



极端工况下深海扬矿泵 CFD-DEM 耦合仿真与试验研究

胡 琼^{1,2}, 陈 骏^{1,2}, 邓立文^{1,2}, 刘少军^{1,2,3}

- (1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;
2. 深海矿产资源开发与利用技术国家重点实验室, 长沙 410012;
3. 中南大学 深圳研究院, 深圳 518057)

摘 要: 深海扬矿电泵是深海采矿提升系统的重要设备, 其形式为多级离心泵, 负责将含有粗颗粒的矿浆提升至水面。其内部流动为复杂的粗颗粒-海水二相流, 通过普通的试验难以观测内部流动特征。通过 CFD-DEM 耦合模拟仿真, 获得了深海扬矿电泵在超过额定浓度、输送极端大颗粒、偏移额定流量以及电力故障矿浆回流时的泵内流动特征。开展了清水和矿浆试验, 验证了仿真的正确性。泵在流量偏离 50%, 矿浆浓度超过额定值 100%, 当颗粒直径超过最大粒径 100% 时仍旧具有良好的输送和一定的回流性能。

关键词: CFD-DEM 耦合; 深海扬矿电泵; 极端工况; 回流堵塞

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2926-12

中图分类号: TH311

文献标志码: A

引文格式: 胡 琼, 陈 骏, 邓立文, 等. 极端工况下深海扬矿泵 CFD-DEM 耦合仿真与试验研究[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2926–2937. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42074

HU Qiong, CHEN Jun, DENG Li-wen, et al. CFD-DEM coupled simulation and experimental study of deep sea lifting mine pump under extreme working conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2926–2937. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42074

随着中国国力的不断发展, 我国在海洋事业上的话语权不断提升。国际上, 海洋及海洋资源的管理与共享发生了新的变化。海洋之中矿物资源丰富, 在几千米以下的海床之上富集了许多陆地上所稀缺的矿物资源: 锰结核、富钴结壳、多金属硫化物等。其中锰结核所含丰富的金属元素, 可以用来进行各种高新行业的发展, 是重要的可再生多金属矿^[1-5]。随着陆地上矿产资源的消耗和生产需求的增加, 世界上许多国家已经将深海资源开发纳入了国家的发展战略计划之中。到目前为止, 德国的 KSB、日本的荏原、印度和中国初步掌握了深海多级离心泵的制造技术, 完成了深海采矿的技术储备^[6-8]。而多级离心泵作为深海采矿系统中水力输送系统的关键部件, 它在各种工况下的稳定运行直

接影响了整个深海采矿提升系统的寿命^[9]。

中国作为拥有最多海底矿物种类和最多矿区的国家, 近几年逐步把深海技术进行了进一步开发^[10-11]。考虑到在中国的海洋矿区之中, 即使是同一个矿区不同区域之间的结核丰度也会不同, 这将造成了六级离心泵的实际开采工况会发生变化。因此, 试验用泵需要从以下几个极端工况下来考虑提升电泵的工作性能: 当矿浆浓度超过指定工作浓度时提升泵内的流动特性; 当整个提升系统受到扰动时, 流量偏移会对矿浆在泵内流动行为造成的影响; 由于采集装置的破碎失效导致的极端大粒径颗粒对泵内矿浆输送的影响; 同时, 在破碎失效的情况下, 发生紧急停泵时, 极端大粒径颗粒对泵内回流情况的影响。这些均需要在真正试验前通过计算

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0304103, 2019YFC0312405); 湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30824); 湖南省科技重大专项(2020GK1020)

