

中文引用格式:何文,何耿烽. 基于 CFD-DEM 法的矿山充填料浆对管道磨损的影响[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5): 113-121.

英文引用格式:HE Wen, HE Gengfeng. Influence of pipelines wear by mine backfill slurry based on CFD-DEM method[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 113-121.

基于 CFD-DEM 法的矿山充填料浆对管道磨损的影响^{*}

何文^{1,2}, 何耿烽¹

(1 江西理工大学 矿业工程学院, 江西 赣州 341000;

2 江西理工大学 稀有金属资源安全高效开采江西省重点实验室, 江西 赣州 341000)

中图分类号:X936;TD853

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0982

资助项目:江西省重点研发计划项目(20202BBG73001)。

【摘要】 为预防矿山充填管道因磨损引发的爆裂、泄漏等安全事故,采用计算流体动力学(CFD)-离散元(DEM)耦合方法,研究充填料浆对管道磨损的影响特征。构建 L 型管道和固液两相流模型,开展数值模拟试验,以颗粒粒径(0.001~0.1 mm)、料浆固相体积分数(60%~80%)和料浆流速(2~6 m/s)为试验中充填料浆的变化参数,探究不同颗粒粒径、料浆固相体积分数和料浆流速下管道的最大磨损率。结果表明:颗粒粒径及料浆固相体积分数与管道最大磨损率呈非线性关系,0.1 mm 粒径时管道的最大磨损率为 $13.4 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$;料浆固相体积分数存在临界值 70%,其最大磨损率为 $7.15 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$,超过该固相体积分数后管道磨损趋于稳定;料浆流速与管道最大磨损率呈线性关系,流速 7 m/s 时,最大磨损率为 $8.25 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$ 。各参数对管道磨损影响的大小依次为:颗粒粒径 > 料浆固相体积分数 > 料浆流速;颗粒粒径与料浆固相体积分数的交互作用影响最大,料浆固相体积分数和料浆流速的交互作用次之,颗粒粒径和料浆流速交互作用影响最小。

【关键词】 计算流体动力学(CFD)-离散元(DEM); 矿山; 充填料浆; 管道磨损; 料浆流速; 颗粒粒径; 固相体积分数

Influence of pipelines wear by mine backfill slurry based on CFD-DEM method

He Wen^{1,2}, He Gengfeng¹

(1 School of Mining Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou

Jiangxi 341000, China; 2 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Safe and Efficient Mining of Rare Metal Resources, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: To prevent safety accidents such as bursting and leakage caused by wear in mine filling pipelines, CFD-DEM was employed to investigate the wear characteristics of filling slurries on pipelines. An L-shaped pipeline and a solid-liquid two-phase flow model were constructed to conduct numerical simulation experiments. Particle size (0.001–0.1 mm), slurry solid volume fraction (60%–80%), and slurry flow velocity (2–6 m/s) were used as variable parameters to explore the maximum wear rate of the pipeline under different conditions. The results indicate that both particle size and solid volume fraction exhibit a nonlinear relationship with the maximum wear rate. At a particle size of 0.1 mm, the maximum

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0113-09; 收稿日期:2025-12-24; 修稿日期:2026-03-15

wear rate is $13.4 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$. There is a critical solid volume fraction of 70%, at which the maximum wear rate was $7.15 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$; beyond this value, the wear rate tended to stabilize. The slurry flow velocity shows a linear relationship with the maximum wear rate; at a flow velocity of 7 m/s, the maximum wear rate is $8.25 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$. The influence of each parameter on pipeline wear was ranked as follows: particle size > solid volume fraction > slurry flow velocity. The interaction between particle size and solid volume fraction has the most significant impact, followed by the interaction between solid volume fraction and slurry flow velocity, while the interaction between particle size and slurry flow velocity had the least effect.

Keywords: computational fluid dynamics (CFD)-discrete element method (DEM); mines; backfill slurry; pipeline wear; slurry flow velocity; particle size; solid volume fraction

0 引言

尾砂胶结充填技术已在矿山领域获得广泛应用,但随之而来的充填管道磨损问题日趋突出,严重威胁矿山安全生产。为解决充填管道磨损这一难题,国内外学者从多个维度开展研究,发现弯管部位是磨损最为严重的区域,尤其在外侧特定角度存在显著磨损集中现象^[1-2],但这些研究主要关注磨损位置分布,未能分析尾砂料浆在不同运动参数下的磨损状态;在料浆参数方面,研究得出颗粒粒径增大导致磨损加剧^[3-5],管道的磨损主要通过颗粒自重增强对管壁的冲蚀作用;料浆输送速度提高同样会使管道磨损程度加重^[6-8];而固相体积分数等参数也被证实对磨损行为具有重要影响,其中,磨损速率随固相体积分数增加呈减小趋势^[9-10];在管道结构参数方面,管径大小被认为是影响磨损分布的关键因素,较大管径通常对应较小的管道磨损^[11-12]。此外,研究发现压力损失与管径呈二次多项式关系,压力在不同规格管径下存在最大值^[13-14];在研究方法上,数值模拟已成为揭示磨损特征的重要手段。童政钢^[15]及石宏伟^[16]等采用 Fluent 软件获取磨损云图,研究了深井矿山自流充填工况下的管道磨损。黄玉诚^[17]和宋学朋^[18]等分别从动力学模拟与风险评价维度模型中研究了充填管道磨损特征。然而,当前研究大多局限于单因素分析,并未考虑多参数间的交互作用对管道磨损的综合影响;单纯的 Fluent 单向流模型难以观察到管道颗粒与管壁以及颗粒与颗粒之间的碰撞关系^[19-20]。

鉴于此,笔者拟以江西某金属矿充填管道为工程背景,建立计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD)-离散元 (Discrete Element Method, DEM) 耦合数值模型,研究料浆颗粒粒径、固相体积分数和流速 3 个参数对管道磨损的影响特征;通过

