

表面摩擦磨损与润滑

冰水两相流管道冲蚀磨损影响与防护

刘寒秋, 刘爱华, 范世东, 危卫

(武汉理工大学 能源与动力工程学院 船舶动力工程技术交通部重点实验室, 武汉 430063)

摘要: **目的** 研究低温条件下冰晶颗粒随水流进入弯管并对弯管造成的冲蚀磨损, 确定弯管关键防护区域。**方法** 通过欧拉-拉格朗日双向耦合法, 研究了冰晶颗粒的斯托克斯数、流速、粒径、质量流率以及管道弯径比对磨损特性的影响。**结果** 冰晶颗粒的斯托克斯数会显著影响最大磨损率区域变化, 当斯托克斯数由 2.8 增大至 5.84 时, 最大磨损率区域由弯头内侧拱壁向弯头外拱壁与出口管道连接处转移, 斯托克斯数高出或低于该范围时, 最大磨损率位置不再发生变化, 斯托克斯数的增加在一定范围内对最大磨损率没有绝对性影响。流速、粒径和质量流率的增大会使得最大磨损率不断升高, 粒径和流速的变化会改变最大冲蚀磨损区域, 而质量流率的改变对最大冲蚀磨损区域没有明显影响。弯径比的增大也会使得最大冲蚀磨损区域由弯头内拱壁向外拱壁与直管连接处转移, 并降低最大磨损率。**结论** 冰水两相流弯管的最大冲蚀磨损区域主要集中在弯头内拱壁、弯头外拱壁与出口直管连接处、靠近弯头侧壁等处, 且大弯径比的管道可实现减蚀防护。

关键词: 管道; 冰水两相流; 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(2019)02-0109-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.016

Erosion Influence and Protection of Ice-Water Two Phase Flow Pipe

LIU Han-qiu, LIU Ai-hua, FAN Shi-dong, WEI Wei

(Key Laboratory of Ship Power Engineering Technology, Ministry of Communications, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: The work aims to study erosion of pipe by ice particles in water flow at low temperature and confirm critical protection regions of the elbow. The effects of Stokes numbers, velocity, particle diameter, mass flow rate and R/D ratio on erosion characteristics were studied through two-way coupling method of euler and lagrange. The Stokes number of ice particles had a significant effect on the regions with the maximum erosion rate. When the Stokes number increased from 2.8 to 5.84, the location with the maximum erosion rate region was transferred from inner extrados of the bend to outer extrados of the bend close to straight pipe. When the Stokes number was higher or lower than that range, the location with the maximum erosion regions did not change at all. The increase of Stokes number had no obvious effect on the maximum erosion rate within a certain range. As the velocity, particle diameter and mass flow rate increased, the maximum erosion rate grew. The variations of particle diameter

收稿日期: 2018-08-25; 修订日期: 2018-11-04

Received: 2018-08-25; Revised: 2018-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51679178)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51679178)

作者简介: 刘寒秋 (1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为海洋工程多相流数值模拟。

Biography: LIU Han-qiu (1994—), Male, Master, Research focus: numerical simulation of multiphase flow in ocean engineering.

通讯作者: 刘爱华 (1978—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为可靠性分析。邮箱: lah_hal@163.com

Corresponding author: LIU Ai-hua (1978—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: reliability analysis. E-mail: lah_hal@163.com

and velocity changed the location of with the maximum erosion rate regions, but the mass flow rate had no obvious effect on the location of maximum erosion rate regions. The growth of R/D ratio also caused the location with the maximum erosion rate to shift from inner extrados to outer extrados of the bend, where it was close to straight pipe and the maximum erosion rate decreased. The regions with the maximum erosion rate of ice-water two phase flow elbow are mainly concentrated at three zones: inner extrados of the bend, outer extrados of the bend close to straight pipe and the side wall near the elbow. Furthermore, erosion rate can be reduced by a long R/D ratio elbow.

KEY WORDS: pipe; ice-water two phase flow; erosion; numerical simulation

管道是海洋工程中最常用的运输手段,在海岸开发和保护过程中,经常会遇到颗粒对管道冲蚀磨损的问题。尽管目前有许多的过滤手段,但仍会有部分颗粒随海水进入管道中,特别是冬季施工时,一些细小的冰晶随海水进入管道,极易对海水管道造成冲蚀磨损。目前,国内外学者对液固两相流冲蚀磨损开展了很多研究,主要分为实验和数值模拟。Chen等学者^[1-4]开展了液固两相流冲蚀磨损实验研究。Wang等学者^[5-7]根据相关实验数据对液固两相流冲蚀磨损进行了数值模拟研究。除此以外,王凯等^[8]对含砂液固两相流弯管最大冲蚀磨损位置进行了研究,分析了斯托克斯数对磨损位置的影响。Zhu等^[9]对弯头处的减磨进行了结构方面的研究。以上考虑的两相流冲蚀磨损,均为颗粒密度大于流体密度的情况,考虑颗粒密度小于流体的情况较少,特别是对于冰水两相流管道的冲蚀磨损研究鲜有涉及。由于存在着相变的影响,难以通过实验获得有效的数据,现阶段关于冰水两相管道冲蚀磨损研究主要停留在数值模拟上。孙强等^[10]对振动条件下冰水两相流管道的冲蚀磨损数值模拟进行了研究。王飞显等^[11]对冰水两相流的直管和弯管冲蚀磨损进行了数值模拟研究。但这些研究只停留在初步探索上,没有深入考察冰水两相流管道的冲蚀磨损影响因素和最大冲蚀磨损区域的变化规律。因此研究斯托克斯数、流速、粒径等因素对弯管的冲蚀磨损,对进一步全面揭示冰晶对管道的冲蚀磨损规律有重要的工程价值。

