

充填料浆对变径弯管的冲蚀磨损特性分析^①

王永军¹, 胡东祥¹, 郑辉¹, 王忠昶²

(1. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 济宁 273500; 2. 大连交通大学 交通工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 采用变径弯管输送充填料浆, 利用 Fluent 软件分析弯管角度、料浆入口流速、料浆质量分数、料浆平均粒径、质量流率、颗粒形状系数、颗粒冲击角度对变径弯管冲蚀磨损的影响。结果表明: 料浆入口流速对管道冲蚀区影响最大, 当料浆入口流速由 0.8 m/s 增至 2.0 m/s 时, 管道的冲蚀区域冲蚀速率增幅约 43 倍; 料浆平均粒径对管道冲蚀区影响次之; 弯管角度、颗粒冲击角度影响较小。管道冲蚀速率与料浆动能有关, 料浆动能越大冲蚀越严重。管道的冲蚀磨损位置主要分布在入口处、弯管内外壁面、变径段与平流段, 磨损最严重的位置位于变径段与出口段的衔接处。

关键词: 充填料浆; 变径弯管; 冲蚀磨损; 输送特性; 管道输送; 管道磨损

中图分类号: TD853.34

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.003

文章编号: 0253-6099(2025)03-0014-08

Analysis of Erosive Wear Characteristics of Backfill Slurry on Reducing Bends

WANG Yongjun¹, HU Dongxiang¹, ZHENG Hui¹, WANG Zhongchang²

(1. Yankuang Energy Group Company Limited, Jining 273500, Shandong, China; 2. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract: As for backfill slurry transported through reducing bends, the effect of bend angle, inlet flow velocity, mass fraction and average particle size of slurry, mass flow rate, particle shape factor and particle impact angle on the erosive wear of reducing bends were analyzed with Fluent software. The results show that the inlet flow velocity of slurry exerts the most significant impact on the erosion-prone areas of pipeline. With the inlet flow velocity up from 0.8 m/s to 2.0 m/s, the erosion rate in the erosion-prone areas of the pipeline surges approximately 43 times. The average particle size of the slurry ranks second in terms of its impact on the pipeline's erosion-prone areas, while the bend angle and particle impact angle have relatively minor effects. It is found that the erosion rate in pipeline is related to the kinetic energy of slurry; the greater the kinetic energy of the slurry, the more severe the erosion. The erosive wear locations of pipeline are primarily distributed at the inlet, the inner and outer wall surfaces of the bend, and reducing section and the straight section to the elbow, with the connection between the reducing section and the outlet section worn most severely.

Key words: backfill slurry; reducing bend; erosive wear; transportation characteristics; pipeline transportation; pipeline wear

充填采矿法具有控制地表下沉、减少尾矿堆积、改善生态环境等优势, 已成为地下矿山开采的主要方法^[1]。充填料浆携带颗粒对充填管道关键结构如三通阀、弯头、阀门、变径位置等的冲蚀作用是导致管道磨损的主要原因^[2]。因此, 研究变径弯管的冲蚀磨损, 准确获得充填管道关键结构的冲蚀磨损状态, 对防护充填管道磨损、确保充填设备的安全运行具有重要

作用^[3]。

目前, 充填管道冲蚀磨损研究主要有室内实验和数值仿真两种方法^[4-5]。现有研究揭示了流速、浓度、粒径等单因素对规则管道的冲蚀率与最大冲蚀区域分布的显著影响^[6-7], 但对充填变径弯管的弯管角度、颗粒形状系数、质量流率等多参数交互作用缺乏系统分析^[8], 部分数值仿真未考虑长距离输送中充填变径弯

① 收稿日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51574055)

作者简介: 王永军(1973—), 男, 山东济宁人, 高级工程师, 主要从事煤炭、地矿水工程的研究。E-mail: 404117515@qq.com

通信作者: 王忠昶(1976—), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事绿色矿山充填技术的研究。E-mail: wazoch@163.com

管的疲劳损伤、料浆流变特性时变等复杂因素^[9-10]。针对上述不足,本文采用离散相模型(DPM),考虑连续相的输送与离散相颗粒运动的耦合,利用 Fluent 软件分析弯管角度、料浆入口流速、料浆质量分数、料浆平均粒径、质量流率、颗粒形状系数、颗粒冲击角度对变径弯管冲蚀磨损的影响,研究充填变径弯管冲蚀磨损的多因素耦合机制,为变径弯管的结构设计和冲蚀防护提供理论参考。

1 变径弯管冲蚀磨损计算模型

1.1 流体流动连续相控制方程

将充填料浆视为连续相,其运动方程采用欧拉法进行求解;充填料浆在管道输送时满足质量守恒、动量守恒与能量守恒定律^[11]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: x_i 为 x, y, z 方向的坐标; ρ 为连续相密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_i 为 x, y, z 方向的速度分量, m/s 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) + \rho f_i \quad (2)$$

式中: P 为压强, Pa ; τ_{ij} 为单元微元体上的黏应力分量, Pa ; f_i 为 x, y, z 方向的单位质量力, m/s^2 。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: T 为温度, $^\circ\text{C}$; C_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; K 为传热系数; S_T 为黏性耗散项。

1.2 离散相方程

充填料浆在管道输送时呈固液两相流,将充填料浆中的粗尾砂颗粒视为离散相,选用 DPM 模拟流体相和颗粒相,离散相颗粒轨迹的控制方程^[11]为:

$$\frac{du_p}{dt} = \left(\frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2} \right) (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p} \quad (4)$$

