流速较高(如图6所示),较高的流速使得壁面剪 切力增大,对管壁的冲刷作用增强,质量损失增加。



不同流速下弯管最大流速及最大腐蚀速率 图 4 Fig.4 Maximum flow velocity and corrosion rate of pipe bend under different flow rates



a 1 m/s

不同流速下弯管截面流速(m/s) 图 6 Fig.6 Flow velocity of elbow section under different flow rates (m/s)

b 3 m/s

1.0

0.5

c 5m/s

• 0.03

随着流速的增加,弯管内部二次流强度逐渐增加,二 次流使得管内流体由弯管外拱侧向弯管内拱侧冲刷, 导致高流速下弯管内侧处冲刷腐蚀严重区域逐渐增大。

3.2 管径对冲刷腐蚀影响分析

管道直径对冲刷腐蚀速率的影响如图 7 所示。由 图 7 可知,随管道直径增加,冲刷腐蚀速率逐渐降低。 管径从 DN25 增加到 DN400 过程中,管内最大流速 由 1.127 m/s 下降为 1.075 m/s,差别并不是太大。冲 刷腐蚀速率由 0.0821 mm/a 减小到 0.0813 mm/a,可 见,增加管径对于减小冲刷腐蚀速率效果并不显著。 由图 8 可知,对于不同直径管道,最大冲刷腐蚀速率 均出现在弯头内拱侧。这主要是由于在弯头内拱侧海 水流速较高(如图 9 所示),较大的剪切力使得该位 置冲刷腐蚀较大。



图 7 不同管径下弯管最大流速和最大腐蚀速率 Fig.7 Maximum flow velocity and corrosion rate of pipe bend under different pipe diameters



3.3 弯径比对冲刷腐蚀影响分析

弯径比对冲刷腐蚀速率的影响规律如图 10 所示。在弯径比为 2~4 时,随着弯径比增加,冲刷腐蚀 速率略有减小;当弯径比大于 5 后,冲刷腐蚀速率反 而增加。这主要是由于在较大弯径比弯管中,冲刷腐 蚀最严重位置发生了变化,如图 11 所示。弯径比较 小时,冲刷腐蚀最严重部位出现在弯头内拱侧;当弯 径比较大时,冲刷腐蚀最严重部位出现在弯头出口与 下游直管段连接处外侧。由不同弯径比下弯管截面流 速分布(见图 12)可知,较大的弯径比使得管道的 路径变长,流体流动更加平缓,最大流速更易出现在 弯头外侧。



图 10 不同弯径比下弯管最大流速和最大腐蚀速率 Fig.10 Maximum flow velocity and corrosion rate of pipe bend under different ratio of bending radius to diameter







图 12 不同弯径比下弯管截面流速(m/s)

Fig.12 Flow velocity of bend section under different ratio of bending radius to diameter (m/s)

3.4 弯管冲刷腐蚀速率预测

0

90°弯管冲刷腐蚀工况及冲刷腐蚀速率见表 3。

_.

| | 表 3 | 90°穹管冲 | 「刷腐蚀工 | 况及 | 、冲刷腐蚀 | 浊速 率 | |
|--------|---------|------------|-----------|-------|-----------|-------------|------|
| Tab.3 | Erosion | -corrosion | condition | and e | erosion-c | orrosion | rate |
| of 90° | nine be | end | | | | | |

| 项目 | 流速/(m·s ⁻¹) | 管径/mm | 弯径比 | 腐蚀速率/(mm·a ⁻¹) |
|----|-------------------------|-------|------|----------------------------|
| 1 | 1 | 54 | 1.33 | 0.081 84 |
| 2 | 2 | 54 | 1.33 | 0.091 85 |
| 3 | 3 | 54 | 1.33 | 0.099 97 |
| 4 | 4 | 54 | 1.33 | 0.101 31 |
| 5 | 5 | 54 | 1.33 | 0.101 51 |
| 6 | 1 | 27 | 1.24 | 0.082 08 |
| 7 | 1 | 103 | 1.38 | 0.081 64 |
| 8 | 1 | 213 | 1.43 | 0.081 44 |
| 9 | 1 | 406 | 1.50 | 0.081 29 |
| 10 | 1 | 54 | 2 | 0.081 86 |
| 11 | 1 | 54 | 3 | 0.081 79 |
| 12 | 1 | 54 | 4 | 0.081 83 |
| 13 | 1 | 54 | 5 | 0.0821 |

