

振动对冰级船海水管道冲蚀磨损的影响及防护

孙强, 徐立, 邹祥岩, 黄长绪, 汤冰

(1.高性能船舶技术教育部重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430063;

2.武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063)

摘要:目的 研究海水管道在振动工况下受冰晶颗粒的冲蚀磨损规律, 提出极地船海水管道系统优化措施, 保障船舶在极地区域安全航行。方法 通过 CFD (计算流体动力学) 中的离散相模型、冲蚀磨损模型和动网格技术, 研究不同振动工况下冰晶两相流对水平和竖直方向布置的 90°弯管冲蚀磨损特性, 预测管道使用寿命变化情况。结果 弯管磨损严重区域随振动工况发生改变, 振动对水平弯管的磨损比对竖直弯管的大; 振幅一定时, 竖直弯管使用寿命均高于水平弯管, 水平弯管从 218.64 d 降低到最小的 12.75 d, 竖直弯管从 332.40 d 降到 43.12 d。振幅为 1 mm 时, 水平弯管在频率为 10~20 Hz 之间出现使用时间转折突变的现象, 从 112.01 d 增大到 173.24 d, 然后又大幅减小。结论 振动对 90°海水管道的使用寿命产生显著影响, 80 Hz、2 mm 振动工况的管道使用寿命比无振动时减少了 205.89 天。

关键词: 振动; 海水-冰晶两相流; 90°海水管道; 布置方向; 冲蚀磨损; 数值模拟

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0148-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.024

Influence and Protection of Vibration on Erosive Wear of Polar Ship's Seawater Pipelines

SUN Qiang, XU Li, ZOU Xiang-yan, HUANG Chang-xu, TANG Bing

(1.Key Laboratory of High Performance Ship Technology, Ministry of Education (Wuhan University of Technology), Wuhan 430063, China; 2.School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: The work aims to study erosion law of seawater pipelines by ice particles under vibration condition, and put forward optimization measures for seawater pipeline system to ensure safe sail in polar region. Discrete phase model, erosion wear model and dynamic grid technology in CFD (computational fluid dynamics) were employed to study erosive wear characteristics of horizontally and vertically arranged 90° elbows by ice crystals under different vibration conditions. Service life variation of the pipelines was predicted. Vibration would change the seriously worn position of the elbows. The effect of vibration on horizontal elbows was greater than that on the vertical elbows. When the amplitude was constant, service life of the vertical elbows was longer than that of the horizontal elbows. Service life of the horizontal elbows decreased from 218.64 days to the minimum, 12.75 days while that of vertical elbows decreased from 332.40 days to 43.12 days. At the amplitude of 1mm and frequency of

收稿日期: 2017-10-14; 修订日期: 2017-11-15

Received: 2017-10-14; Revised: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479152)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51479152)

作者简介: 孙强 (1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为液固两相流管道振动冲蚀磨损。

Biography: SUN Qiang (1993—), Male, Master, Research focus: solid-liquid two phase flow erosion under vibration condition.

通讯作者: 徐立 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为船舶动力装置系统及优化。

Corresponding author: XU Li (1975—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: ship power plant system and optimization.

10~20 Hz, service time of the horizontal elbows changed abruptly from 112.01 days to 173.24 days, and then reduced significantly. Vibration has significant effects on service life of 90° seawater pipelines. Service life of pipelines subject to 80 Hz, 2 mm vibration is 205.89 days shorter than that of original ones.

KEY WORDS: vibration; seawater-ice flow; 90° seawater pipeline; arrangement direction; corrosive wear; numerical simulation

随着北极航线的开辟, 极地船舶建造关键技术成为全球造船业的热点。北极夏季冰雪消融, 船舶破冰后产生大量细小的冰晶颗粒被吸入海水系统, 形成海水-冰晶两相流流动, 容易对海水管路造成严重冲蚀磨损。目前, 国内外很多学者开展了液固两相流对管道的冲蚀磨损研究, 主要集中在三个方面: 冲蚀磨损模拟^[1-2]、冲蚀磨损实验^[3-4]、冲蚀磨损预测^[5-6]。实验验证方面, Zhang 等^[7]通过设计与真实管路相似的冲刷实验, 探究了管壁冲刷和磨损的相关性。Fluent 数值模拟方面, 王凯等^[8]在控制流体流量、粒子直径和流动参数不变的情况下, 研究 Stokes 数对 90°弯管冲蚀磨损率的影响。当前对管道冲蚀磨损研究大都考虑壁面静止情况下颗粒对壁面的冲蚀, 与实际情况不相符。极地船航行过程中受海浪冲击、破冰、船舶机械运行和流体脉动等影响, 使海水管道存在固有频率在 80 Hz 以内的低频振动, 振动对管路磨损的影响不能忽略^[9]。振动工况下液固两相流管路冲蚀磨损尚未有人研究, 而且壁面振动影响冰晶颗粒运动规律非常复杂, 造成壁面的冲蚀磨损也难以预测, 因此开展在振动工况下冰晶两相流管道的冲蚀磨损研究具有重要的科学意义。