收稿日期: 2021-07-21; **修订日期:** 2021-08-31

通信作者: 邓立文; 电话: 13880280823; E-mail: livedeng@csu.edu.cn

机模拟仿真得到一些可以支撑试验的相关数据。

在计算流体动力学方面(Computational fluid dynamics, CFD), 张宗国等^[12]以 CFD 模拟实验为基础结合试验结果进行研究, 其研究结果对管道网格参数的选取以及运输颗粒质量浓度的选择提供了技术支持。SHAH 等^[13]利用 CFD 技术对离心泵在设计和非设计工况下的性能预测、参数研究、气蚀分析、扩散器分析、涡轮机运行性能等方面进行了仿真模拟, 并进一步提出了离心泵的改进方向。邹伟生等^[14]研究了离心泵内的固液两相流动机制, 为设计深海提升电泵的流道设计提供了理论依据。但是单一的 CFD 仿真模拟仅能计算出清水工况下的离心泵工作情况, 不能反映含有结核颗粒的混合浆体在泵内运动行为。而吴波等^[15]对渣浆泵内的固相颗粒的冲蚀行为进行数值模拟, 研究了叶轮的抗冲蚀性能与其叶片参数的关系。PAGALTHIVARTHI 等^[16]用离散元模型(DPM)和双向耦合法研究了离心泵的流量、转速、颗粒直径和不同几何条件等几个运行参数对流量的影响。董喆等^[17]采用了均质泥浆的两相流模型来划分颗粒大小, 而这种均质泥浆模型大大提升了计算流体中深海采矿泵的固液两相流的计算准确性。但是在该计算模型仍旧使用的 DPM 计算方法, 它将粒子视为一个拉格朗日质量点, 忽略了粒子的体积效应与碰撞行为对流场的影响^[18]。因此, 该方法并不适用于大直径颗粒的动力学分析^[19]。

而 CUNDALL 等^[20]提出的拉格朗日方法的离散元法(DEM)曾被广泛地用于颗粒的动力学和多领域的多相模拟之中。该方法时通过将颗粒视为一个软球模型将颗粒之间的碰撞和体积效应纳入计算之中。因此, 在模拟计算离心泵中的矿浆运动行为时, 通过 CFD-DEM 的耦合仿真可以准确地获得矿浆中固液两相流的流体和颗粒的运动特性。CHEN 等^[21]利用 CFD-DEM 耦合方法模拟了水平管

道在不同形状颗粒和不同浓度的工况下的工作情况, 研究出了不同颗粒特性对浆体输送效率和流动特性的影响关系。李亚林^[22]通过使用 CFD-DEM 方法对泵的固液两相进行数值模拟, 分析了单颗粒在不同工况下的运动特性。ZHOU 等^[23]通过 CFD-DEM 耦合方法研究了颗粒粒径分布对管道运输压降和流场的影响。KRAVETS 等^[24]采用 CFD-DEM 方法研究了不同颗粒形状对流动的影响, 并对比了不同耦合模型对颗粒沉降速度的影响。

目前, 所有工作都为深海采矿离心泵中固液两相流的研究提供了有力的支持。但是, 在深海采矿领域中, 将六级离心泵之用于大流量矿浆输送实验是极为少见的。在国家项目基金的支持下, 建造并改造了大型的陆地试验场地, 并设计制造了一台六级离心泵以供试验。本文应用 CFD-DEM 耦合模拟仿真, 计算了在极端工况下六级离心泵的工作特性, 并进行了对应的矿浆输送试验来进行对比验证试验结果。同时, 考虑了多级离心泵在紧急停泵状态时颗粒的回流并做了相关的试验, 验证了泵的各方面性能均达到指标。

1 数学模型

文中研究对象为中南大学研制的六级深海扬矿电泵, 采用宽流道、放大流量设计和等功率设计等设计方法, 额定转速 1450 r/min, 额定流量 420 m³/h。重要设计参数如表 1 所示。

1.1 湍流模型及 FLUENT 设置

文中矿浆中颗粒的最大体积分数为 10%, 适合 Euler-Lagrange 两相流耦合, 将颗粒离散化, 流体介质连续化。将流体作为连续相并在 FLUENT 中进行求解, 连续介质由 Navier-Stokes 方程的连续性方

表 1 六级离心泵重要设计参数表

Table 1 Important design parameters of six-stage centrifugal pump

Parameter	Design value	Parameter	Design value
Design rated flow/(m ³ ·h ⁻¹)	420	Impeller inlet diameter/mm	235
Rated head/m	270	Impeller blade angle/(°)	110
Rated efficiency/%	52	Inlet mounting angle of diffuser/(°)	12
Rated axis power/kW	680	Outlet mounting angle of diffuser/(°)	85
Maximum particle diameter/mm	20	Wrap angle of diffuser	95.5

