

基于Fluent的天然气运输管道弯头 冲蚀模拟分析与防控措施研究*

吕超¹, 陈绪鑫¹, 刘艳龙¹, 殷宏鑫¹, 于林辉²

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066000;

2. 营口东邦环保科技股份有限公司, 辽宁 营口 115000)

摘要: 针对天然气运输管道的典型弯道冲蚀问题, 依据现场实际生产情况, 基于Fluent流体模拟软件建立相应的物理模型, 选用 standard k- ϵ 模型、DPM 离散相模型和冲蚀速率方程, 分析讨论了固体颗粒直径、气体流速以及弯管角度对弯管冲蚀磨损的影响规律。结果显示: 流体流速越快, 颗粒对弯道的冲蚀越明显, 流速与冲蚀率呈正相关; 在同一流速下, 随着颗粒粒径的增大, 冲蚀率逐渐减小, 最后趋于稳定; 不同角度的弯头受到的侵蚀是不同的, 应根据现场操作环境的差异, 设计合适角度的弯头。模拟分析结果表明, 天然气流速和固体颗粒直径是影响管道弯头冲蚀率的主要因素, 并根据模拟结果提出了冲蚀防控措施。

关键词: 天然气管道; 弯头; 冲蚀; Fluent 仿真模拟; 防控措施

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.01.003

Simulation Analysis and Prevention and Control Measures of Elbow Erosion of Natural Gas Transportation Pipeline based on Fluent

LYU Chao¹, CHEN Xuxin¹, LIU Yanlong¹, YIN Hongxin¹, YU Linhui²

(1. College of Control Engineering, Qinhuangdao Branch of Northeastern University, Qinhuangdao 066000, Hebei, China;

2. Yingkou Dongbang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yingkou 115000, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the typical curve erosion problem of natural gas transportation pipeline, according to the actual production situation of the site, the corresponding physical model is established based on Fluent fluid simulation software, and the standard k- ϵ model, DPM discrete phase model and erosion rate equation are selected to analyze and discuss the impact of solid particle diameter, gas flow rate and bend angle on bend erosion wear. The results show that the faster the fluid velocity is, the more obvious the erosion of particles on the bend is, and the velocity is positively correlated with the erosion rate. At the same flow rate, with the increase of particle size, the erosion rate gradually decreases and finally tends to be stable. Elbows with different angles are subject to different erosion. Elbows with appropriate angles should be designed according to the differences in the field operating environment. The simulation results show that the flow rate of natural gas and the diameter of solid particles are the main factors affecting the erosion rate of pipeline elbow, and the erosion prevention and control measures are proposed according to the simulation results.

Key words: natural gas pipeline; elbow; erosion; fluent simulation; prevention and control measure

目前, 我国在进行天然气探勘开发及生产利用过程中, 从井底直接开采出的天然气往往不是

单一的气体, 而是天然气、固体颗粒以及一些液体的混合物。其中, 固体颗粒和流体介质产生了

*基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目“喷雾热解过程中微纳多孔结构氧化铈颗粒形成机理及模拟研究”(项目编号 51904069)。

良好的耦合性，从而带有一定的速度，具备了动量。在流体流经弯管时，较大的离心力会使颗粒在弯头处发生碰撞，从而对管体形成冲蚀。冲蚀现象严重影响运送管道的安全性和可靠性。由于弯头结构的特殊性，与管道其他部位相比，弯头更易受到颗粒的冲蚀磨损^[1]。因此，研究弯头的冲蚀规律对工程实践具有重要意义。相关研究表明，弯管冲蚀与管道材料和结构、内部流体流速、弯径比及固体颗粒直径都有关系^[2-9]。鲁剑啸^[10]采用正交试验方法分析了90°弯管的冲蚀影响规律，确定了影响弯管冲蚀的诸多因素。现有的研究大多是基于理想输油管道^[11-12]的冲蚀影响规律，对于以天然气为流体介质的研究依然较为缺乏，而且与现实工况结合的研究更少。本研究以黄土高原抽取天然气的现实工况为背景，运用Fluent仿真软件，以天然气作为流体介质，设置工况中真实的气体速度与颗粒直径进行数值模拟。对于复杂的地下地貌，通常运用不同角度的弯头^[13]可以有效解决天然气运输问题，因此分析不同角度弯头的冲蚀规律^[14]，对管道设计具有一定的积极作用。