响应曲面法研究料浆的单参数及多参数耦合对管道磨损的敏感性,以期为管道安全运行提供理论依据。

1 不同料浆参数下管道输送数值模拟

1.1 数值模型

江西某金属矿充填系统如图 1 所示,图 1 中,充填管道的 L 型管道为连接地面和各中段采空区的

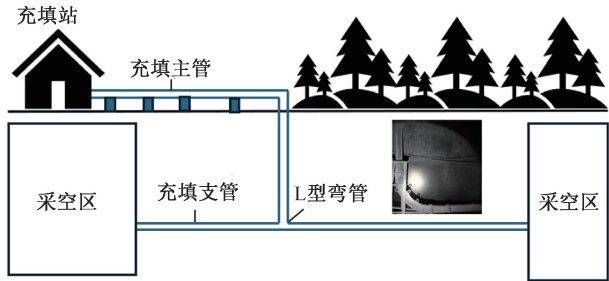


图 1 江西某金属矿充填系统
Fig. 1 Filling system in a metal mine in Jiangxi

基于工程实际建立 L 型管道模型,如图 2 所示,料浆中流体域连续相用 Fluent 生成,料浆中颗粒离散相由 DEM 仿真软件实现。

图 2 中, L_1 为 L 型管道的垂直段, L_2 为水平段,管道材料为 Q345 钢,密度 $7\ 800 \text{ kg/m}^3$,泊松比 0.27。料浆类型为高固相体积分数尾砂胶结充填料浆(料浆固相体积分数在 60% 以上)。料浆材料为尾砂(密度为 $2\ 180 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.25)、水泥(密度为 $3\ 030 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.21)、工业用水。

引入最大磨损率来表征管道内部的磨损程度。最大磨损率是在特定参数下,单位面积磨损表面在整个充填时间内所损失材料的最大质量 (kg/m^2),在 Fluent 中最大磨损率的表达式为:

$$m_t = \int \dot{m}_e dt = \int_0^t \left(\frac{dm}{dt} / A_f \right) dt \tag{1}$$

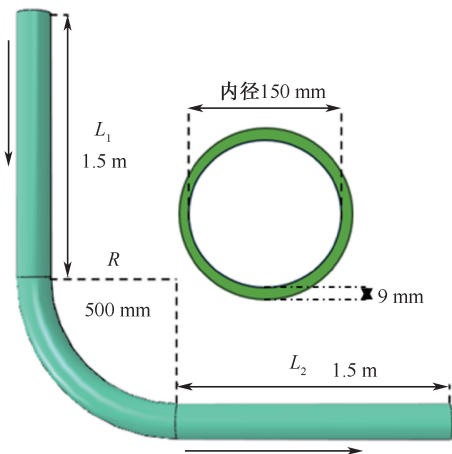


图 2 L 型管道模型
Fig. 2 L-shaped pipe mode

式中: m_t 为最大磨损率, kg/m^2 ; t 为整个充填时间, s ; m_e 为单位时间内材料损失质量, kg ; m 为整个充填时间内材料损失总质量, kg ; A_f 为单位面积, m^2 。

1.2 CFD-DEM 数值模型耦合方法

由文献[6]可知: CFD-DEM 数值模型通过将 CFD 的 Fluent 与 DEM 方法的 Edem 相结合, 精确模拟充填料浆在管道内的流动行为及其对管壁的磨损效应。

CFD 部分负责描述流体的连续相, 即充填料浆的整体流动特性。通过求解 $N-S$ 方程, 获得流体在管道内的速度场、压力分布等关键参数, 根据文献[11], 高固相体积分数尾砂浆体为非牛顿流体, 故其连续相采用 Bingham 模型计算, 塑性黏度为 $12 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 屈服应力为 280 Pa ; DEM 部分则专注于模拟充填料浆中的离散颗粒相。每个颗粒的运动轨迹通过牛顿第二定律求解, 为实现 CFD 与 DEM 的耦合, 需在两者之间建立有效的数据交换机制。CFD 计算出的动能作为 DEM 中颗粒运动的外部驱动力, 而 DEM 计算出的颗粒位置和速度则反馈给 CFD, 以更新流体的边界条件。这种双向耦合机制确保了模型的准确性和可靠性。

1.3 料浆参数设置

采用单一控制变量法分别计算充填料浆颗粒粒径、固相体积分数和流速 3 种参数对管道所造成磨损的影响, 参数选择主要依据充填工艺的工业标准与临界流变特性。

料浆颗粒粒径的取值范围为 $0.001 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。其中, 0.1 mm 粒径作为上限, 是常见分级尾砂的切割点, 大于此粒径的粗砂通常被分离出去用于制作

井下充填骨料, 以防止管道堵塞, 0.1 mm 粒径是保证料浆可泵性的关键尺寸。下限小于 0.001 mm 的尾砂中含有大量粉粒和黏粒, 这些极细颗粒会显著增大料浆黏度, 不利于料浆流动。该选取范围能够覆盖从易沉降到完全悬浮过渡的临界区域。

固相体积分数设定为 $60\% \sim 75\%$ 。60% 作为下限, 低于该值料浆中的固体颗粒沉降严重, 会出现析水沉降, 导致管道中形成不均匀流。75% 作为上限, 是目前高压充填和泵送技术中常见的矿山最大固相体积分数。超过此值, 料浆黏度过大, 需要更高的启泵压力和输送压力。

料浆流速的取值范围为 $2 \sim 7 \text{ m/s}$ 。2 m/s 为临界沉降流速, 低于此值固体颗粒开始沉降, 在管道底部形成床层, 导致管道产生极度不均匀的磨损。7 m/s 为工业上普遍接受的经济流速上限, 超过此值, 磨损率呈指数级增长, 管道寿命大幅缩短, 管道更换成本将远高于泵送节省的能耗。

