

结构与可靠性

极地船波纹换热管冲蚀磨损研究与防护

徐立^{1,2}, 孙强^{1,2}, 刘宏刚^{1,2}, 汤冰^{1,2}, 黄长绪^{1,2}

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

2. 武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对极地船波纹管换热器中进入冰晶颗粒对管路产生严重腐蚀磨损问题, 采用 CFD 中欧拉-拉格朗日离散框架的 DPM 模型及腐蚀磨损模型研究流速、冰晶颗粒直径和含冰率条件变化对水平直波纹管磨损特性的影响。结果表明: 波纹管磨损严重位置发生在波纹与直管衔接处、波谷处以及与流速相对的波峰面, 且出口直管段磨损最为严重, 而水平光滑圆管顶部位置磨损比较严重, 但波纹管的磨损率均大于相同条件下光滑直管的磨损率; 流速对磨损率影响最大, 可使波纹管使用寿命减少 10 倍以上; 冰晶颗粒直径对波纹管磨损影响较小; 含冰率对管壁磨损也有很大影响, 含冰率为 10% 时波纹管使用寿命比含冰率为 2% 时的减少 4.2 倍。根据以上研究结果提出了相应的防护措施。

关键词: 极地船; 波纹管换热器; 腐蚀; 磨损率

中图分类号: U664.5⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)01-0027-05

Research and Protection of Erosion of Corrugated Heat Transfer Tubes on Polar Ships

Xu Li^{1,2}, Sun Qiang^{1,2}, Liu Honggang^{1,2}, Tang Bing^{1,2}, Huang Changxu^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology),

Ministry of Education, Hubei Wuhan 430063; 2. School of Energy and Power Engineering,

Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: In order to solve the problem of severe erosion of the corrugated heat exchanger on the polar ship, using the DPM model of Euler-Lagrangian discrete frame in CFD and the erosion wear model to analyze the effects of different inlet velocities, ice particle diameters and ice contents on the wear characteristics of horizontal straight corrugated tubes. The numerical results show that: the location of severe wear occurs at the interface between the corrugated and the straight tube section, the trough, and the crest surface against the flow, and the export section of the straight tube wore down the most severely, and the top of horizontal smooth circular tube is relatively serious; the erosion rate of corrugated tube is larger than the erosion rate of smooth straight tube under the same condition; the flow velocity has largest impact on erosion rate and can reduce the service life of corrugated tube by more than 10 times; the effect of ice crystal diameter on the wear of corrugated tube is small, the ice content also has a great influence on wall erosion, when ice content is 10%, service life of corrugated tube decreases by 4.2 times than ice content of 2%. The protective measures are given according to the research.

Key words: polar ship; corrugated heat transfer tube; erosion; wear rate

收稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479152)。

作者简介: 徐立(1975-), 男, 博士、副教授, 主要研究方向为极地船舶关键技术, E-mail: 1522635011@qq.com。

0 引言

波纹管换热器主要应用在管内外冷热流体热交换的场合,其材料主要为薄壁碳钢。波纹管内外壁波纹可以改变流体的流动状态,增大扰动和传热面积,从而达到双面强化传热的目的。波纹管换热器的传热系数可达到普通管壳换热器的 2 倍,所以其常用在船舶的海水冷却系统中。然而北极夏季海冰融化,大量细小的冰晶颗粒随海水流入海水冷却系统,形成冰晶两相流动,增大了波纹管内壁的摩擦,管壁受冰晶颗粒腐蚀磨损导致失效等问题。因此,开展冰晶两相流对波纹管路的腐蚀磨损研究对极地船波纹管换热器的设计和防护有很大的参考价值。