1 理论模型

1.1 离散相 (DPM) 模型

一般来说，在气固两相流体系中，假设流体相介质是连续的，在具体分析流体相的规律时，将内部颗粒作离散化处理，因此该模型被称为离散相 (DPM) 模型^[15]。在Fluent模拟中，一般采用欧拉-拉格朗日模型，采用欧拉描述连续相，采用拉格朗日方法描述离散相，其轨迹数学模型为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (2)$$

$$R_e = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

式中： u_p ——颗粒速度，m/s；
 u ——流体速度，m/s；
 ρ_p ——颗粒密度，kg/m³；

ρ ——流体密度，kg/m³；
 F_D ——方向作用力，N；
 F_x ——其他作用力，N；
 g ——重力加速度，m/s²；
 R_e ——雷诺数；
 μ ——流体粘度，Pa·s；
 d_p ——颗粒直径，m；
 C_D ——拖曳力系数， $C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{R_e} + \frac{\alpha_3}{R_e^2}$ 。

1.2 冲蚀模型

根据管道内固液两相流的耦合情况以及管内流体的湍流动能方程，建立冲蚀磨损模型^[16]，模型主要涉及颗粒直径、颗粒质量流量以及颗粒数量。具体的数学模型为

$$R_{ero} = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\theta) v_p^{b(v)}}{A_f} \quad (4)$$

$$f(\theta) = 2.69\theta + 1.61\theta^2 - 8.84\theta^3 + 7.33\theta^4 - 1.85\theta^5 \quad (5)$$

式中： R_{ero} ——管道内侧的冲蚀率，kg/(m²·s)；
 N ——碰撞颗粒的数量；
 m_p ——颗粒质量流量，kg/s；
 $C(d_p)$ ——颗粒粒径函数，取 1.8×10^{-9} ；
 v_p ——颗粒冲击管道壁面的速率，m/s；
 A_f ——管道壁面有限元的计算面积，m²；
 $b(v)$ ——相对颗粒速度的函数，取2.6；
 θ ——颗粒与管道壁面的冲击角度，表1为冲击角度的具体值及 $f(\theta)$ 。

表1 冲击角线性分段函数值

序号	$\theta/(^\circ)$	$f(\theta)$
1	0	0
2	20	0.8
3	30	1
4	45	0.5
5	90	0.4

2 管道弯头冲蚀模拟

2.1 管道弯头几何模型建立及有限元处理

根据实际输送天然气管道规定表，选择直径245 mm、壁厚6 mm的弯管进行建模。为保证管内流体充分，取进出口长度 $L_1=L_2=8D$ 。将

模型导入ICEM中进行网格划分，进出口网格采用“O形”划分，网格单元总数约为30万个，

90°弯管的几何模型和进出口网格划分如图1所示。

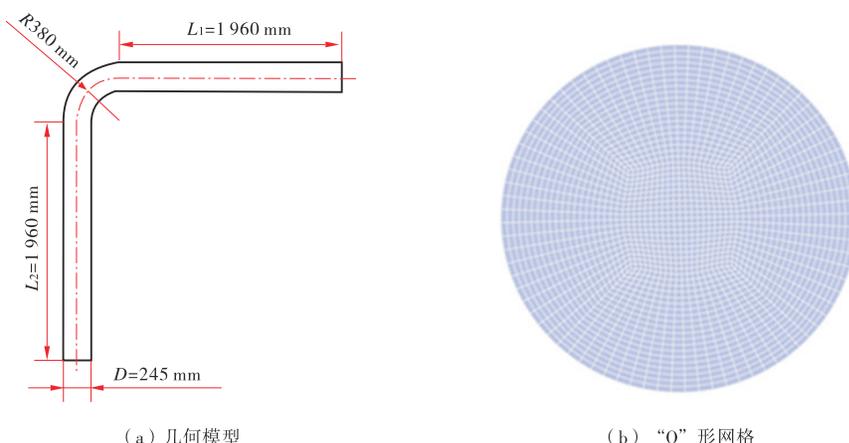


图1 90°弯管的几何模型以及“O”形网格划分

2.2 边界条件设置

2.2.1 物性参数

天然气的成分比较复杂，主要是由甲烷、氮气以及烃类等物质组成，具体组分见表2。

在Fluent软件中设置多组分运输，通过组分的比例，可以计算出此状态下天然气的密度为

表2 天然气组分表

天然气组分	比例/%
CH ₄	92.4
CO ₂	4.54
N ₂	1.2
H ₂ S	1.2
C ₂ H ₆	0.4
H ₂	0.04
He	0.02

表3 管道弯头模型模拟关键参数

天然气密度/ (kg·m ⁻³)	气体流速/ (m·s ⁻¹)	颗粒密度/ (kg·m ⁻³)	颗粒直径/ μm	颗粒质量流量/ (kg·s ⁻¹)	重力加速度/ (m·s ⁻²)	管道直径/ mm	水力直径/ mm
0.756 2	8~16	1 800	50~250	0.01~0.1	9.81	245	233

