

基于试验和 CFD 模拟的稠油热采井口 四通管冲蚀规律分析

王国涛¹, 朱丽云¹, 刘岑凡², 王振波¹, 李安俊¹, 石景元¹

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266000; 2. 中国特种设备检测研究院
特种设备安全与节能国家市场监管重点实验室, 北京 100029)

摘要: **目的** 分析稠油热采中含砂流体对四通管冲蚀磨损问题, 明确失效机理及特征。**方法** 采用金相分析仪对失效四通管损伤处材料 ZG(J)35CrMo 进行金相组织分析, 并采用扫描电镜 (SEM) 对四通管进行冲蚀形貌微观检测, 同时借助多相流冲蚀试验机对四通管材料 ZG(J)35CrMo 进行冲蚀试验, 构建冲蚀预测模型, 并通过单因素冲蚀试验对冲蚀预测模型进行验证。最后建立 CFD-DPM-EPM (耦合计算流体动力学-离散粒子-冲蚀) 数值模型, 研究不同流体速度、颗粒粒径和质量流量对四通管冲蚀规律的影响。**结果** 金相组织分析结果显示, 失效四通管材料基体组织成分为索氏体、铁素体和贝氏体, 表面发生轻微脱碳现象。扫描电镜分析结果显示, 失效四通管内壁有明显的砂粒冲蚀形貌, 材料无明显的材质劣化及脆断现象。单因素冲蚀试验验证了回归分析法构建的冲蚀模型的准确性。随着流体速度由 5 m/s 增加至 25 m/s, 四通管最大冲蚀速率增加了 16.947 倍; 颗粒粒径由 0.05 mm 增加至 0.2 mm 时, 四通管最大冲蚀速率减少了 50%, 而颗粒粒径由 0.2 mm 增加至 0.4 mm 时, 四通管最大冲蚀速率增加了 1.382 倍; 质量流量从 0.15 kg/(m²·s) 增加至 2.4 kg/(m²·s) 时, 最大冲蚀速率增加了 16.584 倍。**结论** 四通管失效主要由于颗粒冲蚀管道内壁, 管道减薄到一定程度后, 无法承受内部压力所致。四通管出口段肩部为冲蚀高危区。随流体速度的增加, 四通管最大冲蚀速率呈指数关系增加; 随着颗粒粒径的增加, 最大冲蚀速率呈先减小后增大的趋势; 当质量流量增加时, 最大冲蚀速率呈线性关系增加。

关键词: 稠油热采; 含砂流体; 四通管; ZG(J)35CrMo; CFD; 冲蚀

中图分类号: TG175.3; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0247-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.023

Analysis of Erosion Law of Four-way Pipe in Heavy Oil Thermal Production Wellhead Based on Experiment and CFD Simulation

WANG Guo-tao¹, ZHU Li-yun¹, LIU Cen-fan², WANG Zhen-bo¹, LI An-jun¹, SHI Jing-yuan¹

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2021-03-01

Received: 2020-08-10; Revised: 2021-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0808602)

Fund: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC0808602)

作者简介: 王国涛 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流体机械冲蚀磨损。

Biography: WANG Guo-tao (1996—), Male, Master, Research focus: erosion wear of fluid machinery.

通讯作者: 刘岑凡 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为多相流仿真与试验。

Corresponding author: LIU Cen-fan (1987—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: simulation and experiment of multiphase flow.

通讯作者: 朱丽云 (1987—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为石油化工设备。

Corresponding author: ZHU Li-yun (1987—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: petrochemical equipment.

引文格式: 王国涛, 朱丽云, 刘岑凡, 等. 基于试验和 CFD 模拟的稠油热采井口四通管冲蚀规律分析[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 247-256.

WANG Guo-tao, ZHU Li-yun, LIU Cen-fan, et al. Analysis of erosion law of four-way pipe in heavy oil thermal production wellhead based on experiment and CFD simulation[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 247-256.

(1.China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China; 2.Key Laboratory of Special Equipment Safety and Energy-saving for State Market Regulation, China Special Equipment Inspection and Research Institute (CSEI), Beijing 100029, China)

ABSTRACT: The work aims to study the problem of erosion and wear on four-way pipe by fluid carrying sand in heavy oil thermal production, so as to define the failure mechanism and characteristics. The metallographic analysis of ZG(J)35CrMo of the damaged four-way pipe was analyzed by metallographic analyzer, and the micro erosion morphology of the four-way pipe was analyzed by scanning electron microscope (SEM). At the same time, the erosion experiment of four-way pipe material ZG(J)35CrMo was carried out by the multiphase flow erosion tester, and the erosion prediction model was established and verified by the single factor erosion experiment. Finally, CFD-DPM-EPM (coupled computational fluid dynamics-discrete particle-erosion) numerical model was established to study the influence of different fluid velocities, particle size and mass flow rate on the erosion law of four-way pipe. The metallographic analysis result shows that the matrix structures of the material were sorbite, ferrite and bainite, and there is slight decarburization on the surface. SEM results show that the inner wall of the failed four-way pipe has obvious sand erosion morphology, and the material has no obvious deterioration and brittle fracture phenomenon. The erosion prediction model is verified by single factor erosion experiment, which proves the accuracy of erosion prediction model constructed by regression analysis method. With the increase of fluid velocity from 5 m/s to 25 m/s, the maximum erosion rate of the four-way tube increased by 16.947 times. When the particle size increased from 0.05 mm to 0.2 mm, the maximum erosion rate of the four-way tube decreased by 2.183 times. However, when the particle size increased from 0.2 mm to 0.4 mm, the maximum erosion rate of the four-way tube increased by 1.382 times. When the mass flow rate increased from 0.15 kg/(m²·s) to 2.4 kg/(m²·s), the maximum erosion rate increased by 16.584 times. The failure of the four-way pipe is mainly due to the erosion of the inner wall of the pipe by particles, and the four-way pipe can not bear the internal pressure after being thinned to a certain thickness. The shoulder of the exit section of the four-way pipe is a high-risk area of erosion, and the maximum erosion rate of the four-way pipe increases exponentially with the increase of the fluid velocity, and with the increase of particle size, the maximum erosion rate decreases first and then increases. When the mass flow rate increases, the maximum erosion rate increases linearly.