本文采用 Fluent 中的 DPM 模型和冲蚀磨损模型, 通过 UDF 定义管壁振动工况, 研究不同振动工况下冰晶颗粒分别对水平和竖直方向布置的 90°弯管冲蚀磨损的影响, 分析管壁磨损规律, 比较水平和竖直布置方法的磨损差异, 提出海水管路的布置和加工优化措施, 相关结论可为极地船舶海水管系设计提供参考。

1 数学模型

在海水-冰晶两相流中, 采用 DPM 离散模型, 连续相在欧拉框架下求解 N-S 方程, 离散相在拉格朗日框架下求解颗粒轨迹方程。基于颗粒与壁面碰撞恢复和冲蚀磨损方程来求解管壁的磨损特性。假定海水含冰率为 10%, 此时可看作是压缩的牛顿流体, 具有湍流特性, 控制方程有连续性方程、动量守恒方程及 $k-\epsilon$ 湍流模型。

1.1 壁面碰撞恢复方程

冰晶撞击壁面后, 会发生反弹, 反弹恢复系数方程表示整个碰撞过程, 将冰晶颗粒运动速度分解为法向和切向速度, 方程表达式为^[10]:

$$\begin{cases} \epsilon_N = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} = 0.993 - 1.76\theta + 1.56\theta^2 - 0.49\theta^3 \\ \epsilon_T = \frac{v_{p2}}{v_{p1}} = 0.988 - 1.66\theta + 2.11\theta^2 - 0.67\theta^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T、N 分别为法向和切向; u_{p1} 、 u_{p2} 为颗粒碰壁前后法向速度; v_{p1} 、 v_{p2} 为颗粒碰壁前后切向速度; θ 为冲击角度。

1.2 冲蚀磨损模型

图 1 是管壁冲蚀磨损示意图, 根据 Tabakoff 等^[11]提出的模型和相关实验模型, 计算模型如下:

$$ER = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(d_p)}{A_{face}} f(\theta) u_p^{b_v} \quad (2)$$

$$f(\theta) = 5.4\theta - 10.11\theta^2 + 10.93\theta^3 - 6.33\theta^4 + 1.42\theta^5 \quad (3)$$

$$C(d_p) = 0.2 \times 2.17 B^{-0.59} \times 10e^{-7} \quad (4)$$

式中: ER 为管壁冲蚀磨损率 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); N 为撞击壁面的冰晶颗粒数; m_p 为冰晶质量流量, $m_p = 2 \text{ kg/s}$; $f(\theta)$ 为撞击角的函数; u_p 为颗粒相对于壁面的速度 (m/s); $b(v)$ 为相对速度的函数, 取 2.41; A_{face} 为管壁计算面积 (m^2); $C(d_p)$ 为粒径函数; B 为冰晶的布氏硬度, 在海水冰点附近取值为 2; θ 为撞击角度。

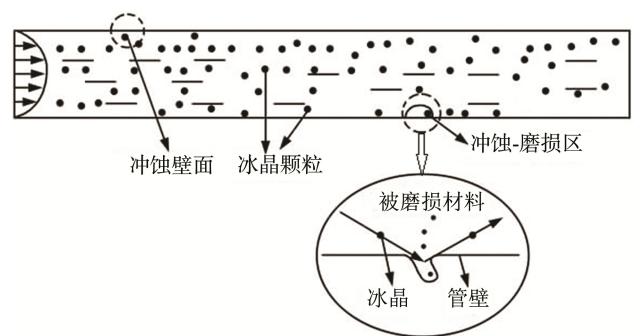


图 1 管壁冲蚀磨损示意

Fig.1 Schematic diagram for erosive wear on pipe wall

1.3 管壁振动模型

船舶上海水管路的振动由多种因素导致, 如破冰冲击、机械运转、船舶晃荡等, 且振动规律非常复杂。为了能够实现数值模拟, 将复杂的管壁振动简化为单向简谐运动, 定义圆管振动方程为 $y = A \sin(\omega t + \phi)$, 该振动初始相位角设为 0。由简谐运动规律可知, 振动速度表示为:

$$v = \frac{dy}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \phi) \quad (5)$$