Nørgaard 等^[1]通过实验方法研究了冰浆流体在不同管型管道中的流动阻力,经计算得出对应局部的阻力系数,并可测算出管道的磨损情况。Lee 等^[2]通过实验测试了水平 90°弯管内冰浆流体磨阻特性,分析了不同含冰率对管路冲蚀磨损的变化规律。丁矿等^[3]通过 CFD 模拟管道内液固两相流在不同颗粒含量、粒径、流速下对管道的磨损特性,并总结出相关磨损规律。邓义斌等^[4]仿真了冰水两相流在不同流速、颗粒直径、冲蚀角度条件下对弯管的冲蚀磨损特性。但目前对管道内冰晶两相流的摩擦磨损特性研究尚属于起步阶段,且对波纹管等形状复杂的管型还未涉及,所以波纹管的腐蚀磨损规律还不能预测。

本文利用 CFD 中的 DPM 离散模型和冲蚀磨损模型研究非相变情况下不同流速、颗粒直径和含冰率对波纹管的冲蚀磨损规律,与相同工况下的水平直圆管磨损特性进行比较,验证仿真的可信度;对管壁失效进行分析,最后提出相应的防护措施,为极地船波纹管换热器设计和防护管理提供参考。

1 数学模型

1.1 离散相控制方程

采用 DPM 离散模型在欧拉框架下求解连续相的 N-S 方程;在拉格朗日框架下求解离散相颗粒轨迹方程;然后在离散时间的步长进行积分运算,可解出冰晶颗粒的轨迹方程以及动量传递附加方程。通过对方程的积分,可得出每一冰晶颗粒运动轨迹上每一点的粒子速度^[5-6]。方程式如下:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \vec{g} \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_v + F_c \quad (1)$$

$$F_D = \frac{3\mu}{4\rho d_p^2} C_d Re_s \quad (2)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d(\vec{u} - \vec{u}_p)}{dt} \quad (3)$$

式中: u 为海水速度, ($m \cdot s^{-1}$); u_p 为冰晶颗粒速度, ($m \cdot s^{-1}$); ρ 为海水密度, ($kg \cdot m^{-3}$); ρ_p 为冰晶颗粒密度, ($kg \cdot m^{-3}$); d_p 为颗粒直径, m ; μ 为海水动力黏度; C_d 为拖曳系数; Re_s 为颗粒雷诺数; g 为重力加速度, ($kg \cdot s^{-2}$); F_D 为单位质量曳力; F_v 为附加质量力; F_c 为 Saffman 升力等其他作用力;忽略压力梯度等。

1.2 壁面碰撞恢复方程

冰晶颗粒撞击壁面后受力反弹对其运动轨迹影响很大,可用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,颗粒运动过程中撞击壁面反弹的示意图如图 1 所示。

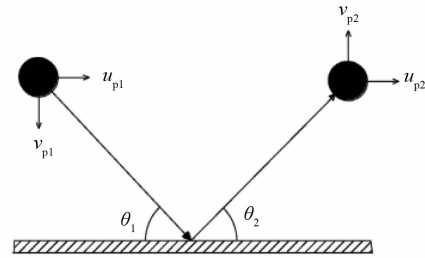


图 1 颗粒与壁面碰撞反弹示意图

法向和切向系数方程表达式如下^[7-8]:

$$\begin{cases} \varepsilon_N = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} = 0.993 - 1.76\theta + 1.56\theta^2 - 0.49\theta^3 \\ \varepsilon_T = \frac{v_{p2}}{v_{p1}} = 0.988 - 1.66\theta + 2.11\theta^2 - 0.67\theta^3 \end{cases} \quad (4)$$

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, ($m \cdot s^{-1}$); v_{p1} 、 v_{p2} 为颗粒碰壁前后切向速度, ($m \cdot s^{-1}$); θ 为冲击角度。

1.3 腐蚀磨损模型

颗粒直径、撞击速度及含冰率等是冲蚀模型选择时须要考虑的主要因素,根据 Tabakoff 等^[9]提出的适用冲蚀模型,选取如下模型:

$$ER = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(d_p)}{A_{face}} f(\theta) u_p^{b(v)} \quad (5)$$

$$f(\theta) = 5.4\theta - 10.11\theta^2 + 10.93\theta^3 - 6.33\theta^4 + 1.42\theta^5 \quad (6)$$