本文考虑冰晶与流场的相互耦合作用,基于欧拉-拉格朗日双向耦合方法,研究斯托克斯数、流速、粒径、质量流率和弯径比对90°碳钢材料的弯管冲蚀磨损的影响,进而得到最大冲蚀磨损区域和最大冲蚀磨损率变化规律。研究结果可为冰水两相流管道设计与防护提供理论指导。

1 模型建立

1.1 控制方程

液相为不可压缩流体,采用Navier-Stokes方程,其连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau) + \rho_g + S_M \quad (2)$$

式中, ρ 为液体密度(kg/m^3); u 为瞬时速度(m/s); P 为压力(N); τ 为应力张量; ρ_g 为液体所受重力(N); S_M 为由于固相作用而增加的动量($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$)。

冰晶颗粒的控制方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{g(\rho_f - \rho_p)}{\rho_p} + F_{\text{other}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_D = \frac{(u_f - u_p)}{\tau} \\ \tau = \frac{24\rho_p d_p}{18\mu_f C_D \text{Re}_p} \\ \text{Re}_p = \frac{\rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu_f} \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_D 为流体作用在颗粒上的阻力(N); τ 为颗粒的弛豫时间^[12]; Re_p 为颗粒雷诺数; u_f 和 u_p 分别为液相和固相速度(m/s); ρ_f 和 ρ_p 分别为液相和固相密度(kg/m^3); d_p 为冰晶颗粒粒径(m); μ_f 为流体黏度($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$); F_{other} 包括Basset力、Saffman升力、Magnus升力等,由于这些力的影响作用很小,在本工作中可忽略不计。

1.2 壁面反弹模型

冰晶颗粒与管壁产生碰撞后,存在着能量损失和转化,本工作中须考虑反弹系数。反弹系数将颗粒与壁面碰撞前后的速度分解为切向速度和法向速度,其表达式为^[13]:

$$\begin{cases} e_n = \frac{u_{n2}}{u_{n1}} = 0.988 - 0.78\gamma + 0.19\gamma^2 - 0.024\gamma^3 + 0.027\gamma^4 \\ e_t = \frac{u_{t2}}{u_{t1}} = 1 - 0.78\gamma + 0.84\gamma^2 - 0.21\gamma^3 + 0.028\gamma^4 - 0.022\gamma^5 \end{cases} \quad (5)$$

式中, γ 为碰撞前颗粒冲击方向与壁面夹角, n 、 t 分别代表法向和切向, u_{n1} 和 u_{t1} 分别为碰撞前法向和切向速度, u_{n2} 和 u_{t2} 分别为碰撞后法向和切向速度, e_n 和 e_t 分别为颗粒法向和切向反弹系数。

1.3 磨损模型

低温条件下,冰晶颗粒对海水管道的冲蚀磨损可

通过 Oka 等^[14]提出的冲蚀磨损模型来计算，其表达式为：

$$ER = 1.0 \times 10^{-9} \rho_w k_0 (HV)^{k_1} \left(\frac{u_p}{v_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{k_3} f(\gamma) \quad (6)$$

$$f(\gamma) = (\sin \gamma)^{n_1} [1 + HV(1 - \sin \gamma)]^{n_2} \quad (7)$$

式中，ER 为冲蚀磨损率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)； ρ_w 为材料的密度 (kg/m^3)；HV 为材料的维氏硬度 (GPa)； u_p 为冰晶颗粒冲击速度 (m/s)； v_{ref} 为相对速度 (m/s)； d_{ref} 为相对粒径。

