

基于Fluent的博士帽型弯管冲蚀模拟分析

马 韞, 鄢曙光, 吕 彤, 禹 瑾

武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年2月17日; 发布日期: 2025年2月27日

摘 要

为了研究博士帽型弯管的流动特性与冲蚀问题, 基于Fluent软件描述和模拟实际物理现象的数学和计算框架, 选用RNG k- ϵ 模型、DPM离散相模型以及冲蚀速率公式, 模拟研究了普通弯管与博士帽型弯管内的冲蚀情况, 分析讨论了质量流量、气体流速、固体颗粒直径对弯管冲蚀磨损的规律。结果显示: 相同条件下, 博士帽型弯管空腔内气体速度和颗粒速度相比普通弯管较小, 颗粒撞击弯管外壁的速度降低, 因此博士帽型弯管具有优异的抗冲蚀性能; 在特定条件下, 流体的流速越高, 粒子对弯头的磨损越显著, 流速与冲蚀率呈正相关; 在同一流速条件下, 冲蚀率随着颗粒粒径的增大而逐步上升, 最终趋于稳定。

关键词

Fluent, 弯管, 流体仿真, 冲蚀

Erosion Simulation Analysis of Doctoral Cap Pipeline Elbow Based on Fluent

Yun Ma, Shuguang Yan, Tong Lyu, Jin Yu

College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Dec. 11th, 2024; accepted: Feb. 17th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

In order to study the flow characteristics and erosion problems of doctoral cap pipeline, according to the actual production situation on site, the corresponding physical model was established based on Ansys-Fluent fluid simulation software, and the RNG k-epsilon model, DPM discrete phase model and erosion rate equation were selected to simulate and study the erosion of ordinary pipe and doctoral cap pipe. The laws of mass flow rate, gas flow rate and solid particle diameter on erosion wear of pipe were analyzed and discussed. The findings indicate that, under identical conditions,

文章引用: 马韞, 鄢曙光, 吕彤, 禹瑾. 基于 Fluent 的博士帽型弯管冲蚀模拟分析[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(1): 108-117. DOI: 10.12677/sea.2025.141011

the gas velocity and particle velocity in the cavity of the Bosch cap bend are smaller than that of the ordinary bend, and the velocity of the particles impacting the shell of the bend is reduced, so the Bosch cap bend has a good anti-erosion effect. Under certain conditions, the faster the fluid velocity is, the more obvious the erosion of particles on the bend, and the flow velocity is positively correlated with the erosion rate. At the same flow rate, the erosion rate increases gradually with the increase of particle size, and finally tends to be stable. The simulation results show that the doctoral cap pipe has strong erosion resistance, and the mass flow rate, gas flow rate and the diameter of solid particles are the main factors affecting the erosion rate of pipeline elbow.

Keywords

Fluent, Elbow, Fluid Simulation, Erosion

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

除尘系统中的一个重要组成部分是含尘气体通风管道，而根据粉尘性质的不同，管道风速的范围一般在 15~25 m/s，对于磨琢性强、浓度高的含尘气体，除尘管道中异形件及其临接的直管易发生磨损，以弯管外弯侧 180~240°范围内的管壁最为严重，除尘管道的磨损主要是磨粒磨损。除尘管道最常用的材料为 Q235 钢板，该材料硬度不高，耐冲蚀性较差，在实际应用中，直角除尘管道的弯头部位极易发生磨损现象，尤其以弯管外弯侧 180~240°范围内的管壁中的磨损情况最为严重。按照国家环保设施“三同时”的要求，除尘器必须与主体设备同时运行，加之除尘管道内呈负压，管道只有在检修时才能焊补，因此，弯头出现磨损后，除尘管网的漏风率会增加，有效风量也会随之降低，在浪费环境资源的同时，也无法保证岗位粉尘浓度的达标。但如果采用耐磨材料，除尘管网的一次性投资将会增加 10~15% [1]-[5]。

通过对已有研究总结，弯管冲蚀现象与管道的构造、在封闭管道内部的流动速度及固体颗粒尺寸大小等多种因素都有着紧密的关系[6]-[13]。朱秀萍等[14]对气力输送管道中弯管的磨损机理进行了分析，结果表明影响气力输送管道中弯管磨损量的因素主要有：冲击角度、输送物料的物性、输送气流速度以及料气比。史晶莹等[15]对天然气输送过程中携带的砂粒对弯管造成的冲蚀问题，对固体颗粒的在特定区域内的流动状态和速度分布、冲蚀速率及在流体流动过程中，固体颗粒与管道表面发生碰撞并造成磨损的具体位置进行模拟分析，为预防管道冲蚀提供一个科学的、系统的框架和支撑以及实际参考。冯晓峰等[16]研究了烧结除尘系统中 90°弯管管壁的冲蚀磨损规律，分析了粉尘质量浓度、管道流速、颗粒直径、管道弯径比及管道直径对弯管冲蚀率的影响。

