



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402537

引用格式:翁志福,闫冲冲,吕志鹏.胃型弯头冲蚀磨损数值模拟研究[J].科学技术与工程,2025,25(4):1450-1457.

Weng Zhifu, Yan Chongchong, Lü Zhipeng. Numerical simulation study on erosion and wear of gastric bend[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1450-1457.

机械、仪表工业

胃型弯头冲蚀磨损数值模拟研究

翁志福^{1,2}, 闫冲冲^{1,2}, 吕志鹏^{1,2*}

(1. 长江大学机械工程学院, 荆州 434023; 2. 长江大学机械结构强度与振动研究所, 荆州 434023)

摘要 为有效降低普通弯头的冲蚀磨损速率,延长其使用寿命。提出一种胃型弯头,基于气固两相流理论,利用 Fluent 软件对胃型弯头进行数值模拟并分析流体冲蚀特性。分析结果表明:第二圆形截面位置小于 7.5° 、大于 25.0° 小于 40.0° 时的胃型弯头具有抗冲蚀作用,其中第二圆形截面位置 35.0° 时的胃型弯头抗冲蚀效果最好,比普通弯头相比抗冲蚀性能提高 9.88% 。流速由 8 m/s 增大至 28 m/s , 35.0° 、 37.5° 、 30.0° 、 32.5° 时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率平均增长 26.08 倍;颗粒直径由 45 mm 增大至 120 mm ,最大冲蚀速率最大增长 1.71 倍;质量流量由 0.02 kg/s 增加至 0.12 kg/s ,最大冲蚀速率最大增长 7.35 倍。不论流速、颗粒直径、质量流量为何值, 35.0° 、 37.5° 、 30.0° 、 32.5° 时的胃型弯头最大冲蚀速率始终小于普通弯头最大冲蚀速率,即均具有抗冲蚀作用,其中 35.0° 时的胃型弯头整体上抗冲蚀效果最好。该弯头可以有效减小冲蚀磨损速率,延长管道使用寿命,同时也可作为弯头的抗冲蚀结构设计与优化提供新的设计方案。

关键词 气固两相流;胃型弯头;冲蚀磨损;结构优化;抗冲蚀

中图分类号 TH117.1;

文献标志码 A

Numerical Simulation Study on Erosion and Wear of Gastric Bend

WENG Zhi-fu^{1,2}, YAN Chong-chong^{1,2}, LÜ Zhi-peng^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Mechanical Structures Strength and Vibration Research Institute, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

[Abstract] In order to effectively reduce the erosion and wear rate of ordinary elbows and extend their service life. A stomach-type elbow was proposed, based on the theory of gas-solid two-phase flow, the Fluent software was used on the stomach-type elbow to numerically simulate and analyze fluid erosion characteristics. The analysis results show that the second circular cross-section position less than 7.5° , greater than 25.0° less than 40.0° of the gastric bend has an erosion-resistant effect, in which the second circular cross-section position of 35.0° of the gastric bend erosion-resistant effect is the best, compared with the ordinary elbow erosion-resistant performance increase by 9.88% . The flow rate increases from 8 m/s to 28 m/s , and the maximum erosion rate of the gastric bend and ordinary elbow at 35.0° , 37.5° , 30.0° and 32.5° increases by 26.08 times on average. The particle diameter increases from 45 mm to 120 mm , and the maximum erosion rate increases by 1.71 times. The mass flow rate increases from 0.02 kg/s to 0.12 kg/s , and the maximum erosion rate increases by 7.35 times. Mass flow rate increases from 0.02 kg/s to 0.12 kg/s , the maximum erosion rate increases by 7.35 times. Regardless of the flow rate, particle diameter, mass flow rate, 35.0° , 37.5° , 30.0° , 32.5° of the maximum erosion rate of the gastric bend is always less than the maximum erosion rate of the ordinary elbow, that is, all have the effect of anti-erosion, of which 35.0° of the gastric bend on the whole has the best anti-erosion effect. The elbow can effectively reduce the rate of erosion and wear to extend the service life of the pipeline, but also for the elbow of the anti-erosion structure design and optimization to provide a new design scheme.

[Keywords] gas-solid two-phase flow; gastric bend; erosion and wear; structural optimization; anti-erosion

管道系统是天然气开采及输送中完成作业的主要途径^[1],管道中难免含有微小固体颗粒会与管

壁发生碰撞造成冲蚀磨损,尤其弯头的冲蚀磨损较为严重^[2-3]。研究表明,弯头的冲蚀磨损程约为直

收稿日期:2024-04-09; 修订日期:2024-11-24

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05038-001-LH002)

第一作者:翁志福(1998—),男,汉族,湖北荆州人,硕士研究生。研究方向:流体机械。E-mail:807329714@qq.com。

*通信作者:吕志鹏(1981—),男,汉族,河南商丘人,博士,教授。研究方向:机械结构强度与振动。E-mail:Lvzhp@yangtzeu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

