

# 充填料浆对变径管的冲蚀磨损分析

王忠昶<sup>1</sup>, 陈 阳<sup>1</sup>, 孙 剑<sup>1</sup>, 夏洪春<sup>2</sup>

(1. 大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘 要:**为研究充填料浆对变径管道的冲蚀磨损规律,以不同结构的变径弯管为研究对象,采用 Fluent 软件建立料浆在变径弯管中的流动模型,分析出入口管径比、变径段长度、弯管弯曲角度 3 个参数对管道磨损的影响规律。研究表明:出入口管径比对管道的冲蚀影响最严重,冲蚀面积与磨损率随着管径比增大改变明显;变径管长度在 80 mm 以下时磨损状况随管道因素变化波动幅度大;弯曲角度对管道的磨损影响仅体现在入口段与弯管段,其他区域磨损状况基本类似。

**关键词:**变径弯管;管径比;冲蚀磨损;充填料浆;数值模拟

**中图分类号:**TD823;TN929.5

**文献标志码:**A

## Analysis of erosion wear of filling slurry on reducing pipes

WANG Zhongchang<sup>1</sup>, CHEN Yang<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, XIA Hongchun<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

**Abstract:** To study the erosion wear law of filling slurry in reducing pipes, this paper took the reducing elbow pipes with different structures as the research object and established a flow model of slurry in reducing elbow pipes by using Fluent. It then analyzed the impact of the inlet and outlet pipe diameter ratio, the reducing section length, and the elbow's bending angle on the erosion wear of reducing pipes. The research results show that the inlet and outlet pipe diameter ratio has the greatest impact on the erosion of the pipeline, and the erosion area and wear rate change significantly with the increase of the pipe diameter ratio. When the length of the reducing pipe is less than 80 mm, the wear condition fluctuates greatly with the change of pipeline factors. The bending angle has impact on the wear of the pipe only in the inlet section and the elbow section while in other areas the wear conditions are basically similar.

**Key words:** reducing elbow pipe; pipe diameter ratio; erosion wear; filling slurry; numerical simulation

冲蚀磨损是矿山采空区进行回填工作中输送管道存在的最典型失效模式,也是制约充填设备长周期运行的一个重要原因<sup>[1-3]</sup>。故探索管道磨损区域和磨损程度对确保管道输送效率和矿山充填安全具有重要意义。在实际工业生产过程中,经常使用变径管来达到控制料浆流量和保护运输管道的目的。料浆输送时变径管的存在会导致料浆输送状态发生瞬时变化,此时管壁所受到的磨损程度要比在正常管道中严重数十倍,管道失效几率加大。因此根据输送管道的几何参数准确预测管道磨损区域和磨损程度,可对关键部位优化设计提供参考。

近年来,众多学者采用数值模拟的方法来研究冲蚀磨损。乔智威等<sup>[4]</sup>使用 Fluent 软件研究了水沙流作用下粗糙度对圆柱体结构的阻力系数、升力系数和冲蚀率的影响,得出在同一含沙量的水流状况下,圆柱体结构在粗糙度为 0.3% 时的冲蚀率最大;许爱荣等<sup>[5]</sup>使用离散相模型模拟液固两相流对三通管道的冲蚀情

收稿日期:2021-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51574055);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807219)

作者简介:王忠昶(1976—),男,山东烟台人,教授,博士,主要从事绿色矿山充填技术研究.E-mail:wazoch@163.com

况,得出分支处磨损的分布规律;石宏伟等<sup>[6]</sup>借助 Fluent 软件研究了弯管与水平直管的易磨损位置,将模拟结果与矿山管道壁厚实测结果进行对比,验证了管道磨损数值模拟方法的有效性,并且给出降低充填管道磨损的建议;戚伟等<sup>[7]</sup>结合理论分析与数值模拟计算,研究了料浆自流输送过程中流速与压力分布规律,并据此得出大冶铁矿输送管道易磨损位置为各拐点处,可通过选择耐磨性较好的弯管和反转水平管道来延长管道的使用寿命。过江等<sup>[8]</sup>结合某矿山实际充填管道,研究了颗粒尺寸、形状、浆体黏度、流速等因素对管道磨损的影响程度。

目前对于管道冲蚀的研究主要集中普通直管和弯管上,对于变径管等不规则管道的研究很少,且针对煤矸石似膏体充填料浆的管道输送磨损研究尚缺乏。本研究采用离散相模型(discrete phase model,DPM)对煤矸石似膏体充填料浆在变径弯管中的输送进行仿真分析,探讨管道的磨损机理,重点研究管道变径处的磨损规律,切实提高料浆在管道中输送的可行性与安全性。