本文研究的“博士帽”型管道耐磨弯头，是通过在弯头入口和弯头出口两个直型管道连接面弯管外弯侧增设一个半凹状空腔体，整体弯头空腔体呈“博士帽型”，该设计可以减弱介质的冲击力，以此来延长弯头的使用寿命，利用 Fluent 仿真软件，将含尘气体作为流体介质，并根据工况设置合适的气体速度，对“博士帽”型耐磨弯头进行数值模拟。

2. 理论模型与管道划分

2.1. 离散相(Discrete Phase Model, DPM)控制方程

在 Fluent 仿真中，通常采用欧拉-拉格朗日模型，其中连续相使用欧拉方法描述，离散相则采用拉

格朗日方法来描述, 通过对拉格朗日坐标系下的固体颗粒作用力的微分方程进行积分得到固体颗粒的运动轨迹。基于牛顿第二定律, 对单位质量颗粒进行受力分析, 得到固体颗粒运动, 其轨迹数学模型为:

$$\frac{du_{\rho}}{dt} = F_D(u - u_{\rho}) + \frac{g_x(\rho_{\rho} - \rho)}{\rho_{\rho}} + F_x \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_{\rho}d_{\rho}^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (2)$$

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

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{R_e} + \frac{\alpha_3}{R_e^2} \quad (4)$$

式中: μ_{ρ} -颗粒速度, [m/s]; u -流体速度, [m/s]; ρ_{ρ} -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_{ρ} -颗粒直径, [m]; C_D -拖曳力系数, 用以表示流体阻力对颗粒的影响程度; α_1 、 α_2 、 α_3 为与 R_e 有关的常数。

2.2. 冲蚀模型

根据管道内气体与固体两相流之间相互影响和相互依赖的关系以及管内流体的湍动能方程, 构建冲蚀磨损模型[17], 其具体的表达式为:

$$R_{ero} = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_{\rho}) f(\theta) v_p^{b(v)}}{A_f} \quad (5)$$

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]; $C(d_{\rho})$ -颗粒粒径函数, 取 1.8×10^{-9} [18]; 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[19], 取 2.6; (θ) -颗粒与管道壁面的冲击角度, $f(\theta)$ 是颗粒速度矢量与物体表面法线的夹角的函数, 通过实验得到[20], 并通过线性分段函数进行表达, 具体见表 1。

Table 1. Impact angle linear piecewise function value

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

固体粒子在与壁面碰撞时, 会发生能量的损耗和传递, 冲击后的反弹速度小于冲击前的速度, 基于铁介质建立的回弹模型公式为[21]:

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

$$e_T = 0.998 - 0.029\theta + 6.43 \times 10^{-4}\theta^2 - 3.56 \times 10^{-6}\theta^{-3} \quad (7)$$

式中: e_N -法向恢复系数; e_T -切向恢复系数。

3. 管道弯头数值模拟

3.1. 弯管模型

该研究弯管模型两个圆柱直径 $D = 630\text{ mm}$ ，两个直型管道长度均为 1420 mm ，在两个直型管道连接的截面之间的弯管外部加入一个半圆台状空腔体，整体弯头空腔体形状呈“博士帽型” [5]，弯头进口与出口之间弯头内侧表面缓冲内曲面为弧形，弯头冲击角 90° ，该研究弯管示意图如图 1。

3.2. 网格划分与边界设定

为简化问题，假设颗粒为密度均匀的球形，且射入后物体不会围绕某一固定轴或点进行转动或旋转，同时忽略颗粒所受的虚拟质量力、压力梯度力和升力等影响。用 ICEM-CFD 软件选用结构化网格进行划分，最终确定总网格数为 5 万。使用 Fluent 软件，采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型来处理气流运动中的湍流效应，湍流中速度波动的程度或湍流的激烈程度和湍流耗散率保持预设值，即 5% 和 10%，模型及边界条件设定见表 2。对计算颗粒运动时受到重力引力的影响，在与地面垂直的方向设定重力加速度为 9.81 m/s^2 。颗粒密度默认为 1550 kg/m^3 。