公式 (7) 中第一项为冰晶颗粒对钢管冲击引起的塑形变形，第二项为切削作用^[15]，其低温条件下对碳钢管道的冲蚀磨损由图 1 说明。

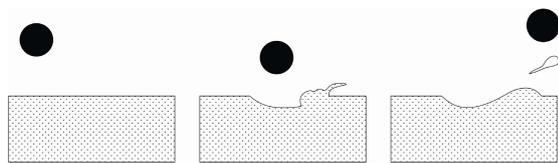


图 1 冰晶对管道内表面的侵蚀
Fig.1 Erosion of ice crystal to inner surface of pipe

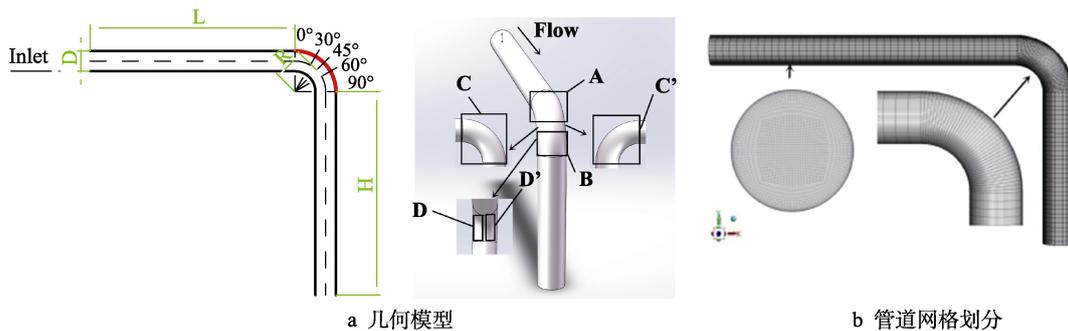


图 2 管道几何模型及网格划分
Fig.2 Geometric model and mesh division of pipe: a) geometric model; b) mesh division of pipe

网格的数量在一定程度上会影响到磨损率的大小，因此必须对网格进行无关性检验，图 3 计算了流速为 5 m/s，冰晶颗粒粒径为 500 μm ，颗粒质量流率为 0.5 kg/s 时，不同网格数量下得到的最大磨损率随网格数量的变化曲线。

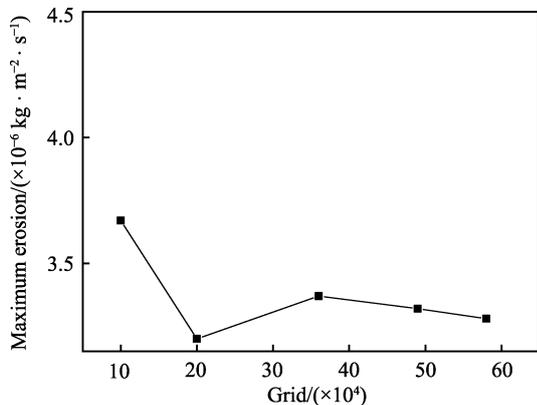


图 3 网格独立性测试
Fig.3 Grid independence test

本文研究对象为钢管，其密度为 7800 kg/m^3 ，维氏硬度为 1.8 GPa，公式(6)中冲蚀磨损参数 k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 等数值如表 1 所示。

表 1 冲蚀模型参数设置
Tab.1 Parameter setting in erosion model

k_0	k_1	k_2	k_3	n_1	n_2	u_{ref}	d_{ref}
65	-0.12	2.35	0.19	0.8	1.3	104	326

1.4 网格划分

建立 90°弯管几何模型如图 2a 所示，其直径 D 为 96 mm，进口管道长度 L 为 960 mm，出口长度 H 为 480 mm，曲率半径 R 为 134.4 mm。将弯头划分为 0°~90°范围，为了便于总结防护位置，对易形成最大磨损区域的弯头处共划分了 6 个区块。弯管采用全六面体网格划分，在近壁面处生成边界层。由于弯头处易产生磨损，因此对弯头处的网格进行了加密，管道网格如图 2b 所示。

由图 3 网格无关性检验表明，当网格数超过 40 万时，最大磨损率趋于稳定，本文最终选取的网格数为 491 985。

1.5 计算条件设置

在冰水两相流管道中，液相采用欧拉法求解 N-S 方程，固相采用拉格朗日法求解颗粒轨道，海水和冰晶颗粒的物理性质如表 2 所示。湍流模型采用标准 k-epsilon 模型，设置进口条件为 velocity，出口条件采取 outflow。重力设置方向为 Z 轴负方向，考虑颗粒与流体间的相互耦合作用，忽略颗粒间的相互碰撞作用^[16]，不考虑壁面滑移。使用标准壁面函数，壁面粗糙高度为 10^{-5} m，壁面粗糙常数设定为 0.5，壁面

表 2 固液两相参数设置
Tab.2 Setting of solid-liquid two phase parameters

	Density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Viscosity $/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
Seawater	1027	1.789×10^{-6}
Ice particle	900	

材料为碳钢，其密度为 7800 kg/m^3 ，湍流强度为 5%，水力直径为 0.096 m ，残差值设定为 10^{-5} ，采用 SIMPLE 算法对压力速度耦合求解计算。

2 数值模拟结果讨论

2.1 冰晶颗粒斯托克斯数对冲蚀磨损的影响

冰晶颗粒的斯托克斯数公式可表示为 $ST = \frac{\rho_p d_p^2 u_p}{18\mu_f D}$ ，其反映惯性力与曳力的相对大小。当流速为 5 m/s 时，通过改变冰晶粒径大小进而改变斯托克斯数大小。不同斯托克斯数对最大磨损率区域的影响，如图 4 所示。通过图 4 可以看出，随着斯托克斯数的增大，冰晶颗粒对管道造成的冲蚀磨损区域增

