CFD-DEM 耦合下的水力提升弯管磨损分析①

李沛霖[1,2], 吴杨[2], 孙佳昭[1,3], 胡英杰[1], 马鑫宇[4]

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 2.广州大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 3.中国海洋大学 海岸与海洋工程全国重点实验室, 山东 青岛 266100; 4.沈阳鑫蓝海洋工程有限公司, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要: 针对深海采矿系统 90°弯管冲蚀失效问题,结合 CFD-DEM 双向耦合方法和方差分析,开展了固液两相流耦合作用下的磨损演化机理研究,定量评估了管径粒径比、流体初始速度和颗粒形状对管道磨损的影响权重。结果显示,单因素对管道最大磨损率的影响顺序为:管径粒径比>流体初始速度>颗粒形状;多因素交互作用对管道最大磨损率的影响顺序为:流体初始速度与管径粒径比>颗粒形状与管径粒径比>流体初始速度与颗粒形状;低管径粒径比工况下,弯管整体磨损较为严重,且磨损峰值集中出现在弯管中段;高管径粒径比工况下,弯管磨损峰值前移至迎流段,且弯管中后段的磨损率呈现出显著的衰减趋势。

关键词: 流体力学; 固液两相流; 深海采矿; 90°弯管; 磨损特性; CFD-DEM; 方差分析; 管道输送; 管道磨损; 水力提升

中图分类号: TD857 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.012

文章编号: 0253-6099(2026)03-0097-09

Wear Analysis of Hydraulic Lifting Elbow with CFD-DEM Coupling Method

LI Peilin[1,2], WU Yang[2], SUN Jiazhao[1,3], HU Yingjie[1], MA Xinyu[4]

(1.*Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou)*, *Guangzhou* 511458, *Guangdong*, *China*; 2.*School of Civil and Transportation Engineering*, *Guangzhou University*, *Guangzhou* 510006, *Guangdong*, *China*; 3.*State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *Shandong*, *China*; 4.*Shenyang Xinlan Ocean Engineering Co., Ltd.*, *Shenyang* 110167, *Liaoning*, *China*)

Abstract: Aiming at the erosion failure problem of 90° elbows in deep-sea mining systems, a study was carried out on the wear evolution mechanism under the coupling action of solid-liquid two-phase flow. In combining with the CFD-DEM two-way coupling method and analysis of variance (ANOVA), the influence weights of pipe-to-particle diameter ratio, initial fluid velocity, and particle shape on pipe wear were quantitatively evaluated. The results show that the influence of single factors on the maximum wear rate of the pipe is in the following descending order: pipe-to-particle diameter ratio > initial fluid velocity > particle shape; while the influence of multi-factor interactions on the maximum wear rate is also in the following descending order: initial fluid velocity and pipe-to-particle diameter ratio > particle shape and pipe-to-particle diameter ratio > initial fluid velocity and particle shape. With a lower pipe-to-particle diameter ratio, the elbow suffers severe overall wear, with peak wear concentrated in the middle section of the elbow; with a higher pipe-to-particle diameter ratio, the elbow has its peak wear presenting in the upstream impingement section, with the wear rate in the middle and rear sections of the elbow in an obvious declining trend.

Key words: fluid mechanics; solid-liquid two-phase flow; deep-sea mining; 90° elbow; wear characteristics; CFD-DEM; ANOVA; pipeline transportation; pipe wear; hydraulic lifting

多金属结核等深海矿产资源的商业化开采已成为海洋工程领域的前沿热点[1-5]。水力提升技术凭借输送效率高、系统可靠性强的优势,成为当前深海采矿常用的矿物颗粒垂直输送技术[6]。90°弯管作为水力提

① **收稿日期**: 2026-04-15
基金项目: 海岸与海洋工程全国重点实验室开放基金(LP2509);中国博士后科学基金(2025M780262);辽宁省中央引导地方科技发展资金计划项目(2026JH6/100300009);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)PI 项目(GML20240001,GML2024009)
作者简介: 李沛霖(2001—),男,广东茂名人,硕士研究生,主要研究方向为深海采矿水力提升系统固液两相流数值模拟。E-mail:2112416165@e.gzhu.edu.cn
通信作者: 吴杨(1985—),男,辽宁锦州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为岩土材料性质多尺度测试与模拟。E-mail:yangwu@gzhu.edu.cn

升管路系统的核心转向部件,对保障矿石水力输运的安全稳定具有重要作用[7]。弯管内固液两相流的流动过程涉及强旋流、二次流、颗粒-壁面高频碰撞、固液相间强耦合作用等复杂动态行为[8],在高速大颗粒矿石的高频冲击下,极易引起严重的管道冲蚀磨损行为[9-10]。因此,探明90°弯管在极端工况下的磨损演化规律,对保障海底矿产资源的安全输送具有重要意义。

近年来,国内外学者广泛采用数值模拟与试验手段,对管路冲蚀的微观机制展开了深入探究。在宏观参数与几何调控维度,学者们依托计算流体力学(CFD)等数值模拟方法,研究了入口流速、固液质量比及弯管结构参数对冲蚀的影响,揭示了弯管最大磨损率随流速增加呈指数或幂函数增长的非线性规律[11-13]。为了实现工程减磨,部分学者利用CFD-DEM耦合模拟与多工况寻优算法,分别划定了竖直弯管的高危磨损区并获取了可减缓冲蚀的优化参数配比[14-15];针对更复杂的管路结构,文献[16]采用数值仿真深入剖析了可变直径弯管内结构比例的影响,明确了进出口直径比超过0.8时冲蚀将急剧恶化。在颗粒微观动力学与深海输运机制维度,研究者们将更精细的分析方法引入两相流冲蚀研究。部分学者采用CFD-DEM双向耦合模型,分别探究了颗粒球形度的二次流耦合效应以及高浓度局部积聚引发的颗粒屏障效应[17-18]。针对深海采矿特有场景,文献[19]基于离散相模型(DPM)预测了深海采矿管道的冲蚀退化规律及磨损深度的空间分布特征;文献[20]则结合粒子图像测速(PIV)物理实验与CFD-DEM数值模拟,精细揭示了直角弯管内粗大颗粒运动轨迹偏转及碰撞过程中的能量传递机制。