式中: μ 为分子黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ_l 为流体密度, kg/m^3 ; u 为相对速度, m/s ; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; d_p 为颗粒直径, m ; Re 为相对雷诺数; u_p 为固体颗粒相对于壁面的速度, m/s ; C_D 为拽力系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

1.3 冲蚀磨损参数

选用磨损速率^[12]表征管道磨损程度:

$$R_{er} = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) u_p^{b(v)}}{A_r} \quad (5)$$

式中: R_{er} 为管壁磨损速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; m_p 为固体颗

粒的质量流量, kg/s ; $C(d_p)$ 为固体颗粒的粒径函数,取 1.8×10^{-9} ; $f(\alpha)$ 为固体颗粒路径与壁面之间冲击角度的函数; $b(v)$ 为固体颗粒相对速度函数,默认 $b(v) = 0$; A_r 为固体颗粒冲蚀壁面计算单元的表面积, m^2 ; N 为碰撞颗粒数目。

颗粒与管道发生碰撞之后的回弹速度总是低于入射速度,采用 Forder 的壁面碰撞恢复系数方程^[13]表征这一损失特性:

$$e_T = 1 - 0.78\alpha + 0.84\alpha^3 - 0.21\alpha^3 + 0.028\alpha^4 - 0.022\alpha^5 \quad (6)$$

$$e_N = 0.988 - 0.78\alpha + 0.19\alpha^2 - 0.24\alpha^3 + 0.27\alpha^4 \quad (7)$$

式中: e_T 为切向恢复系数方程; α 为颗粒的冲击角度; e_N 为法向恢复系数方程。

2 管道模型的建立与参数设置

利用 ANSYS 中 GAMBIT 模块建立变径弯管,如图 1 所示,入口管径 R_1 为 200 mm,出口管径 R_2 为 150 mm,整个管道由入口段 G1、弯管段 G2、平流段 G3、变径段 G4、出口段 G5 组成,变径段 G4 长 100 mm,整个管道共划分 80 万个单元。选择速度入口(velocity-inlet)与压力出口(pressure-outlet),研石颗粒接触条件为逃离(escape),管道壁面设为无滑移界面,相对粗糙度系数为 0.5^[14],壁面边界条件类型为反弹(reflect)。离散相、连续相初始速度设置为 1.44 m/s。

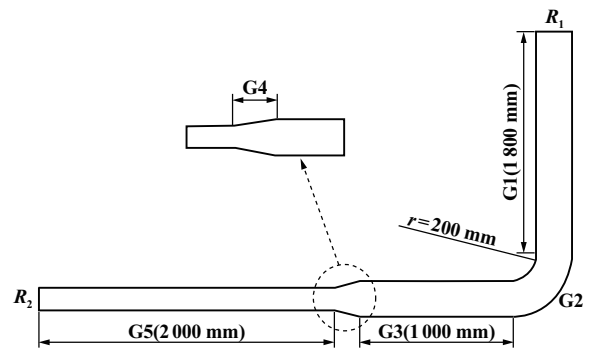


图 1 变径弯管平面图

Fig. 1 Plan view of reducing bend

将粉煤灰、水和细研石颗粒组成料浆,密度约为 $1900 \text{ kg}/\text{m}^3$,料浆质量分数为 78%,水泥、粉煤灰、煤研石质量比为 10:20:48,料浆粒径组成如表 1 所示,料浆流变参数屈服应力 $\tau_R = 81.7 \text{ Pa}$,塑性黏度 $\eta = 2.88 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[15]。

表 1 料浆粒径参数

Table 1 Particle parameters of slurry

最小粒径/ 10^{-4} m	最大粒径/ 10^{-3} m	平均粒径/ 10^{-4} m	质量流率/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	分布 指数	粒径 分布
1	1	5	2	3.5	R-P