管的50倍^[4-5],一旦发生冲蚀磨损失效,不仅需要昂贵的检测和维修费用,还会对生态环境造成严重污染^[6]。因此,设计合理的弯头结构对于延长管道使用寿命具有至关重要的意义。

目前,中外学者对弯头冲蚀规律的研究较多,而对于新型弯头的提出、设计和弯头的改进来减小冲蚀速率的研究很少,中外仅有少数学者进行了相关研究。Li等^[7]设计的半球形凸起肘部弯管对提高弯头的抗冲蚀性能很有效。季楚凌等^[8]证明在弯管内壁设置肋条和凹坑可以减小冲蚀磨损速率。Zhang等^[9]基于沙漠蝎子背部的六边形坑状微结构制作了仿生表面样品,发现仿生试样均具有较好的抗冲蚀性能。黄坤等^[10]提出的3段式弯管同1段式弯管相比,3段式弯管的流场更加平稳,抗冲蚀效果也更好。郭姿含等^[11]设计的不同3点放样管均具有一定的抗冲蚀作用。Zhu等^[12]研究发现,放置在第一次撞击前的梯形肋条可以部分保护壁面免受颗粒的直接冲击。Dos等^[13]在弯管上游设置扭曲带可以在一定程度上减少壁面的冲蚀。黄钰棋等^[14]设计的非对称球形弯头不仅可以减小冲蚀磨损,还可以提高颗粒运输效率。莫丽等^[15]提出的平椭圆弯头同普通弯头相比,能够明显降低最大冲蚀速率。Duarte等^[16]在标准弯管中增加的涡流室结构明显减小了颗粒之间的碰撞,从而减小了冲蚀。

为减小普通弯头的冲蚀磨损速率,提出并设计一种胃型弯头,对胃型弯头的内流场进行分析,接着与普通弯头对比优化出抗冲蚀性能较好的胃型弯头,然后探究流速、颗粒直径、质量流量对胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损规律,其结论可为弯头的抗冲蚀结构设计及优化提供新的设计方案。

1 数值模拟

1.1 模型的提出、建立与网格划分

天然气开采及输送过程中含有的微小固体颗粒会与管壁发生碰撞造成管道的冲蚀破坏,尤其是工程中常使用的小管径普通弯头冲蚀较为严重。因此,选取公称直径50 mm,曲率半径100 mm的常用小管径普通弯头为研究对象,基于仿生原理,根据胃的形状提出、设计一种胃型弯头,结构示意图如图1所示。该弯头由第一、二、三圆形截面通过放样而成,为增强工程实用性,设置第一、三圆形截面直径(D_1 、 D_2)与普通弯头的公称直径相等(方便与同公称直径的直管连接),即 $D_1 = D_2 = 50$ mm,曲率半径与普通弯头的曲率半径相等,即 $R_1 = 100$ mm,第三圆形截面直径 $D_3 = 70$ mm,为使流体介质充满

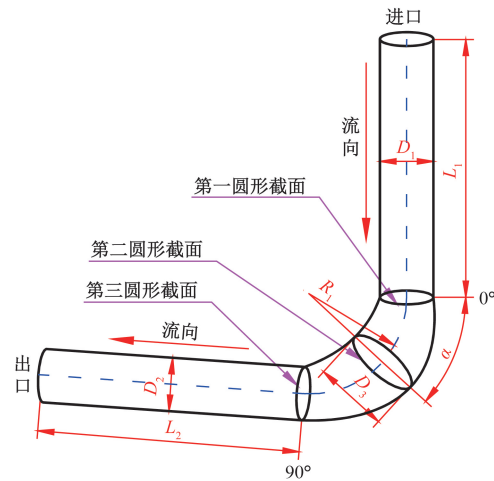


图1 胃型弯头结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of gastric bend

整个管线,将进出口段延长,即 $L_1 = L_2 = 300$ mm。第一圆形截面与第二圆形截面的夹角为 α ,通过调整 α (即调整第二圆形截面位置)可以改变胃型弯头结构。数值模拟中为减少网格总量,网格划分采用六面体网格;为真实模拟管内流体流动状况,在流道圆周面附加边界层。

1.2 数学方程

1.2.1 湍流模型

对管内天然气流动初步计算,其雷诺数大于2 300,得知管内流动为湍流流动,为使模拟结果更加准确,使用标准湍流动能-湍流耗散率(k - ε)方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ∂t 为 $\partial(\rho k)$ 对时间的偏导; μ 为流体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_t 为湍动黏度系数; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能的产生项; u_i 为时均速度, m/s ; k 为湍动能, J ; ε 为耗散率, W/m ; x_i, x_j 为空间坐标, m , $i \neq j$; σ_k 为 k 方程的湍流 Prandtl 数,取1.0; σ_ε 为 ε 方程的湍流 Prandtl 数,取1.3; S_k, S_ε 为源项; $G_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92$ 为经验常数。