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

式中: ER 为管壁腐蚀磨损率, ($kg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$); N 为撞击壁面的冰晶颗粒数; m_p 为冰晶质量流量, ($kg \cdot s^{-1}$); $f(\theta)$ 为撞击角的函数; u_p 为颗粒相对于壁面的速度, ($m \cdot s^{-1}$); $b(v)$ 为此相对速度的函数,取 2.41; A_{face} 为壁面计算单元面积, m^2 ;

$C(d_p)$ 为冰晶直径的函数; 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。

2 模型建立与参数设定

2.1 波纹管几何模型与网格划分

根据波纹管换热器设计规范, 建立水平直波纹管的几何模型如图 2 所示。直径为 42/33 mm, 长度为 1.2 m, 两端的直管段分别为 100 mm, 波距 $F=20$ mm, 波厚 $f=7.7$ mm, 壁厚 1 mm, 受重力方向沿 y 轴向下。采用四面体网格划分边界层, 满足计算精度的要求。

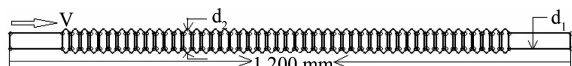


图 2 波纹管几何模型

2.2 相关介质参数

根据“永盛轮”在 2013 ~ 2015 年间的北极实地航行科学考察报告及相关资料, 以及波纹管材料使用规范: 北极夏季海水平均盐度约为 35‰, 海水密度为 $1\,025\text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, 黏度为 $1.789 \times 10^{-6}\text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$; 冰晶颗粒密度为 $910\text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, 假定冰晶颗粒具有相同的物理尺寸和性质, 其入口速度与海水的入口速度相同; 波纹管材质为碳钢, 密度为 $7\,850\text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$ 。数值模拟采用控制变量的方法: 流速变化时, 冰晶体积分数为 6%, 颗粒直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$; 冰晶体积分数变化时, 流速为 $2\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$, 颗粒直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$; 颗粒直径变化时, 流速为 $2\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$, 冰晶颗粒体积分数为 6%^[10-11]。相关参数变化如表 1 所示。

表 1 两相流参数值

两相流参数	数值				
序号	1	2	3	4	5
入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1	1.5	2	2.5	3
冰晶体积分数	2%	4%	6%	8%	10%
颗粒直径/ μm	100	200	300	400	500

2.3 边界条件设定

冰晶颗粒通过入口处的面射流源流入波纹管, 考虑到流体与粒子之间相互作用引起的双向耦合作用, 忽略冰晶颗粒间的相互作用^[12]。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, 粒子状态为 escape。采用非稳态模拟, 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 腐蚀磨损分析

图 3 (a) 为随流速变化波纹管磨损的变化情况。可以看出: 流速为 $1\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时, 波纹管壁基本无磨损; 随着流速的增大, 在出入口直管和波纹连接处出现磨损并逐渐增大, 这是因为在该区域流体流动状态发生急剧变化, 冰晶颗粒对管壁造成直接撞击, 产生严重冲蚀, 由于冰晶的密度小于海水, 所以整个管壁上部分的磨损比底部的大。当流速增大到 $3\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时, 波纹管波谷处和流速相对的波峰面磨损严重, 磨损最大的地方出现在出口直管段和波纹衔接处, 而光滑圆管磨损严重处一直在管道顶部的位置。图 3 (b) 为随颗粒直径变化波纹管磨损的变化情况。当直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时, 波纹管上部磨损较为明显, 随着颗粒直径逐渐增大, 出入口直管段逐渐出现磨损, 但变化不大, 说明颗粒直径对波纹管的磨损影响较小。图 3 (c) 为含冰率变化对波纹管磨损的影响情况。含冰率为 2% 时, 管壁的磨损较轻, 当含冰率逐渐增大时, 波纹管壁磨损也逐渐加重, 且磨损大的地方同样出现在出入口直管和波纹衔接的地方和波谷、以及与流速相对的波峰面。所以在设计波纹管时应缩短与波纹连接的出入口直管段长度, 尤其是出口直管段长度; 对出入口直管段和波谷, 以及与流速相对的波峰面进行加厚和镀耐磨层处理, 可有效避免冰晶颗粒对波纹管造成过度腐蚀, 减缓失效速度。