程和动量控制。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型由瞬时 N-S 方程用“重正化群”数学方法导出。相较于标准 $k-\varepsilon$ 模型而言, RNG $k-\varepsilon$ 能够有效解决湍流旋涡以及分离流动预测不准确的问题^[25]。因此, 对离心泵内流体的旋转和分离的瞬变流、流线弯曲计算更为精确。其湍流动能 k 和湍流能耗散率 ε 为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: ρ 是流体密度; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$; $C_{1\varepsilon} = 1.42$; $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $C_{3\varepsilon} = 0.0845$, 以上四项均为模型常数; k 为湍流动量, ε 为湍流耗散率, ρ 为液体密度, u_i 为液体流动方向, x_i 和 x_j 为方向; G_k 是由平均速度梯度引起的湍流动能产生项; G_b 在本文研究中为 0, 因为没有温度场变化; Y_M 代表波动扩张不可压缩湍流对整个耗散率的贡献, S_k 和 S_ε 为源项。

在 FLUENT 中选择速度入口和压力出口作为计算的边界条件。数值计算方案选择为压力-速度耦合中的 SIMPLEC 方法。同时将动量、湍流动能以及湍流消散率全部提升为二阶迎风以提高计算精度。选择可以处理绝大多数 y^+ 在 15~100 的近壁面流动的标准壁面处理作为壁面函数。在耦合计算中, 数据需要实时传输, 因此在 FLUENT 计算中采用瞬态计算。在 CFD-DEM 耦合中, FLUENT 中的时间步长需要和 EDEM 中的锐利时间步呈 10~100 的整数倍关系。而 FLUENT 中时间步设为 1.15×10^{-4} s (叶轮每旋转 1° 为一个时间步), 因此 EDEM 中设置的时间步为 2.3×10^{-6} s (比 FLUENT 中的时间步小 50 倍)。同时为了保证计算结果有良好的工程应用价值, 所有残差的收敛规则被设定为 1×10^{-4} 。

1.2 颗粒离散方法与 EDEM 设置

颗粒动力学特征在 EDEM 软件中计算得出, 通过耦合接口与 FLUENT 交换数据。EDEM 中的颗粒模型为软球模型, 颗粒运动遵循动量守恒定律^[26]:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \sum_{j=1}^i (f_{(n,p-p_j)} + f_{(t,p-p_j)}) + f_{p\text{-wall}} + f_{f-p} + f_{\text{saffman}} + f_{\text{magnus}} + m_p g \quad (3)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_p \quad (4)$$

式中: m_p 和 I_p 为颗粒的质量与动量; v_p 和 ω_p 为颗粒的平移速度与旋转速度; M_p 为颗粒受到的净转矩; $f_{(n,p-p_j)}$ 和 $f_{(t,p-p_j)}$ 为颗粒与其他颗粒法向和切向接触力; $f_{p\text{-wall}}$ 是颗粒与避免的接触力; f_{saffman} 是由于流体剪切力引起的升力; f_{magnus} 是颗粒自转引起的颗粒升力; g 是颗粒受到的重力; f_{f-p} 是流体与颗粒之间的交互作用力, 包括压力梯度力与流体曳力。

考虑到在实验中的颗粒绝大多数采用的球形颗粒, 为了更为直观对比实验和仿真结果将 EDEM 中的颗粒设置为球形, 密度为 1910 kg/m^3 , 与浆料输送实验中黏土烧成模拟结核颗粒的性质一致。多级离心泵叶轮、扩压器等溢流部件材质为双相不锈钢, 密度为 7850 kg/m^3 , 泊松比为 0.33, 剪切模量为 7.744×10^{-10} 。粒子接触力的计算采用 Hertz-Mindlin(无滑移)模型。升力模型采用 Saffman 和 Magnus 升力模型, 颗粒-颗粒、颗粒-壁面相互作用设置如表 2 所示。

表 2 相互作用参数表

Table 2 Interaction parameter

Type of contact	Recovery coefficient	Static friction coefficient	Rolling friction coefficient
Particle-particle	0.45	0.28	0.01
Particle-wall	0.48	0.10	0.01