大，最大冲蚀磨损位置由 C 区域向 B 区域转移，这是因为冰晶颗粒在弯头处受到惯性力、曳力以及二次流等因素影响。惯性力会使颗粒保持切向运动；曳力使得颗粒不易摆脱流线运动；二次流驱动颗粒向内拱壁处运动；浮力使得冰晶颗粒与液相产生分层运动。当斯托克斯数小于 1 时，颗粒在弯头处受二次流和曳力的驱动作用影响较大，冰晶颗粒与流场的跟随性较好，颗粒有足够的时间响应流场的变化，且受浮力影响，冰晶颗粒随海水运动时呈分层流动，多方面相互耦合影响使得最大磨损区域主要集中在 C 区域。当斯托克斯数超过 1 时，磨损区域主要集中在 B 区域，此时流场对颗粒的影响作用逐渐减弱，惯性力对于颗粒的运动起主导作用，颗粒粒径的增大使得其自身具有较大的动量克服二次流中的涡流团，使二次流对冰晶颗粒的携带作用减弱。

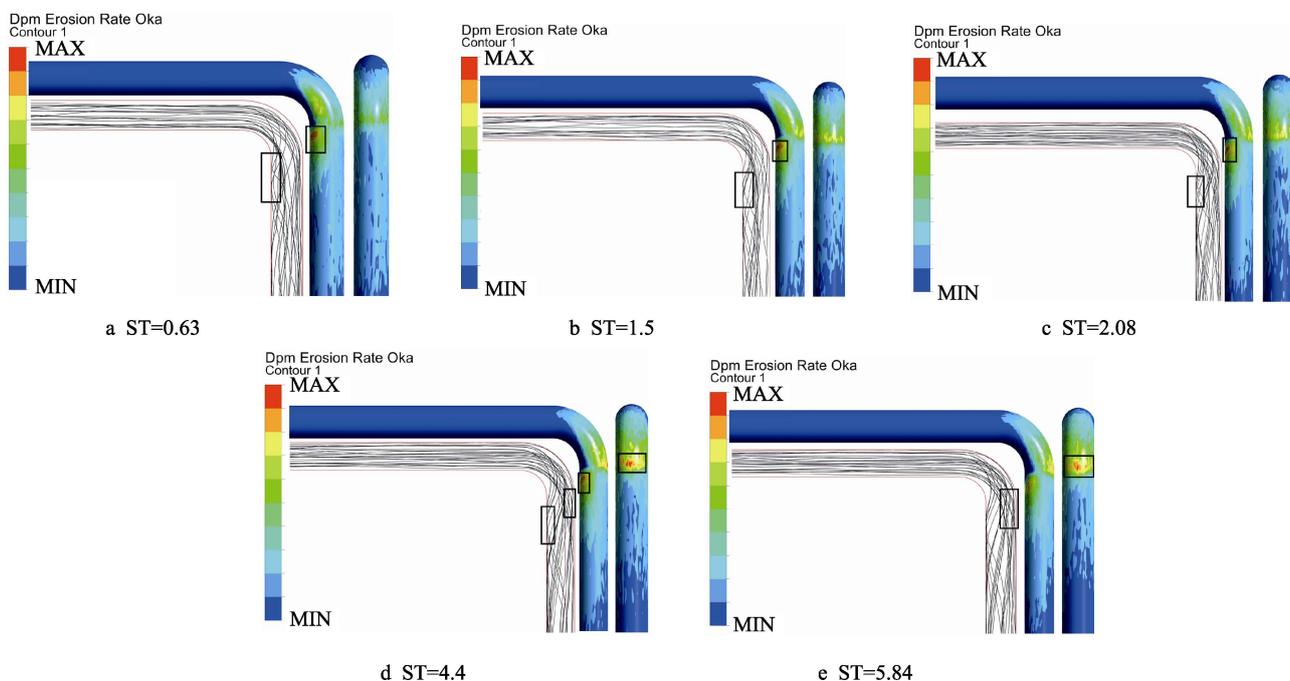


图 4 不同斯托克斯数对最大磨损率区域的影响
Fig.4 Effect of different stokes numbers on the region with the maximum wear rate

图 5 显示了斯托克斯数对最大磨损率的影响。由图 5 可看出，随着斯托克斯数的增大，最大磨损率在 0~1 范围内出现了较大的波动，当斯托克斯数超过 1 时，磨损率随斯托克斯数的增大而增大。这是由于粒径变化引起颗粒的斯托克斯数改变，造成磨损区域发生变化，同时冰晶颗粒密度略小于水的特性，使得二次流驱动颗粒造成的最大磨损率也产生较大变化。

2.2 流速对管道冲蚀磨损的影响

为了便于分析钢管磨损深度的变化，通过穿透率换算公式 $\text{Penetration rate} = \text{ER}/7800$ 获得钢管的穿透率变化情况，图 6 显示了流速对冲蚀磨损的影响。从图 6a 可以看出，随着流速的增大，弯管的最大穿透