参数范围选定后, 在数值试验中固定其他 2 组参数为基准参数, 通过试验单变量调节目标参数, 得到关于该目标参数不同取值下的管道最大磨损率, 具体料浆参数设计见表 1。

表 1 料浆参数设计

Table 1 Slurry parameter design			
方案	基准参数 1	基准参数 2	目标参数取值
1	固相体积分数: 60%	流速: 2 m/s	粒径: 0.001 ~ 0.1 mm
2	流速: 2 m/s	粒径: 0.005 mm	固相体积分数: 60% ~ 75%
3	固相体积分数: 65%	粒径: 0.005 mm	流速: 2 ~ 7 m/s

1.4 网格及时间步长无关性验证

网格数量与网格长宽比是影响数值模拟精度的关键因素。选用 $3 \sim 7 \text{ mm}$ 的六面体单元划分图 2 的管道模型网格。采用粒径 0.05 mm 和固相体积分数 65% 的料浆, 以 2 m/s 流速模拟管道输送, 得到单元尺寸对管道最大磨损率的影响曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可知: 随着单元尺寸的减小, 管道的最大磨损率呈增长趋势, 当单元尺寸为 3 mm 左右时, 最大磨损率趋于稳定。所以采用 3 mm 的单元划分模型, 自动调节管道弯曲部位网格疏密度, 网格长宽比评估超过 0.8, 符合模拟计算时网格规定质量。L 型管道网格模型如图 4 所示。

时间步长是影响模拟结果准确性的重要参数。

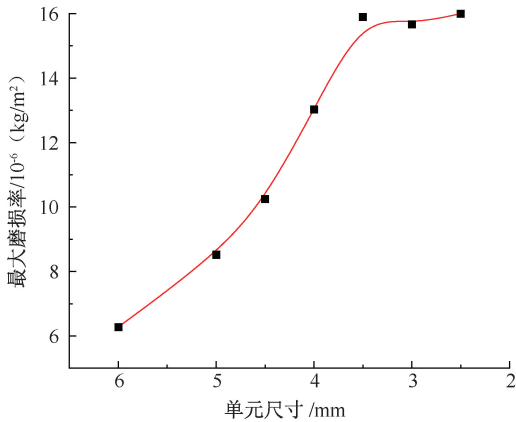


图3 单元尺寸对管道最大磨损率的影响曲线
Fig. 3 Influence curve of mesh size on maximum wear rate of pipeline

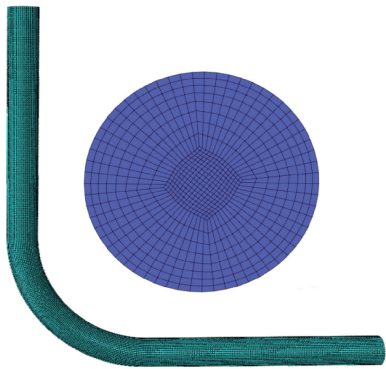


图4 L型管道网格模型
Fig. 4 L-shaped pipe mesh model

对不同时间步长下的数值结果进行收敛性分析^[6], 初始时间步长设置为 0.1 s, 逐步减半进行对比计算, 直至相邻 2 次模拟结果无明显差异, 此时, 计算结果达到收敛且时间步长设置合理。

图 5 为时间步长对管道最大磨损率的影响曲线。由图 5 可知: 时间步长越短, 对磨损过程的捕捉越精确; 随着时间步长继续减小, 直至接近 0.001 s 时, 最大磨损率趋于稳定。因此选取 0.001 s 作为数值模拟的时间步长。

2 不同料浆参数对管道磨损的影响

2.1 料浆颗粒粒径对管道磨损的影响

基于表 1 方案 1 模拟管道输送, 得到 4 种不同颗粒粒径下的 L 型管道磨损云图, 如图 6 所示。由图 6 可知: L_1 段与弯管交汇处磨损最严重; 随着颗粒粒径增大, 磨损向 L_2 段迁移。弯管部位磨损方式发生改变, 图 6a 中, 整个弯管部位都存在磨损, 图 6b 中, 磨损开始聚焦弯管外壁, 图 6c 中, 弯管外壁形成

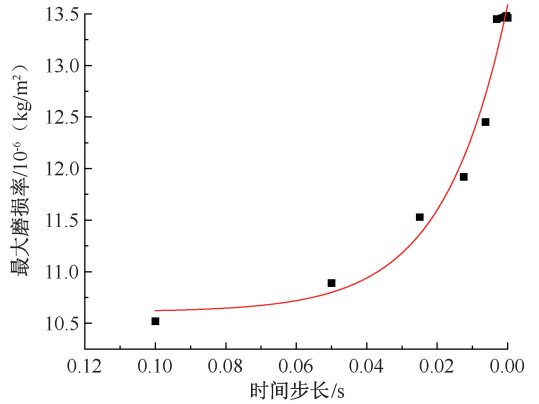


图5 时间步长对管道最大磨损率的影响曲线
Fig. 5 Influence curve of time step on maximum wear rate of pipeline

了流线型磨损, 图 6 d 中, 弯管及 L_2 段均出现流线型磨损。由此推断, 随着颗粒粒径增大, 管道磨损已从全面覆盖转变为集中于弯管及水平管的局部冲刷。

统计模拟结果, 得到料浆颗粒粒径对 L 型管道最大磨损率的影响特征, 如图 7 所示。由图 7 可知: 管道最大磨损率与颗粒粒径呈二次非线性关系。颗粒粒径由 0 增加到 0.1 mm 过程中, 管道的最大磨损率呈加速上升趋势, 表明颗粒粒径越大, 料浆对管道的磨损越严重。在颗粒粒径达到 0.1 mm 时, 最大磨损率达到 1.34×10^{-4} kg/m²。因此, 研磨尾砂颗粒, 适当降低其粒径, 可减小料浆对管道的磨损。