尽管现有研究在揭示弯管磨损规律方面取得了显著进展,但针对深海采矿特定工况的研究仍存在一定局限性:一是现有研究多数聚焦于化工流体或常规细粒尾矿浆输送场景[11-12,15],未能充分体现深海采矿特有的超长垂直跨度、高水压及超大粒径矿石(极低管径粒径比)引发的强耦合旋流特性;二是现有文献大多侧重于单一因素的敏感性分析[14,16,18],虽有部分研究尝试双因素探讨[13],但缺乏将深海特有的多面体形状、大粒径比等关键变量置于统一的量化框架,深海极端工况协同的交互机制尚不明确。

因此,本文以深海采矿水力提升系统90°弯管为研究对象,构建CFD-DEM双向耦合模型,系统开展考虑流体初速度(1.5、2.5、3.5 m/s)、管径粒径比(5、20、35)和颗粒形状(球形、类球多面体、多面体)的三因素三水平全因子数值模拟实验。通过方差分析(ANOVA)量化各参数及其交互作用对最大磨损率的显著性,并深入探讨流速与管径粒径比协同作用下的磨损演化机理。

1 数值方法

1.1 连续相

在固液两相流的数值模拟中,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)被广泛应用于解析复杂边界内的流场演化。本文在欧拉框架下,采用CFD方法处理作为连续相的流体(海水)。通过求解Navier-Stokes方程来描述连续相流动[11],在计算过程中,严格考虑离散颗粒对流场空间的体积排挤效应,以及连续相与离散相之间的相互作用产生的动量传递源项,其连续性方程与动量守恒方程分别如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}) + \nabla\cdot(\alpha_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}) + \nabla\cdot(\alpha_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}\boldsymbol{u}) = -\alpha_{\mathrm{f}}\nabla p + \nabla\cdot(\alpha_{\mathrm{f}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{f}}) + \alpha_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{g} + F_{\mathrm{p}\to\mathrm{f}} \tag{2}$$

式中:α_{f}为液体体积分数;ρ_{f}为液体密度;$\boldsymbol{u}$为液体速度;∇p为液体压力梯度;$\boldsymbol{g}$为重力加速度矢量;$\boldsymbol{T}_{\mathrm{f}}$为液体应力张量;$F_{\mathrm{p}\to\mathrm{f}}$为液体相和固体相的交换动量。

$$T_{\mathrm{f}} = \mu_{\mathrm{f}}(\nabla\boldsymbol{u} + \nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}) + \left(\lambda_{\mathrm{f}} - \frac{2}{3}\mu_{\mathrm{f}}\right)\nabla\cdot\boldsymbol{u}I \tag{3}$$

式中:μ_{f}为液体动力黏度;$\nabla\boldsymbol{u}$为液体速度梯度张量;λ_{f}为液体体积黏度;I为二阶单位张量。

$$F_{\mathrm{p}\to\mathrm{f}} = -\frac{\sum_{p=1}^{N} F_{\mathrm{f}\to\mathrm{p}}}{V_{\mathrm{c}}} \tag{4}$$

式中:V_{c}为计算单元体积;N为计算单元体积内的粒子数;$F_{\mathrm{f}\to\mathrm{p}}$为流体相施加在颗粒上的总力。

$$F_{\mathrm{f}\to\mathrm{p}} = f_{\mathrm{d}} + f_{\mathrm{l}} + f_{\mathrm{p}} + f_{\mathrm{v}} \tag{5}$$

式中:f_{d}为液体对颗粒产生的阻力;f_{l}为升力;f_{p}为压力梯度力;f_{v}为虚拟质量力。

1.2 离散相

对于深海采矿输运系统中的不规则固体矿粒群,采用离散元描述颗粒的平动与转动[12],精准处理颗粒-颗粒、颗粒-壁面之间的碰撞与接触力学响应。在受力分析方面,充分考虑了流体相对颗粒施加的流体力,并依据牛顿第二运动定律求解颗粒的平动与转动,其控制方程如下:

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t} = F_{\mathrm{c}} + F_{\mathrm{f}\to\mathrm{p}} + m_{\mathrm{p}}g \tag{6}$$

$$I_p \frac{dw_p}{dt} = M_c + M_{f\to p} \tag{7}$$

式中：m_p 为颗粒质量；v_p 为颗粒速度；F_c 为由颗粒-颗粒和颗粒-管道壁面相互作用产生的接触力；I_p 为颗粒转动惯量；w_p 为颗粒角速度；M_c 为颗粒的动惯量张量、角速度矢量、切向接触力产生的净扭矩；$M_{f\to p}$ 为流体相速度梯度引起的额外扭矩。

1.3　磨损模型

管道磨损本质为颗粒撞击诱发的材料微切削与渐进剥落，其预测精度高度依赖磨损模型的选取[13]。目前广泛使用的经典磨损模型有 Finnie、McLaury、Oka 等[14-15]。其中 McLaury 模型更适配固液两相流中颗粒冲蚀场景，专门针对颗粒冲击行为构建，能精准刻画冲击动力学对磨损的影响[16-17]。该模型能匹配本研究的颗粒流冲蚀场景，其表达式为：

$$M = Av_{imp}{}^n f(\gamma) \tag{8}$$

$$f(\gamma) = \begin{cases} x\cos^2\gamma\sin(w\gamma) + y\sin^2\gamma + z & \gamma > \gamma_{lim} \\ b\gamma^2 + c\gamma & \gamma \leqslant \gamma_{lim} \end{cases} \tag{9}$$

式中：M 代表无量纲质量，可以定义为侵蚀质量与碰撞边界三角形的颗粒质量之比；A 代表与材料硬度有关的模型常数；v_{imp} 代表颗粒撞击速度；n 代表无量纲速度指数；b、c、x、y、w 均为通过实验确定的无量纲模型常数；z 代表参数，根据定义角度函数的两个组合方程计算得出，当入射角 γ 等于过渡角 γ_{lim} 时，z 值会自动生成；γ_{lim} 代表以 rad 为单位测量的过渡角；γ 代表最大侵蚀的颗粒冲击角。