## 1 理论模型及控制方程

采用计算流体力学软件(computational fluid dynamics,CFD)预测管道冲蚀磨损位置是替代试验研究的一种有效方法<sup>[9]</sup>。本研究将使用欧拉-拉格朗日方法,将粉煤灰和胶凝剂组成的料浆溶液视为连续相,其运动方程采用欧拉法进行求解;将煤矸石颗粒视为离散相,运动方程使用拉格朗日法求解,得出颗粒与管道的碰撞信息,进而预测管道的磨损状况。

### 1.1 控制方程

所计算的离散相的体积分数相对较小,因此采用离散相模型 DPM 进行计算。对管道的冲蚀磨损计算过程主要包括:流场、颗粒轨迹以及冲蚀计算<sup>[10]</sup>。连续相的输送与离散相颗粒的运动存在相互影响的状况,需要考虑两相之间的相互耦合。流体雷诺数  $Re=190$ ,属层流范畴。因此采用适用范围广、计算精度更高的 Laminar 层流模型<sup>[11]</sup>。

连续性方程为:

$$\frac{\partial(\rho\mu_i)}{\partial x_i}=0。 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{\mu})+\nabla\cdot(\rho\vec{\mu}\vec{\mu})=-\nabla P+\nabla\cdot\left\{\mu\left[(\nabla\vec{\mu}+\vec{\mu}^T)-\frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{\mu}I\right]\right\}+\rho\vec{g}+\vec{F}。 \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流体相混合密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $x_i$ 为*i*方向的速度分量, $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_i$ 为*i*时的均速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $c$ 为热力学温度, $\text{K}$ ;  $P$ 为流体内压力, $\text{N}$ ;  $\mu$ 为动力黏度, $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $I$ 为单位张量;  $\vec{F}$ 为体积力, $\text{N}$ ;  $\vec{g}$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ 。

### 1.2 离散相控制模型

离散相在料浆中所占的浓度很小,不考虑颗粒之间的相互碰撞,考虑相间的耦合作用以及该作用对两相运动的影响,在此条件下固体颗粒的作用力在笛卡尔坐标系中可表示为<sup>[12-14]</sup>:

$$\frac{\partial v}{\partial t}=F_D(v-v_g)+\left(\frac{g(\rho_g-\rho_s)}{\rho_g}\right)+F_m。 \quad (3)$$

式中: $v$ 为连续相的速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_g$ 为颗粒相的速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $\rho_g$ 为颗粒密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_s$ 为连续相料浆密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $F_D(v-v_g)$ 为颗粒单位质量曳力, $\text{N}$ ;  $F_m$ 为其他质量力, $\text{N}$ 。

### 1.3 冲蚀磨损模型

管道冲蚀磨损的影响因素有很多,包括管道的材料性质、颗粒的性质、冲击速度、冲击角度、几何形状等。本研究选取 Fluent 中定义的冲蚀磨损模型<sup>[15]</sup>:

$$R_{\text{erosion}}=\sum_{p=1}^n \frac{m_p C(d_p) f(\theta) u_p^{b_v}}{A_{\text{face}}}。 \quad (4)$$

式中: $R_{\text{erosion}}$ 为冲蚀磨损率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  $p$ 为颗粒数目;  $m_p$ 为颗粒的质量流率, $\text{kg}/\text{s}$ ;  $f(\theta)$ 为冲击角度函数;  $C(d_p)$ 为颗粒的直径函数;  $\mu_p$ 为颗粒相对壁面的滑移速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $b_v$ 为滑移速度函数;  $A_{\text{face}}$ 为颗粒冲击面的单

元表面积;  $\text{m}^2$ 。

#### 1.4 壁面碰撞恢复方程

颗粒进入管道中与管道发生碰撞之后的回弹速度并非一成不变的, 由于发生碰撞后存在能量转移与损失, 颗粒的回弹速度总是低于入射速度, 通常用壁面碰撞恢复函数来表达这一特性, 采取 Forder 等<sup>[16]</sup> 的恢复系数方程:

$$e_N = 0.988 - 0.78\alpha + 0.19\alpha^2 - 0.24\alpha^3 + 0.27\alpha^4, \quad (5)$$

$$e_T = 1 - 0.78\alpha + 0.84\alpha^2 - 0.21\alpha^3 + 0.028\alpha^4 - 0.022\alpha^5. \quad (6)$$