1.3 流体域建模

深海采矿提升系统采用六级离心泵作为输送部件, 用于输送含有大量粗颗粒的矿浆。为保证多金属粗颗粒能够在泵内不堵塞的情况下通过泵, 主流路部件的流道截面需要足够大。泵最大通过 20 mm 粗颗粒, 最小流道尺寸在叶轮出口宽度, 根据宽流道设计准则和放大流量设计方法设计为 60 mm。其最大溢流粗颗粒直径是粗颗粒最大溢流直径的 3 倍, 具有良好的粗颗粒流通能力。只有将设计流量从 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $720 \text{ m}^3/\text{h}$, 叶轮出口宽度才能增加到 60 mm。为确保流量波动不会带来过大

的电气负荷波动, 泵的采用等功率设计, 避免了功率波动。叶轮与导叶的轴向界面示意图如图 1 所示。

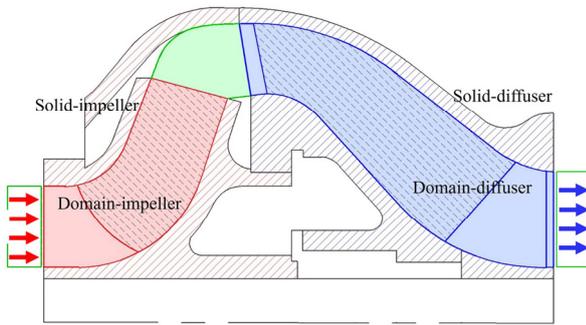


图 1 叶轮和导叶轴向截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axial section of impeller and diffuser

通过三维软件绘制了主要过流区域的水体域模型, 即图 1 彩色区域的三维水体域。通过 ICEM 进行了网格划分, 最低网格质量为 0.44, 第一层网格幅度 y^+ 值为 40~85 之间, 符合湍流模型的计算要求。网格如图 2 所示, 网格总数约 1.4×10^7 , 使用高性能工作站进行计算仿真。

2 仿真结果与分析

2.1 极端流量偏差

提升系统中在工作中会受到各类干扰, 包括外部洋流和输送内扰动, 使得系统流量发生波动。需要对泵在极端偏差流量下的功率、扬程以及颗粒输送模式进行研究。泵额定功率 680 kW, 额定流量

420 m^3/h , 对泵的流量在 $\pm 50\%$ 区间进行流量偏差研究, 即对包含 210~630 m^3/h 流量区间的流量偏差进行研究, 确保泵能正常工作。实际本文选取的研究流量最小极限点为 200 m^3/h , 最大极限流量为 700 m^3/h , 通过 CFD-DEM 耦合仿真获取了输送 5% 体积浓度的矿浆时的泵内宏观参数与颗粒分布, 以及通过 Fluent 仿真获得的清水数据, 为后续试验提供了理论依据。

图 3 所示为不同流量下输送矿浆和输送清水的轴功率曲线特征。由图 3 可知, 在过泵流量发生 $\pm 50\%$ 变化时, 即在 210~630 m^3/h 流量区间内波动时, 轴功率变化为最大范围为 645~690 kW, 相较于额定功率变化为 $-5.15\% \sim +1.47\%$, 数据表明泵轴功率抗波动性能良好。等功率设计效果较好, 在流量变化较大时不会对电力系统造成负载波动。图 4 所示为不同流量下输送矿浆和输送清水的扬程特征。由图 4 可知, 在过泵流量偏离至 210~630 m^3/h 时, 总扬程变化曲线平稳, 系统不会出现压力突变。并且当流量为 210 m^3/h , 输送矿浆的总扬程为 315 m; 当流量为 630 m^3/h 时, 输送矿浆的总扬程为 250 m, 相较于设计扬程 270 m 偏离为 $-7.5\% \sim +16.7\%$, 系统体现较大的正偏离, 不容易出现欠压, 扬程不足的工况。当流量波动时, 整体系统的供压能力平稳。图 5 所示为不同流量下输送体积浓度为 5% 时矿浆的泵内颗粒分布特征。在图 5(a) 中可以看到额定工况下的输送特征, 泵内颗粒分布输送情况较好, 没有大量的成团回流或堵塞现象。在图 5(b) 可以看到泵当流量减低时, 泵内颗粒输送的特征不明