Table 2. Model and boundary setting
表 2. 模型及边界设定

边界	连续相	离散相
模型	k-epsilon 模型	DPM 模型
入口	速度入口	逃逸
出口	压力出口	逃逸
壁面	无滑移边界	反射

选用压力 - 速度稳态求解器对边界条件进行求解，采用 COUPLE 算法，为了在仿真过程中，计算结果随着迭代次数的递增能更好地接近真实解或期望值，压力、动量和湍动能均使用二阶迎风差分格式。

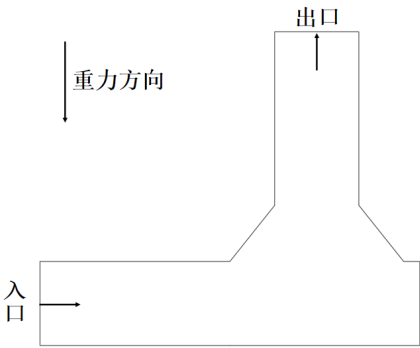


Figure 1. Bending diagram
图 1. 弯管示意图

3.3. 计算模型验证

为了验证数值模拟的准确性，采用冯晓峰[16]所使用的实验条件进行数值模拟并与实验结果对比。具体试验研究为：弯径比为 1.5、入口风速为 19.7 m/s 、颗粒直径为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 、直径为 259 mm 的弯管在粉尘

质量浓度为 16.4 g/m^3 的除尘弯管进行试验研究, 采用超声测厚仪对弯管进行布点测量厚度, 并通过一段时间的壁厚度变化差值计算试验弯头的冲蚀率。将冯晓峰的试验结果与该工况下采用 RNG k- ε 模型的模拟结果进行对比, 结果如图 2 所示。通过对比分析可知模拟结果与试验数据变化规律基本一致, 数据基本吻合, 平均误差为 10%。考虑管内两相流动的复杂性, 该模型误差在可接受范围内, 因此该计算模型可以用来预测弯管冲蚀磨损的情况。

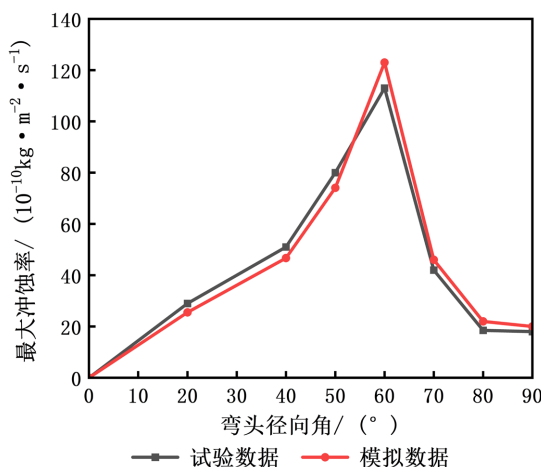


Figure 2. Comparison between experimental and calculated
图 2. 弯头最大冲蚀率试验值与计算值对比

4. 数值模拟结果分析

4.1. 流场数值分析

在流速为 18 m/s , 固体颗粒大小为 $400 \mu\text{m}$, 单位时间内通过管道的颗粒的总质量为 0.1 kg/s 的条件下, 两种弯管的轴向截面分布云图见图 3~5 所示。图 3 和图 4 分别为弯管的压力云图和速度云图。从图 3 观察到, 流体在进入直型管道时, 图中压力相对均匀, 而在流入空腔体时, 压力和速度都发生了显著变化。从图 3 中可以看出弯管大致压力变化趋势: 在弯头内侧, 压力先下降后上升, 速度则先增加后减小; 在弯头外侧, 压力先上升后下降, 速度先减小后增加, 表明速度和压力存在反向变化的趋势。可见流体进入弯头时流向发生了急剧变化, 产生了较强的离心力。在外弯空腔处离心力使颗粒发生位移, 导致压力沿离心力方向逐步增大。因此, 可以推测弯管外侧是弯管表面磨损或损害最严重的区域, 且通常受到磨损的区域位于弯头外侧的 70° 到 90° 之间。

从图 3(a), 图 4(a)可以看出, 普通 90° 管道的水平管道的速度分布和压力分布保持相对稳定, 然而在流体黏滞力的作用下, 速度在靠近管壁区域处数值较低, 当流体流经弯头时, 固体颗粒会直接发生碰撞并反弹, 导致速度场和压力场发生变化。弯管外侧的压力较高, 这是因为流体在弯管处产生离心力, 使其对弯管内侧产生牵引作用, 改变了流动方向。负压在弯管内侧形成, 压力从内侧向外侧逐渐增加, 内侧的压力转化为动能。此外, 弯管内侧的速度较高, 导致颗粒主要在弯管外侧和竖直管道内与管壁发生碰撞和滑动。因此, 冲蚀仅发生在弯管外侧及竖直管道方向, 而内侧则不会受到冲蚀。