式中:  $e_N$  代表法向恢复系数方程;  $e_T$  代表切向恢复方程;  $\alpha$  为颗粒的冲击角度。

## 2 计算问题描述

### 2.1 几何模型及其网格

使用 ANSYS 中 GAMBIT 模块建立变径弯管, 由入口段 G1、弯管段 G2、平流段 G3、变径段 G4、出口段 G5 组成, 管道材料采用 Fluent 软件中默认材料(无碳不锈钢)。  $R_1$  代表入口管径,  $R_2$  代表出口管径, 具体参数如图 1 所示。经无关性检验之后使用自带网格划分工具 MESH 对变径弯管划分网格如图 1。

### 2.2 两相模型设置

模拟设置的充填料浆质量配比为煤矸石: 粉煤灰: 胶凝剂 = 26 : 10 : 3, 将粉煤灰和胶凝剂组成的料浆溶液密度设置为  $1\,900\text{ kg/m}^3$ , 初始剪切应力  $\tau_R$  为  $81.7\text{ Pa}$ , 塑性黏度为  $2.88\text{ Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[17]</sup>; 煤矸石密度设置为  $2\,300\text{ kg/m}^3$ , 粒径选择为随机分布, 粒径范围为  $0.000\,1\sim 0.001\text{ m}$ , 平均粒径为  $0.000\,5\text{ m}$ 。

### 2.3 边界条件设置

选择速度入口(velocity-inlet)与压力出口(pressure-outlet), 矸石颗粒接触条件为逃离(escape), 所选管道内壁为均匀砂粒状表面, 因此粗糙度系数默认设置为  $0.5$ <sup>[18]</sup>, 壁面边界条件类型为反弹(reflect), 离散相连续相初始速度均设置为  $1.44\text{ m/s}$ 。

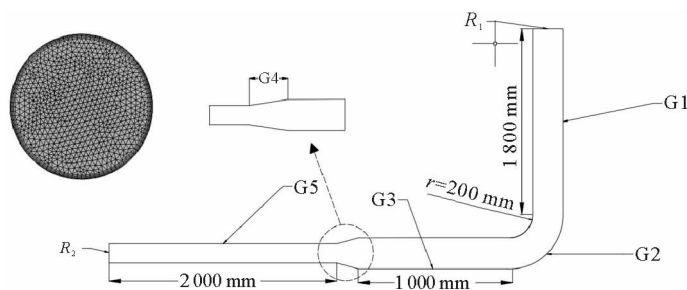


图 1 变径弯管平面图与网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plan view and grid division of reducing elbow pipe

## 3 计算结果分析

### 3.1 出入口管径比对管道磨损的影响

根据《煤炭工业矿井设计规范: GB 50215—2015》<sup>[19]</sup> 可知, 胶结充填管道直径必须大于输送物料最大粒径的 5 倍, 并且对实际矿山充填情况调查得到料浆充填管道直径大多在  $120\sim 200\text{ mm}$  范围内选取。定义  $S$  为出入口管径比( $R_2/R_1$ ), 设定 8 种不同管径比工况(分别为  $0.60$ 、 $0.65$ 、 $0.70$ 、 $0.75$ 、 $0.80$ 、 $0.85$ 、 $0.90$ 、 $0.95$ )进行研究。图 2 给出了不同出入口管径比时变径弯管的磨损状况, 可见:

1) 磨损位置主要分布在入口处、弯管处、变径管处与出口平流段;

2) 入口处的磨损率随着出入口管径比的增大逐渐增加, 最大磨损位置出现在变径段处。当管径比超过  $0.85$  时, 最大磨损位置转移至入口处。管径比超过  $0.80$  时, 弯管内外壁磨损明显增加; 管径比为  $0.85$  时管道磨损最严重、磨损面积最大;

3) 出入口管径比增大时, 管道的磨损位置基本保持不变, 出口段磨损面积逐步增大且磨损率与平流段相比严重的多。当出入口管径比增大至  $0.85$  后磨损面积呈递减趋势, 主要原因是变径段两端管径接近, 速度与压力变化梯度小, 料浆流态相对平稳。