针对深海采矿系统常用高强度钢管材以及多金属结核颗粒物理特性，本文结合文献[18-21]修正参数：设定 $A=1.99\times10^{-7}$，$n=1.73$，$b=-13.3$，$c=7.85$，$w=1$，$x=1.09$，$y=0.125$，$\gamma_{lim}=15°$。以上校准参数准确还原了深海工况下非规则多金属结核颗粒对管壁的切削与挤压微观磨损行为。

1.4　CFD-DEM 双向耦合模型

CFD-DEM 双向耦合技术是解析连续流体与离散颗粒复杂动力学行为的核心方法[22]。在该架构下，液相(CFD)与固相(DEM)通过时间步的严格同步实现实时数据交互[23]。具体而言，CFD 首先将求解出的流体速度、压力及物理属性传递给 DEM，用于精确计算流体对颗粒的阻力与升力；随后，DEM 在流场数据的基础上追踪颗粒的运动与碰撞，并将计算所得的固相体积分数及相间作用力以动量源项的形式反向反馈给 CFD。这种双向动量交换机制，不仅能真实再现流体对颗粒的挟带效应，更能高保真地捕捉高浓度颗粒群对局部流场的扰动与阻滞，是深海采矿等极恶劣多相流工况研究的理想工具。CFD-DEM 双向耦合计算流程如图 1 所示。

2　数值模拟研究

2.1　几何模型与网格设置

深海采矿水力提升系统 90°弯管管道内径 D 为 110 mm，弯管拐弯处曲率半径 R_c 为 110 mm。为保证进口流动充分发展、出口流动不受边界影响，弯管上游直管段长度设为 $5D$(550 mm)，下游直管段长度设为 $2.5D$(275 mm)，管道模型如图 2 所示。

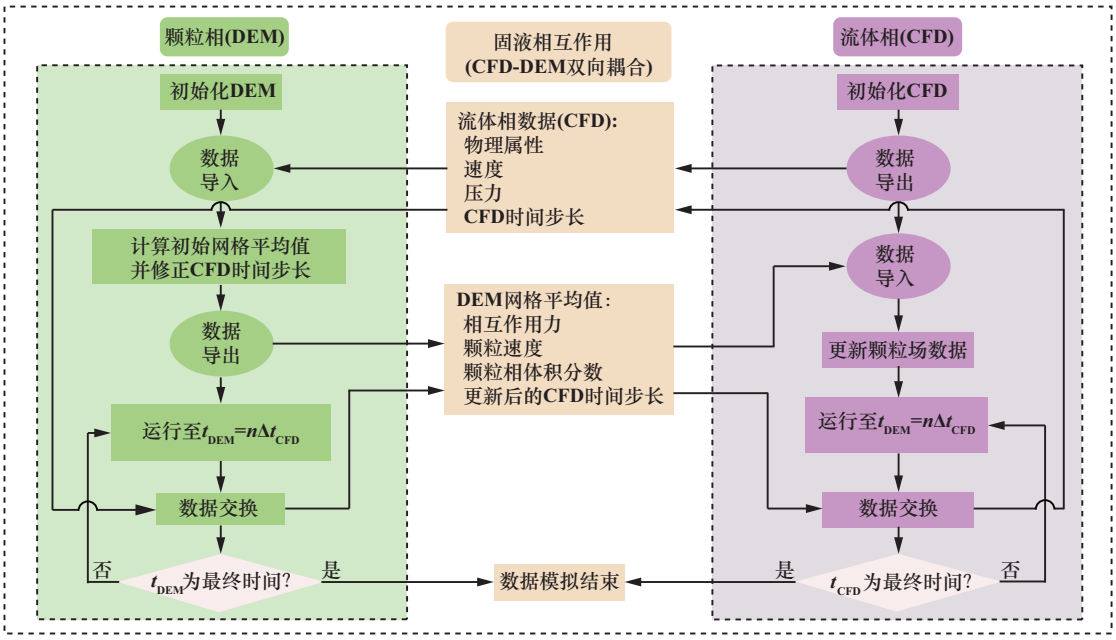


图 1　CFD-DEM 双向耦合计算流程

Fig. 1　Calculation flow of CFD-DEM two-way coupling

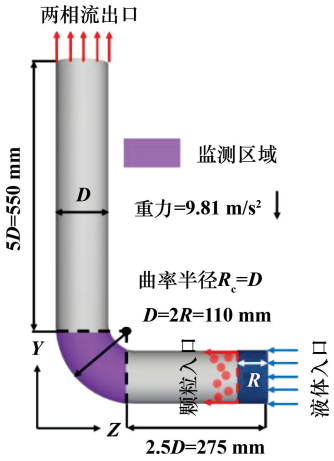
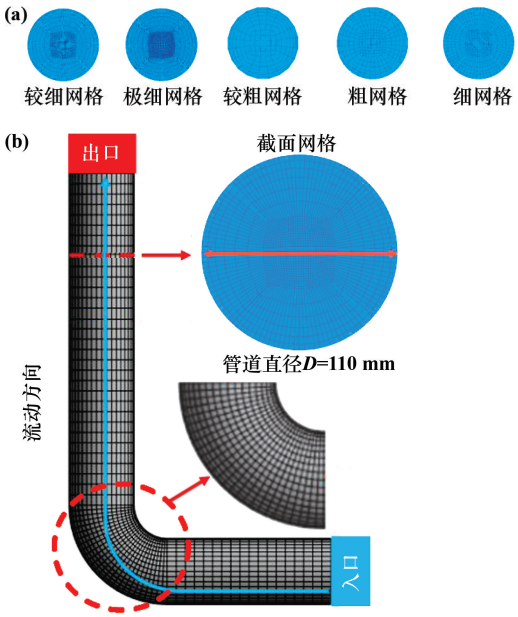