2.2 料浆固相体积分数对管道磨损的影响

矿山中尾砂胶结充填料浆的固相体积分数一般为 60%~80%, 所以针对固相体积分数在 60% 以上的料浆开展管道输送模拟。在 CFD-DEM 耦合分析中, 料浆固相体积分数主要以生成颗粒的流量表示, 料浆固相体积分数公式为:

$$C = \left(\frac{Q_s}{Q_s + Q_l} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: C 为固相体积分数, %; Q_s 为固体颗粒的流量, kg/s; Q_l 为液体的流量, kg/s。

在 Fluent 中液体的流量由液体流速转化而成, 计算见下式:

$$Q_l = \rho \cdot A \cdot V \quad (3)$$

式中: ρ 为液体密度, kg/m³; A 为管道流量面积, m²; V 为液体流速, m/s。在 DEM 仿真软件中可自行设置颗粒质量流量。

综上, 通过相同时间内液体和固体的流量得出料浆固相体积分数, 流量与料浆固相体积分数关系见表 2。

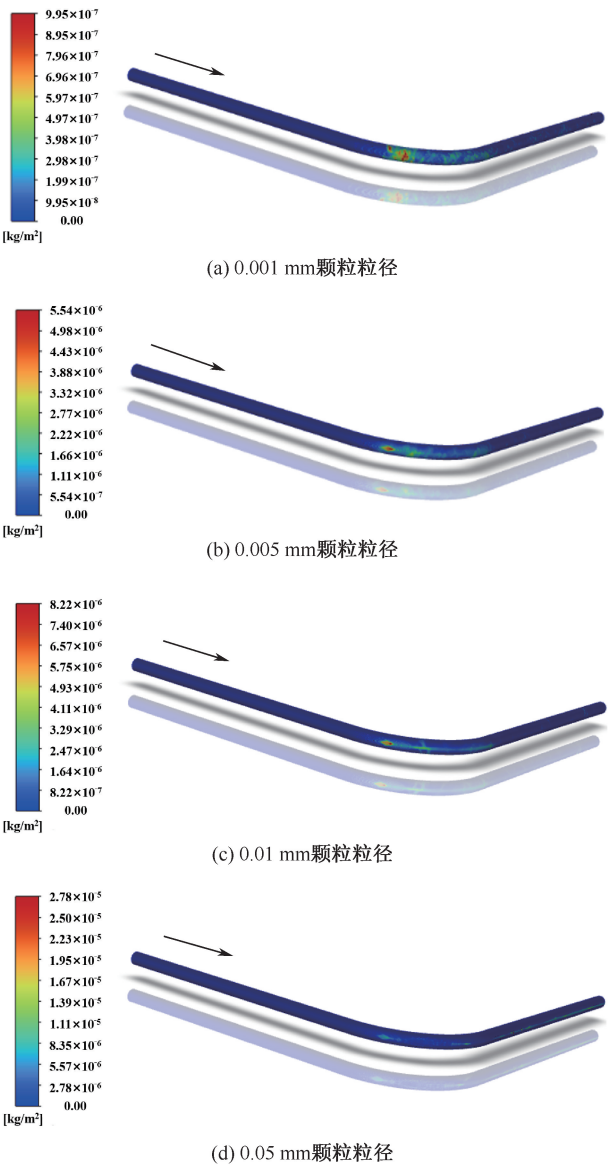


图 6 4 种不同颗粒粒径下的 L 型管道磨损云图

Fig. 6 Contour plots of wear in L-shaped pipe under four different particle sizes

表 2 流量与料浆固相体积分数的关系

Table 2 Relationship between flow rate and slurry mass concentration

$Q_1/(kg/s)$	$Q_s/(kg/s)$	$Q_c/\%$
13.47	20.205	60
13.47	25.0157	65
13.47	31.43	70
13.47	40.41	75
13.47	53.88	80

基于表 2 数据模拟管道输送,得到 4 种不同料浆固相体积分数下 L 型管道磨损云图,如图 8 所示。由图 8 可知: L_1 段与弯管交汇处磨损最严重。随着料浆固相体积分数的增大,弯管与 L_1 段管道磨损呈

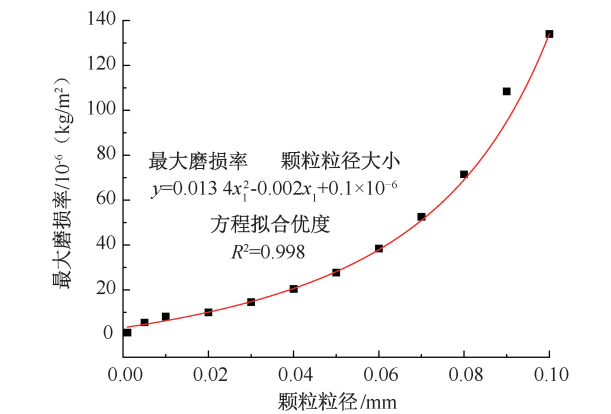


图 7 料浆颗粒粒径对 L 型管道最大磨损率的影响

Fig. 7 Influence of slurry particle size on maximum wear rate in L-shaped pipe

上升趋势。对比图 8a—图 8 d 可知:弯管与 L_2 段交汇处的磨损有所增强;图 8a 中,该处开始出现磨损迹象;图 8b 中,磨损由 L_2 段向弯管延伸;图 8c 中,该区域的磨损已变得明显;至图 8d 时,磨损已开始覆盖整个交汇区域。由此推断,固相体积分数越大,料浆从弯管进入水平管下壁面磨损越大;对比图 8c 和图 8d 发现,料浆固相体积分数从 70% 增加到 75% 时,最大磨损率趋于稳定。