3 不同因素对变径弯管冲蚀磨损的影响

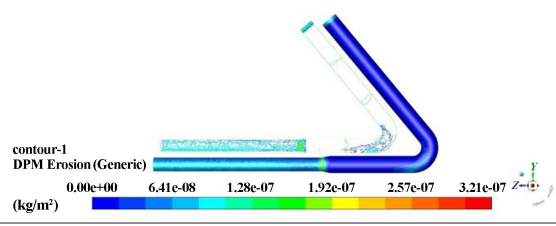
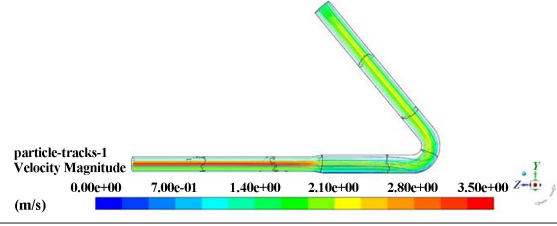
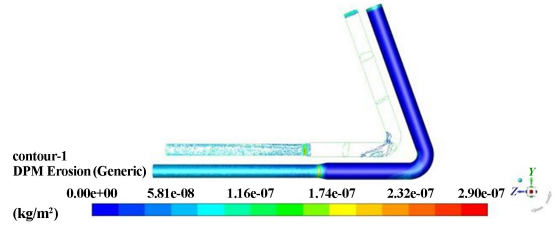
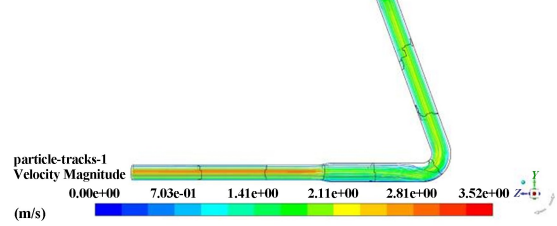
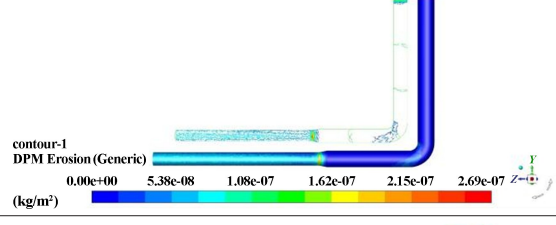
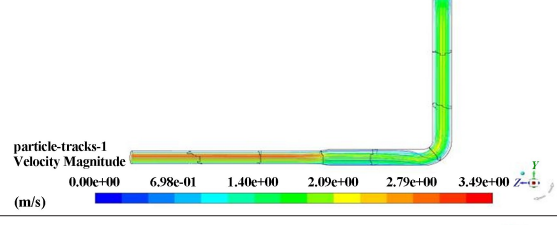
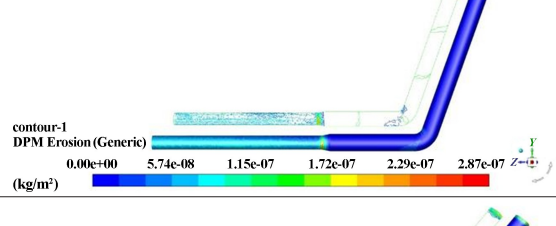
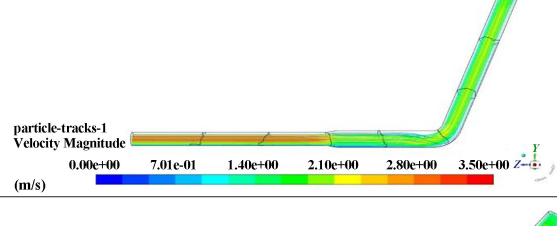
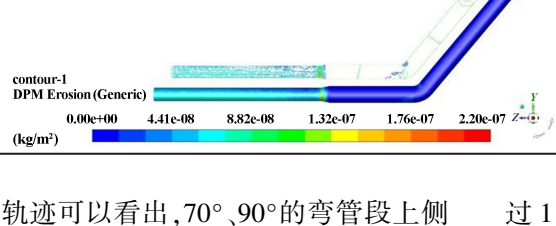
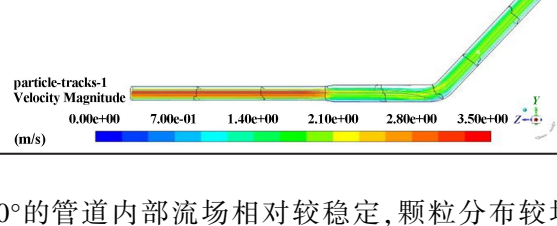
为了研究各因素对充填管道的冲蚀磨损影响,通过改变单一因素来探求各因素与冲蚀磨损之间的关系。变量初始水平设置为出入口管径比为 0.8,变径段长度为 100 mm,弯管角度为 90°,绝对粗糙度为 3×10^{-5} ,料浆质量分数为 78%,料浆入口流速为 1.2 m/s,料浆平均粒径为 0.5 mm,质量流率为 2 kg/s,颗粒形状系数为 0.6,颗粒冲击角度为 30°。

3.1 弯管角度的影响

不同弯管角度下变径弯管内颗粒轨迹与磨损状况如表 2 所示。由表 2 可见,弯管角度 50°的弯管磨损主要集中在管壁内侧与弯管两颊(弯曲部位的外侧与直管段过渡的区域)处,随着角度增大,弯管段整体磨损减弱,内壁面磨损位置下移,两颊位置磨损面积迅速减小。由于颗粒自重影响,弯管入口处最大磨损位置随着弯管角度增大从入口左侧偏移至入口右侧。

表 2 不同弯管角度下变径弯管内颗粒轨迹与磨损状况

Table 2 Particle trajectories and erosive wear in reducing bends with different angles

弯管角度/(°)	颗粒轨迹	磨损状况
50		
70		
90		
110		
130		

从颗粒运动轨迹可以看出,70°、90°的弯管段上侧出现颗粒与管壁的无接触区域,颗粒集中在该区域下侧,随着弯管角度增大,该区域随之扩大。弯管角度超

过 110°的管道内部流场相对较稳定,颗粒分布较均匀,流经弯管时受到的离心力较小,跟随主相作规则运动。料浆在弯管内流动导致的流态变化经过平流段缓

冲后开始趋向稳定,到达变径段时的料浆流态不再受弯管角度的干扰,管道冲蚀速率起伏变化较小。

图 2 为不同弯管角度下的最大冲蚀速率变化曲线。弯管角度由 50°增大至 130°时,最大冲蚀速率呈现局部小幅度波动、整体下降的趋势,但变化范围不大,弯管角度对管道磨损影响程度相对较小。

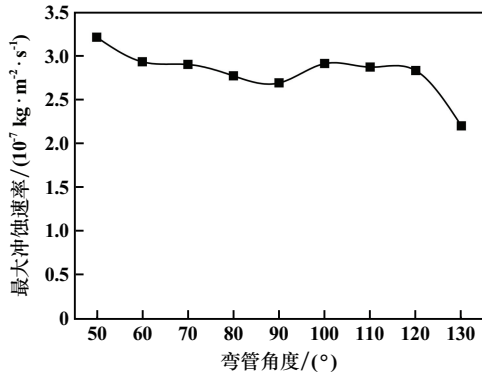


图 2 不同弯管角度下的最大冲蚀速率变化曲线

Fig.2 Variation curve of maximum erosion rate in bends with different angles

3.2 料浆入口流速的影响

料浆入口流速设定为 0.8、1.2、1.6 m/s,该速度可保证料浆流态稳定,确保矸石颗粒不发生沉降。不同料浆入口流速下变径弯管磨损云图如图 3 所示。由图 3 可知:料浆入口流速 0.8 m/s 时,冲蚀区域集中分布在