3.2 磨损率随不同参数的变化情况

图 4 为波纹管受冰晶颗粒冲蚀磨损影响, 管壁平均磨损率和最大磨损率随流速、含冰率及冰晶颗粒直径的变化规律; 图 5 为水平直圆管平均磨损率随流速、含冰率及冰晶颗粒直径的变化规律。

图 4 (a) 为波纹管磨损率随流速变化情况。波纹管的平均磨损率和最大磨损率都随流速的增大而显著增大, 最大磨损率在流速为 $1 \sim 2\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时变化比较平缓; 在 $2\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 之后, 最大磨损率大幅增长。图 4 (b) 为含冰率对磨损率的影响。随着冰晶体积分数的增加, 波纹管平均磨损率均呈线性上升, 最大磨损率先增大, 在体积分数为 8% 时发生转折开始减小。图 4 (c) 为磨损率随颗粒直径变化规律。随着冰晶直径的增大, 波纹管的平均磨损率也随之增大, 但变化率较小; 但最大磨损率随直径的增大先减小再增大, 且颗粒直径在 $100 \sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 之间时减小率较大, $200 \sim 500\text{ }\mu\text{m}$ 之间

时趋于平稳。图5为在相同条件下水平直圆管的平均磨损率随各参数变化规律。可以看出:磨损率都随参数的增大而增大,同样流速对其影响最大,含冰率和颗粒直径对其影响较小;同时直管的平均磨损率均小于相同工况下波纹管的磨损率,这也验证了波纹管数值模拟结果的准确性。

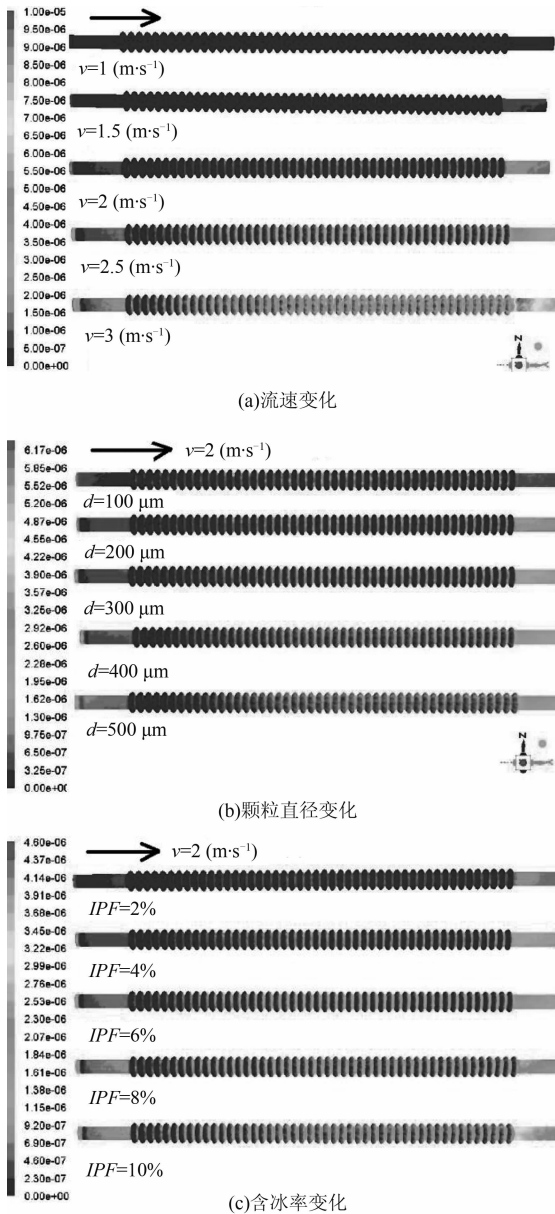


图3 流速、颗粒直径及含冰率变化时的波纹管壁面磨损量云图

4 波纹管失效预测及防护措施

根据波纹换热管的壁厚标准,选取的 $\Phi 42/33$ mm波纹管的壁厚为1 mm,当管壁磨损量超过壁厚的50%时将不满足压力的要求,即管路失效。图6为按式(8)、(9)计算得出的波纹管使用寿命随各参数变化情况。