图 2 管道模型

Fig. 2 Pipe model

对计算域进行结构化网格划分,弯管拐弯区域进行网格局部加密,根据不同粒径的工况设置 5 套不同密度的网格方案:超细网格(1 558 621 单元)、较细网格(1 145 635 单元)、细网格(647 267 单元)、粗网格(342 751 单元)、超粗网格(41 480 单元)。网格方案和划分如图 3 所示。



(a) 网格方案;(b) 网格划分

图 3 网格方案和划分

Fig. 3 Grid generation diagram

为消除网格数量对计算结果的影响,本文对 5 套网格方案进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。当网格数量达到 1 145 635 时,颗粒平均速度和平均阻力的计算结果相对误差小于 3%[24-25],因此,后续计算均采用 1 145 635 单元的中网格方案。

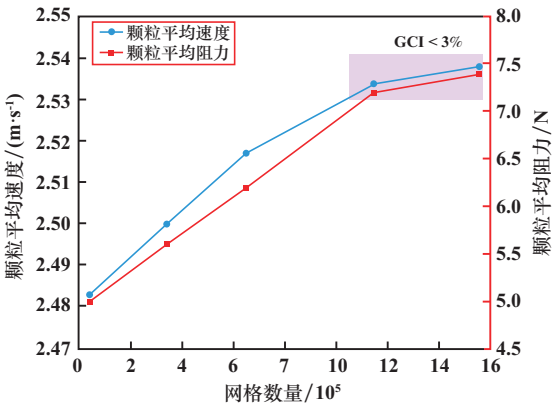


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

2.2 边界条件与相互作用力

在连续相计算中,湍流模型选用可靠 k-ε 模型,壁面函数选择可扩展壁面函数,壁面条件为无滑移壁面,计算残差采用 10^{-4} 收敛标准[26]。此外,本文选取 0.05,0.01,0.005,0.001,0.000 5 s 共 5 个时间步长开展时间步长无关性验证,结果如图 5 所示。随着时间步长增大,颗粒的各监测值均逐步降低并趋于平稳。时间步长 0.001 s 时的颗粒平均速度相较时间步长 0.005 s 时的变化小于 3%,因此本文确定时间步长为 0.001 s。

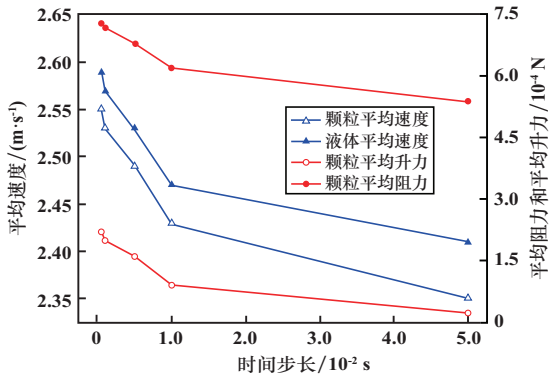


图 5 时间步长无关性验证

Fig. 5 Time step independence verification

在离散相计算中,DEM 使用 FLUENT 的初始流场,模拟总时长设置为 5 s,为保证计算同步与稳定性,CFD 时间步长需设为 DEM 时间步长的整数倍[27],因此,DEM 时间步长设为 1×10^{-4} s。

采用双向耦合方式求解连续相流体与离散相颗粒之间的相互作用力(主要为曳力、升力),采用 DEM 的 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型计算颗粒间及颗粒与壁面间的接触力,采用 Di Felice 曳力模型[28]模拟球形颗粒,采用 Haider-Levenspiel 曳力模型[29]模拟不规则形状颗粒,不同颗粒形状如图 6 所示,各材料属性[30-32]

如表 1 所示,颗粒与颗粒间、颗粒与管道壁面间的相互作用参数如表 2 所示。



(a) 球形;(b) 球面多边形;(c) 多面体

图 6　颗粒形状

Fig. 6　Particle shape

表 1　材料属性

Table 1　Material properties

材料	密度/(kg·m^{-3})	黏度/(m^2·s^{-1})	杨氏模量/GPa	泊松比
液体相(海水)	1 025	1.5×10^{-3}	—	—
颗粒相	2 600	—	0.2	0.33
管道壁面	7 850	—	80	0.30

表 2　相互作用参数

Table 2　Interaction parameters

材料	静摩擦因数	滚动摩擦因数	恢复系数
颗粒-壁面	0.15	0.01	0.50
颗粒-颗粒	0.27	0.01	0.44

2.3　数值模拟工况

选取流体初始速度 V_0(1.5、2.5、3.5 m/s)、颗粒形状 S(球形、球面多边形、多面体)、管径粒径比 D/d(5、20、35)为研究变量,共划分 27 个数值模拟实验组。

2.4　模型验证

为了确保 CFD-DEM 耦合模型预测深海采矿弯管冲蚀磨损的准确性,本文对比验证了文献[33]的实验数据,模型验证结果如图 7 所示。

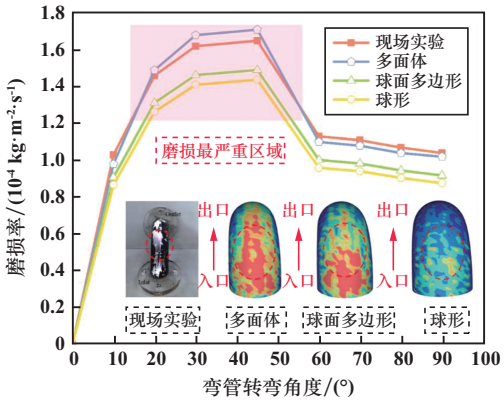


图 7　CFD-DEM 模型验证

Fig. 7　CFD-DEM model validation

图 7 表明,多面体颗粒在弯管全角度范围内的磨损率与实验结果高度吻合,平均相对误差仅 1.6%,球面多边形颗粒平均相对误差 3.4%,球形颗粒平均相对误差 5.6%。因此,本模型定量验证充分,可为弯管磨损优化提供可靠支撑。