1.2.2 离散相模型

离散相模型(discrete phase model, DPM)通过拉格朗日参考系下的离散相颗粒运动方程计算其运动轨迹,由颗粒的惯性与受力平衡,写出离散相颗

粒运动方程为

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u_g - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + f_x \quad (3)$$

$$Re_p = \frac{\rho_g d_p |u_g - u_p|}{\mu} \quad (4)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (5)$$

式中: ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_g 连续相密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒直径, m ; C_D 为阻力系数; Re_p 为颗粒相对雷诺数; u_g 为连续相速度, m/s ; u_p 为颗粒速度, m/s ; f_x 为附加加速度; g_x 为重力加速度, m/s^2 ; a_1, a_2, a_3 为常数。

1.2.3 冲蚀模型

由于冲蚀磨损过程比较复杂,且受多种因素的影响,在工作时固体颗粒会对壁面形成冲击磨损造成壁面材料的损失。使用 Generic 冲蚀磨损模型方程如下,该模型可以充分考虑碰撞角、粒径、流速、颗粒流量等因素对冲蚀磨损速率的影响^[17-18]。

$$ER = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{m_p C(d_p) F(\alpha) u_p^{b(u_p)}}{A_{\text{face}}} \quad (6)$$

式(6)中:ER 为冲蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; m_p 为颗粒质量流量, kg/s ; $C(d_p)$ 为颗粒直径函数; $F(\alpha)$ 为冲击角函数; $b(u_p)$ 为颗粒相对速度函数; A_{face} 为壁面网格面积, m^2 。

1.2.4 壁面碰撞反弹模型

固体颗粒会与壁面发生碰撞导致能量损失,使得颗粒反射速度低于入射速度,这种碰撞特性根据 Grant 等^[19]提出的随机颗粒-壁面反弹模型进行描述。

$$e_n = 0.993 - 0.0307\theta + 4.75 \times 10^{-4}\theta^2 - 2.61 \times 10^{-6}\theta^3 \quad (7)$$

$$e_t = 0.998 - 0.029\theta + 6.43 \times 10^{-4}\theta^2 - 3.56 \times 10^{-6}\theta^3 \quad (8)$$

式中: e_n 为法向反弹系数; e_t 为切向反弹系数; θ 为颗粒与壁面的碰撞角。

1.3 边界条件

数值模拟中选取天然气为连续相,密度为 $0.6679 \text{ kg}/\text{m}^3$,黏度为 $1.087 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;固体颗粒石英砂为离散相,密度为 $1700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。进口边界条件为速度进口,颗粒入射速度与进口流体速度相等,颗粒法向均匀入射,出口边界条件为标准大气压。

1.4 网格独立性验证

选取第二圆形截面位置 45° 时的胃型弯头,将其划分为单元尺寸 $4.00, 2.80, 2.30, 2.08, 1.67,$

$1.56, 1.40, 1.35 \text{ mm}$ 的 8 套网格以流速为 $16 \text{ m}/\text{s}$,质量流量为 $0.06 \text{ kg}/\text{s}$,颗粒直径为 $120 \mu\text{m}$ 进行数值模拟,由模拟结果得到网格独立性验证曲线如图 2 所示。可以看出,当单元尺寸由 4 mm 减小至 1.56 mm 时,各截面最大压力逐渐减小,且变化较大;当单元尺寸小于 1.56 mm 时,各截面最大压力变化很小。当网格数量由 $93\ 663$ 增加至 $690\ 060$ 时,最大冲蚀速率逐渐增大,且变化较大;当网格数量超过 $690\ 060$ 时,最大冲蚀速率趋于稳定,因此,考虑到计算结果准确性和计算效率的问题,综合各截面最大压力和最大冲蚀速率的网格独立性分析结果,最终选取单元尺寸 1.56 mm (网格数量 $799\ 220$) 进行后续模型网格划分。单元尺寸对应的网格数量依次为 $93\ 663, 203\ 159, 306\ 306, 396\ 986, 690\ 060, 799\ 220, 1\ 055\ 294, 1\ 154\ 664$ 。