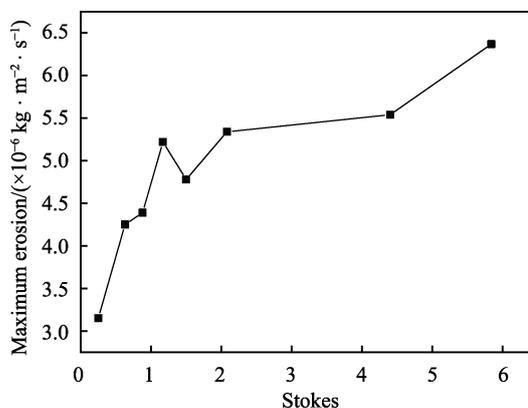


图 5 斯托克斯数对最大侵蚀速率的影响
Fig.5 Effect of Stokes number on the maximum erosion rate

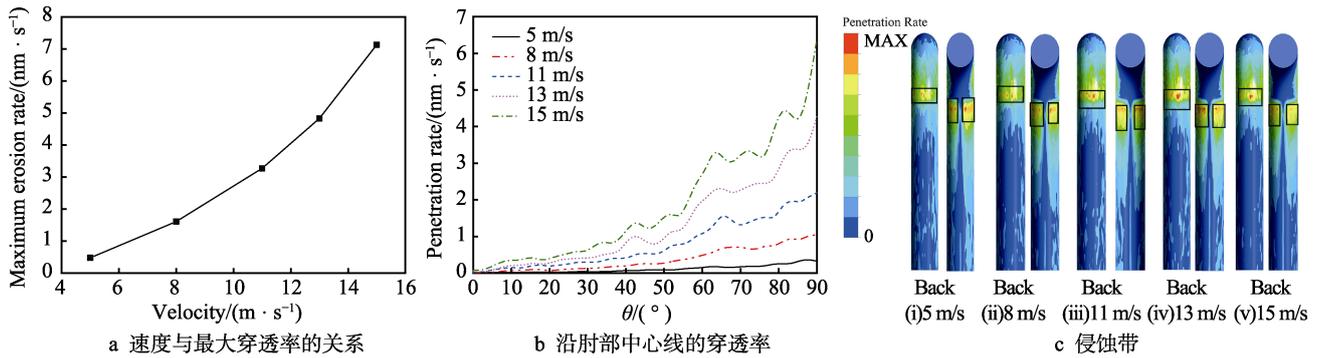


图 6 流速对冲蚀磨损的影响

Fig.6 Effect of velocity on erosion: a) relationship between velocity and the maximum penetration rate; b) penetration rate along the elbow centerline; c) erosion zone

率也增大，二者呈现指数关系。这主要是由于大流速的颗粒通常具有较大的冲击能导致。由图 6b 可以看出，随着流速的增大，弯头外拱壁最大磨损位置主要出现在 90°附近。由图 6c 磨损区域对比可以看出，随着流速的不断增大，B、D、D'区域的最大磨损区域面积和穿透率均增大。B 区域出现该现象的原因主要是由于冰晶颗粒的流速增大，惯性力驱动颗粒对外拱壁的 B 区域产生直接冲蚀磨损。D、D'区域出现该现象的原因主要是由于外侧流体受到横向压力形成二次流，二次流驱动冰晶颗粒向弯头内侧转移；同时由于冰晶颗粒密度小于水，在浮力作用下易形成分层流

动，在二次流和浮力作用下，流速的不断增大使得颗粒对 D、D'区域侵蚀不断加剧。

2.3 粒径对冲蚀磨损的影响

图 7 显示了冰晶颗粒粒径变化对冲蚀磨损的影响。由图 7a 和 b 可知，随着粒径的增大，最大穿透率不断增大，弯头外拱壁中心线的最大穿透率位置出现在 80°~90°范围内。这主要是由于大粒径的颗粒惯性力作用较强，使冲击弯头处的动能增大。由图 7c 中磨损分布图可以看出，随着粒径的增大，D、D'区域磨损量逐渐减少，B 区域磨损量逐渐增大，最大磨