从图 3(b), 图 4(b)所示, 博士帽型弯管的水平管道的压力与速度分布同样基本是稳定状态, 当气固两相流流经空腔体时, 由于其空腔的横截面积比普通弯管内部横截面积更大, 流体在经过弯头时受黏性作用和空腔结构影响, 靠近管壁区域的流速较低, 在空腔部分接近于 0, 空腔体内气体流速减慢, 固相颗粒对管壁冲击力减弱, 冲击点减少。空腔内部的压力较高, 这是由于流体在空腔中产生离心力, 对弯管

内侧产生牵引作用, 导致流动方向发生变化, 并在内侧形成负压, 压力从内侧向外侧逐渐增加, 部分内侧压力被转化为动能。弯管内侧的速度相对较高, 因此颗粒在空腔内部和垂直管道内与管壁发生碰撞和滑动, 故只有空腔底部部分发生冲蚀, 且冲蚀程度与冲蚀面积大大减少。

从图 5 冲蚀云图可以看出, 普通 90°管道冲蚀率比“博士帽型”弯管高两个量级, 冲蚀形状大致呈“v”型, 主要集中在弯管径向角位为 50°~70°范围内, 且冲蚀面积比“博士帽型”弯管大, 因而博士帽型弯管具有很好的防冲蚀效果。

从图 6 颗粒轨迹图中看出, 当含尘气体流经空腔体时, 由于“博士帽型”空腔的横截面积远大于管道的横截面积, 对于体积一定的气体来说, 空腔内的气体流速显著降低, 固相颗粒对管壁的冲击力减弱, 冲击点减少, 从而延长了弯头的使用寿命。随着“博士帽型”空腔内两相流与管壁之间形成颗粒缓冲层, 这种缓冲层利用自生耐磨的原理, 对管壁起到了保护作用, 有效减少了两相流对管壁的冲击力和冲击次数, 从而提高了耐磨性能, 达到耐磨的目的。此外, 弯头内侧表面为弧形缓冲曲面, 避免了局部磨损的发生。