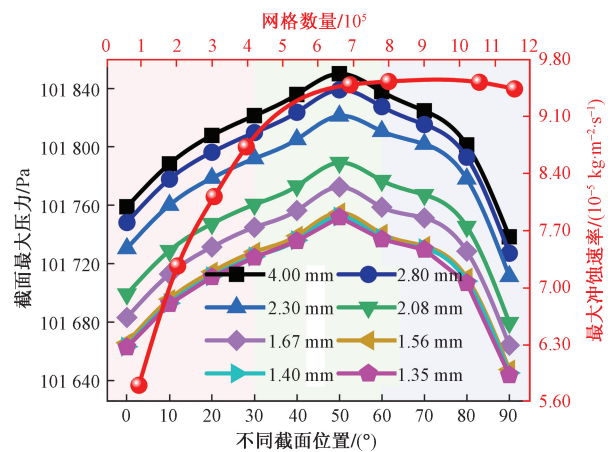


图 2 网格独立性验证曲线

Fig. 2 Grid independence verification curve

2 数值模拟结果分析

2.1 内流场分析

选取第二圆形截面位置 45.0° 时的胃型弯头以流速为 $16 \text{ m}/\text{s}$,质量流量为 $0.06 \text{ kg}/\text{s}$,颗粒直径为 $120 \mu\text{m}$ 进行数值模拟,提取速度、压力云图和流线图如图 3 所示。由图 3(a)、图 3(b)可以看出,进口段速度、压力变化比较均匀,这与图 3(c)进口段流线比较平稳的结果相一致;弯头段速度、压力有分层现象,其中越靠近外侧管壁速度越小,压力越大,即速度和压力呈负相关,这是因为流体由进口段进入弯头段来不及转向与管壁发生碰撞,导致流体速度减小,压力增大,即动能转化为压力能;出口段速度有明显分层现象,压力变化比较均匀。

2.2 抗冲蚀结构优化

调整第二圆形截面位置改变胃型弯头结构以流速为 $16 \text{ m}/\text{s}$,质量流量为 $0.06 \text{ kg}/\text{s}$,颗粒直径为

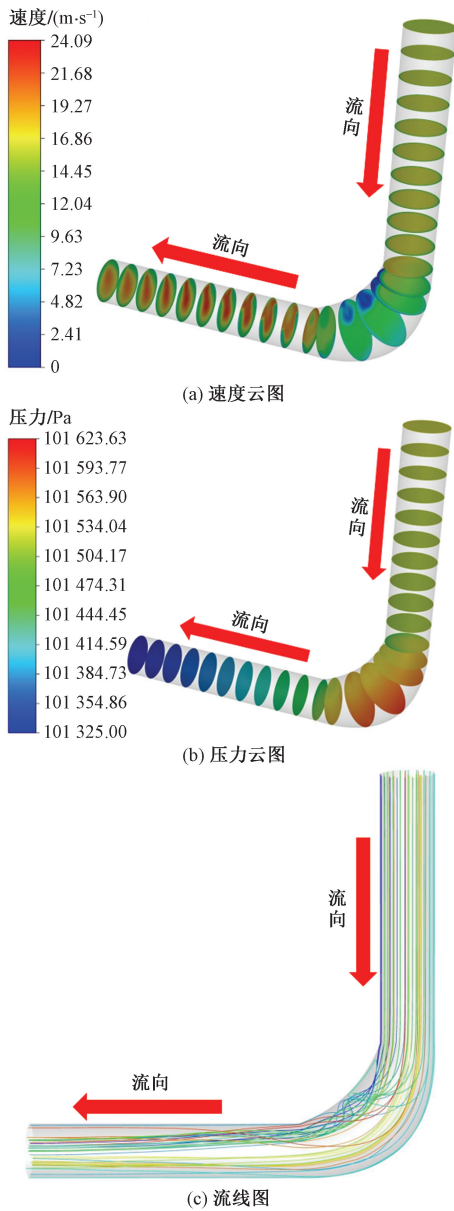


图3 速度、压力云图和流线图

Fig. 3 Velocity, pressure cloud and streamline diagram

120 μm 进行数值模拟,提取胃型弯头与普通弯头最大冲蚀速率对比变化规律如图 4 所示,胃型弯头与普通弯头冲蚀磨损对比云图如图 5 所示,胃型弯头与普通弯头颗粒轨迹对比云图如图 6 所示。

由图 4 可知,胃型弯头最大冲蚀速率整体上呈上升、下降、再上升、后上下波动的趋势。当第二圆形截面位置小于 7.5°时,胃型弯头最大冲蚀速率小于普通弯头最大冲蚀速率,具有抗冲蚀作用。当第二圆形截面位置处于 7.5°~25°时,胃型弯头最大冲蚀速率大于普通弯头最大冲蚀速率,不具有抗冲蚀作用。当第二圆形截面位置处于 25.0°~40.0°时,胃型弯头具有较好的抗冲蚀性能,尤其第二圆形截面位置等于 35.0°时,最大冲蚀速率为

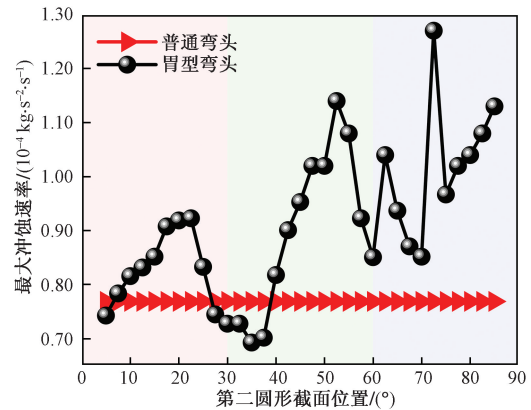


图 4 胃型弯头与普通弯头最大冲蚀速率对比变化规律

Fig. 4 Comparison and variation of maximum erosion rate between gastric bend and ordinary bend