KEY WORDS: heavy oil thermal production; sand-containing fluid; four-way pipe; ZG(J)35CrMo; CFD; erosion

稠油资源在我国分布广阔, 储藏量巨大, 是维持国民经济发展的主要能源^[1-3]。稠油开采以热力采油方式为主, 目前主要有蒸汽吞吐、火驱、SAGD 等稠油热采技术。稠油热采中, 四通管构件应用广泛, 然而在热采过程中, 装置内会混入砂粒, 流体携砂高速通过四通管时, 会对其内壁造成严重的冲蚀破坏^[4-5], 使得四通管内壁减薄而失效。四通管一旦失效, 稠油从失效处流出, 会造成严重的污染问题, 带来巨大的经济损失, 甚至对人员的生命安全造成巨大威胁。因此, 研究四通管不同典型工况参数下的冲蚀规律, 对预防四通管无预兆性失效, 保障稠油热采过程的安全进行, 具有重要指导作用。

国内外学者对冲蚀问题已进行了大量的研究。McLaury 等^[6]开发了一种通用的冲蚀预测模型, 并将其与 CFD 一起用于解释直接和随机撞击造成的侵蚀。钟功祥等^[7]对含有 CO₂ 的油气管道腐蚀情况进行了模拟及寿命评估预测。侍吉青等^[8]研究了新疆油田 SAGD 井口装置存在的失效问题, 通过失效分析, 确定已泄漏的井口装置失效的具体原因主要是冲刷腐蚀, 并通过 CFD 流场仿真, 确定了易产生冲刷腐蚀的部位^[9-13]。虽然国内外对冲蚀问题研究很多, 但大

多数针对弯管^[14-17]及 T 型管^[18], 对于四通管的研究几乎空白, 而四通管是稠油热采中的关键设备, 因此很有必要对四通管冲蚀规律进行研究。

本文从新疆某油田稠油热采过程中四通管失效事故出发, 利用金相显微镜对四通管材料 ZG(J)35CrMo 进行金相组织分析, 并采用扫描电镜对四通管进行冲蚀形貌微观分析, 同时对四通管材料 ZG(J)35CrMo 开展多相流冲蚀环路试验, 建立冲蚀预测模型, 并利用已有试验数据和实际工况下失效的四通管实物图验证 CFD 数值模型的可靠性, 进而在不同操作参数下, 对稠油热采井口四通管的冲蚀规律进行分析。

1 失效四通管试验分析

四通管实际工况冲蚀失效情况如图 1 所示。可以看出, 失效四通管出现严重的冲蚀穿透现象(图 1a), 同时四通管道内壁上出现了砂粒冲刷后的沟壑状缺陷, 并且管道内壁存在褐色的腐蚀物质(图 1b)。为明确冲蚀穿透位置的理化性质, 进一步进行金相组织分析及扫描电镜分析。最后, 对四通管材料 ZG(J)35CrMo 进行多相流冲蚀试验, 通过回归分析法

建立 ZG(J)35CrMo 材料的冲蚀率计算模型，并对冲蚀率计算模型进行单因素冲蚀试验验证。

1.1 失效四通管金相组织分析

采用金相分析仪对四通管材料 ZG(J)35CrMo 进行金相组织分析，选取材料的 3 个不同位置进行检测，金相组织放大倍数为 200×，金相组织如图 2 所示。组织成分为索氏体、铁素体和贝氏体。此井实际生产过程中有火驱阶段，伴随着超温工况，金相组织显示，材料表面有轻微脱碳现象，但整体来说，对材

料抗冲蚀特性产生的影响较小。

1.2 四通管扫描电镜分析

采用扫描电镜对四通管内壁进行分析，内壁形貌如图 3 所示。四通管内壁冲蚀位置存在明显的砂粒冲刷痕迹（图 3a），砂粒的冲刷对四通管的冲蚀失效起很大作用。四通管内壁存在很多凹坑（图 3b），这主要是由于砂粒的高角度撞击与低角度切削作用共同产生的^[19-21]。四通管内壁存在疏松孔隙和腐蚀渣（图 3c），说明内壁腐蚀加剧了四通管的冲蚀失效。

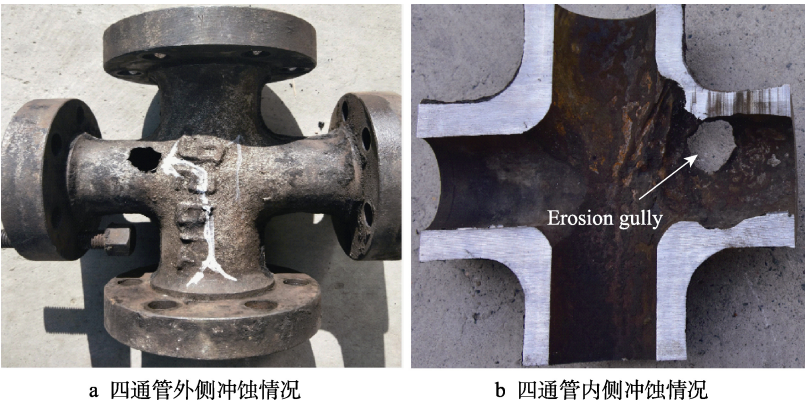


图 1 四通管冲蚀失效情况
Fig.1 Erosion failure of four-way pipe: a) external erosion of four-way pipe; b) erosion of the inside of the four-way pipe