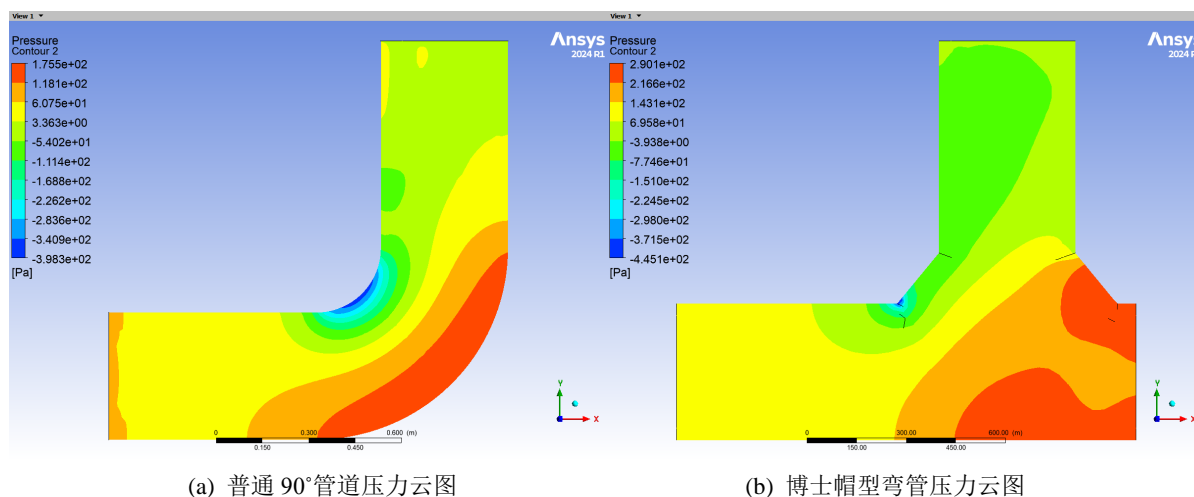


Figure 3. Two kinds of bending pressure cloud image
图 3. 两种弯管压力云图

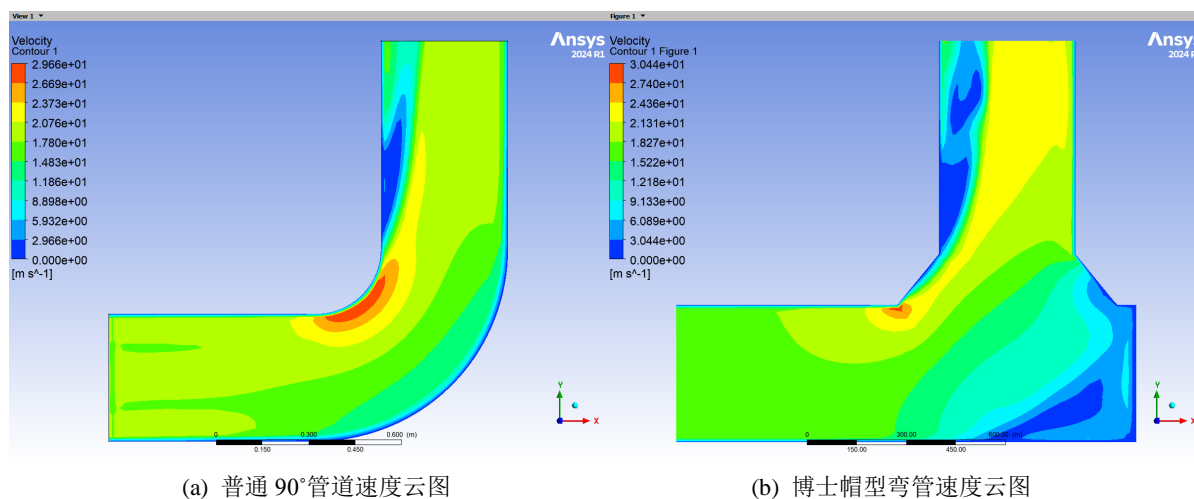


Figure 4. Two kinds of bending velocity cloud image
图 4. 两种弯管速度云图

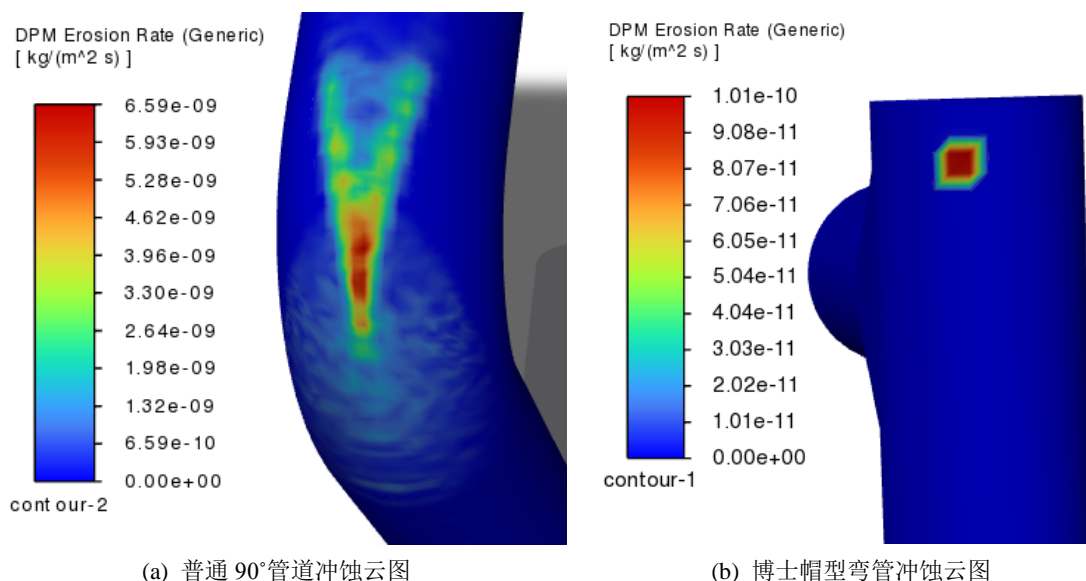


Figure 5. Two kinds of bending erosion cloud image
图 5. 两种弯管冲蚀云图

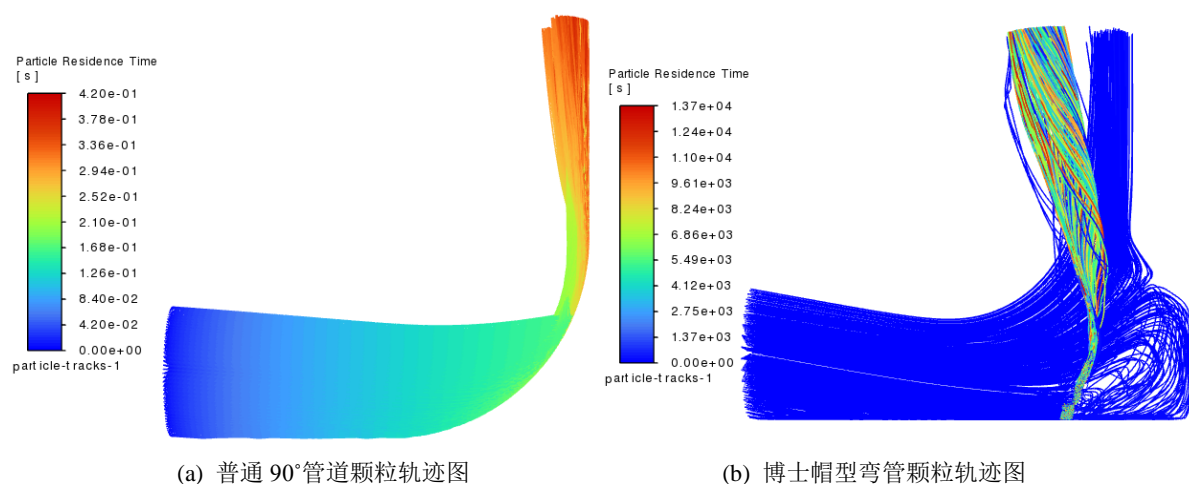


Figure 6. Two kinds of bending particle trajectories
图 6. 两种弯管颗粒轨迹图

4.2. 流体速度对冲蚀率的影响

为了研究在不同流体运动速度下固体颗粒在流体流动过程中对弯管表面造成损伤的规律, 设定粒子尺寸为 $100\ \mu\text{m}$, 颗粒在单位时间内通过弯管截面的流体质量分别设置为 $0.01\ \text{kg/s}$ 、 $0.05\ \text{kg/s}$ 、 $0.1\ \text{kg/s}$, 对不同流速下的冲蚀速率进行模拟。通过图 7 可以看出, 随着流速的增加, 管壁颗粒的冲蚀率呈现上升趋势。尽管冲蚀率随着流速增大而增加, 但冲蚀的形态大体相同。在流体曳力与颗粒的惯性效应共同作用下, 管道内流体与弯管弯头外侧内壁发生碰撞, 形成了明显的圆形冲蚀痕迹。