$6.93 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其抗冲蚀效果最佳,抗冲蚀性能较普通弯头提高 9.88%。当第二圆形截面位置大于 40.0°时,胃型弯头最大冲蚀速率明显大于普通弯头最大冲蚀速率,不但不具有抗冲蚀作用,反而使得冲蚀磨损更为严重。由此得知,选择第二圆形截面位置小于 7.5°、大于 25.0°小于 40.0°时的胃型弯头可以有效减小冲蚀磨损速率。

从图 5 可以明显看出,当第二圆形截面位置小于 55.0°时,胃型弯头的冲蚀分布整体上呈鸡蛋形貌和二次冲蚀产生的倒 V 形形貌,其中第二圆形截面位置位于 40.0°~55.0°时,鸡蛋形形貌的上方部分冲蚀磨损较轻;当第二圆形截面位置大于 55.0°时,胃型弯头的冲蚀分布呈鸡蛋形形貌和二次冲蚀产生的不规则形貌;而普通弯头的冲蚀分布呈椭圆形形貌和二次冲蚀产生的倒 V 形形貌。从图 6 可以看出,胃型弯头和普通弯头的颗粒轨迹基本一致,先集中与管壁发生冲击,然后发生扩散,这与图 5 均发生两次冲蚀的结果一致。

2.3 流速对弯头冲蚀磨损的影响

为探究流速对胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损规律,选取第二圆形截面位置分别为 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°(位于 25.0°~40.0°)时的胃型弯头和普通弯头以质量流量为 0.06 kg/s,颗粒直径为 120 μm,流速分别为 8、12、16、20、24、28 m/s 进行数值模拟,由模拟结果得到不同流速下最大冲蚀速率变化规律如图 7 所示。由图 7 可知,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率随流速的增大呈抛物线增长;当流速由 8 m/s 增加至 28 m/s 时,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率平均增长 26.08 倍;这是因为流速增大、流体夹带的固体颗粒速度随之增大、颗粒的动能急剧增加、颗粒对管

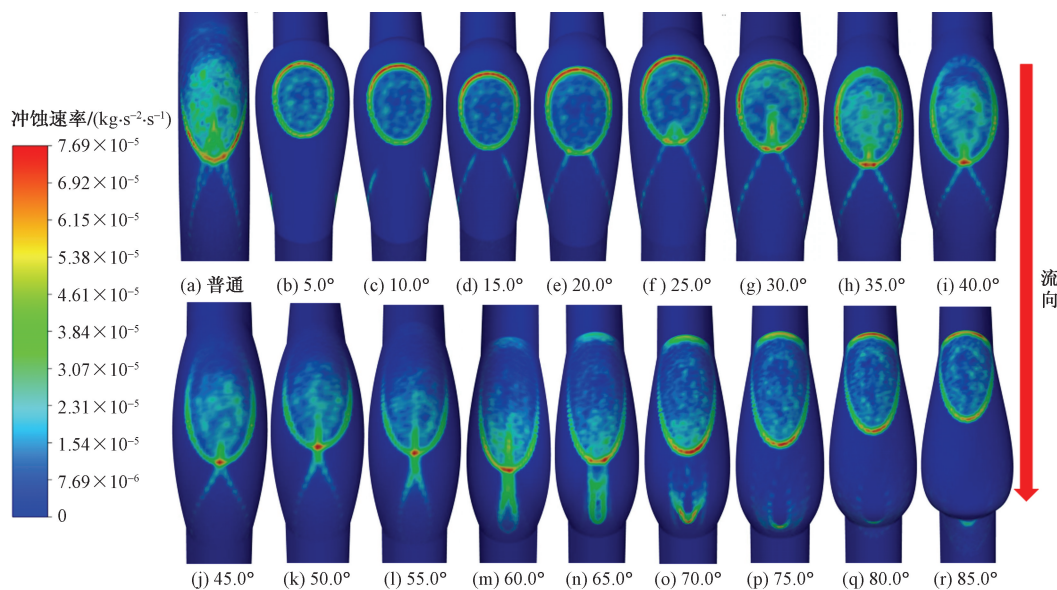


图5 胃型弯头与普通弯头冲蚀磨损对比云图

Fig. 5 Comparison cloud diagram of erosion and wear between gastric bend and ordinary bend