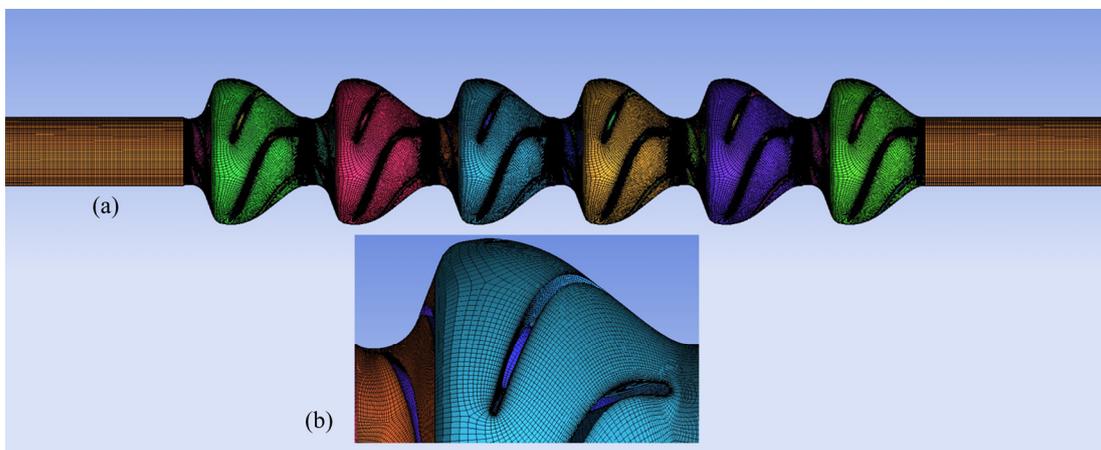


图 2 流体域网格

Fig. 2 Fluid domain grids: (a) Overall view; (b) Local zoom

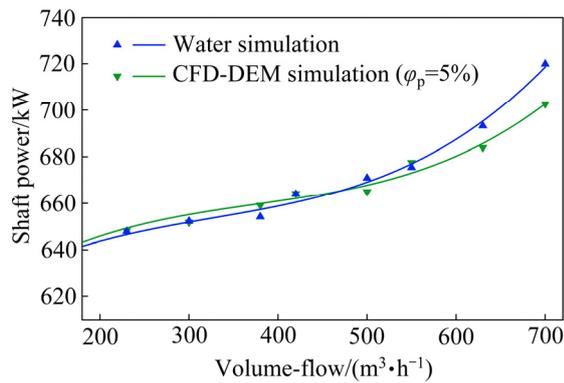


图3 流量对轴功率的影响

Fig. 3 Effect of flow rate on shaft power

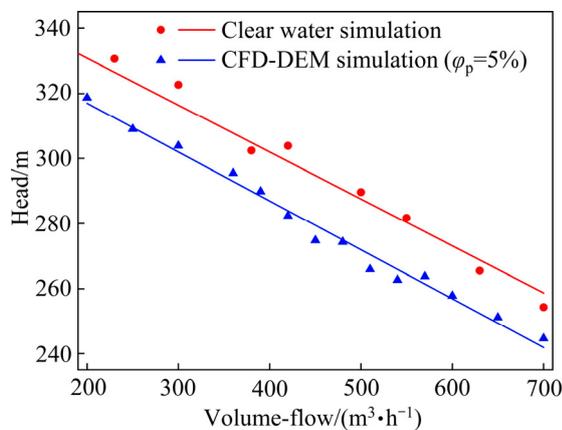


图4 流量对总扬程的影响

Fig. 4 Effect of flow rate on total head

显, 颗粒的速度分布差也较大, 高速颗粒会在短时间降低至低速, 颗粒在泵内的随机运动较多。在图

5(c)可以看到, 泵当流量增大时, 泵内颗粒输送特征较好, 颗粒成颗粒流输送, 呈现“成股”特征, 颗粒的速度变化也更均匀, 在泵内的运动规律性更强, 输送得到较大的改善。总体来说, 在流量变化时, 颗粒均能通过泵成功输送。