图 7 显示了流速与冲蚀率之间的关系。当流速在 $6\sim 8\ \text{m/s}$ 之间时, 冲蚀率的变化幅度较小, 流速的变化对冲蚀速率几乎没有显著影响; 然而, 当流速为 $10\ \text{m/s}$ 时, 冲蚀率达到折线图的最高峰。故 $10\ \text{m/s}$ 为临界流速, 在实际生产中尤其是颗粒质量流量较大时应避免处于此流速。流速大于 $10\ \text{m/s}$ 后, 冲蚀率开始逐渐下降至平稳, 这是因为在低流速下, 颗粒的动能较小, 对弯管壁面的冲击力度不足, 因此冲蚀率较低。而在较高流速下, 气

体曳力增强,能够更有效地推动颗粒,导致颗粒与弯管壁面撞击更加充分,撞击频率增加,从而显著提高了最大磨损速率。到达一定流速以后,空腔内两相流与管壁之间形成颗粒缓冲层,对管壁起到了保护作用,有效减少了两相流对管壁的冲击力和冲击次数。在颗粒质量流量较小时,冲蚀速率随流速呈线性变化,此时流体所携带的颗粒数量有限,即使初始动能较大,对管壁的伤害依然有限;在颗粒质量流量较大时,颗粒与壁面之间碰撞的概率变大,冲蚀速率随流速呈指数变化。

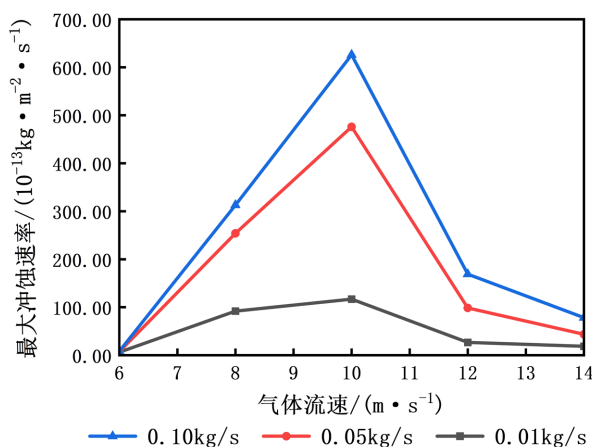


Figure 7. Influence of fluid velocity on erosion of bent pipe

图 7. 流体速度对弯管冲蚀的影响

4.3. 颗粒直径对冲蚀率的影响

在管道直径为 630 mm、弯管半径与管道直径的比值为 1.5、流速 10 m/s,颗粒在单位时间内通过弯管截面的流体质量分别设置为 0.01、0.05、0.1 kg/s 的条件下,通过改变固体颗粒的尺寸,得到相对应的冲蚀率。图 8 呈现了粒径与冲蚀率的关系。