统计模拟结果,得到料浆固相体积分数对 L 型管道最大磨损率的影响特征,如图 9 所示。由图 9 可知:管道最大磨损率与料浆固相体积分数呈多次非线性关系。料浆固相体积分数为 60% 时,管道最大磨损率为 $4.65\times 10^{-6} kg/m^2$;料浆固相体积分数在 60%~70% 范围内,随着固相体积分数的增加,最大磨损率逐渐增大;料浆固相体积分数为 70% 时,最大磨损率达到 $7.06\times 10^{-6} kg/m^2$,此后,固相体积分数继续增加,最大磨损率趋于稳定。因此,在保障充填体强度的前提下,适当降低充填料浆固相体积分数可减少管道磨损率。

2.3 料浆流速对管道磨损的影响

基于表 1 中方案 3 模拟管道输送,得到 4 种不同料浆流速下的 L 型管道磨损云图,如图 10 所示。由图 10 可知: L_1 段与弯管交汇处磨损最为严重,且磨损程度随流速的增加而增强。结合图 10a—图 10d 发现,随着流速增大,磨损趋于集中,图 10a 弯管磨损集中与中段部位,图 10b 和图 10c 该处磨损向中线聚拢,图 10d 该处磨损已形成长流线状,说明流速越大,料浆中颗粒会沿同一位置聚集流动。

统计模拟结果,得到料浆流速对 L 型管道最大磨损率的影响特征,如图 11 所示。由图 11 可知:管

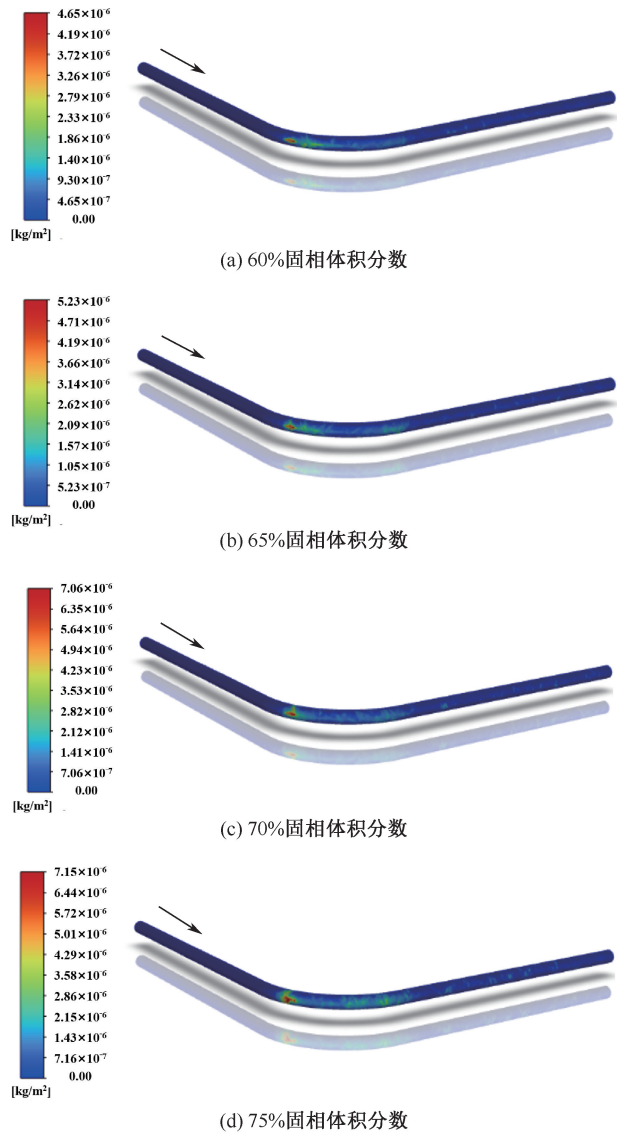


图 8 4 种不同料浆固相体积分数下 L 型管道磨损云图
Fig. 8 Contour plots of wear in L-shaped pipe under four different slurry solid volume fraction

道最大磨损率与料浆流速呈线性递增关系。在料浆流速为 2 m/s 时,管道最大磨损率为 $5.54 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$;流速为 7 m/s 时,管道最大磨损率为 $8.25 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$ 。因此,在保障料浆不会因流速过大而造成固液分流的前提下,适当降低充填料浆的流速可减小管道磨损。

3 料浆参数对管道磨损的影响分析

采用响应曲面法 (Response Surface Methodology, RSM)^[4]对数值模拟结果进行敏感性分析,根据表 1 料浆参数的取值范围确定低中高 3 个单一变量,颗粒粒径 H :低 (0.001 mm)、中 (0.005 mm)、高 (0.01 mm);料浆固相体积分数 I :低

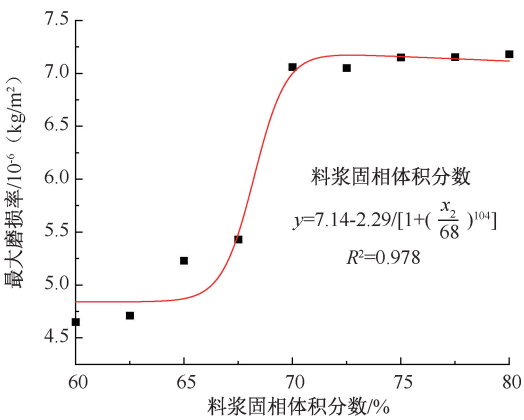


图 9 料浆固相体积分数对 L 型管道最大磨损率的影响

Fig. 9 Influence of slurry solid volume fraction on maximum wear rate of L-shaped pipeline