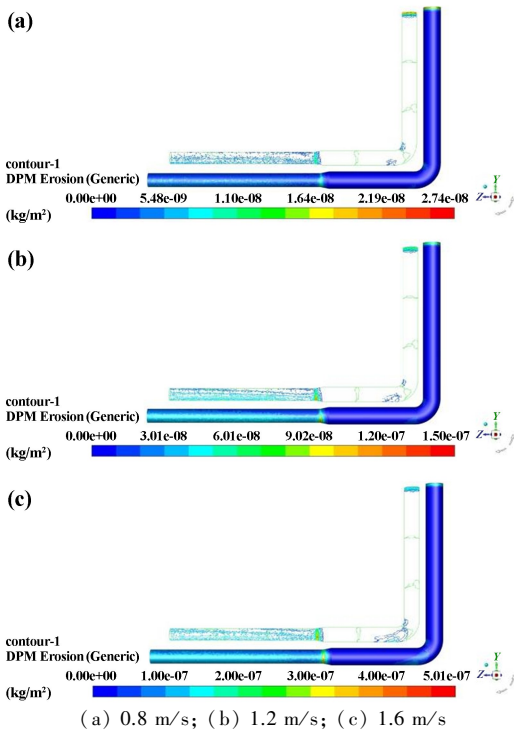


图 3 不同料浆入口流速下变径弯管磨损云图

Fig.3 Erosion of reducing bends with slurry at different inlet flow velocities

管道入口和变径段处,出口段两侧壁面存在部分点蚀,此时管道磨损最严重的位置在管道入口处;料浆入口流速超过 0.8 m/s 后,弯管段的磨损区域主要分布在内壁、沿来流方向向外壁面的后侧与两颊处,出口段磨损由点蚀扩展到全范围磨损,磨损最严重区域转移至变径段与出口段衔接处底侧。

图 4 为不同料浆入口流速下管道最大冲蚀速率变化曲线。由图 4 可知,最大冲蚀速率与冲蚀区域表现出较强的一致性,最大冲蚀速率与入口流速呈现正相关关系。料浆入口流速由 0.8 m/s 增至 2.0 m/s 时,冲蚀速率由 2.74×10⁻⁸ kg/(m²·s)增至 1.19×10⁻⁶ kg/(m²·s),增幅约 43 倍。同时,冲蚀速率变化曲线上升斜率不断增大,说明料浆入口流速增大,管道磨损程度会持续攀升。料浆充填时应尽可能选择合适的流速,以减少对管道的冲蚀。

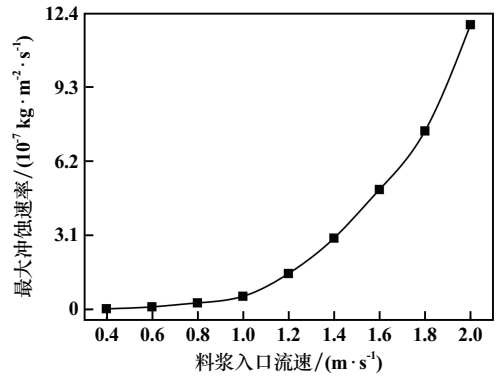


图 4 不同料浆入口流速下管道最大冲蚀速率变化曲线

Fig.4 Variation curve of maximum erosion rate in pipe with slurry at different inlet flow velocities

3.3 料浆质量分数的影响

图 5 为不同料浆质量分数下的管道冲蚀磨损云图。由图 5 可见,随着充填料浆质量分数增大,管道整体冲蚀区域位置大致相同,主要集中在管道变径处与弯管两颊处。

图 6 为不同料浆质量分数下管道最大冲蚀速率变化曲线。由图 6 可见,最大冲蚀速率呈现先稳步上升后降低的趋势,料浆质量分数 76% 时,料浆黏度处于临界点,既保证了颗粒充分悬浮,又避免了颗粒运动因黏度过高而受阻,此时颗粒动能与流体携带能力达到平衡,最大冲蚀速率达到峰值。

3.4 料浆平均粒径的影响

充填料浆中颗粒级配服从 R-P 分布,图 7 为不同平均粒径下管道冲蚀磨损云图。由图 7 可见,颗粒平均粒径增大时,管道冲蚀磨损较为严重的区域没有发生明显改变,弯管段两颊处的冲蚀范围略有扩散,并且有沿流体流动方向继续偏移的趋势。