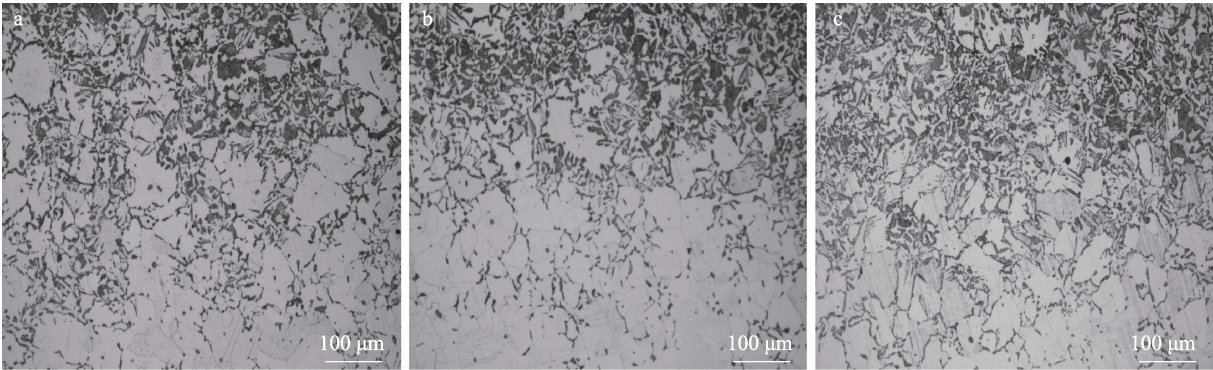


图 2 四通管金相组织分析
Fig.2 Metallographic analysis of four-way pipe

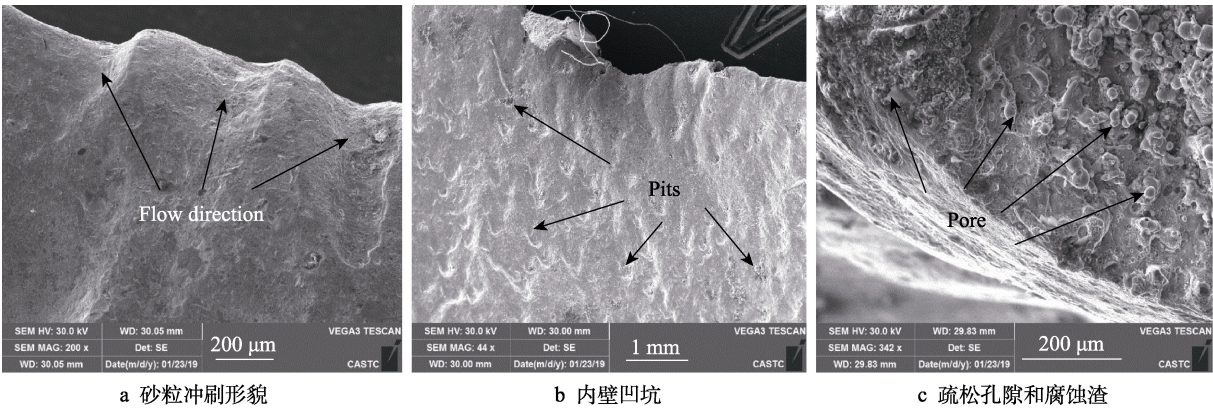


图 3 四通管扫描电镜分析
Fig.3 Scanning electron microscope analysis of four-way pipe: a) sand erosion appearance; b) the lining of the pits; c) loose pores and corrosion slag

1.3 腐蚀产物分析

为了对四通管内壁腐蚀产物的成分进行确定,运用 X 射线衍射仪对样品表面腐蚀产物进行分析,检测结果见表 1。由 XRD 分析结果可知,腐蚀产物主要以氧化铁为主,其次是氧化硅、氧化钙和氧化铝等。

表 1 腐蚀产物 XRD 分析结果
Tab.1 XRD analysis results of corrosion products

Ingredients	Content	Ingredients	Content
Fe ₂ O ₃	73~76	MgO	1~2
SiO ₂	8~9	TiO ₂	0.4~0.7
CaO	2~3	SO ₃	2~3
Al ₂ O ₃	2~3	K ₂ O	0.4~0.7
BaO	1~2	Na ₂ O	1~2
Cr ₂ O ₃	1~2	Other contents	≤0.4

1.4 冲蚀试验及冲蚀模型的建立

1.4.1 试验材料和条件

失效四通材料 ZG(J)35CrMo 的冲蚀试验在多相流冲蚀试验机上进行。冲蚀试验设计:固相砂粒取自稠油热采中的真实砂粒,与液相按一定比例配成冲蚀液,冲蚀角度分别为 20°、35°、70°、90°,冲蚀速度分别为 1、5、10、30 m/s。

1.4.2 冲蚀模型的建立

为了表征冲蚀速率,大量半经验冲蚀模型或方程被提出,如 Bitter^[22]冲蚀模型和 oka^[23]冲蚀模型。本文关于 ZG(J)35CrMo 材料的冲蚀方程为:

$$E = kV_p^n f(\theta) \quad (1)$$

式中: V_p 表示颗粒冲蚀速度, θ 表示颗粒冲蚀角度, n 表示颗粒速度指数函数, $f(\theta)$ 表示颗粒冲蚀角度函数。美国冲蚀研究中心和 Zhang 等^[17]采用五阶多项式回归获得角度函数,角速度函数为:

$$f(\theta) = \sum_{i=5}^5 A_i \theta^i \quad (2)$$

式中: A_i 为各项系数,由试验获得。

本文对不同角度和不同速度下的 16 组冲蚀试验结果进行非线性回归分析,得到 ZG(J)35CrMo 的冲蚀率计算模型为:

$$E = 2.67 \times 10^{-7} V^{1.74} (-1.9967 \times 10^{-7} \theta^4 + 4.7163 \times 10^{-5} \theta^3 - 0.0038 \theta^2 + 0.1085 \theta) \quad (3)$$

回归分析结果的相关系数 r 为 0.98,说明所得未知系数与冲蚀率计算模型有很高的相关性,方差分析结果证明了回归方程的显著性。将所建立的冲蚀模型计算结果与试验结果进行比较,如图 4 所示。冲蚀计算模型数值与试验值,除 4 组结果的误差接近 18% 外,其余 12 组结果的误差均在 15% 之内,验证了计算结果与试验结果的吻合性较好。

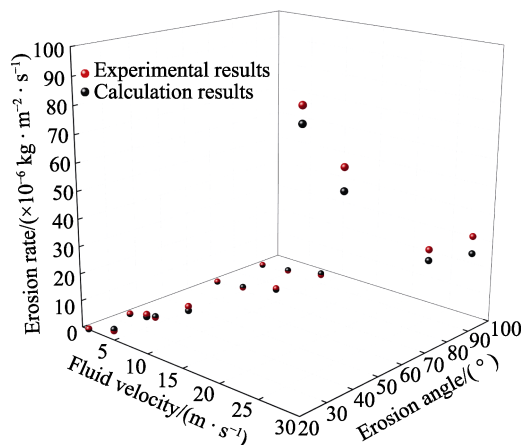


图 4 试验值与计算值对比

Fig.4 Comparison of experimental and calculated values

1.4.3 单因素试验验证

进一步利用单因素试验对冲蚀计算模型进行验证。颗粒速度为 20 m/s 时,在不同冲击角度下进行冲蚀试验,试验值与模型计算值如图 5 所示,试验值与计算值的吻合度较好。

常温下,冲蚀角度为 50° 时,进行不同冲击速度的冲蚀试验,试验值与模型计算值如图 6 所示。由模

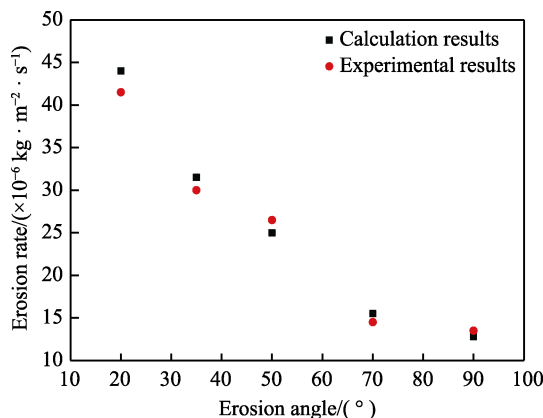


图 5 不同冲击角度下冲蚀速率的计算值与试验值对比

Fig.5 Comparison of erosion rates between the estimated and measured values at different impact angles