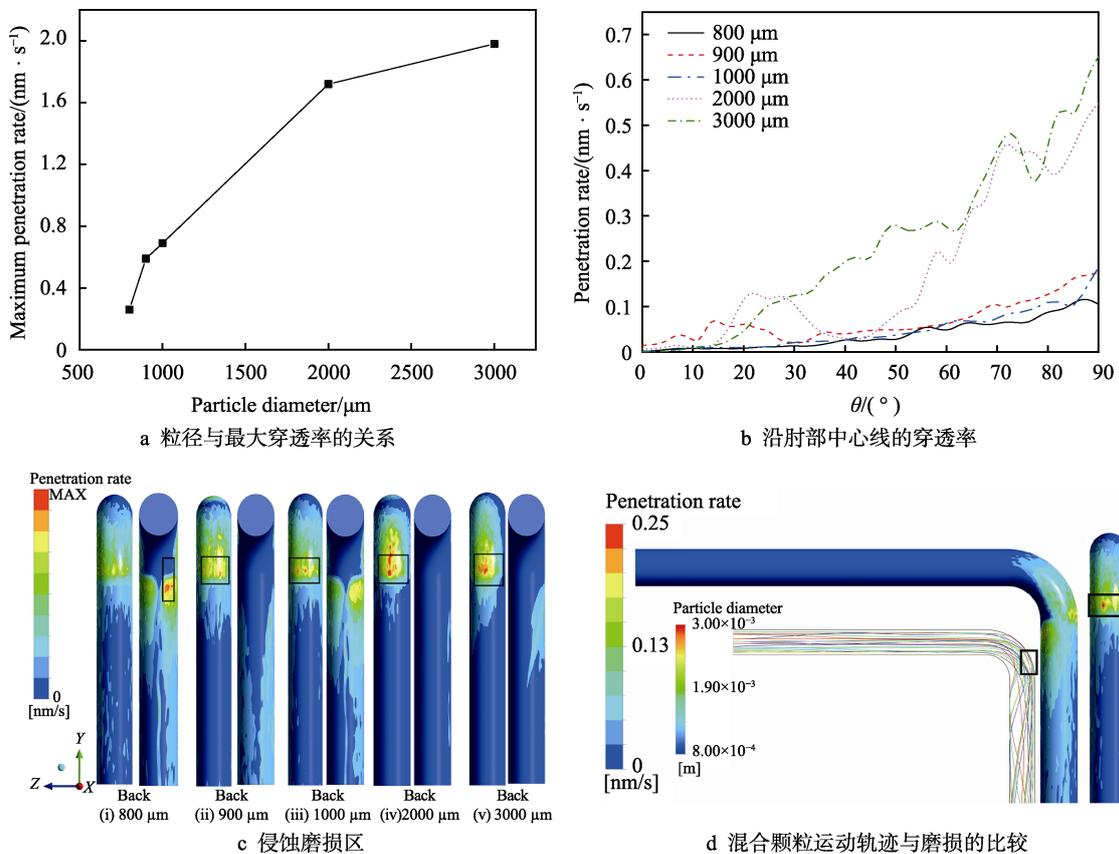


图 7 粒度对侵蚀的影响

Fig.7 Effect of particle size on erosion: a) relationship between diameter and the maximum penetration rate; b) penetration rate along the elbow centerline; c) erosion wear zone; d) comparison of mixture particle trajectories and wear

损位置由 D'区域向 B 区域转移。形成该现象的原因主要是大粒径的颗粒通常具有较大惯性力,使固相和液相间很容易产生相对滑移,同时冰晶颗粒密度小于水,导致重力在流动过程中起到的作用很小,惯性力相比较二次流、曳力等对颗粒的作用更明显,进而驱动冰晶颗粒直接冲击弯头,形成 B 区域;而小粒径的冰晶颗粒受到二次流作用明显,且冰晶颗粒在流动时会逐渐上浮,形成分层流动,导致最大磨损位置出现在 D'区域。图 7d 显示了 a 图中五种冰晶粒径以相同百分比含量相互混合后对弯管的冲蚀磨损。可以看出,最大磨损区域仍集中在 B 区域,最大磨损区域由五种粒径中粒径最大的颗粒决定。

2.4 质量流率对冲蚀磨损的影响

图 8 显示了冰晶颗粒在不同质量流率下对管道冲蚀磨损的影响。其中图 8b、8c 分别为质量流率为 0.4 kg/s 和 0.8 kg/s 时,磨损区域的变化图。由图 8a

可知,最大穿透率随冰晶颗粒质量流率的增大而增大;对比图 8b 和 8c 磨损分布可以看出,随着质量流率的增大,最大磨损区域主要向 D 和 B 区域集中。这是由于更高的质量流率,将导致更多的颗粒与壁面产生碰撞,颗粒主要由二次流和惯性力的驱动形成 D 和 B 最大冲蚀磨损区域。但 Zheng 等人^[17]的研究表明,当质量流率增大到一定值后,穿透率不会产生明显变化,此时颗粒间相互碰撞使得颗粒动能损失很大。由于本研究中使用的双向耦合方法,且质量流率较低,因此忽略了颗粒间相互作用,如果考虑颗粒间碰撞作用,则会弥补大质量流率时的不足。

2.5 弯径比对冲蚀磨损的影响

图 9 显示了不同弯径比条件下穿透率的情况。由图可以看出,最大穿透率随弯径比的增大而减小,弯头外拱壁中心线 0°~90°范围内最大穿透率位置仍集中在 85°~90°。