2.2 极端大浓度矿浆输送

矿浆浓度是影响输送效率的重要因素。浓度较低时, 提升系统效率低; 浓度过高时, 提升系统容易发生输送堵塞。深海采矿系统的提升系统设计矿浆输送浓度为 5%(ϕ_p), 即颗粒的体积浓度(ϕ_p)为 5%。但是由于海底存在富矿区与贫矿区, 并且在一些极端工况时会出现矿浆浓度过大的情况, 甚至超过 2 倍, 即达到 10%(ϕ_p), 对这些工况的研究可以获得极端工况下的提升系统状态, 了解系统的负载性能冗余。

图 6 所示为额定转速和额定流量时输送不同浓度的矿浆时的泵内颗粒图, 以速度梯度对颗粒进行染色显示。图 6(a)中输送的矿浆体积浓度为 5%, 图 6(b)中输送的矿浆体积浓度为 10%。对比可以发现, 当浓度增大时, 泵内颗粒的输送规律保持基本一致, 颗粒输送的颗粒流更粗, 泵内颗粒分布也随浓度增大变多变密。颗粒的速度变化趋势基本一致, 只是在导叶内的减速更为均匀, 可以看到图 6(b)导叶内的颗粒减速随颗粒流变大而变缓。总体而言, 在颗粒浓度增高至 2 倍额定浓度时, 泵内颗粒

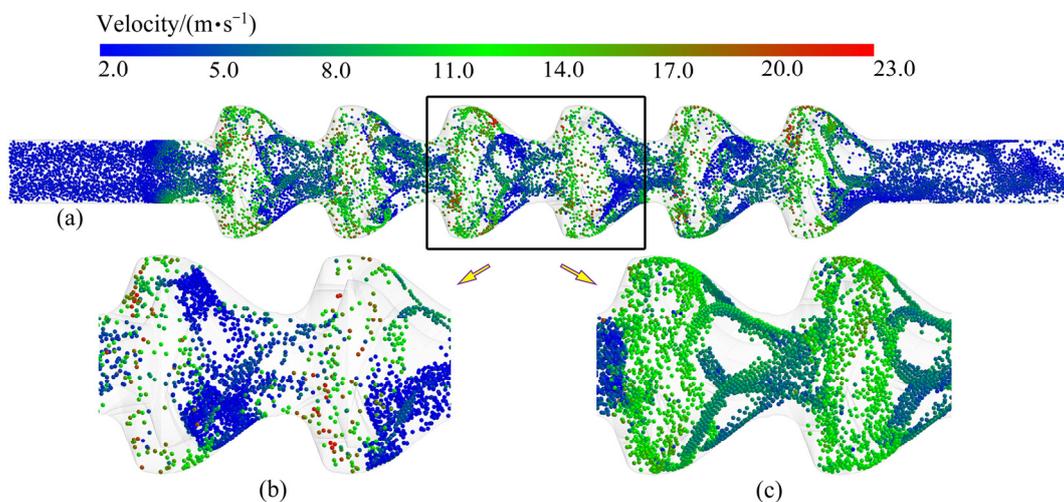


图5 不同流量对颗粒输送的影响

Fig. 5 Effect of flow rate on particle transporting: (a) 420 m³/h; (b) 200 m³/h; (c) 700 m³/h

输送特征仍旧比较稳定, 没有出现输送堵塞现象, 泵的输送特征对浓度变化并不敏感, 体现了较大的冗余量, 可以适应在贫矿区与富矿区交替变化时的矿浆浓度变化。

2.3 极端大粒径颗粒输送

在集矿机工作正常的情况下, 深海采矿提升系统设计最大结核粒径为 20 mm。但是在破碎机失效, 向提升系统输送的颗粒可能会包含极端大粒径的颗粒, 对这类的极端工况展开研究非常有必要。图 7 所示为泵输送颗粒浓度 5% 的矿浆时, 矿浆分别包含粒径 15、20、25、30、35、40 mm 的颗粒质量分数各 10%, 其余 40% 粒径颗粒为 10 mm 粒径, 模拟了在破碎机故障时, 泵输送超过额定最大设计粒