2.5　方差分析

方差分析的核心原理是将由因素的主效应、交互效应引起的变异与随机误差引起的变异分开,通过 F 假设检验判断各因素对响应值的影响[34-35]。本文基于 27 组全因子数值实验结果开展多因素方差分析,设定显著性水平 $\alpha=0.05$,显著性判定标准为:伴随概率 $P<0.05$ 时,认为因素或交互效应具有统计学显著性。采用 F 统计量量化因素效应与随机误差的相对大小,F 的计算公式如下:

$$F=\frac{M_F}{M_E} \tag{10}$$

式中:M_F 代表因素均方,表征由该因素或交互效应引起的单位自由度的响应值变异;M_E 代表误差均方,表征由随机波动引起的单位自由度的响应值变异。

F 值越大,表明该因素对响应值的影响越显著。M_F 与 M_E 计算公式如下:

$$M_F=\frac{S_F}{d_F} \tag{11}$$

$$M_E=\frac{S_E}{d_E} \tag{12}$$

式中:S_F 代表因素偏差平方和;d_F 代表因素自由度;S_E 代表误差偏差平方和;d_E 代表误差自由度。

流体初始速度 V_0、颗粒形状 S、管径粒径比 D/d,每个自变量设置 3 个水平,各因素的水平设置如表 3 所示。

表 3　方差分析中的因素与水平设置

Table 3　Factor and level settings in ANOVA

水平	参数		
	V_0/(m·s^{-1})	S	D/d
水平 1	1.5	球形	35
水平 2	2.5	球面多边形	20
水平 3	3.5	多面体	5

3　结果与讨论

3.1　方差分析

本文共开展 27 组全因子数值模拟实验,选取弯管拐弯处的最大磨损率 E_{max} 作为方差分析的响应值,结果如表 4 所示。基于该结果分别开展单因素主效应、多因素交互效应的系统分析。

3.2　单因素主效应分析

单因素主效应分析可明确各因素对弯管最大磨损率的影响程度与作用规律,各单因素主效应见图 8~10。

表 4 弯管拐弯处最大磨损率 E_{max} 数值模拟实验结果

Table 4 Numerical simulation experimental results of maximum wear rate E_{max} at elbow bend

初始速度/(m·s^{-1})	管径粒径比	不同颗粒形状的 E_{max}/(10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1})		
		球形颗粒	球面多边形颗粒	多面体颗粒
1.5	35	1.2	2.6	234
	20	3.4	8.0	1 060
	5	6.6	15.6	2 080
2.5	35	2.8	5.0	320
	20	7.0	11.6	1 145
	5	13.8	31.5	2 860
3.5	35	3.3	5.8	346
	20	8.2	13.5	1 580
	5	16.2	33.4	3 120

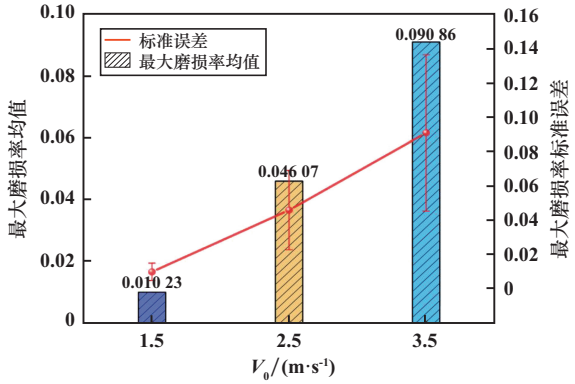


图 8 流体初始速度主效应图

Fig. 8 Main effect plot of initial fluid velocity

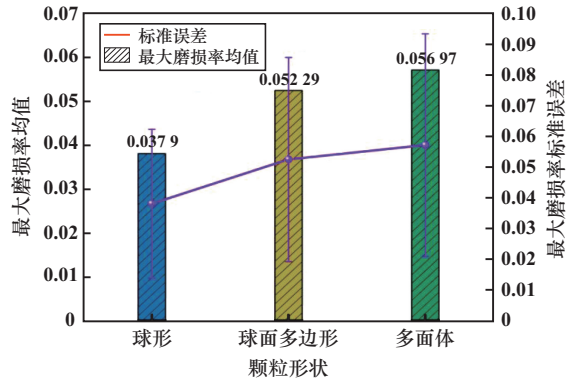


图 9 颗粒形状主效应图

Fig. 9 Main effect plot of particle shape

由图 8 可知，V_0 从 1.5 m/s 增至 3.5 m/s，弯管最大磨损率均值呈现显著的非线性递增趋势。这表明在水力提升过程中，较高的流速会赋予固相颗粒更大的动能，显著加剧两相流对管壁的冲击与磨损。同时，高流速下的标准误差(SEM)也随之增大，反映出管内局部湍流波动及颗粒群碰撞行为的随机性增强。

由图 9 可知，颗粒形状的主效应同样显著。随着颗粒几何特征从球形、球面多边形变为多面体，弯管最大磨损率均值逐步上升。相较于规则光滑的球形，具有尖锐边缘和不规则轮廓的多面体颗粒在靠近边界层撞击管壁时，接触应力更集中，从而导致管道更为严重的局部磨损。

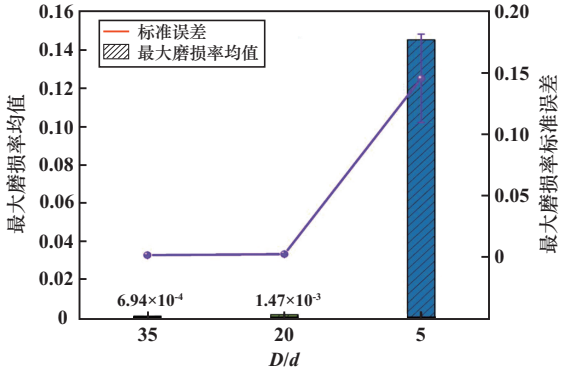


图 10 管径粒径比主效应图

Fig. 10 Main effect plot of pipe-to-particle diameter ratio

由图 10 可知，D/d 对最大磨损率的结果表现出极为剧烈的非线性影响。D/d 较大时，最大磨损率均值极低且变化平缓。当 D/d 降至 5 时，最大磨损率剧增，发生了跨数量级的突变。这说明在深海粗颗粒矿石的提升输送中，大粒径颗粒是引发极端恶劣工况的核心风险因素。