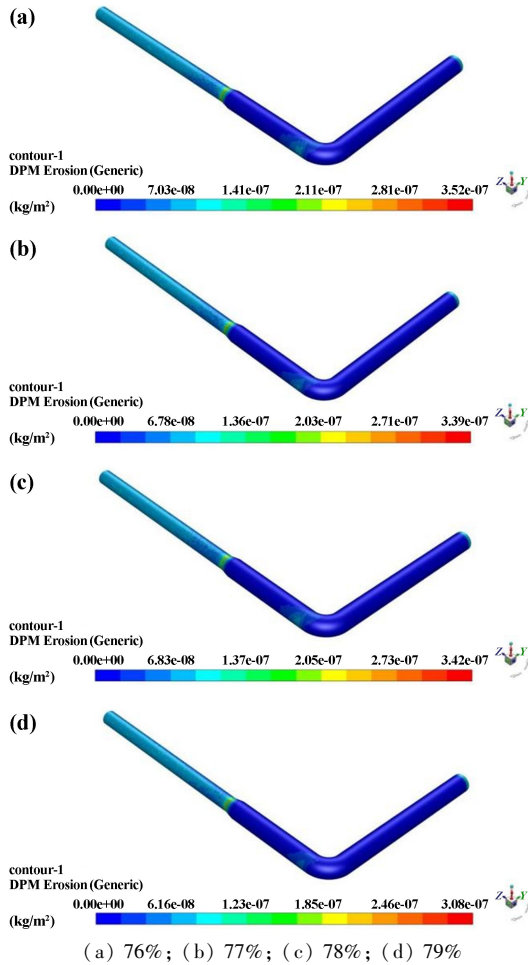


图5 不同料浆质量分数下的管道冲蚀磨损云图
Fig.5 Erosive wear in pipe with slurry at different mass concentrations

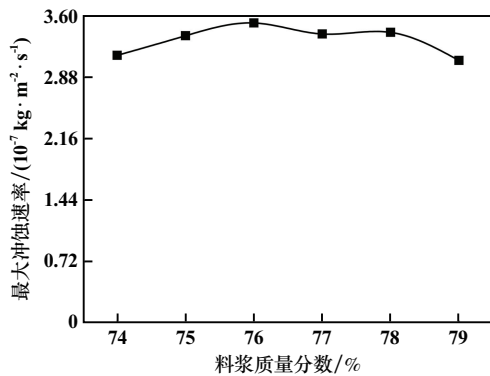


图6 不同料浆质量分数下管道最大冲蚀速率变化曲线
Fig.6 Variation curve of maximum erosion rate with slurry at different mass fractions

图8为不同平均粒径下管道最大冲蚀速率变化曲线。由图8可见,颗粒平均粒径从0.2 mm增至0.4 mm时,管道最大冲蚀速率大幅下降;颗粒平均粒径超过0.4 mm以后,管道最大冲蚀速率随着平均粒径增大出现上下起伏变化,总体上呈现递减的趋势。这主要是

管道发生冲蚀磨损最严重的区域位于变径段,质量流率保持恒定,颗粒平均粒径大的料浆内研石颗粒含量较少。当颗粒平均粒径在0.2~0.4 mm范围内递增时,单位时间内颗粒与管壁碰撞的次数减少,使得颗粒在变径段的冲蚀行为减弱。颗粒平均粒径继续增大时,颗粒所蕴含的动能越高,造成管道的磨损量也越高。实际工程中,粒径增大时颗粒之间碰触概率会上升,单个颗粒携带的能量有所损失,无规律颗粒碰撞行为以及管壁碰撞的颗粒数目减少,使得最大冲蚀速率呈现波动变化、总体递减的趋势。

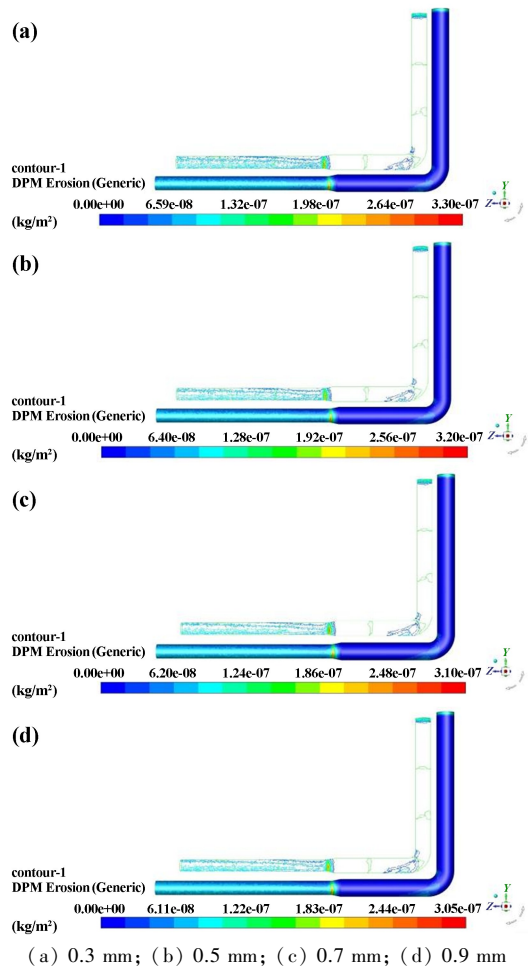


图7 不同平均粒径下管道冲蚀磨损云图

Fig.7 Erosion of pipes by slurry with different average particle sizes

3.5 质量流率的影响

图9为不同质量流率下管道冲蚀磨损云图。由图9可知,随着研石颗粒质量流率增大,管道磨损位置未发生明显改变,主要集中在变径段与出口段,变径段与出口段衔接处的磨损有所加重。随着质量流率升高,变径段与出口段衔接处颗粒含量逐渐增大,由于变径段处管径迅速缩小,颗粒与管壁平均碰撞次数高于其他部位,变径段冲蚀磨损受颗粒质量流率的影响相对较大。

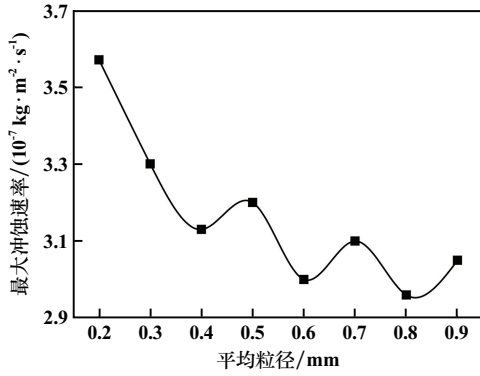


图8 不同颗粒平均粒径下管道最大冲蚀速率变化曲线

Fig.8 Variation curve of maximum erosion rate by slurry with different average particle sizes