采用灰色关联分析方法,计算各影响因素(流速、 管径、弯径比)与参考因素(冲刷腐蚀速率)的关联 程度,根据关联度大小判断各影响因素对参考因素的 影响程度。灰色关联分析分为以下5步:确定选取数 据、数据无量纲化处理、关联系数计算、关联度计算

和关联度排序。按该方法, 假定数值计算得到的最大 冲蚀速率数据共有 m 组,以最大冲蚀速率作为参考 因素,其计算值为:

$$\{x_0(j)\} = \{x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(m)\}, \ j = 1, 2, 3, \cdots, m \quad (8)$$

为使参考因素和影响因素具有可比性,按式(9) 对其进行无量纲化处理:

$$X_{i}(j) = \frac{x_{i}(j)}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} x_{i}(j)}, \quad i = 1, 2, 3, \cdots, n$$
(9)

计算
$$X_i(j)$$
对 $X_0(j)$ 往第 j 个点的天联系数:

$$\xi_i(j) = \frac{\min\{|X_0(i) - X_i(j)|\} + 0.5 \max\{|X_0(j) - X_i(j)|\}}{|X_0(i) - X_i(j)| + 0.5 \max\{|X_0(j) - X_i(j)|\}}$$
(10)

关联度即为关联系数的平均值:

$$r_{i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \xi_{i}(j)$$
(11)

按灰色关联分析法,关联度越大,其相对影响程 度越大。由表 4 可知, 对于 90°弯管, 各影响因素对 冲刷腐蚀速率的影响程度为:弯径比>流速>管径。

表 4 不同影响因素关联度

| Tab.4 Correl | lation degree | of different inf | luencing factors |
|--------------|---------------|------------------|------------------|
| 影响田妻 | 冻油 | 答汉 | 查亿业 |

| 影响因素 | 流速 | 管径 | 弯径比 |
|------|--------|--------|--------|
| 关联度 | 0.8059 | 0.7615 | 0.8175 |

根据不同影响因素与冲刷腐蚀速率(V_{EC})之间的关系,在大量数据的基础上,采用幂函数回归分析方法,获得管道最大冲刷腐蚀速率预测模型,见式(12)。

$$V_{EC} = 0.08215 \frac{V^{0.14904}}{(D/54)^{0.00521} \cdot (R/D/1.33)^{0.00268}} (12)$$

将式(12)预测结果与仿真计算结果进行对比发现,预测结果的相对误差为-3.21%~2.87%,因此该预测模型拟合良好,精度较高。

4 结论

 1)随流速增加,弯管内最大流速增加,管壁最 大冲刷腐蚀速率先增大、后趋于平稳;随管径增加, 弯管内最大流速变化不大,管壁最大冲刷腐蚀速率逐 渐减小。

2)随弯径比增加,弯管内最大流速变化不大, 管壁最大冲刷腐蚀速率略有增加,冲刷腐蚀最严重位 置由弯头内拱侧向弯头出口与下游直管段连接处外 侧转移。

3)不同因素对弯管冲刷腐蚀速率影响的严重程 度由大到小为弯径比、流速、管径。

参考文献:

- 王广夫. 舰船海水管路系统防腐防污技术进展[J]. 材 料开发与应用, 2016, 31(4): 108-112.
 WANG Guang-fu. Development of anti-corrosion and fouling of seawater pipe system of marine ship[J]. Development and application of materials, 2016, 31(4): 108-112.
- [2] 刘建华, 王永坚. 船用海水管系腐蚀故障分析[J]. 船艇, 2008(4): 34-40.
 LIU Jian-hua, WANG Yong-jian. Corrosion failure analysis of marine seawater piping[J]. Ships & yachts, 2008(4): 34-40.
- [3] 黄璐琼,武兴伟. 铜镍合金管在舰船海水管系中的应用[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.
- [4] 杨光付, 裘达夫, 潘金杰, 等. 舰船海水管系腐蚀风险 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.

 [5] 周永峰, 王洪仁. 船舶海水管系的环境腐蚀研究进展
 [J]. 材料开发与应用, 2008, 23(3): 16-20, 23.
 ZHOU Yong-feng, WANG Hong-ren. Review of research on the environmental corrosion of ship seawater systems[J]. Development and application of materials, 2008, 23(3): 16-20, 23.