3.3 多因素交互效应分析

多因素交互效应可量化 2 个因素耦合作用对弯管最大磨损率的影响，双因素交互效应见图 11~13。

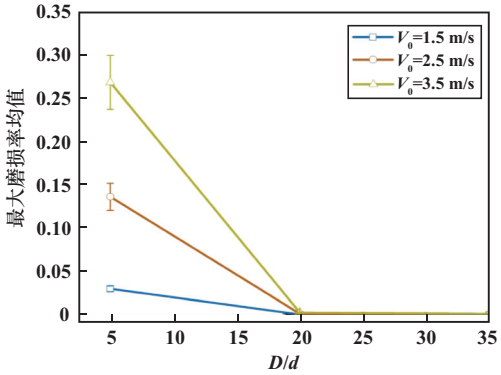


图 11 V_0-D/d 交互效应分析

Fig. 11 Analysis of V_0-D/d interaction effect

由图 11 可知，$D/d \geqslant 20$ 时，流速的提升对弯管磨损的影响相对平缓。当 D/d 降至 5 时，弯管磨损率发生快速增长，且高流速放大了这种突变效应。这表明大粒径颗粒与高动能流场的叠加是引发管壁极端破坏的核心机制。

由图 12 可知，V_0-S 表现出明显的发散型交互特征。在低流速下，颗粒形状的改变几乎不产生明显差

异。但在高流速驱动下,不规则颗粒形状所带来的微切削和应力集中效应被彻底激活,导致管道磨损率显著上升。

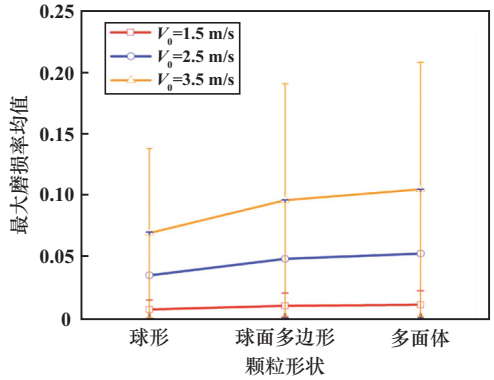


图 12　V_0-S 交互效应分析

Fig. 12　Analysis of V_0-S interaction effect

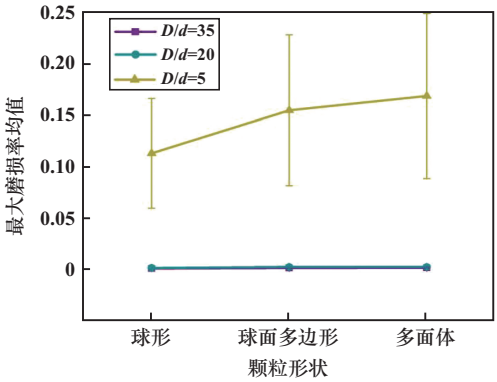


图 13　S-D/d 交互效应分析

Fig. 13　Analysis of S-D/d interaction effect

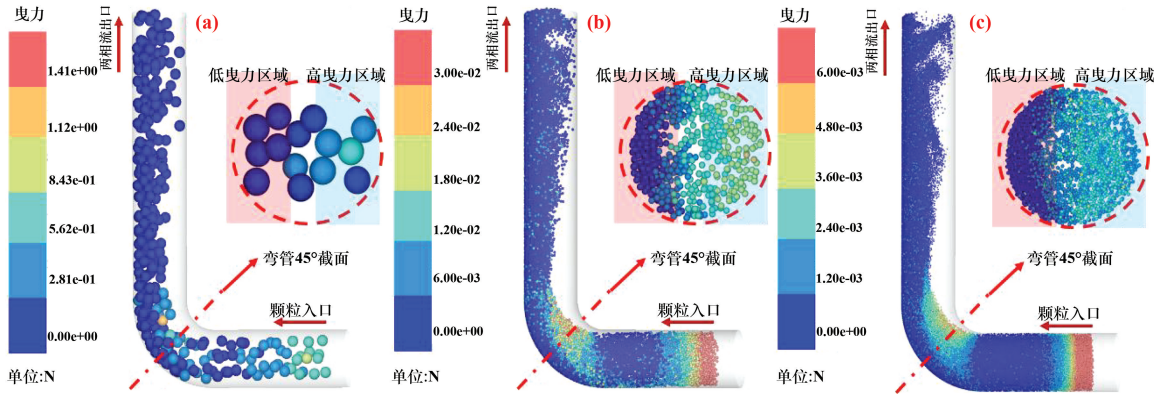
由图 13 可知,对于高 D/d 工况,颗粒形状的改变对管道磨损率无影响。但对于低 D/d 工况,颗粒形状从球形演变为多面体会造成管道磨损率的急剧攀升,这表明高 D/d 与不规则颗粒形状的交互作用降低了 90°弯管整体的磨损风险。

3.4　磨损分析

上述研究结果表明,流体初始流速(V_0)与管径粒径比(D/d)的交互作用是造成弯管磨损的主要因素。为深入探究其影响机制,以 V_0 = 3.5 m/s 工况为例,结合不同 D/d 下的流场流动特征、颗粒受力特性及磨损形态与空间分布,系统分析弯管段内固液两相流动力学演化过程。

宏观流场的演变会显著影响颗粒的微观受力状态,进而改变相间曳力的空间分布。该分布特征清晰地揭示了流速与管径粒径比共同诱发磨损的微观机制,不同 D/d 下弯管颗粒曳力分布对比图如图 14 所示。低 D/d 工况下,惯性致使随流性极差,随着流速提升,两相滑移速度剧增,颗粒在弯管迎流面承受较高的局部曳力。反之,高 D/d 工况下随流性极佳,颗粒承受曳力较低。但高流速将大量颗粒输送至外拱侧,形成了致密的低曳力颗粒堆积带。颗粒承受的相间曳力越小,意味着流场对其约束力越弱,颗粒自身巨大的运动惯性将直接转化为对管壁的法向冲击破坏力。