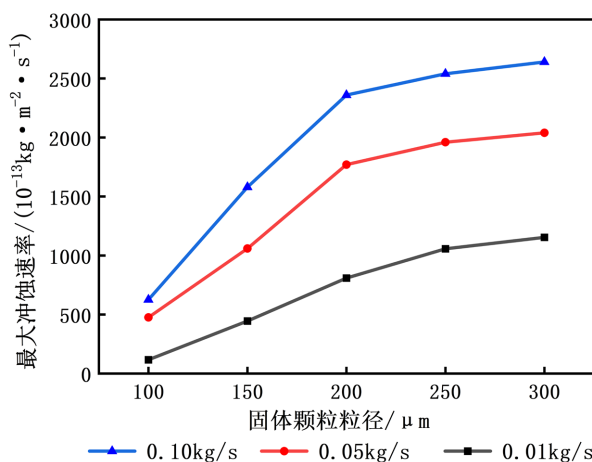


Figure 8. Influence of particle diameter on erosion of bent pipe

图 8. 颗粒直径对冲蚀率的影响

由图 8 可见,在保持流体流动过程中的速度一致性,颗粒质量流量一定的条件下,随着粒子尺寸增大,固体粒子对弯头造成的最大磨损率逐渐上升。分析认为,直径小的颗粒的惯性较小,受到在流体中运动时遇到的阻力的作用,容易与流体保持一直的运动,从而较少偏离流动方向,撞击管壁的概率也较

低,因此冲蚀率较低。然而,随着颗粒直径的增大,颗粒的惯性和动能增加,它们与流体的耦合性也更强。此时,在弯管内部,颗粒之间以及颗粒与壁面的碰撞变得更加频繁,且颗粒在壁面表面运动时出现了与壁面表面之间的相对滑动行为,导致粒子与弯头壁面的撞击更为充分,撞击频率增多,从而使得冲蚀面积扩大,增强了对管道外侧的冲击作用。当粒子尺寸超过 $250\text{ }\mu\text{m}$ 后,磨损率逐渐趋于平稳。这是由于气体和固体颗粒作为两种不同相态的物质,在流动过程中彼此相互作用,共同影响导致小颗粒与壁面之间的碰撞更为频繁,而大颗粒转移到气体中的动能更多,流体的携带能力下降,颗粒之间的有效碰撞增多,随着颗粒增大,大颗粒与壁面碰撞的频率和强度减弱,而重力引起的大颗粒停滞效应即流体的速度不足以克服颗粒的沉降力时,颗粒会逐渐减速,最终停留在某个位置,形成停滞状态,对后续颗粒的冲蚀影响更为显著,导致冲蚀速率维持稳定。

与此同时,对管壁的撞击强度和破坏力也增强,最终造成壁面的磨损量加大,使得弯头的最大冲蚀率变大。因此,适当减小颗粒粒径能够有效降低弯头的冲蚀磨损程度。

5. 结论

(1) 模拟结果表明,普通 90° 管道的冲蚀率显著高于“博士帽型”弯管,同时其冲蚀区域也较“博士帽型”弯管更为广泛。由此可得出结论:“博士帽型”弯管相比普通 90° 管道在抗冲蚀性能方面具有明显优势。

(2) 通过对弯管内气体流速、颗粒质量流量、颗粒直径等进行模拟分析,发现:当流速为 10 m/s 时,冲蚀率达到最高峰,故 10 m/s 为临界流速,在实际生产中尤其是颗粒质量流量较大时应避免处于此流速。颗粒质量流量较小时,冲蚀速率随流速呈线性变化且变化幅度不大,颗粒质量流量较大时,冲蚀速率随流速呈指数变化。在不同粒径范围内,冲蚀速率的增加幅度存在差异,粒子尺寸越大,管壁所受的最大冲蚀率也随之增大。当粒子尺寸超过 $250\text{ }\mu\text{m}$ 后,由于较大颗粒容易沉积,其进一步增大会导致弯管最大冲蚀率的增长趋于平稳。

(3) 使用 FLUENT 软件中的 RNG k- ϵ 湍流模型进行模拟分析,可以较为准确地模拟内部的湍流现象。在未来的模拟工作中,仍可尝试应用其他湍流模型,以提高弯管内部数值模拟的精度。但模拟仿真技术在磨损问题上存在一定局限性,只能计算得出固体颗粒对管壁的相对磨损速率,无法得到真实的磨损速率与弯管的使用寿命。