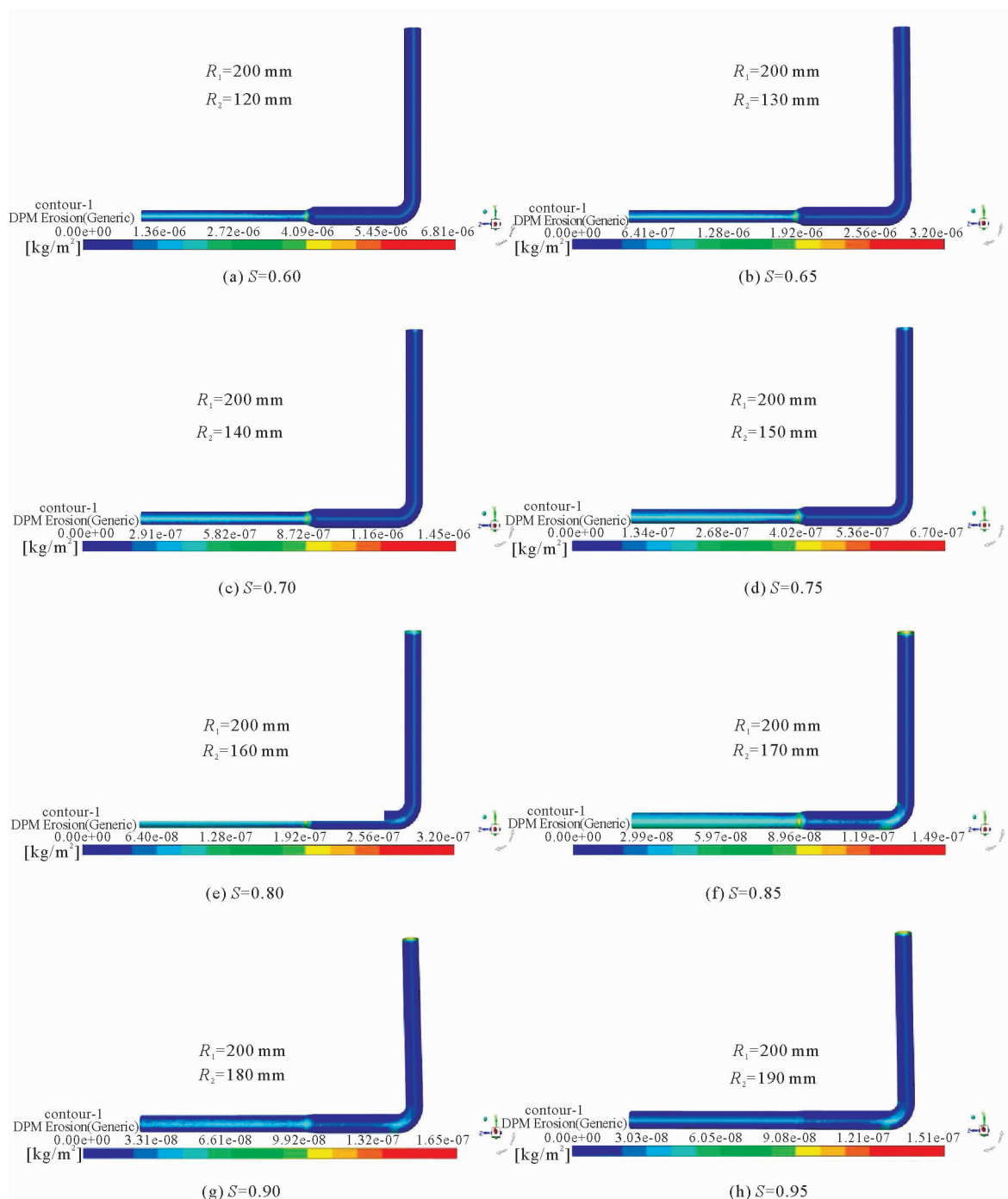


图2 不同出入口管径比下的变径弯管的磨损示意图

Fig. 2 Wear of the reducing elbow under different inlet and outlet pipe diameter ratios

图3给出了变径弯管内的流核变化图。

1) 弯管段的磨损位置主要分布在弯管内壁 $15^\circ$ 与弯管出口段底部。主要原因是受离心力和连续相黏度的影响,料浆进入弯管后“流核”在弯管入口 $15^\circ$ 处向内偏移,将要流出弯管段时“流核”向外侧偏移,导致弯管内壁处与弯管出口段底部流速增快,研石颗粒与管道碰撞概率增加使得磨损高于其他弯管区域。

2) 变径处的磨损集中在与出口段衔接处。主要原因是变径和二次流的存在使得研石颗粒密集度增加,颗粒与管壁的接触频繁,导致此处磨损最为严重,总体上变径段处的磨损面积随着出口管径的增大逐步扩