2 模型建立与参数设定

2.1 管道参数与网格划分

根据船舶海水管系设计规范要求, 建立 90°弯管的几何模型如图 2 所示, 直径为 100 mm, 流入段长度为 3 m, 流出段长度为 2 m, 弯曲段半径 $R=200$ mm。船上 90°海水管系的布置主要有两种情况: 水平方向和竖直方向。水平布置时, 重力方向沿 y 轴向下, 振动方向沿 y 轴方向; 竖直布置时, 重力方向沿 x 轴向下, 振动方向沿 y 轴方向。划分相应的边界层, 由于动网格计算时很容易出现负体积, 对网格质量要求很高, 因此采用混合网格计算。液固两相在弯角处的运动比较复杂, 而且一般弯角处的磨损较严重, 要进行网格加密, 以满足计算精度的要求。

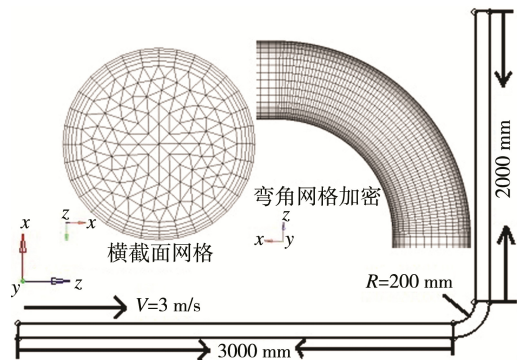


图 2 管道模型及网格划分
Fig.2 Pipeline model and grid division

2.2 海水-冰晶两相流参数

据“永盛轮”近年的北极实地航行科学考察报告及相关资料和国标的船舶海水管系流速设计规范要求, 北极夏季海水平均盐度约为 3.5%, 海水管路材质为碳钢, 密度为 7850 kg/m^3 , 在标准大气压下海水管路内海水、冰晶的物性参数如表 1 所示^[12]。

表 1 两相流物性参数
Tab.1 Physical properties parameters of two-phase flow

相	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	入口速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	体积分数/%
海水	1025	1.789×10^{-6}	3	90
冰晶	910		3	10

2.3 边界条件设定

海水在管道内为充分发展的湍流流动状态, 湍流强度可通过公式计算。冰晶颗粒是具有相同物理尺寸和性质的小球直径为 $500 \mu\text{m}$, 采用入口处的面射流源, 考虑流体与粒子之间相互作用引起的双向耦合作

用, 忽略颗粒之间的相互作用^[13]。壁面采用标准壁面函数法和无滑移边界条件, 粒子与壁面碰撞后弹性反射, 动量相应减小, 减小量由径向和法向的反弹系数决定, 出口设为 outflow, 粒子状态 escape。压力速度耦合采用经典 SIMPLE 算法, 其他均采用二阶迎风格式。

3 结果与讨论

3.1 振动对海水管道冲蚀磨损影响

3.1.1 水平 90°弯管磨损分析

图 3a 是水平布置的 90°弯管施加 1 mm 的振幅, 频率从 10 Hz 变化到 80 Hz 的弯角磨损状况, 可以看出, 随着频率的增大, 磨损严重区向弯角内侧移动。这是因为振动频率的增加使管壁附近由层流变为紊流, 冰晶颗粒撞击壁面更剧烈, 动量变化率较大, 受力向管道管壁内侧运动, 冲蚀磨损量明显增大, 因此动量传递是影响冰晶颗粒对管壁磨损的主要原因。频率 20 Hz 的最大磨损率比 10 Hz 的小, 但是整体磨损却比 10 Hz 的大。频率为 80 Hz 时, 弯角内侧的最大磨损率达到了频率为 10 Hz 时的 4.5 倍。比较图 3a 和图 3b, 振幅增加到 2 mm, 磨损严重的位置发生变化, 最大磨损率也大幅增加。频率为 10 Hz 时, 振幅为 1 mm 的最大磨损率在弯角上侧, 2 mm 时转移到弯角出口段内侧; 20 Hz 时, 振幅为 1 mm 的磨损率最大的地方在弯角内侧, 最大磨损率为 $2.36\times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 振幅为 2 mm 的最大磨损率出现在弯角出口顶部, 达到 $8.85\times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 增大了 4 倍。振幅增大时, 管壁振动强度增大, 冰晶颗粒群与管壁撞击强度增大, 反弹系数也增大, 冲蚀磨损量明显变大。频率为 80 Hz、振幅为 2 mm 的最大磨损位置呈带状分布在弯角内侧, 最大磨损率为 $2.25\times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在振动条件下, 流体各方向的湍流脉动量大幅增加。由于这些湍流脉动强度增加, 使壁面附近流体与主流区流体的质量、动量和能量交换速度加快, 所以振动的海水管路磨损更严重。