(4) 本文仅针对“博士帽型”弯管内部计算域在单一重力场条件下进行了数值模拟分析。未来研究可扩展至在不同重力场条件下对“博士帽型”弯管冲蚀情况的模拟,以进一步探讨冲蚀现象及冲蚀区域如何受到重力场方向的影响及其规律,从而为弯管设计提供更加全面和深入的指导。

参考文献

- [1] 董争亮,阮超,白立强,等. 90° 弯管冲蚀磨损仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(9): 157-161.
- [2] Tripathi, N.M., Santo, N., Levy, A. and Kalman, H. (2019) Experimental Analysis of Velocity Reduction in Bends Related to Vertical Pipes in Dilute Phase Pneumatic Conveying. *Powder Technology*, **345**, 190-202. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.001>
- [3] Safaei, M.R., Mahian, O., Garoosi, F., Hooman, K., Karimipour, A., Kazi, S.N., et al. (2014) Investigation of Micro- and Nanosized Particle Erosion in a 90° Pipe Bend Using a Two-Phase Discrete Phase Model. *The Scientific World Journal*, **2014**, Article ID: 740578. <https://doi.org/10.1155/2014/740578>
- [4] Pouraria, H., Seo, J.K. and Paik, J.K. (2016) Numerical Study of Erosion in Critical Components of Subsea Pipeline: Tees vs Bends. *Ships and Offshore Structures*, **12**, 233-243. <https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1131889>
- [5] 卢静,包文琦,赵军,等. 一种通风管道耐磨弯头[P]. 中国专利, CN201220083431.5. 2012-11-07.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Liu, M.Y. (2017) A Modified CFD-Based Sand Erosion Prediction Procedure for Pipe Elbows and Similarity Analyses on Erosion Tests. Doctor's Thesis, Tianjin University.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YHRUfPYi6NO-wqos9T9_K1KthcxmPuLGadme6lvgkmr7NJIAybriuX-UANvu7bbed8W9F7FRoERV4vdfWino1EeUFG5l-A1wp3amiQi5b2UAK_UVEgmQi8qoGWnMxxUn4ZMtkmB-FhHZaGQ-DiNc67KXl5mNxW_QkupL8fhZvYEa23Ina-i36gA81E4eM3ekiiYTr7rZcL4AU=&uniplat-form=NZKPT&language=CHS
- [9] 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.
- [10] Sun, X. and Cao, X. (2021) Impact of Inter-Particle Collision on Elbow Erosion Based on DSMC-CFD Method. *Petroleum Science*, **18**, 909-922. <https://doi.org/10.1007/s12182-021-00550-5>
- [11] Wei, Z., Huang, X., Lu, L., Shanguan, H., Chen, Z., Zhan, J., *et al.* (2019) Strategy of Rainwater Discharge in Combined Sewage Intercepting Manhole Based on Water Quality Control. *Water*, **11**, Article 898.
<https://doi.org/10.3390/w11050898>
- [12] 王岩. 液体颗粒对天然气管道冲蚀的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2019.
- [13] 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.
- [14] 朱秀萍, 李勇. 气力输送中弯管磨损原因分析及预防措施[J]. 橡胶工业, 2008(11): 680-684.
- [15] 史晶莹, 陈燕才, 蔡晓明, 等. 天然气携砂在 90°弯管中的冲蚀磨损数值分析 [J]. 油气田地面工程, 2021, 40(5): 6-11.
- [16] 冯晓峰, 张华, 谢冬明, 等. 烧结除尘系统 90°弯管壁面冲蚀磨损规律 [J]. 烧结球团, 2024, 49(2): 17-24, 37.
- [17] Forder, A., Thew, M. and Harrison, D. (1998) A Numerical Investigation of Solid Particle Erosion Experienced within Oilfield Control Valves. *Wear*, **216**, 184-193. [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(97\)00217-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(97)00217-2)
- [18] Haugen, K., Kvernfold, O., Ronold, A. and Sandberg, R. (1995) Sand Erosion of Wear-Resistant Materials: Erosion in Choke Valves. *Wear*, **186**, 179-188. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07158-x](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07158-x)
- [19] Heitz, E. (1996) Mechanistically Based Prevention Strategies of Flow-Induced Corrosion. *Electrochimica Acta*, **41**, 503-509. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00336-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)00336-3)
- [20] 叶健. 煤液化管道材料冲蚀磨损试验与数值研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
- [21] ANSYS Inc. (2012) ANSYS Fluent 14. 5 Theory Guide.