0.762 6 kg/m³，黏度为1.12×10⁻⁵ Pa·s。在进行数值模拟时，将天然气看作理想的不可压缩的流体。

2.2.2 边界条件

使用Fluent软件模拟计算天然气对管道内壁冲蚀磨损率。首先，在Fluent中选用standard k-ε湍流模型，湍流强度设置为5%，将模型的入口位置设置为速度进口型，为了保证颗粒受反弹条件的限制，将模型出口处的边界条件设置为自由流出型，并且要满足足够的逃逸条件。为了使仿真模拟结果更加贴近现实，对模型的壁面进行合理的参数设置尤为重要，需要在壁面上设置反弹系数、冲击角函数、粒径函数和速度指数函数，其中粒径函数设置为常数1.8×10⁻⁹，速度指数函数设置为2.6。设置的弯头模拟关键参数见表3。

3 数值模拟结果分析

3.1 弯头内流场的数值分析

在进行数值计算时，将进口设置为速度入口，出口条件为自由型。其中，设置颗粒直径为200 μm，颗粒流量为0.01 kg/s。进行弯头内流场的数值分析是为了预测颗粒冲蚀管道的大体位

置，所以只需要模拟一组数据即可。

图2为弯管的速度云图和压力云图，从图2可以看出，流体在进入弯头之前的一段距离时，管道内的压力比较均匀，流体在流入弯头时，压力和速度都发生了较大的变化。弯管内的压力变化如图3所示，在靠近弯头内侧，压力先减小后增大，速度却是先增大后减小；在

靠近弯头外侧，压力先增大后减小，速度是先减小后增大，即速度与压力的分布呈负相关。这是由于流体进入弯头时，流体流向突然发生变化，从而产生较大的离心力，这个离心力对

弯管外侧进行挤压、碰撞，压力沿着离心力的方向慢慢增加，从而预测弯管的外侧是受侵蚀最严重的地方，且受到冲蚀的位置一般在弯头的外侧70°~90°之间。

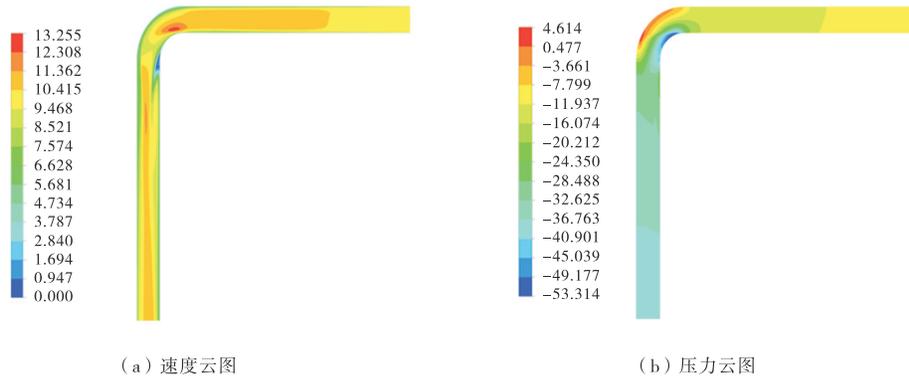


图2 90°弯管的速度和压力云图

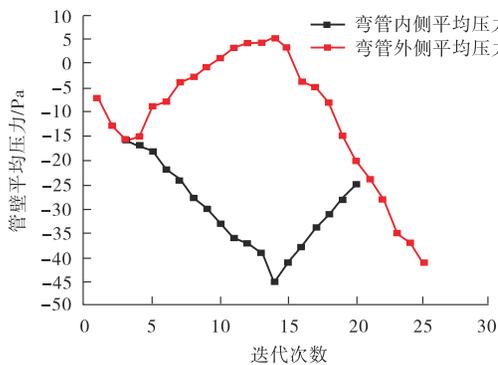


图3 弯管内壁平均压力变化情况

弯管入口流速分别为8 m/s、10 m/s、12 m/s、14 m/s和16 m/s，在以上条件下，对弯头冲蚀情况进行数值模拟。图4所示为不同颗粒质量流量以及不同流速下的冲蚀率曲线，图5为8 m/s和12 m/s流速下的冲蚀率云图。