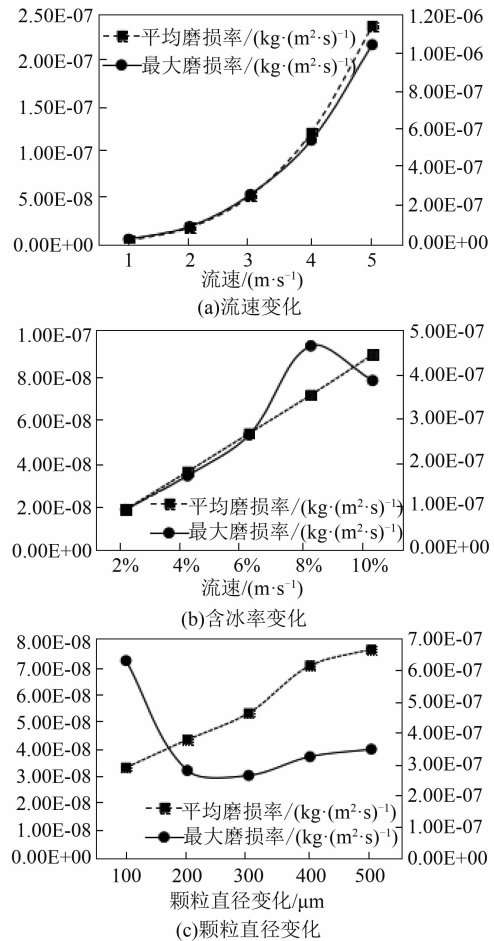


图4 波纹管磨损率随流速、含冰率及冰晶颗粒直径的变化规律

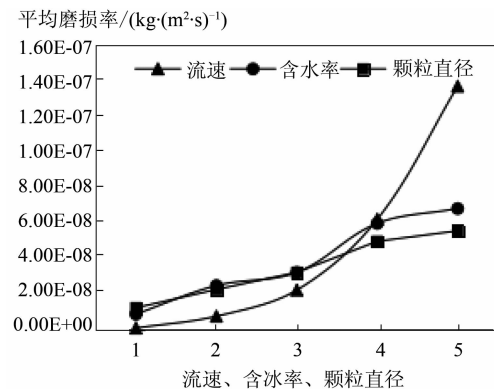


图5 直圆管平均磨损率随流速、含冰率及冰晶颗粒直径的变化规律

$$m = \rho_{\text{wall}} dV = \rho_{\text{wall}} dS \frac{1}{2} \delta \quad (8)$$

$$T = \frac{m}{ER_{\text{max}} \times 3600 \times 24} \quad (9)$$

式中: m 为单位质量, kg; dV 为单位体积, m^3 ; dS 为单位面积, m^2 ; ER_{max} 为最大磨损率, $(\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1})$; T 为使用寿命。