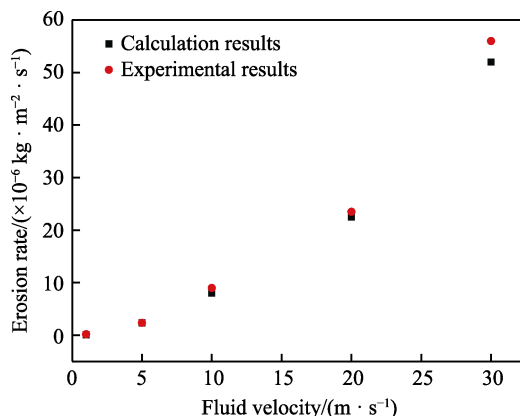


图 6 不同冲击速度下冲蚀速率的计算值与试验值对比

Fig.6 Comparison of erosion rates between the estimated and measured values at different impact velocities

型计算值和试验值可知, 冲蚀速率和砂粒冲击速度的关系近乎指数关系, 试验结果和模型计算结果的吻合度很高。

2 失效四通管数值模拟分析

2.1 流体运动控制方程

连续相的质量和动量方程如式(4)和式(5)表示^[24-25]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_g v_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g v_i v_j) \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_j}{\partial x_j} - \rho_g v_i' v_j' \right) + \rho_g g_i + F_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ρ_g 为流体密度; v 为流体速度; p 为压力; μ 为黏度; $\rho_g g_i$ 为重力; F_i 为粒子作用于连续相的附加源项, 以此考虑颗粒与连续相的两相耦合作用。使用 realizable k-e 模型来求解雷诺应力, 据此考虑湍流效应。

2.2 颗粒轨迹模型及四通管冲蚀模型

颗粒运动的控制方程如式(6)表示:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_s d_s^2} \frac{C_D Re_s}{24} (v_g - v_s) + \frac{g_x(\rho_s - \rho_g)}{\rho_s} + F_s \quad (6)$$

式中: v_s 为颗粒速度; v_g 为流体速度; d_s 为颗粒粒径; ρ_s 为颗粒密度; ρ_g 为流体密度; $(\rho_s - \rho_g)/\rho_s$ 为单位质量颗粒受到的曳力; F_s 为颗粒受到的其他力, 考虑了压力梯度力和虚拟质量力; C_D 为曳力系数, 本文取 0.8; Re_s 为相对雷诺数。

四通管冲蚀模型采用四通管材料 ZG(J)35CrMo 冲蚀试验构建的冲蚀模型, 如式(3)。

3 四通管几何模型及网格划分

3.1 四通管模型的建立

四通管几何模型如图 7 所示。四通管入口直径为 65 mm, 出口直径为 53 mm, 弯径 r 为 35 mm。

3.2 四通管网格无关性验证

网格在 CFD 计算中起着重要作用, 为保证计算效率和精度, 进行网格无关性分析, 得到适合的网格密度具有重要意义。为验证数值计算精确性和网格变化不会对模拟结果产生显著影响, 创建了 6 种不同网格数的网格, 冲蚀速率与网格关系如图 8 所示。网格数量较少时, 最大冲蚀速率随着网格数的增加而增大, 当网格数目达到 303 584 时, 最大冲蚀率逐渐趋

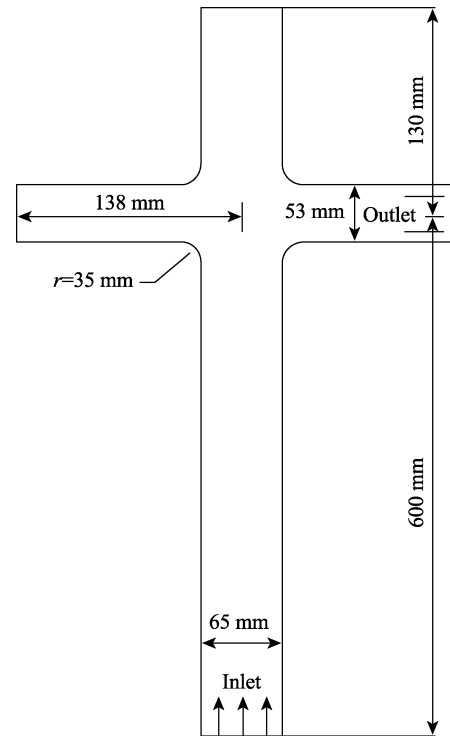


图 7 四通管几何模型

Fig.7 Geometric model of four-way pipe

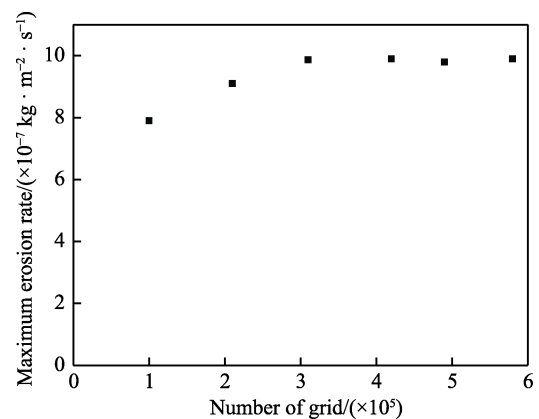


图 8 网格数量与冲蚀速率的关系

Fig.8 Relationship between mesh number and erosion rate

于稳定。在计算允许的情况下, 划分网格时选用网格数目为 303 584。

3.3 数值模型验证

本文以工程实际过程中失效四通管为对比依据, 流体携砂注入进口直径为 65 mm, 出口直径为 53 mm。连续相为空气, 流速为 10 m/s, 离散相是密度为 2000 kg/m³ 的砂粒, 质量流量为 0.3 kg/(m²·s), 砂粒粒径为 0.1 mm。四通管冲蚀云图如图 9 所示。由数值模拟结果可知, 四通管冲蚀最严重区域位于四通管肩部, 同时四通管竖直段末端也有轻微冲蚀现象, 与工程实际过程中四通管失效位置吻合, 从而证明了冲蚀模型的可靠性。