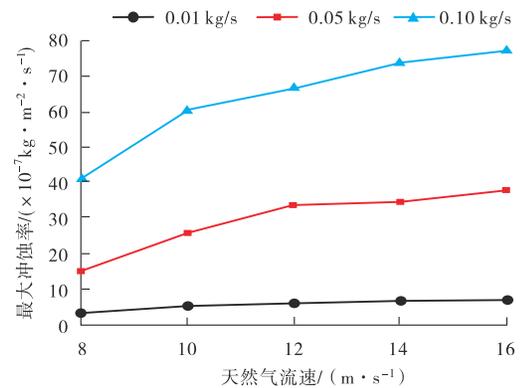


图4 颗粒质量流量对弯头冲蚀的影响

3.2 流体速度对冲蚀率的影响

为了研究颗粒在不同流速下对弯管的冲蚀规律，在模拟过程中保持其他条件不变。管道直径为245 mm，弯径比1.5，颗粒直径200 μm，颗粒质量流量分别为0.01 kg/s、0.05 kg/s、0.1 kg/s，

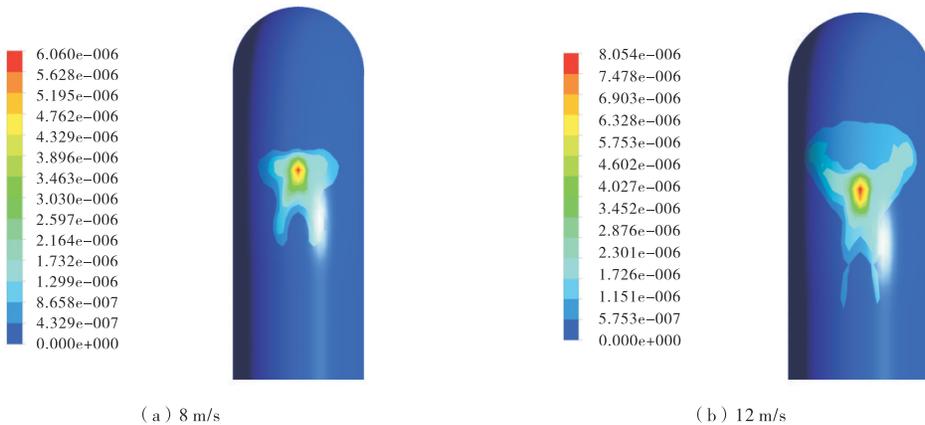


图5 不同流速下弯头冲蚀率云图

从图4可以看出，当在同一个颗粒质量流量的环境中，随着气体流速的增大，弯头处外侧的最大冲蚀率也逐渐增大，这是因为流体所携带的固体颗粒在运动的过程中由于速度增加，颗粒所携带的动能增加，会加剧对管道外侧的冲击削弱，最终造成壁面的磨损量加大。当气体流速在8~10 m/s区间时，最大冲蚀率的涨幅显著增大；当气体流速在10~16 m/s区间时，最大冲蚀率的涨幅缓慢增大。这是因为，当流体速度过大时，气体与颗粒之间发生耦合作用，弯头内壁和固体颗粒之间的碰撞会发生滑移现象，导致冲蚀面积增大，而最大冲蚀率却是缓慢增加。因此，通过降低流体的流速，可以在一定程度上减轻弯头的冲蚀磨损。

3.3 颗粒直径对冲蚀率的影响

在管道直径245 mm，弯径比1.5，颗粒质量流量0.1 kg/s，弯管入口流速分别为8 m/s、9 m/s和10 m/s条件下，通过改变固体颗粒直径的大小（分别设置为200 μm、250 μm、300 μm、350 μm和400 μm），对弯头冲蚀进行数值模拟，获得不同颗粒直径下的冲蚀率大小。图6所示为颗粒直径与冲蚀率的关系曲线。