从图6可知:波纹管使用寿命随流速和含冰率

的增大而显著下降, 随冰晶颗粒直径的增大先增大后减小, 但变化率很小。流速对波纹管使用寿命的影响最大, 使用寿命从流速为 $1 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时的 506.44 天降到 $3 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时的 43.68 天, 缩短 10.6 倍。所以船舶在极地航行时要严格控制含冰晶颗粒的冷却海水以较低的流速流入波纹管换热器, 避免因流速过大对换热管产生严重腐蚀磨损, 加快波纹管失效速度。其次, 含冰率对波纹管的使用寿命影响也较大, 含冰率 2% 时, 使用寿命为 515.64 天, 含冰率 8% 时, 使用寿命仅为 98.54 天, 减少 4.2 倍。相应的防护措施有: 可在波纹管换热器入口前安装一个缓冲的加热水箱, 当含冰率较高时加温融化部分冰晶; 也可向海底箱通入蒸汽加热以融化部分冰晶, 将换热器入口处冰晶体积分数控制在 6% 以下, 以保证换热器能长时间运行。冰晶颗粒的直径对波纹管的磨损影响较小, 通过在海底阀和换热器入口使用滤网将颗粒直径控制在 $300 \text{ }\mu\text{m}$ 左右, 对换热器的腐蚀磨损最小。

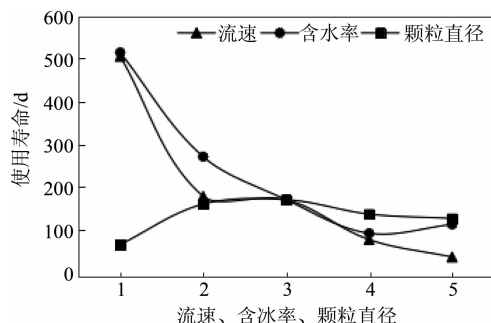


图 6 波纹管失效时间随各参数变化规律

5 结 论

(1) 波纹管易发生腐蚀磨损的区域在波纹与直管的衔接处、波谷处以及与流向相对的波峰面, 可对该区域管壁采取加厚或镀层的措施来延长其使用寿命。

(2) 波纹管平均磨损率随流速和颗粒直径增大而增大, 但变化率较小, 与含冰率之间几乎呈线性变化, 且波纹管磨损率均大于相同工况下的水平直圆管磨损率。

(3) 波纹管最大磨损率随流速增大而增大, 在流速小于 $2 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 时变化率较小, 流速大于 $2 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 后磨损率大幅增大。随冰晶颗粒直径的增大, 最大磨损率先减小后增大, 在直径为 $300 \text{ }\mu\text{m}$ 时其值最小; 当含冰率小于 6% 时, 最大磨损率变化较小, 在 8% 时达到最大值。

(4) 波纹管使用寿命随流速和含冰率的增大

而大幅下降, 最大从 506.44 天减少到 43.68 天, 因而应严格控制波纹管换热器入口的流速和含冰率; 冰晶颗粒直径对波纹管使用寿命影响最小, 通过滤器将冰晶颗粒直径控制在 $300 \text{ }\mu\text{m}$ 左右最佳。

参考文献

- [1] NØRGAARD E, SØRENSEN T A, HANSEN T M, et al. Performance of components of ice slurry systems: pumps, plate heat exchangers, and fittings [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28 (1): 83-91.
- [2] LEE D W, YOON C I, YOON E S, et al. Experimental study on flow and pressure drop of ice slurry for various pipes [C]. Fifth Workshop on Ice-Slurries of the International Institute of Refrigeration. Stockholm (Sweden): 2002.
- [3] 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.
- [4] 邓义斌, 王飞显, 范世东, 等. 冰水两相流对海水管道冲蚀磨损特性数值模拟 [J]. 船海工程, 2015, 44 (1): 150-154.
- [5] KREPPER E, LUCAS D, PRASSER H M. On the modelling of bubbly flow in vertical pipes [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235 (5): 597-611.
- [6] LAIN S, BRODER D, SOMMERFELD M, et al. Modelling hydrodynamics and turbulence in a bubble column using the Euler-Lagrange procedure [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28 (8): 1381-1407.
- [7] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles [J]. Journal of Aircraft, 2012, 12 (5): 471-478.
- [8] FORDER A, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves [J]. Wear, 1998, 216 (2): 184-193.
- [9] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles [J]. Journal of Aircraft, 2012, 12 (5): 471-478.
- [10] 赵庆爱. 永盛轮随船日记 (上) [J]. 中国远洋航务, 2013 (09): 36-42.
- [11] 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.
- [12] SUZUKI 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.