大,最大磨损率逐渐降低。

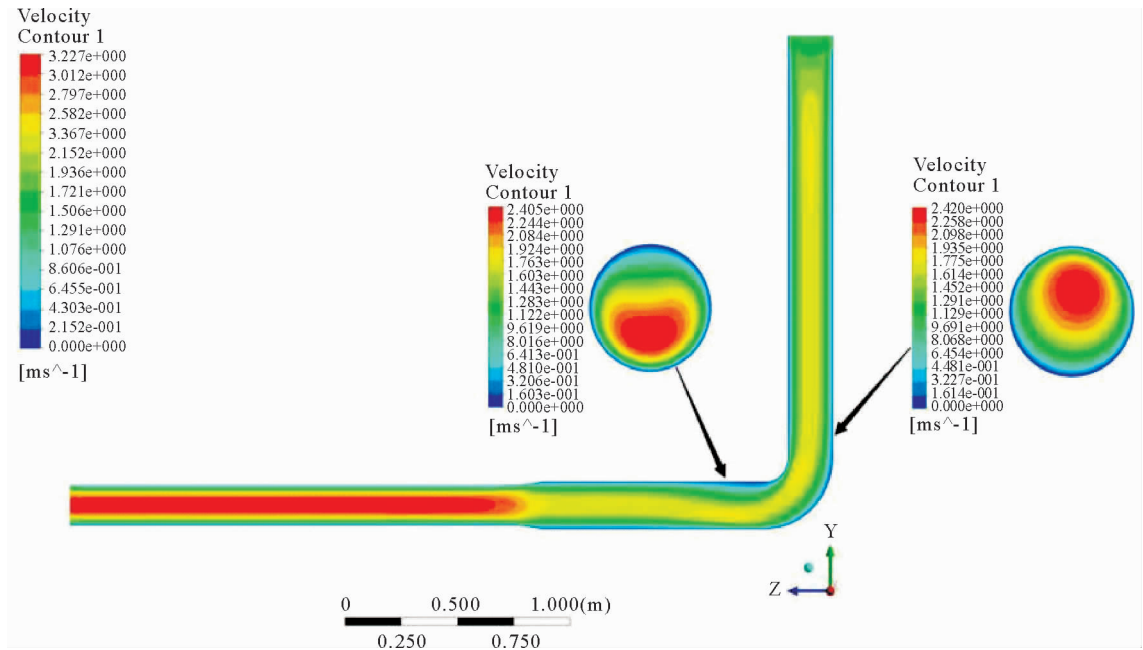


图 3 流核变化图

Fig. 3 Change of flow core

图 4 给出了入口管径为 200 mm,出口管径不同时的磨损率变化曲线。由图 4 可见,最大磨损率随出入口管径比的增大呈先稳步下降、后保持平稳的趋势。主要原因是出入口管径比小于 0.80 时,磨损严重位置位于变径段与出口段衔接处,料浆流经变径段受到的管径限制作用降低,流速变动幅度减小,使得管道的最大磨损率持续下降;而当管径比增大至 0.80 后,磨损严重位置转移至入口处且输送参数保持恒定,因而最大磨损率变化较为平稳。