径 100% 时的工况。

通过图 7(a) 可以看到泵内输送稳定, 大颗粒的速度较低, 这与其质量大、惯性大、难以在叶轮内有效加速有关。小颗粒的输送依旧比较稳定, 速度变化趋势比较均匀, 输送特征较为良好。图 7(a) 所示为不同粒径的颗粒在泵内的分布。可以看到不同粒径级别的颗粒分布均匀, 未有出现较大的聚集与回流, 也非发生输送堵塞现象。这些说明了通过放大流量设计法设计的加宽流道的设计时有效的, 不仅达到了 20 mm 的设计指标, 对恶劣的极端工况也有一定的设计冗余量, 可以有效应对一些复杂恶劣的系统非紧急失效, 比如破碎机面板部分破碎齿断裂, 小颗粒黏附聚集成大颗粒, 超硬颗粒破碎不充分等极端恶劣工况。

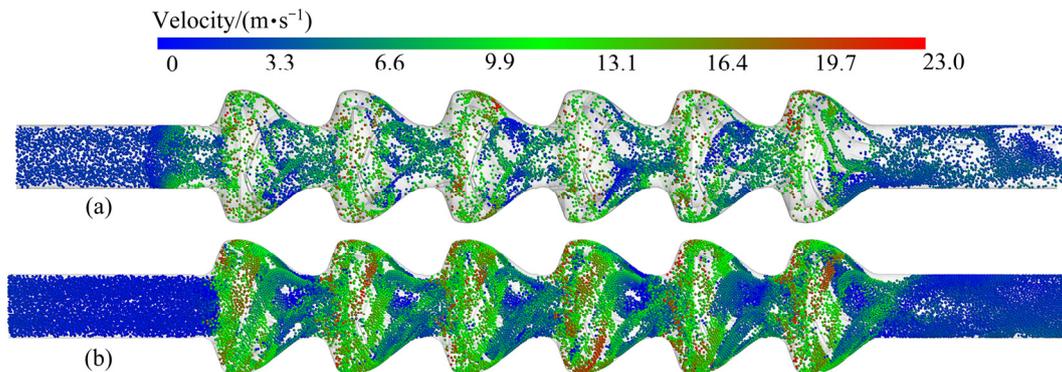


图 6 不同矿浆浓度的颗粒分布

Fig. 6 Particle distribution in pump with different concentrations of slurry: (a) $\phi_p=5\%$; (b) $\phi_p=10\%$