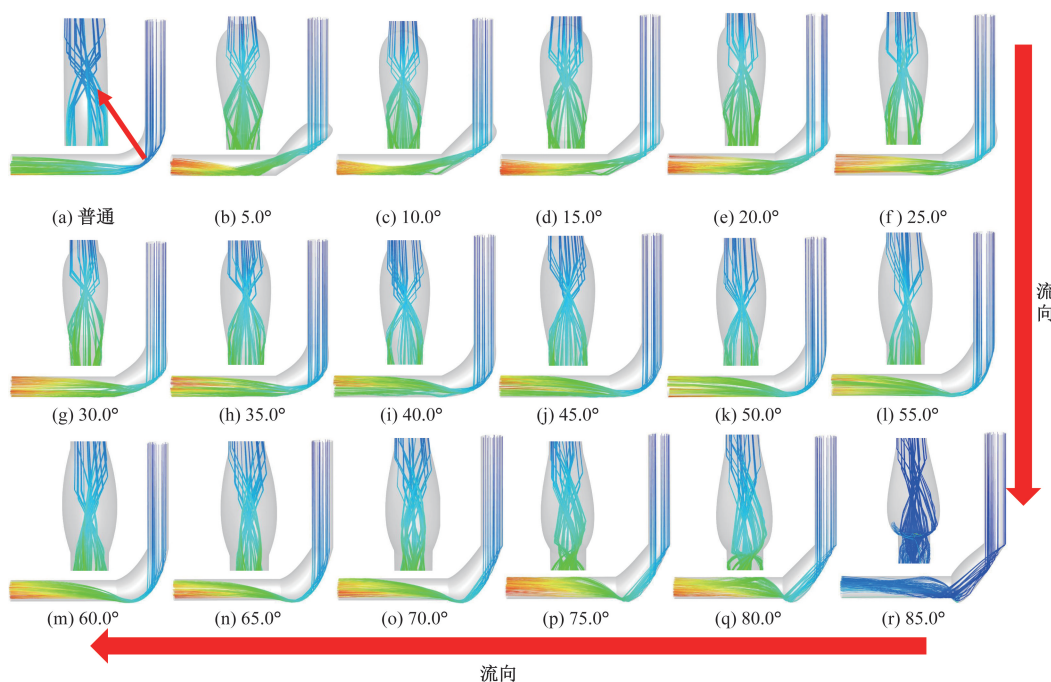


图6 胃型弯头与普通弯头颗粒轨迹对比云图

Fig. 6 Comparison cloud map of particle trajectories between gastric bend and ordinary bend

壁的冲击较大、从而导致管壁的冲蚀磨损更为严重。当流速小于 16 m/s 时, 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率比较接近, 这是因为颗粒的动能与速度的平方有关。不管流速为何值, 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率均小于普通弯头最大冲蚀速率, 即均具有抗冲蚀性能。当流速小于 20 m/s 时, 35.0°时的胃型弯头抗冲蚀效果最佳, 抗冲蚀性能平

均提高 9.43%; 当流速大于 20 m/s 小于 24 m/s 时, 32.5°时的胃型弯头抗冲蚀效果最佳, 抗冲蚀性能平均提高 10.64%; 当流速大于 24 m/s 时, 30.0°时的胃型弯头抗冲蚀效果最佳, 抗冲蚀性能平均提高 9.57%。由此可见, 天然气开采及输送中胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损受流速的影响均很大; 若不考虑出口流量大小问题, 可以通过降低流速来延长弯头使用寿命。

2.4 颗粒直径对弯头冲蚀磨损的影响

为寻求颗粒直径对胃型弯头、普通弯头的冲蚀磨损规律,选取第二圆形截面位置分别为 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°(位于 25.0°~40.0°)时的胃型弯头和普通弯头以流速为 16 m/s,质量流量为 0.06 kg/s,颗粒直径分别为 45、60、75、90、105、120 μm进行数值模拟,由模拟结果绘制出不同颗粒直径下最大冲蚀速率变化规律如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着颗粒直径的增大,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率整体上呈上升趋势;当颗粒直径从 45 mm 增大至 120 mm 时,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率分别增长 1.61、1.71、1.45、1.66、1.09 倍;分析原因可知:当质量流量和颗粒密度固定时,颗粒直径增大,导致颗粒质量增大(颗粒数目减少)、颗粒的冲击动能增加,使得颗粒与管壁造成的冲击较大。虽然颗

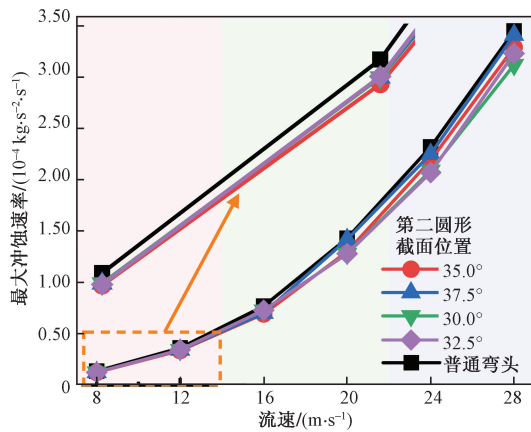


图 7 不同流速下最大冲蚀速率变化规律
Fig. 7 Variation law of maximum erosion rate under different flow velocities