由图6可以看出，在同一流速下，随着颗粒直径的增大，固体颗粒对弯头造成的最大冲蚀率在总体上呈下降趋势。分析认为，颗粒直径越

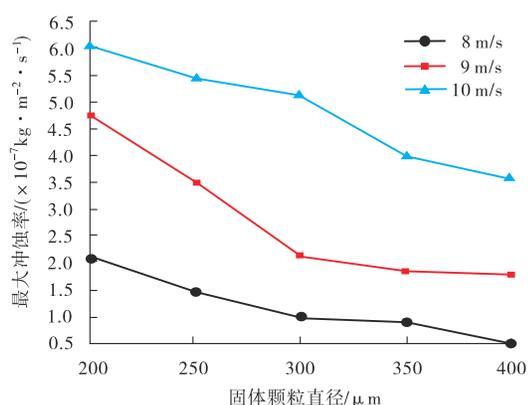


图6 颗粒直径与冲蚀率的关系

小，它与流体介质之间的耦合性就越好，颗粒与弯头壁面的碰撞就更加充分，碰撞次数增多，使得弯头的最大冲蚀率变大；当颗粒直径增大时，此时需要考虑固体颗粒的重力影响，颗粒难以被流体所携带，颗粒之间的碰撞会损失大量的动能，从而影响到颗粒与弯头壁面的碰撞次数，导致冲击强度降低，使弯头内壁冲蚀率下降。

3.4 弯头角度对冲蚀率的影响

使用三维画图软件构造不同弯头角度的模型，为了减小其他因素对数值模拟产生影响，固定弯径比、管道直径等设计数值，研究在入口速度10 m/s、固体颗粒直径200 μm、质量流量0.1 kg/s条件下，不同角度弯头受到的冲蚀情况。模拟结果如图7所示。

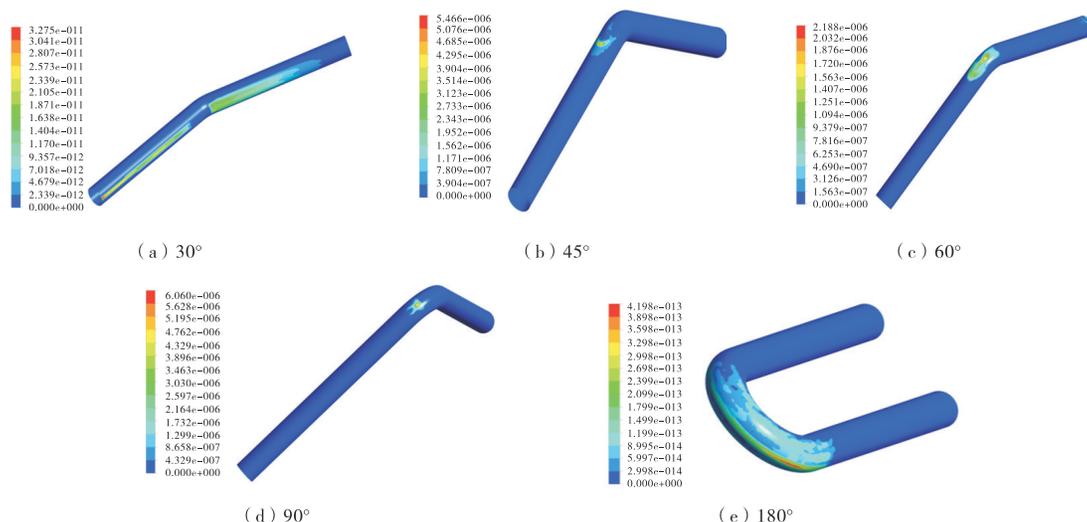


图7 不同角度弯头的冲蚀模拟结果

在不讨论速度和压力分布的情况下，弯管采用以x轴为重力方向放置，此时30°弯头和180°

弯头所受的最大冲蚀率最小，但冲蚀面积比较大。在天然气运输的实际工程中，一般很少使用

这两种弯管,故在此不作多余的赘述。在黄土高原地区,45°、60°和90°这三种典型弯头经常在开采天然气工程上使用。因此研究这三种典型弯头的冲蚀规律,可以为设计弯管角度提供依据。