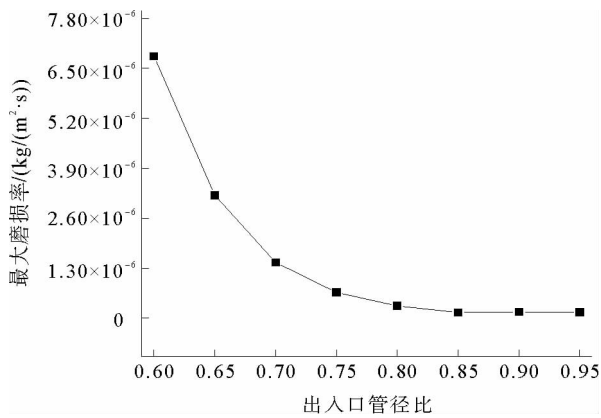


图 4 不同出入口管径比下的磨损率变化图

Fig. 4 Change of wear rate under different inlet and outlet pipe diameter ratios

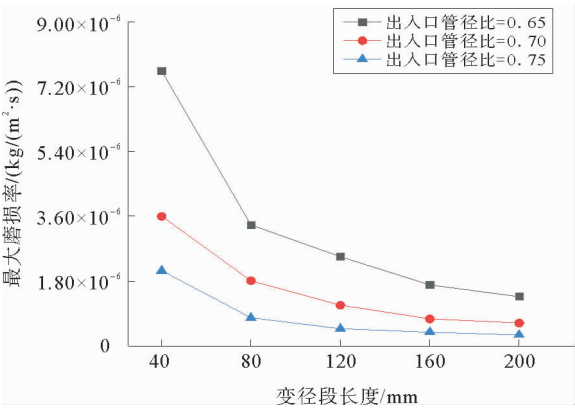


图 5 不同变径段长度下的管道磨损率变化图

Fig. 5 Change of pipeline wear rate under different reducing section lengths

3.2 变径段长度对管道磨损的影响

设定 5 种变径段长度工况(分别为 40、80、120、160 和 200 mm),变径段长度为图 1 中 G4 所示。图 5 给

出了管径比分别为 0.65、0.70、0.75 时,不同变径段长度下的管道磨损率变化曲线。

1) 变径段的长度对管道磨损率有明显影响,长度在 80 mm 以下变化对管道磨损影响最大,磨损率随变径管长度增加呈指数性下降趋势。主要原因是从平流段进入变径段时,压强沿管道方向迅速降低,外围料浆流速改变高于中心位置,导致料浆运动状态发生急速变化。变径段长度越小管道的横截面积就越小,矸石颗粒的密集程度、冲击角度和速度就越大,磨损程度就越高。

2) 当变径段长度处于 80~160 mm 时,磨损率随变径段长度增加稳步下降;当变径段长度超过 160 mm 后,磨损率大小基本不受变径段长度变化影响。主要原因是变径段长度增大后,颗粒在流道变化区域的运动可以有较长的缓冲,使得料浆在该段的流动较平缓,从而减缓对管道的冲蚀磨损。