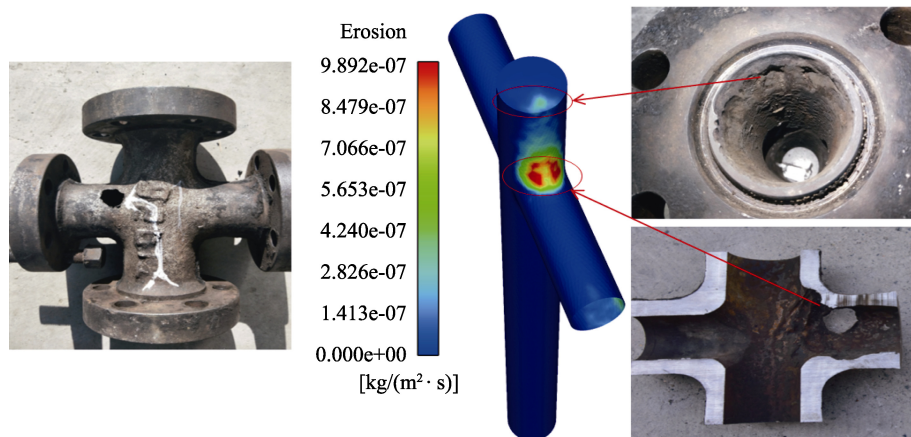


图9 四通实际失效位置与模拟位置对比

Fig.9 Comparison of the actual failure position of the four-way and the simulated position

4 结果与讨论

4.1 流速对四通管冲蚀速率的影响

为研究流体流速对四通管冲蚀速率的影响,在颗

粒粒径为 0.1 mm、质量流量为 $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 不变的情况下,以流速为变量 ($v=5、8、10、15、20、25 \text{ m/s}$),进行数值模拟研究。图 10 为流速 $v=5、15、25 \text{ m/s}$ 时四通管冲蚀速率云图。图 11 为流速与最大冲蚀速率关系曲线图。

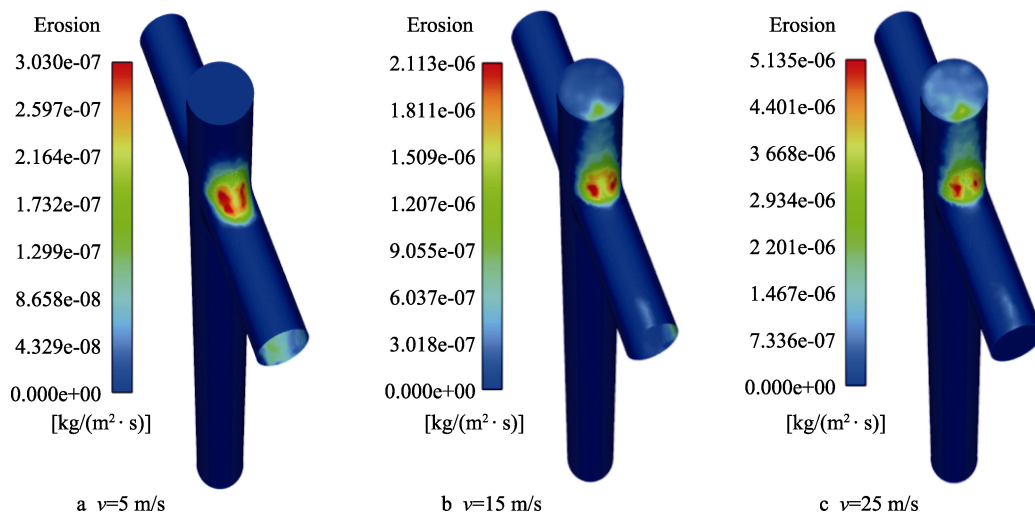


图10 不同流速下冲蚀速率云图

Fig.10 Cloud of the erosion rate under different velocities

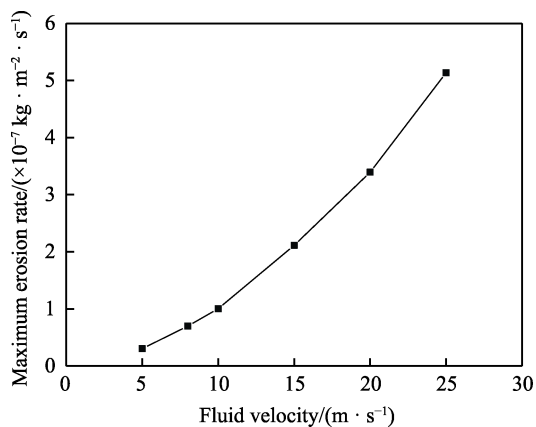


图11 流速与最大冲蚀速率的关系

Fig.11 Relationship between fluid velocity and maximum erosion rate

如图 10 所示,四通管最大冲蚀速率发生在肩部,并且随流速增加,四通管竖直管末端的冲蚀面积及冲蚀速率也增加。由图 11 数据可知,最大冲蚀速率随着流速的增加,呈指数关系增加,证明流速对四通管冲蚀的影响效果显著。分析认为,流体速度较低时,由动能定理可知,流速较低颗粒具有的动能较小,从而对四通管肩部位置的冲蚀碰撞作用较弱,且大多数颗粒受流体作用的影响较大,在流体带动下直接从出口流出,从而对竖直管末端产生的影响较小。随着流速的增加,颗粒具有的动能急剧增加,一方面加剧了四通管肩部位置的冲蚀效果,另一方面,大多数颗粒从入口位置以较高动能直接冲蚀碰撞竖直管末端位置,从而造成末端的冲蚀面积及冲蚀速率增加。流速变化是导致四通管发生冲蚀的主要因素^[26]。

4.2 颗粒粒径对四通管冲蚀速率的影响

颗粒粒径也是影响四通管冲蚀的重要因素,保持流速 10 m/s 和质量流量 $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 不变,以颗粒粒

径为变量 ($d=0.05、0.1、0.15、0.2、0.3、0.4 \text{ mm}$),进行数值模拟研究。图 12 为颗粒粒径 $d=0.05、0.15、0.4 \text{ mm}$ 时四通管冲蚀速率云图。图 13 为颗粒粒径与最大冲蚀速率关系曲线图。