3.1.2 竖直 90°弯管磨损分析

图 4 是竖直方向布置的 90°弯管的磨损图, 比较图 4a 和图 4b, 振幅为 1 mm 时, 冲蚀严重区域均出现在弯角内侧, 入口直管段的顶部磨损也较大, 浮在顶部的颗粒与壁面撞击系数较大, 且最大磨损率随着频率的增大而增大。当振幅增加到 2 mm 时, 冲蚀磨损严重区域逐渐出现在弯角出口外侧, 这是因为颗粒轨迹在弯角处受惯性力、拖曳力、二次流等几种因素综合影响。其中, 惯性力维持颗粒沿切向运动, 拖曳力维持颗粒沿流线运动, 从而使颗粒不易脱离流线去撞击壁面。振幅变大, 颗粒撞击壁面的反弹系数也变大, 颗粒被迫脱离流线, 加上二次流驱使冰晶颗粒沿

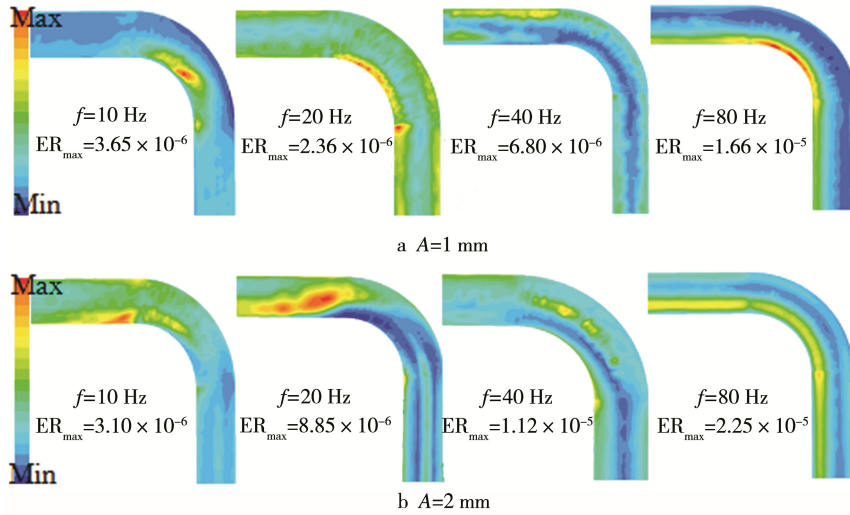


图 3 不同振动工况下水平布置的 90°弯管磨损图

Fig.3 Wear of horizontally arranged 90° elbows under different vibration conditions

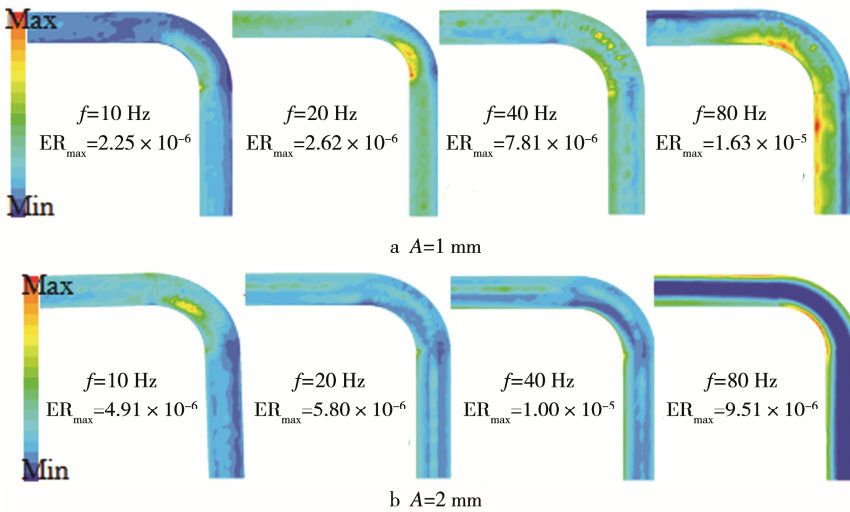


图 4 不同振动工况下竖直布置的 90°弯管磨损

Fig.4 Wear of vertically arranged 90° elbows under different vibration conditions