### 3.3 弯管段角度对管道磨损的影响

图 6 给出了入口管径为 200 mm,出口管径为 160 mm 时不同弯曲角度下的弯管的磨损状况。

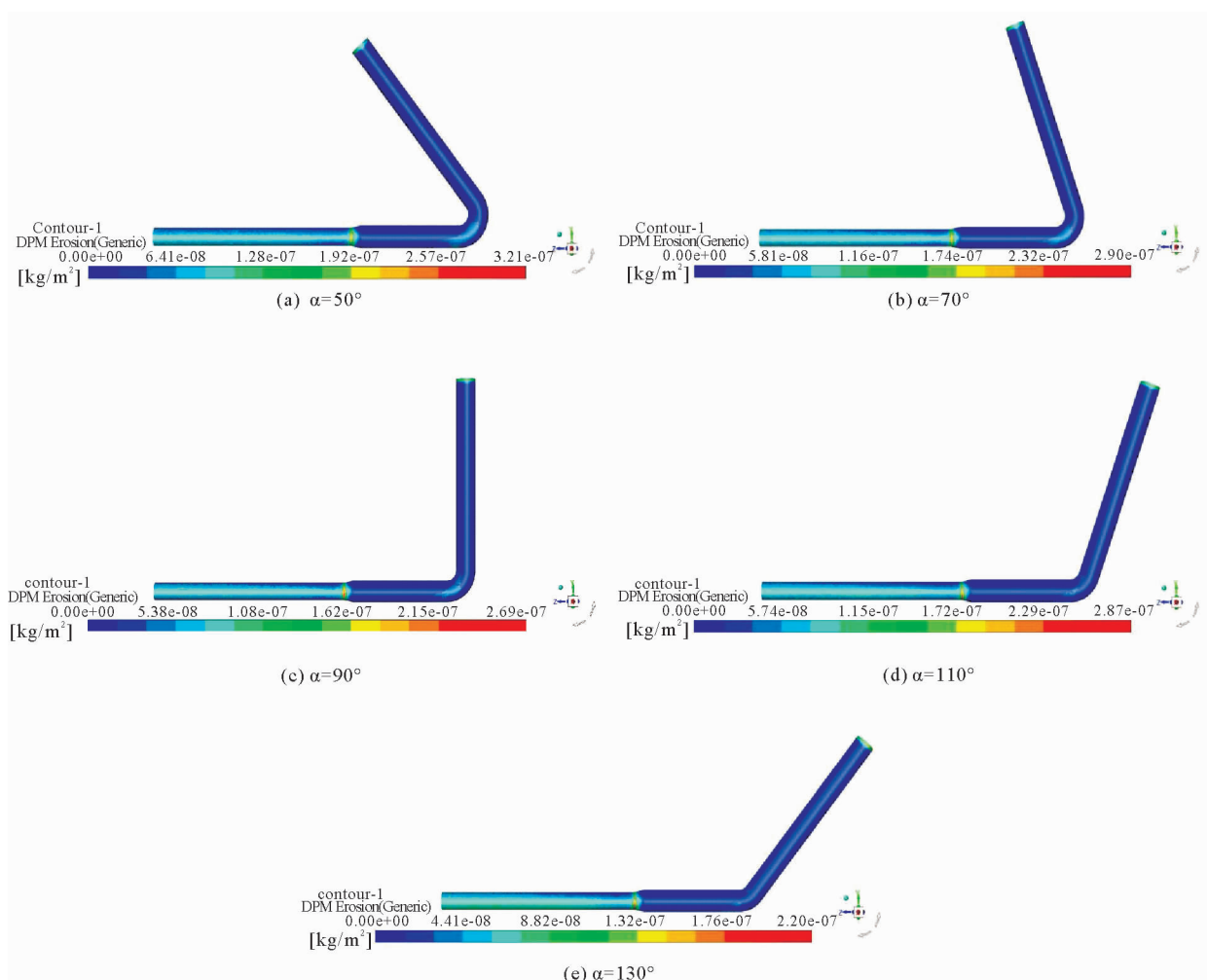


图 6 不同弯曲角度下的磨损示意图

Fig. 6 Wear under different bending angles

1) 弯曲角度对管道磨损的影响主要体现在弯管段,50°弯管磨损位置集中在弯管内管壁与弯管出口处。随着弯曲角度增大,内壁面磨损位置下移,弯管出口位置磨损面积迅速减小。主要原因是弯曲角度增加后,弯曲流道长度减小,颗粒相由外壁面撞击后反弹的角度变小,使得颗粒与内壁面撞击位置整体下移且几率降低,导致内壁面磨损位置下移。另外弯曲角度的增加使得颗粒运动状态受管道形状影响降低,主动流与二次

流作用减弱。研石颗粒集中在中间部分,流经弯管后与弯管出口底部位置接触减少,对管壁的磨损逐渐降低。

2) 入口处最大磨损位置随管道角度变化从入口左侧偏移至入口右侧。主要原因是料浆刚进入管道时,流体携带作用弱,颗粒相受重力影响严重,这会加剧对垂直于重力方向管壁的磨损。

图 7 给出了不同弯曲角度下的管道磨损率变化曲线,可见:弯管角度变化对管道磨损影响敏感程度较弱,最大磨损率随弯曲角度变化呈现小幅度波动,当弯曲角度超过  $90^\circ$  时最大磨损率出现回升趋势。主要原因是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,到达变径段时的流态仅存在小幅度变化,因此管道磨损率起伏变化较小。

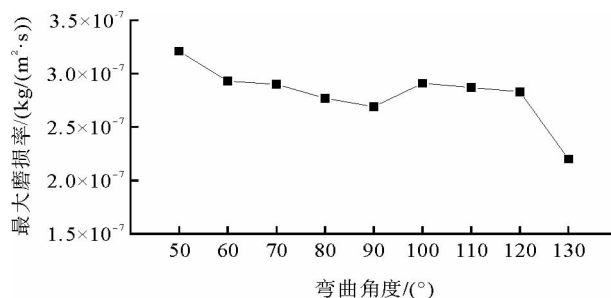


图 7 不同弯曲角度下的磨损率变化图

Fig. 7 Change of wear rate under different bending angles

#### 4 结论

1) 输送管道的出入口管径比从 0.60 增至 0.95 时,入口段与弯管段磨损状况逐渐加重,且弯管段的磨损位置集中分布在内壁面与弯管出口底端,变径段的磨损率大小随管径比变化逐渐增大。出入口管径比为 0.60 时管道局部磨损最严重;管径比为 0.85 时管道整体磨损最严重,磨损面积最大。因此在进行矿山实际充填时,如果其管路存在变径管,可适当增加出入口的管径比,且选择合适的管径。

2) 变径段长度由 40 mm 增至 200 mm 时,磨损率下降明显,磨损位置由变径段末端向出口段蔓延,磨损面积逐步扩大。变径段长度在 80 mm 以下时管道冲蚀磨损所受影响最大,超过 160 mm 后基本不受变径段长度变化影响。采用变径管进行矿山充填时,可以适当延长变径段的长度,并增加该段管道的壁厚。

3) 弯管段角度由  $50^\circ$  增至  $130^\circ$  时,对管道磨损影响主要体现在弯管段与入口段。弯管内壁磨损位置随弯曲角度增大逐渐下移,弯管出口段底部磨损面积逐渐减小并出现左移的趋势,入口段最大磨损位置受重力影响呈现左右偏移趋势。因此,在设计不同角度变径弯管进行矿山充填时,应尽量增大弯曲角度,延长平流段的长度,从而减弱弯曲角度对管道磨损的影响。