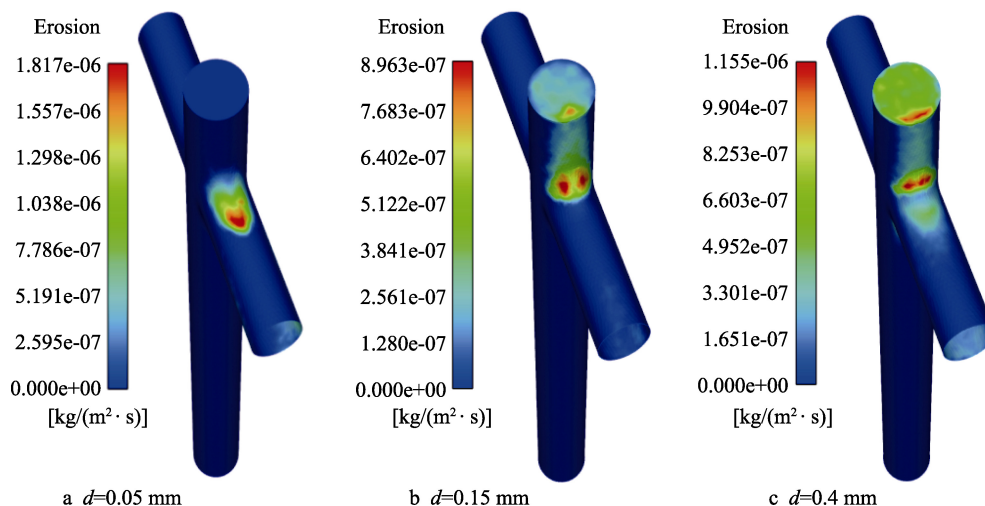


图 12 不同颗粒粒径下冲蚀速率云图

Fig.12 Cloud of the erosion rate under different particle sizes

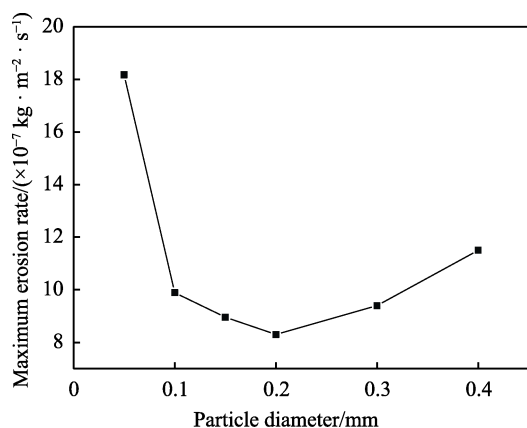


图 13 颗粒粒径与最大冲蚀速率的关系

Fig.13 Relationship between particle size and maximum erosion rate

如图 12 所示,在颗粒粒径较小时,四通管最大冲蚀位置从肩部向右移动,且竖直管末端几乎不发生冲蚀,然而当颗粒粒径增加至 0.15 mm 时,四通管最大冲蚀位置又移至肩部,并且随颗粒粒径的增加,四通管竖直管末端的冲蚀面积及冲蚀速率也随之增加。由图 13 数据可知,颗粒粒径对冲蚀的影响呈近乎一次函数关系。颗粒粒径为 $0.05\sim 0.2 \text{ mm}$ 时,四通管最大冲蚀速率随颗粒粒径的增加,呈减小趋势;颗粒粒径为 $0.2\sim 0.4 \text{ mm}$ 时,最大冲蚀速率随颗粒粒径的增加而增加。分析认为,粒径较小的颗粒受流体的影响较大,较小颗粒在流体携带下在四通管肩部右端与壁面进行了充分碰撞,从而造成最大冲蚀位置右移,并且颗粒粒径较小时,小颗粒的运动主要受流体流动的影响,绝大多数小颗粒在流体携带下不会流向并冲击

竖直管末端,而是直接从水平管出口端流出,从而导致颗粒粒径较小时,大多数颗粒直接冲击四通管肩部,此位置受到的颗粒碰撞次数急剧增大,使得最大冲蚀速率增加。当颗粒粒径增加到一定程度时,颗粒动能增加,受流体的携带效果削弱,颗粒的直接冲击使得最大冲蚀速率发生在四通管肩部,但此时由于冲击碰撞面积较大,所以单位面积上的冲击动能相对较小,从而导致最大冲蚀速率减小。颗粒粒径继续增大,由动能定理可知,大颗粒的冲击动能随之增大,四通管单位面积上受到的冲击动能随之增加,因此四通管在较大颗粒动能冲击下,最大冲蚀速率变大。

4.3 质量流量对四通管冲蚀速率的影响

在颗粒粒径为 0.1 mm 、流速为 10 m/s 不变的情况下,以质量流量为变量 ($f=0.15、0.3、0.9、1.5、2.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),分析不同质量流量对四通管冲蚀规律的影响。图 14 为质量流量 $f=0.15、0.3、0.9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时四通管冲蚀速率云图。图 15 为质量流量与最大冲蚀速率关系曲线图。

由图 15 数据可知,四通管最大冲蚀速率随着颗粒质量流量的增加,呈近似线性关系增加,质量流量从 $0.15 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 $2.4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,四通管最大冲蚀速率增加了 16.584 倍。分析认为,随着颗粒质量流量的增加,颗粒在单位时间内流经四通管的颗粒数量增加,越来越多的颗粒与壁面发生碰撞,从而导致更多的颗粒在相同时间内对四通管内壁单位面积上的碰撞频率变大,单位时间内壁面材料受颗粒的切削作用加剧,使得四通管的最大冲蚀速率增加。