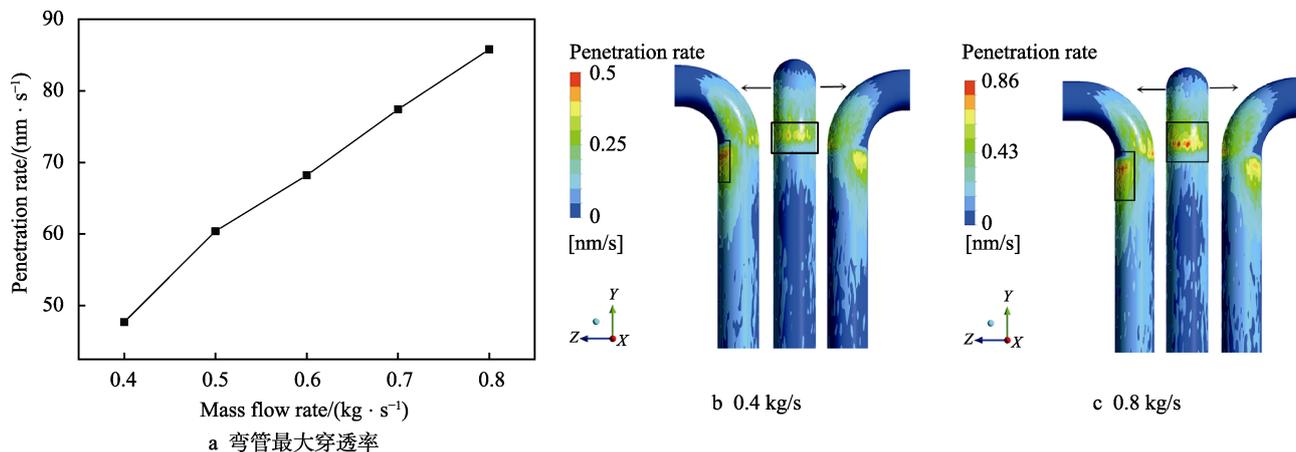


图 8 质量流率对侵蚀的影响

Fig.8 Effect of mass flow rate on erosion: a) maximum penetration rate of elbow

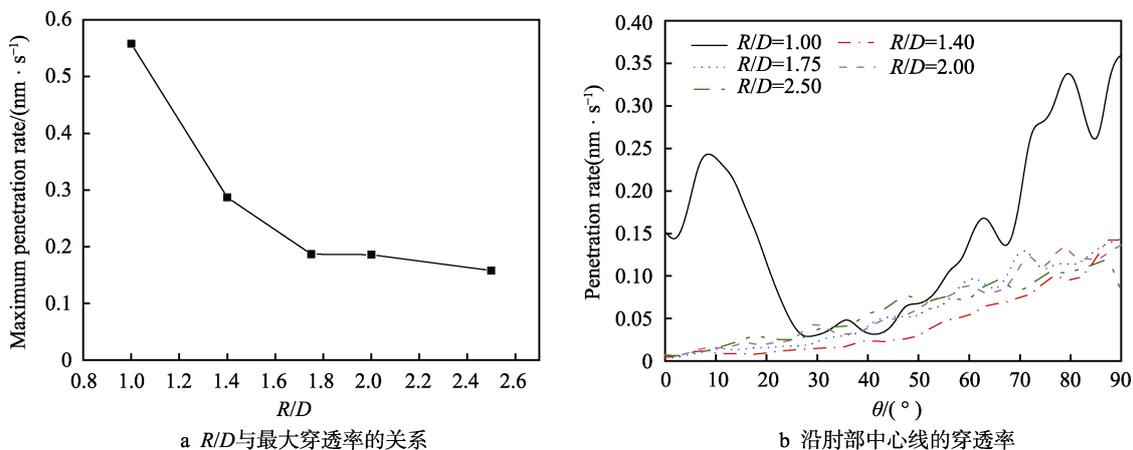


图 9 R/D 比对穿透率的影响

Fig.9 Effect of R/D ratio on penetration rate: a) relationship between R/D and the maximum penetration rate; b) penetration rate along the elbow centerline

图 10 显示了弯径比分别为 1.4、1.75 和 2.5 时的磨损分布、XY 面流场分布以及颗粒运动轨迹图。对比图 10a、10b、10c 可以得出,随着弯径比的增大,

最大磨损区域由 D'向 B 区域转移。这主要是因为弯径比的增大使得流场发生明显变化,弯径比越大,越接近直管的流动,因此海水的流动趋于平缓。在二次

流和浮力的作用下,颗粒被迫脱离流线,此时冰晶颗粒与壁面碰撞时的入射角更小,颗粒几乎以滑动的方式贴近壁面运动,相比直接的冲击而言,最大穿透率必然下降。因此,随着弯径比的增大,穿透率会出现不断下降的现象。

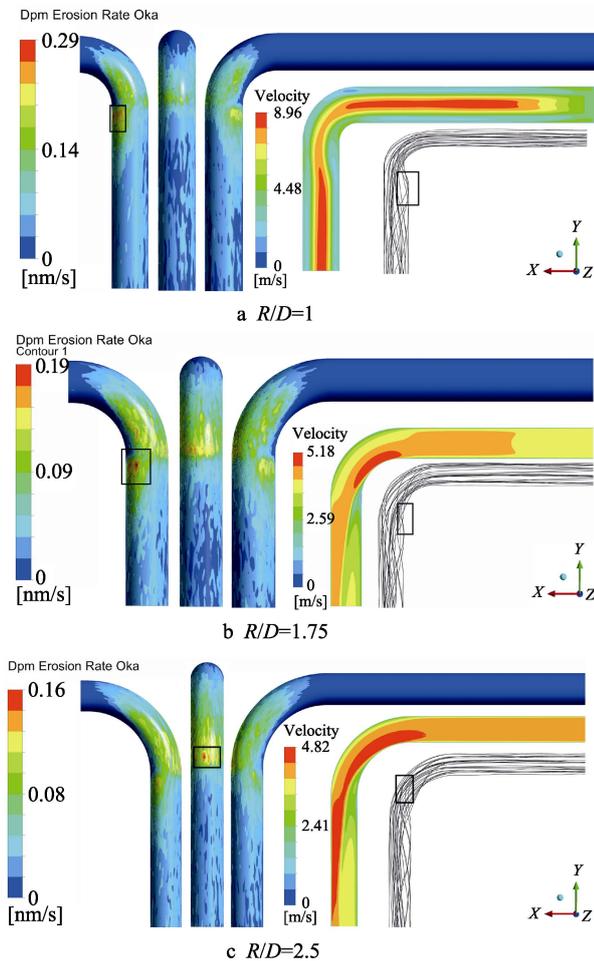


图 10 不同 R/D 比下侵蚀分布、 XY 平面流场及颗粒运动轨迹

Fig.10 Distribution of erosion, flow field of XY plane and trajectory of particles under different R/D ratios