- [6] 姚磊, 徐雄, 傅刚, 等. 浅析舰船海水管系环境与青铜阀门的腐蚀[J]. 船舶, 2019, 30(6): 76-82.
 YAO Lei, XU Xiong, FU Gang, et al. Analysis of environment of seawater pipes and corrosion of bronze valves in warships[J]. Ship & boat, 2019, 30(6): 76-82.
- [7] 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.
- [8] 张敏丽. 船舶海水管系的腐蚀及其防护[J]. 涂装与电
 镀, 2010(1): 16-19.
 ZHANG Min-li. Corrosion and protection of seawater
 piping system for boats[J]. Coating and electroplating,
 2010(1): 16-19.
- [9] 戈亮, 汪震, 曹红波, 等. 某型船海水管路系统腐蚀治 理[J]. 船海工程, 2018, 47(6): 77-80.
 GE Liang, WANG Zhen, CAO Hong-bo, et al. Corrosion study and treatment scheme for the seawater pipeline system of a naval ship[J]. Ship & ocean engineering, 2018, 47(6): 77-80.
- [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, 80.
 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, 80.
- [11] 陈艳,黄威,董彩常.海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究 现状[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 48-53. CHEN Yan, HUANG Wei, DONG Cai-chang. Research status of numerical simulation of erosion corrosion in seawater pipeline[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(4): 48-53.
- [12] 戴明城, 万新斌, 鞠剑峰, 等. 多场耦合条件下的 B10
 铜镍合金在海水中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(7): 479-484, 489.

DAI Ming-cheng, WAN Xin-bin, JU Jian-feng, et al. Corrosion behavior of B10 Cu-Ni alloy in seawater under multi-field coupling condition[J]. Corrosion & protection, 2019, 40(7): 479-484, 489.

- [13] 李晓孟,张彦敏,国秀花,等.流动海水中铜镍合金管材的冲刷腐蚀行为[J].河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 10-13.
 LI Xiao-meng, ZHANG Yan-min, GUO Xiu-hua, et al. Erosion corrosion behavior of copper-nickel alloy pipe in flowing seawater[J]. Journal of Henan university of science and technology (natural science), 2017, 38(3): 10-13.
- [14] 周晓光, 董彩常, 宋伟伟, 等. 某型舰主机海水管路的 模拟冲刷腐蚀研究[J]. 船舶, 2013, 24(6): 65-68.
 ZHOU Xiao-guang, DONG Cai-chang, SONG Wei-wei, et al. On simulation of erosion-corrosion of main engine seawater pipelines on a warship[J]. Ship & boat, 2013, 24(6): 65-68.
- [15] 罗小兵, 钱江, 苏航, 等. 海水流速对典型金属管材腐

蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6): 555-559. LUO Xiao-bing, QIAN Jiang, SU Hang, et al. Effect of flow velocity on corrosion behavior of typical metal materials for pipes in seawater[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(6): 555-559.

- [16] 冯亚菲,方志刚,赵伊.海军装备腐蚀仿真技术现状、 挑战和展望[J].中国材料进展,2020,39(3):179-184. FENG Ya-fei, FANG Zhi-gang, ZHAO Yi. Status, challenge and prospect of the technology of corrosion simulation on navy equipment[J]. Materials China, 2020, 39(3): 179-184.
- [17] 权崇仁,孙存楼,王世忠.基于 CFD 技术的流动海水 对管路侵蚀机理分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 31(1): 54-58.
 QUAN Chong-ren, SUN Cun-lou, WANG Shi-zhong. Analysis of the mechanism of flowing seawater on duct erosion using of CFD technology[J]. Ship science and
- [18] 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

technology, 2010, 31(1): 54-58.

cause of sea-water supply pipe and control measures[J]. Ship science and technology, 2020, 42(7): 177-181.

- [19] 杨元龙. 流动冷却水对船舶管路的冲刷加速腐蚀机理
 [J]. 船海工程, 2015, 44(4): 82-87.
 YANG Yuan-long. Analysis on mechanism of flowing cooling water on ship pipeline accelerated corrosion[J].
 Ship & ocean engineering, 2015, 44(4): 82-87.
- [20] 陈艳,康伟杰,姚铭,等. 基于 FLUENT 和神经网络预测海水弯管冲刷腐蚀的模型[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(6): 436-440.
 CHEN Yan, KANG Wei-jie, YAO Ming, et al. Prediction model for erosion-corrosion of seawater bend based on fluent and neural network[J]. Corrosion & protection, 2019, 40(6): 436-440.
- [21] 彭文山,刘雪键,刘少通,等.含砂流动海水中 Q235
 钢冲刷腐蚀行为研究[J].表面技术,2019,48(9):230-237.

PENG Wen-shan, LIU Xue-jian, LIU Shao-tong, et al. Erosion-corrosion Behavior of Q235 Steel in Flowing Seawater Containing Sand Particles[J]. Surface Technology, 2019, 48(9):230-237.