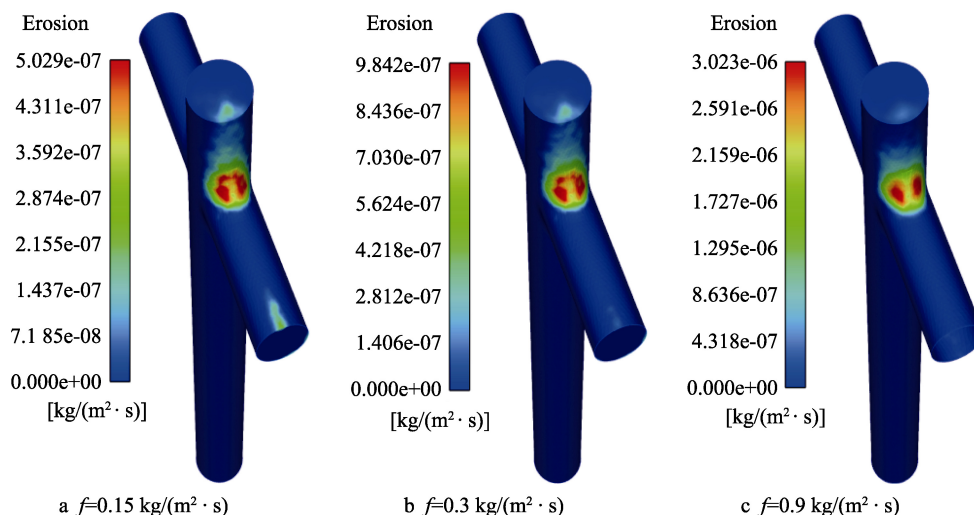


图 14 不同质量流量下冲蚀速率云图

Fig.14 Cloud of the erosion rate under different mass flow rates

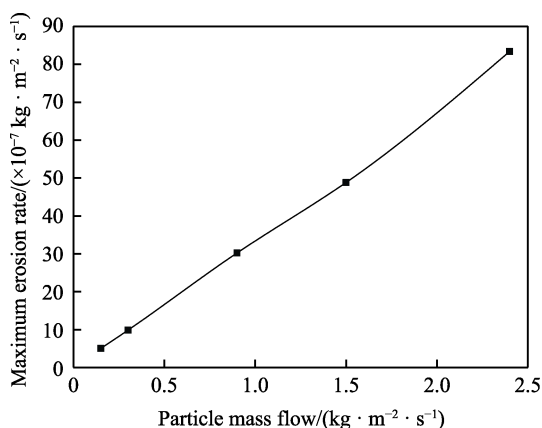


图 15 质量流量与最大冲蚀速率的关系

Fig.15 Relationship between mass flow rate and maximum erosion rate

4.4 颗粒球形度对四通管冲蚀速率的影响

工程实际过程中,颗粒并不是完全球形,因此在

四通管冲蚀速率的分析过程中,对于颗粒球形度的考虑显得尤为重要。流速为 10 m/s 、质量流量为 $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、颗粒粒径为 0.1 mm 、颗粒密度为 $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,以颗粒球形度为变量(球形度为 0.2 、 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1)进行数值模拟研究。图 16 为颗粒球形度为 0.4 、 0.6 、 0.8 时四通管冲蚀速率云图。图 17 为颗粒球形度与最大冲蚀速率关系曲线图。

颗粒球形度越小,表明颗粒越不规则,颗粒球形度越接近于 1 ,颗粒越接近于圆形颗粒。如图 16 所示,当颗粒球形度较小时,四通管最大冲蚀速率发生在肩部右端靠近水平出口位置,与颗粒球形度接近于 1 时相比,此时四通管最大冲蚀速率较大,并且在竖直管末端的冲蚀情况并不严重。随着颗粒球形度增加,颗粒越来越趋向于圆形时,四通管最大冲蚀速率越来越靠近肩部位置,并且由冲蚀云图可以看出,随着球形度的增加,竖直管末端受冲蚀区域开始扩展,但是四通管最大冲蚀速率却在减小。由图 17 数据可

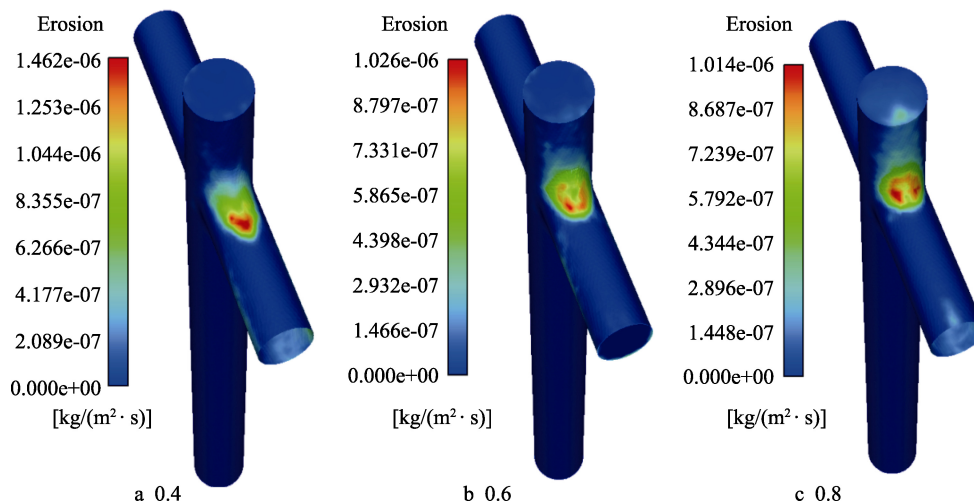


图 16 不同球形度下冲蚀速率云图

Fig.16 Cloud of the erosion rate under different sphericity

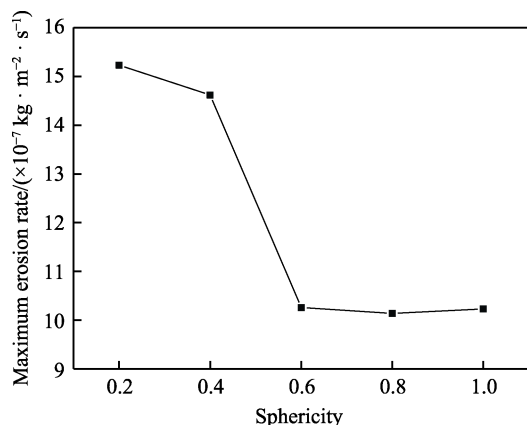


图 17 球形度与最大冲蚀速率的关系

Fig.17 Relationship between sphericity and maximum erosion rate

知,四通管最大冲蚀速率随颗粒球形度的增加而减小,当颗粒球形度由 0.4 变为 0.6 时,四通管最大冲蚀速率的减小尤为明显,在颗粒球形度大于 0.6 时,四通管最大冲蚀速率几乎不发生改变。这表明当颗粒球形度递增到一定程度后,球形度的改变对四通管最大冲蚀速率的影响并不占据主导地位。分析认为,在其他工况相同时,粒径、球形度较小的颗粒形状较为尖锐,与圆形颗粒相比,在相同流速携带下,颗粒对四通管进行碰撞时,尖锐颗粒对四通管的切削作用更加显著,往往会造成更大的冲蚀效果,因此四通管的最大冲蚀速率更大。在颗粒球形度较小时,颗粒的跟随性较好,颗粒在流体携带下往水平段出口处流动,使得四通管最大冲蚀位置从肩部位置向水平段出口位置偏移。

5 结论

1) 四通管失效由腐蚀-冲蚀共同作用造成,砂粒冲蚀作用占主导。四通管在受到砂粒低角度切削为主、高角度冲击为辅的冲蚀作用下,管壁逐渐减薄,壁厚减薄到一定厚度后,由于承受不住管内内压,突然穿透失效。

2) CFD 结果表明,四通管易失效位置位于其肩部,与实际工程中四通管失效位置吻合。随流体流速的增加,四通管最大冲蚀速率在颗粒较大动能冲击下呈指数增加。随颗粒粒径的增加,四通管竖直管末端的冲蚀面积及冲蚀速率增加。质量流量增加使得四通管受到更多的颗粒冲击,使得四通管最大冲蚀速率增加。随颗粒球形度增加,四通管最大冲蚀速率先减小,后趋于稳定。