因是质量流率增大后,管壁遭受的冲击不断累积,进而使得最大冲蚀速率剧增。

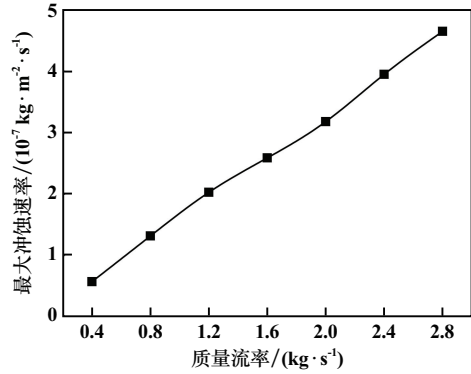


图10 不同质量流率下管道最大冲蚀速率变化曲线

Fig.10 Variation curve of maximum erosion rate by slurry at different mass flow rates

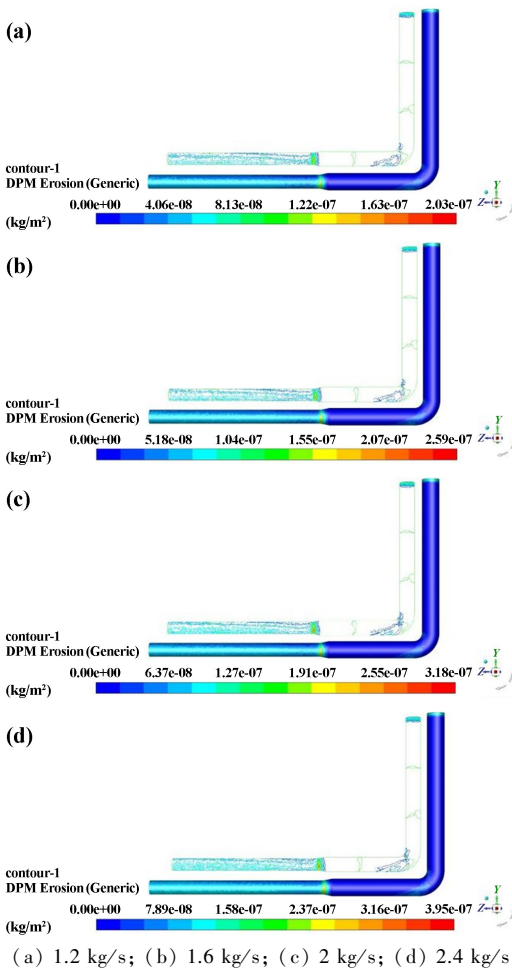


图9 不同质量流率下管道冲蚀磨损云图

Fig.9 Erosive wear at different mass flow rates

3.6 颗粒形状的影响

颗粒形状采用形状系数(F_s)表示, F_s 越接近1.0,颗粒形状越规则,可近似看作为球形。形状系数分别为0.2、0.6、1.0时充填管道底部与弯管段的冲蚀磨损云图如图11所示。随着形状系数增大,弯管段与两颊区域的冲蚀面积略有扩大,底侧冲蚀严重区域从类四角星状逐渐演变为椭圆状。这主要是因为形状系数小的颗粒存在边角,与管壁接触面小,使得冲蚀面积较小且形状不规则;形状系数增大后颗粒表面积减小,受到的流体携带作用减弱,在沉降效应与二次流效应共同

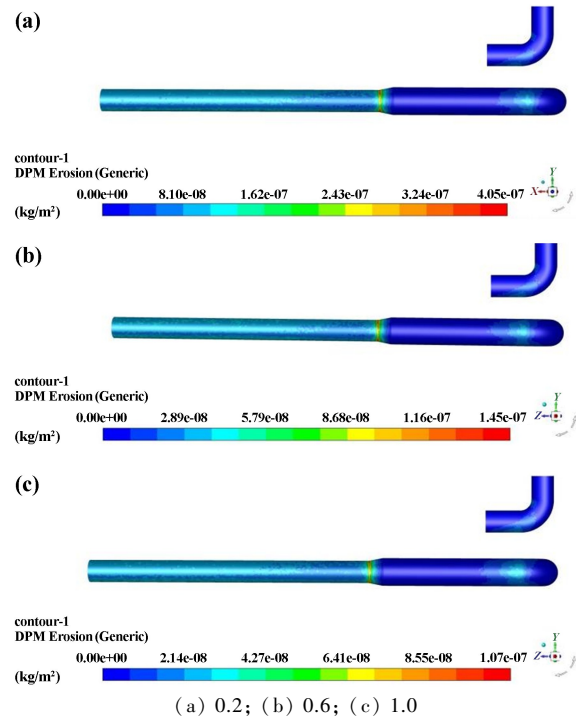


图11 不同形状系数下管道冲蚀磨损云图

Fig.11 Erosive wear in bends with different shape coefficients

图10为不同质量流率下管道最大冲蚀速率变化曲线。管道最大冲蚀速率与砾石颗粒的质量流率呈现近似线性相关关系。当质量流率由0.4 kg/s增至2.8 kg/s,变径弯管的最大冲蚀速率由 5.77×10^{-8} kg/(m²·s)增大至 4.65×10^{-7} kg/(m²·s),增幅超过8倍。主要原