3 结论

本文使用 CFD 方法,通过对弯管中冰晶颗粒随水流动的模拟,分析了冰晶颗粒的斯托克斯数、粒径、流速、质量流率等因素对弯管冲蚀磨损的影响,得到如下结论:

1) 随着冰晶颗粒斯托克斯数的增大,冰晶颗粒对弯管最大冲蚀磨损区域由 C 区域向 B 区域转移。当冰晶颗粒的斯托克斯数超过 4.4 时,最大冲蚀磨损区域主要集中在 B 区域,此时最大冲蚀磨损位置处于弯头外拱壁中心线 $85^\circ\sim 90^\circ$ 附近,冰晶颗粒的斯托克斯数在一定范围内对最大穿透率没有决定性影响。

2) 对于最大冲蚀磨损区域而言,其影响因素主

要有粒径、弯径比以及流速;对于最大穿透率而言,其影响因素由大到小分别为质量流率、流速、弯径比和粒径。

3) 实际工程中,针对冰水两相流弯管内表面应尽可能加强 B、C、D 和 D' 区域的防护,降低流速,提高弯径比,灵活选择过筛的滤网,这些措施对于延长冰水两相流管道的寿命具有积极作用。

参考文献:

- [1] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow[J]. *Wear*, 2006, 261(7): 715-729.
- [2] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. *Wear*, 2007, 263(1): 330-338.
- [3] SOLNORDAL C B, CHONG Y W, BOULANGER J. An experimental and numerical analysis of erosion caused by sand pneumatically conveyed through a standard pipe elbow[J]. *Wear*, 2015, 336-337: 43-57.
- [4] ZHANG J, KANG J, FAN J, et al. Research on erosion wear of high-pressure pipes during hydraulic fracturing slurry flow[J]. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2016, 43: 438-448.
- [5] WANG K, LI X, WANG Y, et al. Numerical investigation of the erosion behavior in elbows of petroleum pipelines[J]. *Powder technology*, 2016, 314:490-499.
- [6] CHEN J, WANG Y, LI X, et al. Erosion prediction of liquid-particle two-phase flow in pipeline elbows via CFD-DEM coupling method[J]. *Powder technology*, 2015, 282(22): 25-31.
- [7] PENG Wen-shan, CAO Xue-wen. Analysis on erosion of pipe bends induced by liquid-solid two-phase flow[J]. *Journal of Chinese society for corrosion and protection*, 2015, 35(6): 556-562.
- [8] 王凯, 李秀峰, 王跃社, 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.
- [9] WANG Kai, LI Xiu-feng, WANG Yue-she, et al. Numerical prediction of the maximum erosion location in liquid-solid two-phase flow of the elbow[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2014, 35(4): 691-694.
- [10] ZHU H, LI S. Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib[J]. *Powder technology*, 2018, 330: 445-460.
- [11] 孙强, 徐立, 邹祥岩, 等. 振动对冰级船海水管道冲蚀磨损的影响及防护[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 148-152.
- [12] SUN Qiang, XU Li, ZOU Xiang-yan, et al. Influence and

- protection of vibration on erosive wear of polar ship's seawater pipelines[J]. *Surface technology*, 2018, 47(3): 148-152.
- [11] 邓义斌, 王飞显, 范世东. 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. DENG Yi-bin, WANG Fei-xian, FAN Shi-dong. Numerical simulation of erosion characteristics for ice-water two-phase flow in seawater pipes[J]. *Ship & ocean engineering*, 2015, 44(1): 150-154.
- [12] GOSMAN A D, LOANNIDES E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors[J]. *Journal of energy*, 1983, 7(6): 482-490.
- [13] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 184-193.
- [14] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. *Wear*, 2005, 259(1-6): 95-101.
- [15] PARSI M, NAJMI K, NAJAFIFARD F, et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications[J]. *Journal of natural gas science & engineering*, 2014, 21: 850-873.
- [16] SUZUKI M, INABA K, YAMAMOTO M. Numerical simulation of sand erosion phenomena in square-section 90 degree bend with linear/nonlinear rans turbulence models[J]. *Journal of fluid science& technology*, 2007, 3(7): 868-880.
- [17] ZHENG Y G, YU H, JIANG S L, et al. Effect of the sea mud on erosion corrosion behaviors of carbon steel and low alloy steel in 2.4% NaCl solution[J]. *Wear*, 2008, 264(11-12): 1051-1058.