3) 综合 4 种参数对四通管最大冲蚀规律的影响,流体流速是影响四通管冲蚀失效的主要因素,因此在使用允许范围内,适当减小流速可对四通管的防护起到重要作用。

参考文献:

- [1] 李苒, 陈掌星, 吴克柳, 等. 特超稠油 SAGD 高效开发技术研究综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(6): 729-741.
LI Ran, CHEN Zhang-xing, WU Ke-liu, et al. Review on the effective recovery of SAGD production for extra and super heavy oil reservoirs[J]. Scientia sinica (technologica), 2020, 50(6): 729-741.
- [2] 王杰祥, 刘晓, 牛成成, 等. 稠油油藏蒸汽吞吐防砂完井产能评价新方法[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 80-87.
WANG Jie-xiang, LIU Xiao, NIU Cheng-cheng, et al. A new productivity evaluation method of sand control completion for steam stimulation in heavy oil reservoirs[J]. Acta petrolei sinica, 2020, 41(1): 80-87.
- [3] BUTLER R M, MCNAB G S, LO H Y. Theoretical studies on the gravity drainage of heavy oil during *in situ* steam heating[J]. The Canadian journal of chemical engineering, 1981, 59(4): 455-460.
- [4] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 21-25.
MA Ying, REN Jun, LI Yuan-dong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2005, 31(1): 21-25.
- [5] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 440-442.
SUN Jia-shu. Wear of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 440-442.
- [6] MCLAURY B S. A model to predict solid particle erosion in oilfield geometries [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1993.
- [7] 钟功祥, 石强, 赵乾坤. 含 CO₂ 油气管道内腐蚀模拟及剩余寿命预测[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 106-112.
ZHONG Gong-xiang, SHI Qiang, ZHAO Qian-kun. Corrosion simulation inside oil-gas pipelines containing CO₂ and prediction of residual life[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 106-112.
- [8] 侍吉清. SAGD 井口在线检测技术与剩余寿命评价方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
SHI Ji-qing. Research on the online testing technology and the residual life assessment method for the stream assisted gravity drainage (SAGD) wellhead[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [9] 曹学文, 胥锟, 彭文山. 弯管液固两相流冲蚀失效模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 124-131.
CAO Xue-wen, XU Kun, PENG Wen-shan. Simulation and analysis of liquid-solid two-phase flow erosion failure in pipe bends[J]. Surface technology, 2016, 45(8): 124-131.
- [10] 胡炳涛, 朱荣涛, 李超永, 等. 弯管冲蚀失效模拟研究及影响因素分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019, 31(2): 27-34.

- HU Bing-tao, ZHU Rong-tao, LI Chao-yong, et al. Simulation study on erosion failure of elbow and analysis of influencing factors[J]. Journal of Changzhou University (natural science edition), 2019, 31(2): 27-34.
- [11] 杜晋, 张剑峰, 张超, 等. 水轮机金属材料及其涂层抗空蚀和沙浆冲蚀研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 154-161.
- DU Jin, ZHANG Jian-feng, ZHANG Chao, et al. Research progress of cavitation and slurry erosion resistance of metal materials and coatings of hydro turbine[J]. Surface technology, 2016, 45(10): 154-161.
- [12] 刘少胡, 张益维, 管锋, 等. 含缺陷连续管冲蚀规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(10): 92-95.
- LIU Shao-hu, ZHANG Yi-wei, GUAN Feng, et al. Study on erosion laws of coiled tubing containing defect[J]. Journal of safety science and technology, 2016, 12(10): 92-95.
- [13] 梁光川, 聂畅, 刘奇, 等. 基于 FLUENT 的输油管道弯头冲蚀分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(9): 822-824.
- LIANG Guang-chuan, NIE Chang, LIU Qi, et al. Erosion-corrosion analysis of oil pipeline elbow based on FLUENT [J]. Corrosion & protection, 2013, 34(9): 822-824.
- [14] 张文超, 武美萍, 任仲贺. 基于 LS-DYNA 仿真的射流加工参数分析[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 268-276.
- ZHANG Wen-chao, WU Mei-ping, REN Zhong-he. Analysis of jet flow machining parameters based on LS-DYNA simulation[J]. Surface technology, 2017, 46(10): 268-276.
- [15] KLIAFAS Y, HOLT M. LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90° bend[J]. Experiments in fluids, 1987, 5(2): 73-85.
- [16] ZHANG Ji-xin, KANG Jian, FAN Jian-chun, 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.
- [17] JEREMY K E, BRENTON S M, SIAMACK A S. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service, 2000[C]// Proceedings of the 2000 asme fluids engineering division summer meeting. Boston: American Society of Mechanical Engineers, 2000: 959-966.
- [18] 彭文山, 曹学文, 吉俊毅, 等. 油水砂多相流中固体颗粒对弯管及 T 型堵头管的冲蚀[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(2): 131-136.
- PENG Wen-shan, CAO Xue-wen, JI Jun-yi, et al. Erosion of pipe bend and plugged tee by solid particles in oil-water-sand multiphase flow[J]. Corrosion & protection, 2016, 37(2): 131-136.
- [19] FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. Wear, 1960, 3(2): 87-103.
- [20] LEVY A V, CHIK P. The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel[J]. Wear, 1983, 89(2): 151-162.
- [21] 杨鸿麟, 吴玉国, 蒋硕硕, 等. 文丘里管冲刷腐蚀数值模拟[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 193-199.
- YANG Hong-lin, WU Yu-guo, JIANG Shuo-shuo, et al. Numerical simulation of erosion prediction in venturi[J]. Surface technology, 2018, 47(10): 193-199.
- [22] BITTER J G A. A study of erosion phenomena part I[J]. Wear, 1963, 6(1): 5-21.
- [23] 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(1-6): 95-101.
- [24] ZHANG Hao, LI Gong, AN Xi-zhong, et al. Numerical study on the erosion process of the low temperature economizer using computational fluid dynamics-discrete particle method[J]. Wear, 2020, 450-451: 203269.
- [25] LI An-jun, ZHU Li-yun, LIU Chang, et al. Transport hydrodynamics of particles in a gas-solid cyclone reactor using a dense discrete phase model and a particle size segmentation method[J]. Powder technology, 2019, 354: 696-708.
- [26] 黎伟, 李配, 舒晨旭. 基于 CFD 对 60.3 mm 弯管冲蚀仿真预测[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 178-184.
- LI Wei, LI Pei, SHU Chen-xu. Simulation prediction of 60.3 mm elbow erosion based CFD[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 178-184.