固液两相流中颗粒动力学行为的差异,直接决定了管壁磨损的宏观演化规律。图 15 为不同 D/d 工况下弯管磨损率沿转弯角度的分布对比。



(a) D/d = 5; (b) D/d = 20; (c) D/d = 35

图 14　不同 D/d 下弯管颗粒曳力分布对比图

Fig. 14　Comparison of particle drag force in conveying elbow with different D/d ratios

由图 15 可以看出,颗粒粒径对弯管磨损的沿程分布具有决定性影响。

在低 D/d 工况下,粗大颗粒占据主导地位,弯管整体磨损率处于较高水平,且严重磨损区主要集中于弯管中段。从颗粒动力学视角剖析,粗颗粒因具有极大的质量与运动惯性,在经过弯管时极易克服流体的曳力作用而脱离流线偏转的束缚,以极高的法向动能直接冲击管壁。

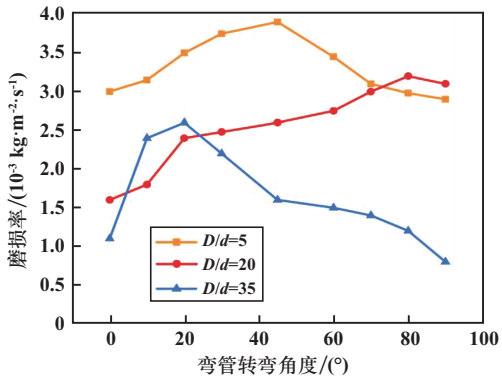


图 15 不同 D/d 工况下弯管磨损率沿转弯角度的分布对比

Fig. 15 Distribution comparison of elbow wear rate with turning angle under different D/d ratios

随着 D/d 的增大,颗粒的随流性有所改善,磨损峰值逐渐向弯管出口侧推移。而在高 D/d 工况下,细颗粒占据主导地位。此时磨损主要集中在 20°弯管附近的迎流段,随后磨损率随弯管转弯角度增加迅速下降。这是由于细颗粒惯性微小,其运动轨迹能够高度顺应流体的偏转。颗粒在进入弯管初期发生初步接触后,迅速被流体裹挟并顺流转动,颗粒与管壁的接触模式转变为更为缓和的切向滑移。因此,弯管中后段未再受到颗粒的持续强烈冲击,弯管转弯角度超过 20°后整体磨损率发生大幅骤降。

4 结语

1) 各因素对深海采矿水力提升 90°弯管磨损的影响顺序为:管径粒径比>流体初始速度>颗粒形状。随着流速提升、颗粒不规则度增加及粒径比减小(即粗大颗粒工况)均会显著恶化管壁的磨损状态。

2) 各因素对磨损的影响并非简单的线性叠加。V_0 与 D/d 之间存在极显著的交互效应;高动能流场与粗颗粒的叠加是引发管壁极端破坏的主要原因。S 与 D/d 表现出显著的交互效应,高 D/d 与不规则颗粒形状的交互作用降低了 90°弯管整体的磨损风险。

3) 颗粒粒径显著改变了弯管磨损的沿程空间分布规律。低 D/d(粗大颗粒)工况时,颗粒受极大惯性主导,易脱离流体携带,直接冲击管壁,导致弯管整体磨损较为严重,且磨损峰值集中出现在弯管中段;高 D/d(细小颗粒)工况时,细颗粒随流性好,运动轨迹顺应流体偏转,接触模式由碰撞转变为切向滑移,使得弯管磨损峰值前移至迎流段,且弯管中后段的磨损率呈现出显著的衰减趋势。

4) 受限于计算规模及模型假设,本文仍存在一定的局限性。首先,模型未充分考虑高浓度输送下颗粒间的挤压与碰撞,实际深海提升中局部颗粒浓度的剧烈波动极易引发颗粒挤压与碰撞效应。其次,多金属结核在高速冲击弯管时不可避免地会发生颗粒破碎,本文未引入颗粒破碎模型,忽略了粒径在管道内的动态减小机制。最后,未考虑壁面粗糙度随磨损不断演化的动态边界效应。未来的研究方向应进一步结合真实深海高浓度条件,引入破碎力学模型及边界动网格技术,以更精准地还原管道冲蚀的长周期演化全貌。

参考文献(References):

[1] 冯妮,杨建民. 全球深海矿产资源开发进展与启示:以装备技术为核心[J]. 太平洋学报, 2024,32(8):62-75.
FENG Ni, YANG Jianmin. Development of equipment technology for exploitation of marine mineral resources[J]. Pacific Journal, 2024, 32(8):62-75.

[2] 李鑫海,孙治雷,曹红,等. 深海重要矿产资源开发研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024,44(3):160-172.
LI Xinhai, SUN Zhilei, CAO Hong, et al. Research progress on exploitation of key deep-sea mineral resources[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024,44(3):160-172.

[3] 邹丽,孙佳昭,孙哲,等. 我国深海矿产资源开发核心技术研究现状与展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023,44(5):708-716.
ZOU Li, SUN Jiazhao, SUN Zhe, et al. Deep-sea mining core technology in China: Current situation and prospects[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023,44(5):708-716.

[4] 王国荣,黄泽奇,周守为,等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2023,25(3):1-12.
WANG Guorong, HUANG Zeqi, ZHOU Shouwei, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):1-12.

[5] 毕致玮,周娜,吴巧生,等. 深海战略性矿产资源开发的政策逻辑与中国选择[J]. 中国矿业, 2026,35(1):66-78.
BI Zhiwei, ZHOU Na, WU Qiaosheng, et al. The policy logic of deep-sea strategic mineral resource development and China's choice[J]. China Mining Magazine, 2026,35(1):66-78.

[6] 陈光,王伟,杨佳. 90°方形通风弯头内颗粒物沉积的模拟研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2010,9(6):4-8.
CHEN Guang, WANG Wei, YANG Jia. The numerical study of particle deposition in 90° square ventilation bend[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2010,9(6):4-8.