作用下,颗粒在弯管段区域运移速度减小,造成冲蚀面积有所增加。

图 12 为不同形状系数下管道最大冲蚀速率变化曲线。随着形状系数增大,管道最大冲蚀速率先快速减小后趋于平缓,主要原因是形状系数 0.4 以下的颗粒形状不规则,类似于扁平状,颗粒凸起处会以一定的角度与管壁接触造成切削磨损。形状系数趋于 1.0 时,颗粒表面逐渐光滑,磨损方式转变为以研磨为主,切削作用逐渐减弱。

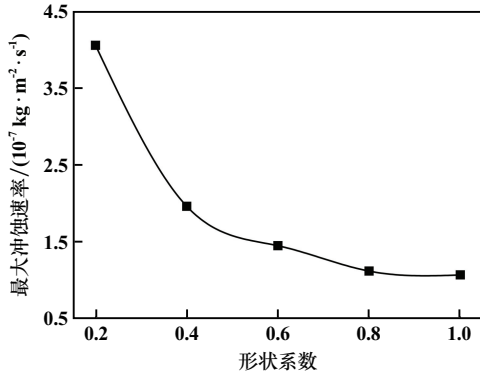


图 12 不同形状系数下管道最大冲蚀速率变化曲线

Fig. 12 Variation curve of maximum erosion rate in bends with different shape coefficients

3.7 冲击角度的影响

图 13 为不同冲击角度下管道冲蚀磨损云图。随着冲击角度增大,除了入口段的初入口区域,其余弯管段未出现磨损,弯管段的冲蚀磨损区域有向右偏移的趋势。产生这种冲蚀规律的原因是浆体初入管道后颗粒与管道口发生碰撞,加上流动状态不稳定,导致入口处磨损较为严重,继续在入口段流动时,颗粒流速较小并且在主相的携带作用下不会对该管段产生冲蚀磨损。随着冲击角度增大,颗粒流经弯管段时与管壁的碰触点提前,使得该段的冲蚀区域整体向右发生偏移。

冲击角度在既定范围内变化时,冲蚀面积不断缩小。冲击角度 0°时管道磨损面积最大,冲击角度 30°时管道磨损分布范围最广,原本未出现磨损的平流段两颊处产生连续的冲蚀点。产生这种冲蚀规律的原因是冲击角度较小时,颗粒对壁面的磨损以微切削作用为主,此时切向冲击动能较大,法向冲击动能较小,管道壁面的冲蚀形状表现为长犁沟状。超过一定角度后 2 个方向的动能大小发生转变,锻造挤压作用逐步代替微切削作用,管道壁面的冲蚀样貌表现为深度较大的凹坑,因而冲蚀面积不断缩小。

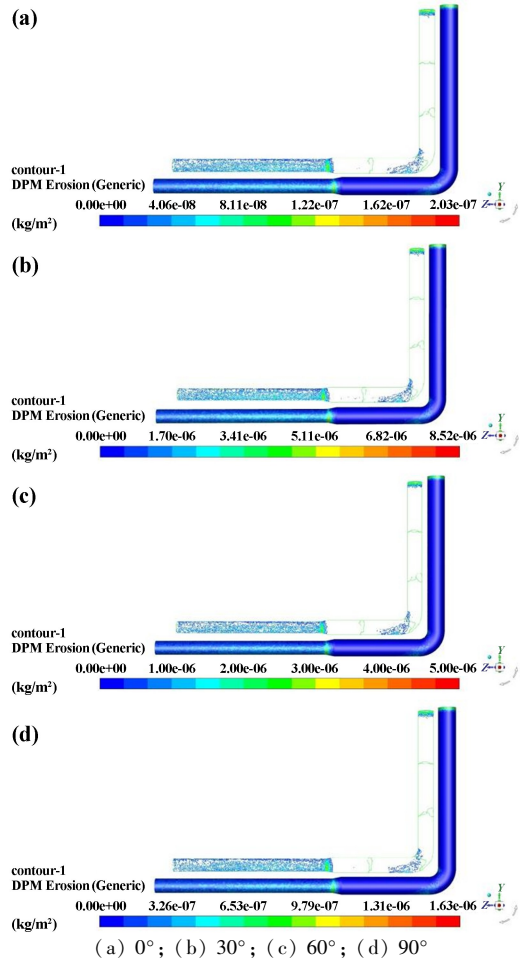


图 13 不同冲击角度下管道冲蚀磨损云图

Fig. 13 Erosive wear in pipe with fluid particles at different impact angles

图 14 为不同冲击角度下管道最大冲蚀速率变化曲线。随着冲击角度增大,最大冲蚀速率呈现先上升后下降的趋势,冲击角度 30°时达到峰值。冲蚀角度 30°时,在微切削和锻造挤压的共同作用下,切向与法向的冲击动能达到最大值,管道磨损程度极严重。

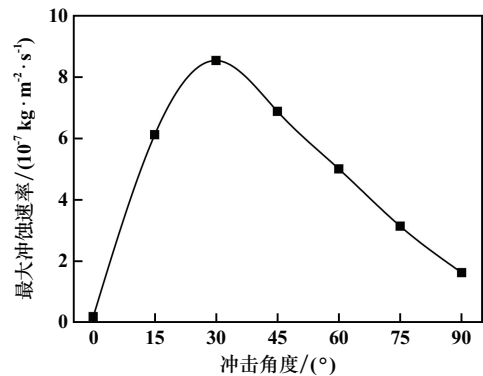


图 14 不同冲击角度下管道最大冲蚀速率变化曲线

Fig. 14 Variation curve of maximum erosion rate in pipe with fluid particles at different impact angles