(60%)、中 (65%)、高 (75%);料浆流速 J :低 (2 m/s)、中 (3 m/s)、高 (5 m/s)。其 RSM 参数设计与模拟结果见表 3。

表 3 RSM 参数设计与模拟结果

Table 3 RSM parameter design and simulation results

试验点	H/mm	$I/\%$	$J/(\text{m/s})$	管壁最大磨损率 $Y/10^{-6}(\text{kg/m}^2)$
1	0.001	60	3	2.04
2	0.01	60	3	8.28
3	0.001	75	3	2.56
4	0.01	75	3	12.1
5	0.001	65	2	0.995
6	0.01	65	2	8.22
7	0.001	65	5	1.15
8	0.01	65	5	9.99
9	0.005	60	2	4.65
10	0.005	75	2	7.15
11	0.005	60	5	9.10
12	0.005	75	5	11.0
13	0.005	65	3	7.15

设计 3 因子 (H 、 I 、 J) 3 水平,试验点包含中心点 (第 13 号点),适合用二次模型拟合。

拟合的模型形式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 I + \beta_3 J + \beta_{11} H^2 + \beta_{22} I^2 + \beta_{33} J^2 + \beta_{12} HI + \beta_{13} HJ + \beta_{23} IJ \quad (4)$$

式中: Y 为管壁最大磨损率, 10^{-6} kg/m^2 ,是模型预测的响应变量; β_0 为常数,表示所有因素取基准值时的响应基准水平; β_1 、 β_2 、 β_3 为一次项系数,分别表示因素 H 、 I 、 J 对响应 Y 的主效应强度; β_{11} 、 β_{22} 、 β_{33} 为二次项系数,分别表示因素 H 、 I 、 J 的非线性效应强度; β_{12} 、 β_{13} 、 β_{23} 为交互项系数,分别表示因素对 H - I 、 H - J 、 I - J 之间的交互效应强度; H 、 I 、 J 为 3 个试验因素。

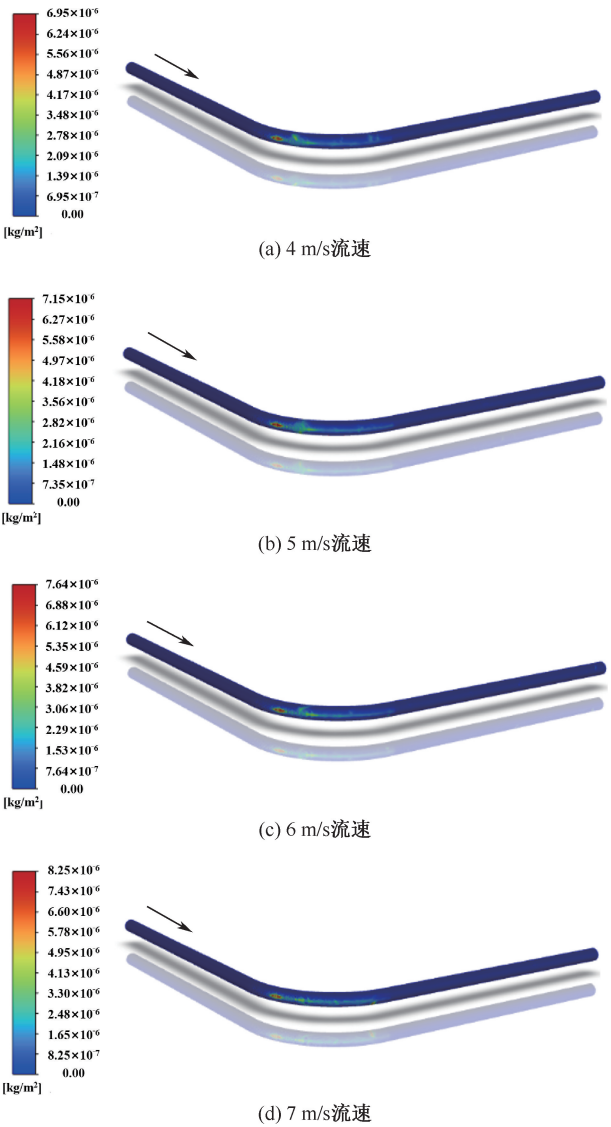


图 10 4 种不同料浆流速下的 L 型管道磨损云图

Fig. 10 Contour plots of wear in L-shaped pipe under four different slurry flow velocities

综上模拟数据得到方差分析中自由度、显著值及概率值,结果见表 4。

表 4 方差分析			
Table 4 Analysis of variance table			
来源	自由度	显著值	概率值
模型	9	45.86	0.000 2
检验误差	3	3.24	0.22
纯误差	2	—	—

由表 4 可知:模型显著值为 45.86,概率值为 0.000 2,其值远小于 0.05,模型整体显著性较强。检验误差的概率值为 0.22,其值不显著,说明模型拟合良好,该模型适用于 RSM 分析。采用中心复合设计法(Central Composite Design, CCD)通过多元回归分析得到关于各参数单项、交互项的系数值、标准

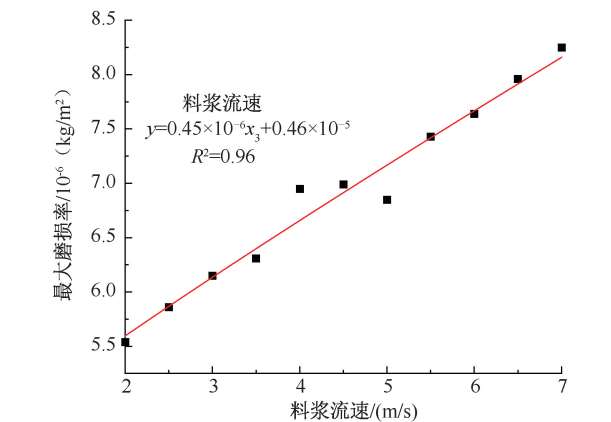


图 11 料浆流速对 L 型管道最大磨损率的影响

Fig. 11 Influence of slurry flow velocity on maximum wear rate in L-shaped pipe

误差、单项影响值及概率值,其模型系数结果见表 5。

表 5 模型系数结果				
Table 5 Model coefficient results				
项	系数值	标准误差	单项影响值	概率值
<i>H</i>	3.56	0.15	23.73	<0.000 1
<i>I</i>	1.22	0.15	8.13	0.0004
<i>J</i>	0.45	0.15	3.00	0.030
<i>HI</i>	0.85	0.21	4.05	0.010
<i>HJ</i>	0.32	0.21	1.52	0.042
<i>IJ</i>	0.67	0.21	3.19	0.008