4 天然气管道冲蚀防控措施

通过以上的模拟分析计算,确定了天然气流速和固体颗粒直径是影响管道弯头冲蚀率的主要因素。因此,为了减小管道的冲蚀率,延长弯头的使用寿命,提出了以下防控措施:①保持合适的压力,去调控不同的天然气速率;②定期进行管道清理工作,清除管道内的颗粒杂质;③在弯头附近增加厚度,降低管道冲蚀风险;④在管道投入工作之前,利用仿真模拟手段,对弯管冲蚀的地方进行预测和检测,从而进行防控。

5 结 论

(1) 管道弯头模拟压力分布结果表明,流体在经过弯头时,弯头内外两侧所受的压力是不同的,外侧压力逐渐升高,流出弯头后,压力渐渐变小;内侧压力逐渐减小,流出弯头后先增大后减小。

(2) 管道流体速度模拟结果表明,流体在流经弯头时,速度会急剧的变化。流进弯头时,速度达到最大值;经过弯头时,速度逐渐减小;流出弯头时,冲蚀部位的速度瞬时上升,而在同一部位的弯头内侧,速度达到了最小值。

(3) 颗粒冲蚀率模拟结果表明,随着颗粒的速度增大,冲蚀速率随之增大,但冲蚀位置基本不变,最严重的区域总是位于弯头外侧壁面;颗粒的直径越大,管壁所受的最大冲蚀率随之减小,但冲蚀面积随之增大;弯头角度不同,冲蚀情况不同,90°弯头所受的最大冲蚀率最大,其次是45°弯头,60°弯头所受的冲蚀率最小。

参考文献:

[1] 李永梅. YB区块天然气管线弯头冲蚀模拟及预防[D]. 西

安:西安石油大学,2021.

- [2] 游赞,李梦莹. 基于FLUENT天然气集输管道直角弯管磨损分析[J]. 煤气与热力,2021,41(4):75-81,102.
- [3] 胡金文,马贵阳,王红莹,等. 高含硫天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 节能技术,2011,29(5):418-423.
- [4] 刘鸣洋. A modified CFD-based sand erosion prediction procedure for pipe elbows and similarity analyses on erosion tests [D]. 天津:天津大学,2017.
- [5] 王明吉,姚岱男,张勇,等. 基于Fluent的油气管道内部泄漏特性分析[J]. 化工自动化及仪表,2020,47(5):420-424.
- [6] SUN X Y, CAO X W. Impact of inter-particle collision on elbow erosion based on DSMC-CFD method [J]. Petroleum Science,2021,18(3):909-922.
- [7] WEI Z Q, HUANG X F, LU L J, et al. Strategy of rainwater discharge in combined sewage intercepting manhole based on water quality control[J]. Water, 2019, 11(5):898.
- [8] 王岩. 液体颗粒对天然气管道冲蚀的数值模拟[D]. 抚顺:辽宁石油化工大学,2019.
- [9] 夏明磊,罗懿. 基于FLUENT的混输海管沉积物腐蚀模拟分析[J]. 广东化工,2022,49(10):185-188,201.
- [10] 鲁剑啸. 基于Ansys Fluent及正交试验的90°弯管冲蚀影响因素分析[J]. 当代化工,2019,48(9):2102-2106.
- [11] 滕向松,孟军政,尹仲伟,等. 基于FLUENT的输油管道弯头冲蚀模拟分析与防控措施研究[J]. 石油化工腐蚀与防护,2021,38(3):19-22.
- [12] 陈泽,陈国清,杨先辉,等. 基于Fluent有限元模拟的连续弯管冲蚀特性研究[J]. 机械工程师,2021(10):60-62,65.
- [13] 杨永亮. 石油天然气管道腐蚀及其防护措施研究[J]. 当代化工研究,2021(2):90-91.
- [14] 路鑫,常宗瑜,赵林,等. 大口径海洋输气管道弯管处的固体颗粒冲蚀效果分析[J]. 机械设计,2019,36(S1):34-39.
- [15] 王佳琪,何世权,李力,等. 基于DPM模型V型球阀固液两相流冲蚀研究[J]. 流体机械,2021,49(11):81-85.
- [16] 莫丽,王玖,郭振兴,等. 椭圆截面异型管道弯头冲蚀机理研究[J]. 石油机械,2021,49(10):129-136.

作者简介:吕超(1985—),男,副教授,工学博士,博士后,东北大学硕士生导师,主编出版专著2部,发表SCI/EI论文28篇。

通讯作者:陈绪鑫(1999—),男,东北大学在读研究生。

收稿日期:2022-07-28

修改返回日期:2022-10-09

编辑:黄蔚莉