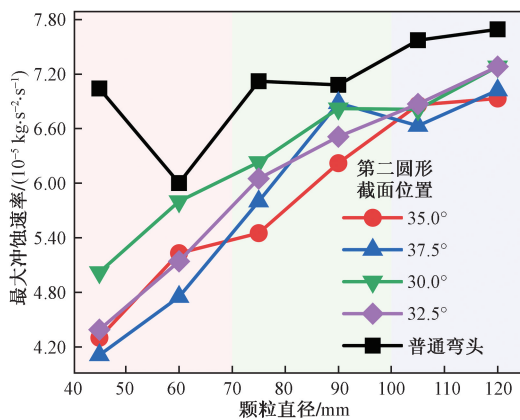


图 8 不同颗粒直径下最大冲蚀速率变化规律
Fig. 8 Variation law of maximum erosion rate under different particle diameters

粒数目减少、与管壁的碰撞次数减少,但更大的冲击动能弥补了因颗粒数目减少造成的能量损失,使得弯头的最大冲蚀速率仍然增长。无论颗粒直径如何变化,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率均小于普通弯头最大冲蚀速率,均具有抗冲蚀作用;其中,当颗粒直径小于 70 mm 时,37.5°时的胃型弯头抗冲蚀效果最好,当颗粒直径大于 70 mm 时,35.0°时的胃型弯头抗冲蚀效果最好。因此,天然气开采及输送中设法滤除管道中直径较大的固体颗粒可以在一定程度上降低胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损。

2.5 质量流量对弯头冲蚀磨损的影响

为研究颗粒数目对胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损规律,选取第二圆形截面位置分别为 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°(位于 25.0°~40.0°)时的胃型弯头和普通弯头以流速为 16 m/s,颗粒直径为 120 μm,质量流量分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 kg/s 进行数值模拟,模拟结果如图 9 所示。

由图 9 可知,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率随质量流量的增加近似线性增长;当质量流量从 0.02 kg/s 增加至 0.12 kg/s 时,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头和普通弯头的最大冲蚀速率分别增长 6.62、6.71、6.97、7.00、7.35 倍。这是因为流速为一定时,单位时间内质量流量增加而颗粒直径为定值,导致颗粒数目增加,使得单位时间内在单位面积上与管壁发生碰撞的频率增加,管壁的冲蚀磨损相应较为严重。普通弯头最大冲蚀速率与 35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率的差值随质量流量的增加逐渐增大。不论质量流量为何值,普通弯头最大冲蚀速率同 35.0°、37.5°、

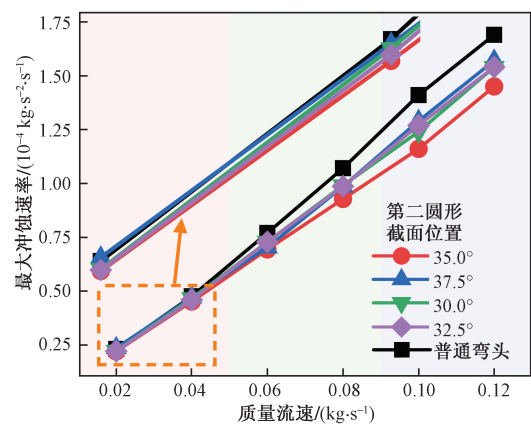


图 9 不同质量流量下最大冲蚀速率变化规律
Fig. 9 Variation law of maximum erosion rate under different mass flow rates

30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率相比始终最大,即冲蚀磨损始终最为严重,也就是35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头均具有抗冲蚀效果,其中37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头抗冲蚀效果比较接近,35.0°时的胃型弯头抗冲蚀效果最佳,抗冲蚀性能平均提高10.83%。因此,在天然气开采及输送中设法减小固体颗粒数目可以有效减小胃型弯头和普通弯头的冲蚀磨损速率,延长弯头使用寿命。

3 结论

(1)提出并设计一种胃型弯头(新型弯头),通过将不同结构胃型弯头的最大冲蚀速率与普通弯头对比,得到只有第二圆形截面位置小于7.5°和大于25.0°小于40.0°时的胃型弯头具有抗冲蚀作用,其中35.0°时的胃型弯头抗冲蚀效果最佳,抗冲蚀性能较普通弯头提高9.88%。

(2)35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率同普通弯头最大冲蚀速率的变化趋势相同,均随流速、颗粒直径、质量流量的增大而增大;分析各因素下最大冲蚀速率的数值及增长倍数,得到流速对弯头的冲蚀磨损影响最大。

(3)不论流速、颗粒直径、质量流量如何变化,35.0°、37.5°、30.0°、32.5°时的胃型弯头最大冲蚀速率始终小于普通弯头最大冲蚀速率,即均具有抗冲蚀性能;综合对比分析得知,35.0°时的胃型弯头整体上抗冲蚀效果最好。

(4)天然气开采及输送中,使用具有抗冲蚀作用的胃型弯头不仅方便与同公称直径的直管连接,还可以有效降低冲蚀磨损速率,实用性较强;其次,通过降低流速、设法滤除管道中直径较大的固体颗粒和颗粒数目可以更加有效降低弯头的冲蚀磨损,对于延长管道使用寿命具有十分重要的意义。

参 考 文 献

[1] 孙键琳,张忠义,何彤,等.空间Z形管路液-固两相流冲蚀特性分析[J]. 液压与气动,2022,46(4):34-43.
Sun Jianlin, Zhang Zhongyi, He Tong, et al. Analysis of erosion characteristics of liquid-solid two-phase flow in space Z-shape pipeline[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(4): 34-43.