由表 5 可知:单参数及多参数概率值均<0.05,说明 3 因子对 *Y* 均有显著影响。*H* 的概率值<0.000 1,影响最显著,其次是 *I*,最后为 *J*,所以单参数对管道磨损影响大小排序为:颗粒粒径>料浆固相体积分数>料浆流速;多参数交互项 *HJ* 的单项影响值为 1.52、概率值为 0.042,高 *H* 和高 *J* 对管道磨损影响最小。*IJ* 的单项影响值为 3.19、概率值为 0.008,高 *I* 和高 *J* 影响次之。*HI* 的单项影响值为 4.05、概率值为 0.010,高 *H* 和高 *I* 对管道磨损影响最大。

对多参数交互项进行响应曲面及等高线统计,结果如图 12、图 13 所示。由图 12a 与图 13a 可知:将颗粒粒径控制在 0.001 mm、料浆固相体积分数维持在 60%~70% 区间内,磨损较小;由图 12b 与图 13b 可知:当料浆固相体积分数固定为 65% 时,最大磨损率主要受颗粒粒径影响;由图 12c 与图 13c 可知:当颗粒粒径固定为 0.005 mm 时,高固相体积分数与高流速的组合导致最大磨损率为 $11.0 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$ 。结合等高线图分析可知;*H* 与 *I* 交互作用影响最大,*I* 与 *J* 交互作用次之,*H* 与 *J* 交互作用影响最小。

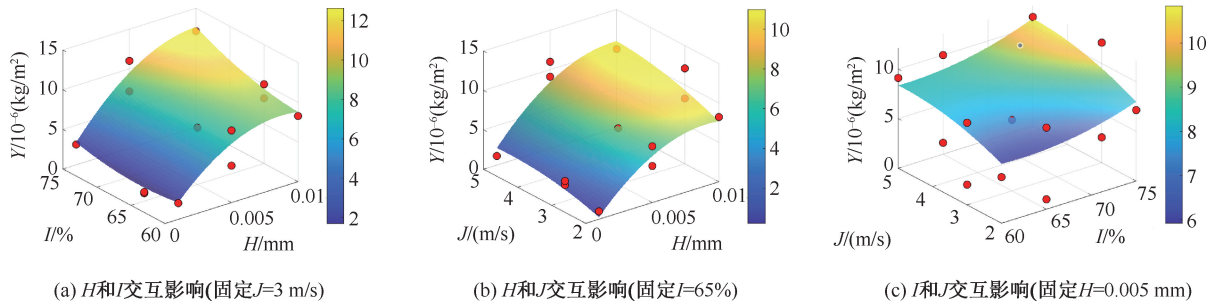


图 12 3 种参数交互影响响应曲面

Fig. 12 Response surface plots showing interaction effects of three parameters

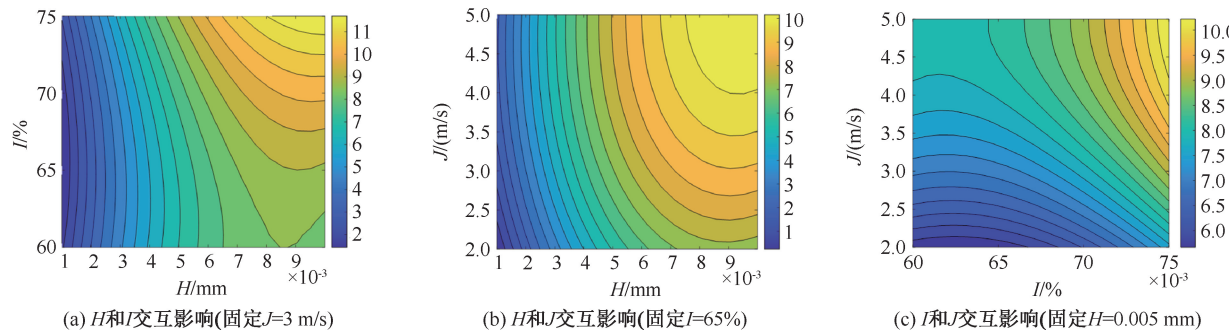


图 13 3 种参数交互影响等高线图

Fig. 13 Contour plots of interaction effects among three parameters

4 结 论

1) 充填管道最大磨损率与料浆颗粒粒径、料浆固相体积分数呈非线性关系,与料浆流速呈线性关系。料浆颗粒粒径在 0.1 mm 时,磨损率达到峰值 13.4×10^{-5} kg/m²;料浆固相体积分数在 60% 时,磨损率降低至最小值 4.65×10^{-6} kg/m²,固相体积分数超过 70% 后磨损率趋于稳定;料浆流速在 2 m/s 时磨损率最小值为 5.54×10^{-6} kg/m²。

2) 分析响应曲面法得出,料浆颗粒粒径对管

道磨损影响最大,单因素敏感性排序为:料浆颗粒粒径>料浆固相体积分数>料浆流速。

3) 响应面及等高线图发现,颗粒粒径与料浆固相体积分数交互项贡献率最高,在矿山充填工程中,应优化颗粒粒径与料浆固相体积分数,以降低管道的磨损,延迟服役寿命。

4) 文中研究侧重于优化料浆参数,降低其对管道磨损的影响,后期将进一步研究料浆参数和管道结构(管径和曲率半径)耦合作用对管道磨损的影响特征。

参 考 文 献

[1] 王小林,张润,邱征,等. 金属矿山高固相体积分数充填管道磨损规律与防控技术[J]. 金属矿山, 2024(6): 181–190.
Wang Xiaolin, Zhang Run, Qiu Zheng, et al. Wear law and prevention and control technology of high concentration filling pipeline in metal mine[J]. Metal Mine, 2024(6): 181–190.