管壁外侧向内侧做周向运动，且振幅和频率越大，二次流影响越显著。

比较图 3 和图 4 两种布置情况下的弯角磨损状况，振动对水平布置的弯管磨损影响较大，最大磨损率和磨损严重区域均随振动工况发生变化，很难对其进行准确预测。这是因为海水-冰晶两相流在水平弯管内流动时，冰晶颗粒密度小于海水密度，分层流动比较明显，但在弯角处由于流动状态发生改变，导致磨损也发生变化。竖直布置的管路在入口段与水平布置的类似，但经过弯角后，流体为上升流动，对管壁磨损较轻。

3.2 管路失效预测及防护

根据船用管路系统常用无缝钢管壁厚标准，本文选取的公称直径为 100 mm 的钢质海水管道壁厚为 9 mm，当管壁磨损达到一半时就不满足压力要求，管路失效。通过仿真模拟得到弯管处在不同振动工况下

的最大磨损率，通过公式可预测振动对海水管路使用寿命的影响^[14]。

$$m = \rho_{\text{wall}} \cdot dV = \rho_{\text{wall}} \cdot dS \cdot \frac{1}{2} \delta \quad (6)$$

$$T = \frac{m}{ER_{\max} \times 3600 \times 24} \quad (7)$$

将不同振动工况下的最大磨损率带入式 (7)，得到海水管道使用寿命随振动参数的变化，如图 5。

研究的管壁没有做任何强化保护，结果可能和实际情况有偏差，但使用寿命的变化趋势和磨损严重位置值得参考。由图 5 可以看出，在无振动工况下，水平布置海水管道使用寿命为 218.64 d，竖直布置的管道寿命为 332.40 d，而且在所有振动工况下，竖直布置管的使用寿命大都高于水平布置管。这是因为水平布置管在整个流动过程中，冰晶颗粒均对其有影响，而竖直管在流出段属于上升流动，冰晶颗粒对其影响较小，所以在布置管道时应尽量减少水平 90°弯角的

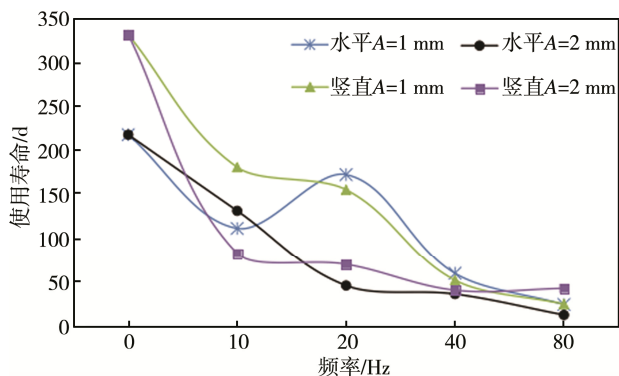


图 5 海水管道在不同振动工况下的寿命预测

Fig.5 Service life prediction for seawater pipes under different vibration conditions

布置。在水平管顶部和弯角内侧应镀上耐磨金属层防护,防止冰晶颗粒对其产生严重磨蚀,加快失效。当振幅为 1 mm 时,水平弯管的使用寿命呈先降低、再升高、再降低的趋势,在频率为 10~20 Hz 时管壁使用寿命出现转折点,这是因为随着频率的增大,冰晶颗粒运动趋向均匀,而不是集中磨损,但是平均磨损量高于 10 Hz 时的平均磨损量。随着频率的增大,冰晶撞击壁面愈加激烈,管壁局部磨损更加严重,竖直弯管使用寿命一直呈下降趋势。此时应控制管道的振动频率,使振动频率不在 10 Hz 附近,这样可有效延长使用寿命。当振幅为 2 mm 时,水平弯管使用寿命随频率的增大一直下降,在 0~20 Hz 范围内,管壁使用寿命下降的幅度最大。竖直弯管使用寿命在 0~10 Hz 内大幅减少,之后变化比较平缓。所以船上应在振动强度大的地方给管道安装相应的减振装置,以避免因振幅影响造成使用寿命严重减少,产生安全隐患。80 Hz 的振动工况可使管壁使用时间减少 205.89 d,所以在极地船管路布置时要根据仿真结果采取相应措施,来最大程度地降低冰晶颗粒对管道造成的损害。另外在海水管道入口处安装过滤装置,控制两相流入口流速,也可减轻冰晶颗粒对海水管道的冲蚀磨损,延长管道使用寿命。