[7] GUO Y N, KANG Z, SUN Y, et al. Resilience integrated failure analysis for hydraulic lifting system of deep-sea mining[J]. Journal of Marine Science and Application, 2026:1-23.

[8] WANG Y Y, LIU Y D, LIN Z Q, et al. Particle dynamics and wear characteristics of lining layers in curved non-metallic flexible pipes for deep-sea mining[J]. Petroleum Science, 2026,23(1):447-463.

[9] XU L, CHEN X C, WU X K, et al. Coarse-grained CFD-DEM simulation of elbow erosion induced by dilute gas-solid flow: A multi-level study[J]. Powder Technology, 2024,443:119916.

[10] CHANG A L, DONG Q S, ZHANG J S, et al. Investigation of the e-

rosion wear mechanism of bend pipes for the action of multiphase flow in CO_2 flooding industry[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2025,35(7):2264-2295.

[11] ZHOU M M, WANG S, KUANG S B, et al. CFD-DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. Powder Technology, 2019,354:893-905.

[12] NASATO D S, GONIVA C, PIRKER S, et al. Coarse graining for large-scale DEM simulations of particle flow: An investigation on contact and cohesion models[J]. Procedia Engineering, 2015,102:1484-1490.

[13] 彭东华,董绍华,张行,等. 冲蚀磨损在油气管道行业的研究进展[J]. 油气储运, 2021,40(7):730-741.
PENG Donghua, DONG Shaohua, ZHANG Hang, et al. Research progress of erosion wear in oil and gas pipeline industry[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021,40(7):730-741.

[14] ZHOU J W, LIU Y, LIU S Y, et al. Effects of particle shape and swirling intensity on elbow erosion in dilute-phase pneumatic conveying[J]. Wear, 2017,380:66-77.

[15] XU L, ZHANG Q, ZHENG J Y, et al. Numerical prediction of erosion in elbow based on CFD-DEM simulation[J]. Powder Technology, 2016,302:236-246.

[16] ABDULJABBAR A, MOHYALDINN M, YOUNIS O, et al. A numerical CFD investigation of sand screen erosion in gas wells: Effect of fine content and particle size distribution[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021,95:104228.

[17] PARSI M, NAJMI K, NAJAFIFARD F, et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014,21:850-873.

[18] ARABNEJAD H, MANSOURI A, SHIRAZI S A, et al. Development of mechanistic erosion equation for solid particles[J]. Wear, 2015,332:1044-1050.

[19] ARABNEJAD H, MANSOURI A, SHIRAZI S A, et al. Evaluation of solid particle erosion equations and models for oil and gas industry applications[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston. 2015:SPE 174987-MS.

[20] RACKL M, HANLEY K J. A methodical calibration procedure for discrete element models[J]. Powder Technology, 2017,307:73-83.

[21] DENG Y, LIU Y, CHEN J, et al. Numerical simulation of the erosion in the 90° elbow[C]//Proceedings of the AIP Conference Proceedings, F, 2013.

[22] LI Y W, GUO Z M, LIU S J, et al. Flow field and particle flow of two-stage deep-sea lifting pump based on DEM-CFD[J]. Frontiers in Energy Research, 2022,10:884571.

[23] KABEEL A E, ELKELAWY M, MOHAMAD H A, et al. The influences of loading ratios and conveying velocity on gas-solid two phase flow characteristics: A comprehensive experimental CFD-DEM study[J]. International Journal of Ambient Energy, 2022,43(1):2714-2726.

[24] JIANG L, ZHAO Y X, ZHAO Z J, et al. CFD-DEM simulation and experimental study of particle dynamics in a solid-liquid two-phase centrifugal pump [J]. Advanced Powder Technology, 2025,36(11):105077.

[25] WANG Y, LI M, CHEN J, et al. CFD-DEM study on effect of particle property on solid-liquid two-phase flow structure in a centrifugal pump under stall conditions[J]. Powder Technology, 2025,458:121003.

[26] 江帆,徐勇程,陈江栋,等. 水嘴内部的湍流数值模拟[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2018,17(5):50-58.
JIANG Fan, XU Yongcheng, CHEN Jiangdong, et al. Numerical simulation on turbulent flow inside faucet[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2018,17(5):50-58.

[27] LI Y W, GUO Z M, LIU S J, et al. Flow field and particle flow of two-stage deep-sea lifting pump based on DEM-CFD[J]. Frontiers in Energy Research, 2022,10:884571.

[28] DI FELICE R. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. InternationalJournal of Multiphase Flow, 1994,20(1):153-159.

[29] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. Powder Technology, 1989,58(1):63-70.

[30] DONG M, MEI Y K, LI X, et al. Experimental measurement of the normal coefficient of restitution of micro-particles impacting on plate surface in different humidity[J]. Powder Technology, 2018,335:250-257.

[31] FRANKOWSKI P, MORGENEYER M. Calibration and validation of DEM rolling and sliding friction coefficients in angle of repose and shear measurements [J]. AIP Conference Proceedings, 2013,1542(1):851-854.

[32] ZHENG K H, DU C L, LI J P, et al. Numerical simulation of the impact-breakage behavior of non-spherical agglomerates[J]. Powder Technology, 2015,286:582-591.

[33] CUI B C, ZHAO L, JIN C, et al. Experimental and numerical investigation on particle erosion and structural optimization of two elbows in series under solid-liquid flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2025,213:137-145.

[34] MONLEZUN C J. Two-dimensional plots for interpreting interactions in the three-factor analysis of variance model[J]. The American Statistician, 1979,33(2):63-69.

[35] DE FIGUEIREDO M, RUDAZ S, BOCCARD J. A unified strategy to rebalance multifactorial designs with unequal group sizes: Application to analysis of variance multiblock orthogonal partial least squares[J]. Analytica Chimica Acta, 2023,1263:341284.

引用本文:李沛霖,吴杨,孙佳昭,等. CFD-DEM 耦合下的水力提升弯管磨损分析[J]. *矿冶工程*, 2026,46(3):97-105.

LI Peilin, WU Yang, SUN Jiazhao, et al. Wear analysis of hydraulic lifting elbow with CFD-DEM coupling method [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):97-105.