[2] 樊新波,王桂红,罗杨,等. 基于 CFD-DEM 耦合的混凝土输送弯管冲蚀磨损数值模拟[J]. 南方农机, 2025, 56(增刊 1): 125–128.

[3] 黄靓,朱梦莹,许靖,等. 天然气管道压缩机叶轮冲蚀磨损数值计算及优化[J]. 天然气与石油, 2024, 42(1): 102–108.
Huang Liang, Zhu Yujie, Xu Jing, et al. Numerical calculation of erosion and optimization on natural gas pipeline compressor impeller [J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(1): 102–108.

[4] 肖琦琨,马军,郭凯,等. 基于 DDPM-RSM 的浆体管道冲蚀磨损数值模拟研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(3): 709–719.
Xiao Qikun, Ma Jun, Guo Kai, et al. Numerical simulation of erosion wear in slurry pipelines based on DDPM-RSM[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(3): 709–719.

[5] 游赟,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.
You Yun, Li Mengying. Wear analysis at right angle elbow of nature gas gathering and transportation pipeline based on

- Fluent [J]. Gas and Heat, 2021, 41(4): 75-81, 102.
- [6] 杨凯,黎梦圆. 基于 CFD-DEM 耦合方法的矸石-粉煤灰充填料浆在竖直弯管中的磨损研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(12): 116-122.
- Yang Kai, Li Mengyuan. Research on wear of gangue-fly ash filling slurry in vertical bending pipe based on CFD-DEM coupling method [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(12): 116-122.
- [7] 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.
- [8] 庞建涛,李树建,石勇,等. 粗骨料充填输送管道阻力特性与冲蚀磨损研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(12): 53-59.
- Pang Jiantao, Li Shujian, Shi Yong, et al. Research on resistance characteristics and erosion wear of coarse aggregate filling transportation pipeline [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(12): 53-59.
- [9] Wang Yingying, Wang Yong, Yang Gangfeng, et al. Effect of cement-to-tailings ratio and flow rate on the wear performance of filling pipeline [J]. Powder Technology, 2022, 397: DOI:10.1016/j.powtec.2021.117027.
- [10] 赵一博,刘伟涛,胡秀瀚,等. 基于环管试验的膏体充填管道磨损规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(3): 119-124.
- Zhao Yibo, Liu Weitao, HU Xiuhuan, et al. Research on pipeline wear patterns in cemented paste backfill based on looped pipeline test [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2025, 77(3): 119-124.
- [11] 常英杰,吴爱祥,阮竹恩,等. 含粗骨料膏体输送管道磨损机理及参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 307-316.
- Chang Yingjie, Wu Aixiang, Ruan Zhuen, et al. Wear mechanism and parameters optimization of coarse aggregate-containing paste transport pipes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(1): 307-316.
- [12] 向韫. 基于 DEMATEL 法的充填管道磨损风险评估可拓云模型[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6): 172-180.
- Xiang Yun. Extension cloud model for risk assessment of filling pipeline wear based on DEMATEL method [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 172-180.
- [13] 张振华,杜兆文,陈学华. 基于 DEMATEL-ISM 的深部矿山充填管道磨损风险影响因素分析[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(2): 9-16.
- Zhang Zhenhua, Du Zhao wen, Chen Xuehua. Analysis on influencing factors of filling pipelines wearing in deep mine based on DEMATEL-ISM [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(2): 9-16.
- [14] 康志强,辛东夫,邵陆航,等. L 型充填管道料浆输送压力损失及优化研究[J]. 金属矿山, 2020(9): 33-40.
- Kang Zhiqiang, Xin Dongfu, Shao Luhang, et al. Study on pressure loss and optimization of L-shaped filling pipe slurry [J]. Metal Mine, 2020(9): 33-40.
- [15] 董政钢,伍红. 基于 CFD-DEM 耦合的混凝土泵输送管磨损研究[J]. 建筑机械化, 2020, 41(10): 34-36, 52.
- Tong Zhenggang, Wu Hong. Research on wear of concrete pump truck conveying pipe based on CFD-DEM coupling [J]. Construction Mechanization, 2020, 41(10): 34-36, 52.
- [16] 石宏伟,黄吉荣,乔登攀,等. 深井矿山高固相体积分数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.
- [17] 黄玉诚,段晓博,王瑜敏,等. 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 117-122.
- Huang Yucheng, Duan Xiaobo, Wang Yumin, et al. research on non-full pipeline flow transportation and prevention method of coal gangue cemented backfill [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 117-122.
- [18] 宋学朋,柯愈贤,魏美亮,等. 基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 95-102.
- Song Xuepeng, Ke Yuxian, Wei Meiliang, et al. Risk assessment of filling pipeline blockage based on multidimensional cloud model [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 95-102.
- [19] 汪春节. 基于 FLUENT 的制冷系统管道磨损研究[J]. 中国设备工程, 2018(23): 132-134.
- [20] 刘培坤,胡兆文,杨兴华,等. 基于 FLUENT 的管道磨损分析及换边规律研究[J]. 矿山机械, 2016, 44(2): 35-39.
- Liu Peikun, Hu Zhao wen, Yang Xinghua, et al. Analysis on pipeline abrasion based on FLUENT and study on side exchange laws [J]. Mining Machinery, 2016, 44(2): 35-39.



作者简介: 何文 (1981—),男,广东中山人,博士,副教授,主要从事矿山开采灾害监测预警、应力波理论及试验技术、充填理论及工艺、结构健康诊断及无损检测等方面的研究。E-mail: herman3@163.com。