4 结论

1) 颗粒质量流率和入口流速增大会加剧管道磨损;而弯管角度、颗粒平均粒径、颗粒形状系数增大时冲蚀速率有明显降低。料浆入口流速 0.8~2.0 m/s 范围内,最大冲蚀速率与冲蚀区域表现出较强的一致性;冲击角度在 0~90° 范围内变化时,最大冲蚀速率呈现先上升后下降的趋势,并且在冲击角度 30° 时达到峰值。

2) 料浆入口流速对管道冲蚀区域的影响极显著,颗粒粒径的影响次之,而弯管角度与颗粒冲击角度的影响相对较小。

3) 管道的冲蚀磨损位置主要分布在入口处、弯管内外侧壁面、变径段与平流段,磨损严重的位置位于变径段与出口段的衔接处。

参考文献(References):

- [1] 阮竹恩,吴爱祥,焦华喆,等.我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J].中国有色金属学报,2022,32(1):286-301.
RUAN Zhu'en, WU Aixiang, JIAO Huazhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022,32(1):286-301.
- [2] 石宏伟,黄吉荣,乔登攀,等.深井矿山高浓度充填料浆自流输送管道磨损研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(4):13-18.
SHI Hongwei, HUANG Jirong, QIAO Dengpan, et al. Study on the abrasion of high concentration filling slurry self flowing pipeline in deep mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020,72(4):13-18.
- [3] 李小松,赵承佑,秦帅,等.自流充填系统的管道压力与流量特征研究[J].矿冶工程,2024,44(3):6-10.
LI Xiaosong, ZHAO Chengyou, QIN Shuai, et al. Pressure and flow-rate characteristics of free fall backfill system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):6-10.
- [4] 刘伟涛,王莹莹,杨莹,等.自流充填管道局部变径满管输送的环管试验[J].矿冶工程,2023,43(6):20-23.
LIU Weitao, WANG Yingying, YANG Ying, et al. Loop pipe test on transportation with full pipe flow in a tapered pipeline with gravity-fed backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):20-23.
- [5] 郭沫川,谭玉叶,楚立申,等.某铁矿管道自流输送分析及管道磨损研究[J].矿冶工程,2022,42(5):39-43.
GUO Mochuan, TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Analysis of gravity flow pipeline transportation and pipeline wear for an iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):39-43.
- [6] 邓代强,朱永建,王发芝,等.充填料浆长距离管道输送数值模拟[J].安徽大学学报(自然科学版),2012,36(6):36-43.
DENG Daiqiang, ZHU Yongjian, WANG Fazhi, et al. Transportation numerical simulation of filling slurry in long distance pipeline[J].

- Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2012,36(6):36-43.
- [7] WANG Q C, HUANG Q Y, SUN X, et al. Experimental and numerical evaluation of the effect of particle size on slurry erosion prediction[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021,143(7):073101.
- [8] PEI J, LUI A, ZHANG Q, et al. Numerical investigation of the maximum erosion zone in elbows for liquid-particle flow[J]. Powder Technology, 2018,333(6):47-59.
- [9] RAHMAN S, KHAN R, NIAZI U M, et al. Performance prediction of erosive wear of steel for two-phase flow in an inverse U-bend[J]. Materials (Basel), 2022,15(16):5558.
- [10] 刘金枝,殷菲,高子明.多因素下尾砂充填料浆流变参数试验研究及预测分析[J].矿冶工程,2023,43(6):15-19.
LIU Jinzhi, YIN Fei, GAO Ziming. Experimental research and prediction analysis of rheological parameters of tailings backfill with multi-factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):15-19.
- [11] 艾纯明,宋红岩,张馨,等.充填料浆颗粒轨迹特征及管壁磨损机理[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(3):395-402.
AI Chunming, SONG Hongyan, ZHANG Xin, et al. Particle trajectory characteristics of filling slurry and pipe wall wear mechanism[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024,60(3):395-402.
- [12] 乔小溪,单斌,陈平.固-液两相流黑水管道冲蚀磨损的数值模拟研究[J].摩擦学报,2020,40(6):726-734.
QIAO Xiaoxi, SHAN Bin, CHEN Ping. Simulation study on the erosive wear of the black water pipeline with solid-liquid flow[J]. Tribology, 2020,40(6):726-734.
- [13] LIU E B, HUANG S, TIAN D C, et al. Experimental and numerical simulation study on the erosion behavior of the elbow of gathering pipeline in shale gas field[J]. Petroleum Science, 2024,21:1257-1274.
- [14] 曹学文,彭文山,胥锟,等.含固体颗粒竖直弯管段塞流/乳沫状流冲蚀速率预测[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):119-128.
CAO Xuewen, PENG Wenshan, XU Kun, et al. Prediction of erosion rate of solid particles in vertical pipe bends with slug flow/churn flow[J]. Journal of China University of Petroleum, 2018,42(2):119-128.
- [15] 于飞,刘明,王汀,等.弯头内气-固两相流动与管壁磨损特性研究[J].工程热物理学报,2015,36(4):796-800.
YU Fei, LIU Ming, WANG Ting, et al. Numerical research on gas-solid two phase flow and erosion in elbows[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015,36(4):796-800.

引用本文:王永军,胡东祥,郑辉,等.充填料浆对变径弯管的冲蚀磨损特性分析[J].矿冶工程,2025,45(3):14-21.
WANG Yongjun, HU Dongxiang, ZHENG Hui, et al. Analysis of erosive wear characteristics of backfill slurry on reducing bends[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):14-21.