[2] 王静,李长俊,吴瑕.页岩气集输管道弯头气液固三相冲蚀磨损特性研究[J]. 石油机械,2022,50(9):137-144.
Wang Jing, Li Changjun, Wu Xia. Study on gas-liquid-solid erosion wear of elbow in shale gas gathering pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(9): 137-144.

[3] 林楠,黄辉,李仕力,等.天然气集输场站管线弯头冲蚀磨损数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(21):8543-

8549.
Lin Nan, Huang Hui, Li Shili, et al. Study on erosion numerical simulation of elbows of pipelines in natural gas gathering stations [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8543-8549.

[4] Song X, Qi D, Xu L, et al. Numerical simulation prediction of erosion characteristics in a double-suction centrifugal pump[J]. Processes, 2021, 9(9): 1483.

[5] 黄华宝,钱玉宝,郭旭涛,等.基于DDPM模型的高压管汇冲蚀磨损数值模拟[J]. 科学技术与工程,2023,23(26):11195-11201.
Huang Huabao, Qian Yubao, Guo Xutao, et al. Numerical simulation of high pressure pipe sink erosion and wear based on DDPM model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11195-11201.

[6] 莫丽,刘栖,许先雨.基于CFD数值模拟的异面三通管冲蚀磨损规律研究[J]. 润滑与密封,2022,47(8):41-46.
Mo Li, Liu Xi, Xu Xianyu. Study on erosion wear law of tee in different planes based on CFD numerical simulation[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(8): 41-46.

[7] Li R, Sun Z, Li A, et al. Design optimization of hemispherical protrusion for mitigating elbow erosion via CFD-DPM [J]. Powder Technology, 2022, 398: 117128.

[8] 季楚凌,李长俊,马树锋,等.弯管仿生耐磨方法数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(10):3582-3589.
Ji Chuling, Li Changjun, Ma Shufeng, et al. Numerical simulation of bionic method for improving property of elbow erosion resistance [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(10): 3582-3589.

[9] Zhang J, Chen W, Yang M, et al. The ingenious structure of scorpion armor inspires sand-resistant surfaces [J]. Tribology Letters, 2017, 65: 1-11.

[10] 黄坤,邓平,李岳鹏,等.气固两相流90°弯管抗冲蚀结构优化[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(8):94-100.
Huang Kun, Deng Ping, Li Yuepeng, et al. Structure optimization for erosion resistance of 90° elbow with gas-solid two-phase flow [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(8): 94-100.

[11] 郭姿含,张军,陈沪,等.基于CFD的3点放样弯管冲蚀模拟研究[J]. 化学工程,2023,51(6):73-78.
Guo Zihan, Zhang Jun, Chen Hu, et al. Erosion simulation of three-point lofting elbow based on CFD [J]. Chemical Engineering, 2023, 51(6): 73-78.

[12] Zhu H, Li S. Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib [J]. Powder Technology, 2018, 330: 445-460.

[13] Dos S V F, De Souza F J, Duarte C A R. Reducing bend erosion with a twisted tape insert [J]. Powder Technology, 2016, 301: 889-910.

[14] 黄钰棋,王沐晨,张林,等.非对称球形弯头内颗粒流动特性研究[J]. 计算机仿真,2023,40(4):236-240.
Huang Yuqi, Wang Muchen, Zhang Lin, et al. Study on particle flow characteristics of asymmetric spherical elbow [J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 236-240.

[15] 莫丽,郭振兴.平椭圆弯管冲蚀磨损数值模拟[J]. 石油机

- 械, 2022, 50(1): 137-144.
- Mo Li, Guo Zhenxing. Numerical simulation on erosion wear of flat oval elbow [J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(1): 137-144.
- [16] Duarte C A R, De Souza F J, Dos Santos V F. Mitigating elbow erosion with a vortex chamber [J]. *Powder Technology*, 2016, 288: 6-25.
- [17] 付鹏, 刘洛航, 杨卫平, 等. 气固两相流饲料输送管道结构优化研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 303-310, 319.
Fu Peng, Liu Luohang, Yang Weiping, et al. Study on structure optimization of feed conveying pipeline in gas-solid two-phase flow [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 303-310, 319.
- [18] 谭冬梅, 甘沁霖, 陶雨, 等. 含错边焊缝缺陷弯管气固两相流冲蚀磨损研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(1): 110-120.
Tan Dongmei, Gan Qinlin, Tao Yu, et al. Erosion wear of gas-solid two-phase flow in a curved pipe with a misaligned welding defect [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)* 2024, 51(1): 110-120.
- [19] Grant G, Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles [J]. *Journal of Aircraft*, 1975, 12(5): 471-478.