#### 参考文献:

- [1] 张孟昀,马贵阳,李存磊,等.弯管与盲通管冲蚀磨损对比分析研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):76-81.  
ZHANG Mengyun, MA Guiyang, LI Cunlei, et al. Comparative analysis of erosion and wear of elbow pipe and blind tube[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(3): 76-81.
- [2] 王博,徐鑫,王卫强.  $30^\circ$  弯管应力集中处的冲蚀模拟分析[J].当代化工,2020,49(4):680-683.  
WANG Bo, XU Xin, WANG Weiqiang. Erosion simulation analysis of stress concentration zone in  $30^\circ$  elbow[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(4): 680-683.
- [3] 孔贺,张新国,王昌祥,等.研石充填开采管道磨损影响因素分析[J].煤矿安全,2016,47(3):215-217.  
KONG He, ZHANG Xinguo, WANG Changxiang, et al. Analysis of pipe wear influencing factors in waste filling mining[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(3): 215-217.
- [4] 乔智威,刘壮,张宪堂,等.水沙流作用下粗糙度对圆柱体结构受力特性及冲蚀的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):44-49.  
QIAO Zhiwei, LIU Zhuang, ZHANG Xiantang, et al. Effect of roughness on the force and erosion of cylindrical structures under water-sand two phase flow[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(3): 44-49.
- [5] 许爱荣,冯昌兴.基于液固两相流排污管道冲蚀磨损的数值模拟[J].云南化工,2020,47(1):132-133.  
XU Airong, FENG Changxing. Numerical simulation of erosion wear of sewage pipe based on liquid/solid two-phase flow[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(1): 132-133.

- [6] 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.
- [7] 戚伟, 郭沐川, 谭玉叶, 等. 大冶铁矿充填管道自流输送参数分析及管网磨损规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 164-169.
- QI Wei, GUO Mochuan, TAN Yuye, et al. Gravity transport parameter analysis and pipe network wear law of filling pipeline in Daye Iron Mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 164-169.
- [8] 过江, 张碧肖. 固-液两相流充填管道输送冲蚀磨损数值研究[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 49-53.
- GUO Jiang, ZHANG Bixiao. Numerical investigation of impact erosion in liquid-solid two-phase flow of the backfilling pipe [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(11): 49-53.
- [9] 刘向军, 石磊, 徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状[J]. 计算力学学报, 2007, 4(2): 166-172.
- LIU Xiangjun, SHI Lei, XU Xuchang. Activities of dense particle-gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 4(2): 166-172.
- [10] 申鹏飞. 水煤浆管道输送中冲蚀数值模拟研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017: 27-32.
- SHEN Pengfei. Numerical simulation research of erosion wear for coal water slurry pipeline transportation[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017: 27-32.
- [11] DUARTE C A R, SOUZA F J. Innovative pipe wall design to mitigate elbow erosion: A CFD analysis[J]. Wear, 2017, 380(1): 176-190.
- [12] ZHU H J, WANG J, BA B, et al. Numerical investigation of flow erosion and flow induced displacement of gas well relief line[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 37(2): 19-32.
- [13] BISHNOI P, KUMAR S, SINGH A, et al. Effect of velocity variation on the rate of erosion wear at the elbow of the slurry pipe by using CFD[J]. Advances in Fluid and Thermal Engineering, 2021(1): 305-312.
- [14] 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]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 726-734.
- QIAO Xiaoxi, SHAN Bin, CHEN Ping. Simulation study on the erosive wear of black water pipeline with solid-liquid flow [J]. Tribology, 2020, 40(6): 726-734.
- [15] 金龙, 陈基业, 陈樑. 不同 T 型管汇液-固两相流颗粒冲蚀数值模拟[J]. 材料保护, 2021, 54(1): 68-75.
- JIN Long, CHEN Jiye, CHEN Liang. Numerical simulation of particle erosion in liquid-solid two-phase flow of different T-manifolds[J]. Material Protection, 2021, 54(1): 68-75.
- [16] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves[J]. Wear, 1998, 216(2): 184-193.
- [17] 林天埜. 研石似膏体充填料浆流动性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 37-53.
- LIN Tianye. Research on the flow properties of the gangue paste-like slurry[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016: 37-53.
- [18] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 162-163.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤炭工业矿井设计规范: GB 50215—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.

(责任编辑: 吕海亮)