4 结论

1) 振动对水平布置弯管的磨损影响更大,水平布置弯管磨损严重位置随振动工况的变化而不断移动,而竖直弯管磨损严重位置集中在弯角内侧。

2) 振幅不变时,10 Hz 之后,竖直弯管使用寿命均高于水平弯管,水平弯管从 218.64 d 降低到最小的 12.75 d,竖直弯管从 332.40 d 降到 43.12 d。振幅为 1 mm 时,水平弯管在频率为 10~20 Hz 之间出现使用时间转折突变的现象,从 112.01 d 增大到 173.24 d,然后又大幅减小。

3) 设计建造海水管道时,在弯角处可进行表面耐磨改性处理,并安装管道减振装置,以延长海水管道使用寿命。

参考文献:

- [1] 练章华,陈新海,林铁军,等.排砂管线弯接头的冲蚀机理研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(1):150-156.
LIAN Z H, CHEN X H, LIN T J, et al. Study on Erosion Mechanism of Bending Joint in Blooey Line[J]. J Southwest Petrol Univ (Sci Technol Ed), 2014, 36(1): 150-156.
- [2] 丁矿,朱宏武,张建华,等.直角弯管内液固两相流固体颗粒冲蚀磨损分析[J].油气储运,2013,32(3):241-246.
DING K, ZHU H W, ZHANG J H, et al. Erosion Wear Analysis of Solid Particles in Liquid-Solid Two-phase Flow of Right-angle Bend Pipe[J]. Oil Gas Storage Transp, 2013, 32(3): 241-246.
- [3] NEVILLE A, REZA F, CHIOVELLI S, et al. Erosion-corrosion Behavior of WC-based MMCs in Liquid-Solid Slurries [J]. Wear, 2005, 259(1): 181-195.
- [4] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged Tees[J]. Comput Fluids, 2004, 33 (10): 1251-1258.
- [5] PENG W S, CAO X W. Numerical Simulation of Solid Particle Erosion in Pipe Bends for Liquid-Solid Flow [J]. Powder Technology, 2016, 294: 266-279.
- [6] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact: Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation[J]. Wear, 2005, 259(1): 95-101.
- [7] ZHANG G A, ZENG L, HUANG H L, et al. A Study of Flow Accelerated Corrosion at Elbow of Carbon Steel Pipeline by Array Electrode and Computational Fluid Dynamics Simulation [J]. Corrosion Science, 2013, 77: 334-341.
- [8] 王凯,李秀峰,王跃,等.液固两相流中固体颗粒对弯管冲蚀破坏的位置预测[J].工程热物理学报,2014,35(4):691-694.
WANG K, LI X F, WANG Y, et al. Numerical Prediction of the Maximum Erosion Location in Liquid-Solid Two-phase Low of the Elbow[J]. J Eng Thermophys, 2014, 35(4): 691-694.
- [9] 王显正,赵德有.船舶总振动固有频率实用算法[J].中国舰船研究,2007,2(1):56-58.
WANG X Z, ZHAO D Y. The Total Natural Frequency of Vibration of Ships Practical Algorithm [J]. China Ship Research, 2007, 2(1): 56-58.
- [10] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A Numerical Investigation of Solid Particle Erosion Experienced within Oilfield Control Valves[J]. Wear, 1998, 216: 184-193.
- [11] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion Prediction in Turbo Machinery Resulting from Environmental Solid Particles[J]. J Aircraft, 1975, 12(5): 471-478.
- [12] 赵庆爱.永盛轮随船日记(上)[J].中国远洋航务,2013(9):36-42.
ZHAO Q A. Yongsheng Round with the Ship Diary (on)[J]. China Ocean Shipping, 2013(9): 36-42.
- [13] SUZUHI M, INABA K, YAMAMOTO M. Numerical Simulation of Sand Erosion in a Square-section 90-degree Bend[J]. Journal of Fluids Science and Technology, 2008, 3(7): 868-880.
- [14] XU L, SUN Q, TANG B, et al. Numerical Simulation of Ice Particle Erosion in Seawater Pipelines of Polar Ship under Vibration Conditions[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 9-19.