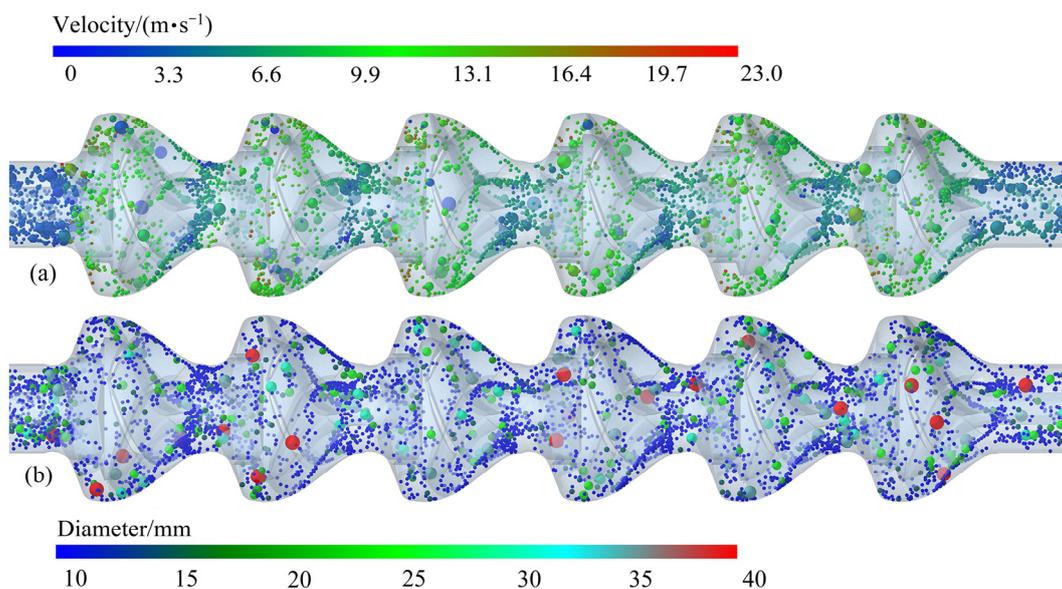


图 7 包含极端大粒径颗粒的矿浆输送的泵内颗粒输送分布

Fig. 7 Particle transport distribution in pump containing extremely large particle size slurry transport: (a) Colored by velocity; (b) Colored by diameter of particles

2.4 紧急停泵回流

考虑到 LI^[27]对一级离心泵的回流堵塞特性进行了模拟仿真,研究了颗粒粒径对回流堵塞的影响。而在多级离心泵中,结核颗粒在泵内回流是经过两类流场的变化:颗粒从提升管道进入泵内流道;颗粒在上级泵内流道落入下一级泵内流道。因此,单级泵的回流堵塞不能完全说明颗粒在泵内的运动行为。考虑进行六级离心泵的全流道仿真模拟,根据试验现场筛分的粒径进行颗粒粒径分布设置,颗粒的粒径分布情况如表3所示。

图8所示为粒径分布在0~20 mm的颗粒在离心泵内的回流堵塞情况。图8(a)所示为仿真进行到25 s时颗粒在泵内的回流情况。从图8(a)可以看出,颗粒泵内各级间的下落速度均为0.454到0.635 m/s,且颗粒并未在泵内流道发生堆积,各级流道的颗粒回流十分顺利。图8(b)所示为仿真进行到50 s时颗粒在泵内的回流状态。对比图8(a)和(b)可知,当颗粒粒径在5~20 mm时,颗粒可以在泵内流道完全流过而不发生堵塞。最后研究泵内颗粒残留

表3 结核颗粒的粒径分布

Table 3 Particle size distribution of nodules

Particle size/mm	Mass fraction/%
5	6.48
5-8	13.25
8-10	62.75
10-13	13.95
13-15	3.33
15-17	0.24

情况可知,除去一两颗颗粒卡死在叶轮的尖角处,没有颗粒残留在泵内,颗粒在泵内的残留质量为0.08 kg。由此可知,六级离心泵在正常工况下运行,即使发生了紧急断电停泵,颗粒回流入泵内流道也不会发生堵塞。

考虑到在实际开采工况中,六级离心泵可能会输送由于采集装置的破碎失效而导致的极端大粒径颗粒,而在这以极端工况下颗粒的回流情况如何是需要进行验证的。根据对5~20 mm颗粒的回流仿真过程的研究发现,颗粒的易堵塞部位一般时发生与管道相连的首级泵内。因为首级泵时最先接触到回流颗粒的泵级,首级泵的颗粒回流速度是有限的,当大量颗粒通过管道落入首级泵中,会导致泵内流道颗粒堆积,造成极高的局部浓度。在计算资源有限的情况下,考虑采用两级泵模型来观察颗粒在泵内的回流堵塞行为。

在对采集装置破碎失效这一极端工况的回流仿真时,对颗粒的粒径分布进行重新设置:粒径10 mm的颗粒占40%,15 mm的占10%,20 mm的占10%,25 mm的占10%,30 mm的占10%,35 mm的占10%,40 mm的占10%。如图9所示是10~40 mm颗粒在泵内的回流情况。

对比图9(a)和(b)可以发现,颗粒在泵内可以顺利过流,而只余少数几颗大颗粒卡死在第二级泵的叶轮尖角处。同时,在观察第二级泵的导叶流道内颗粒的运动行为发现:虽然颗粒在大部分导叶流道内运动情况良好,但是研究其中一个流道时发现,颗粒在流道内的速度基本为0 m/s。由此可以判断

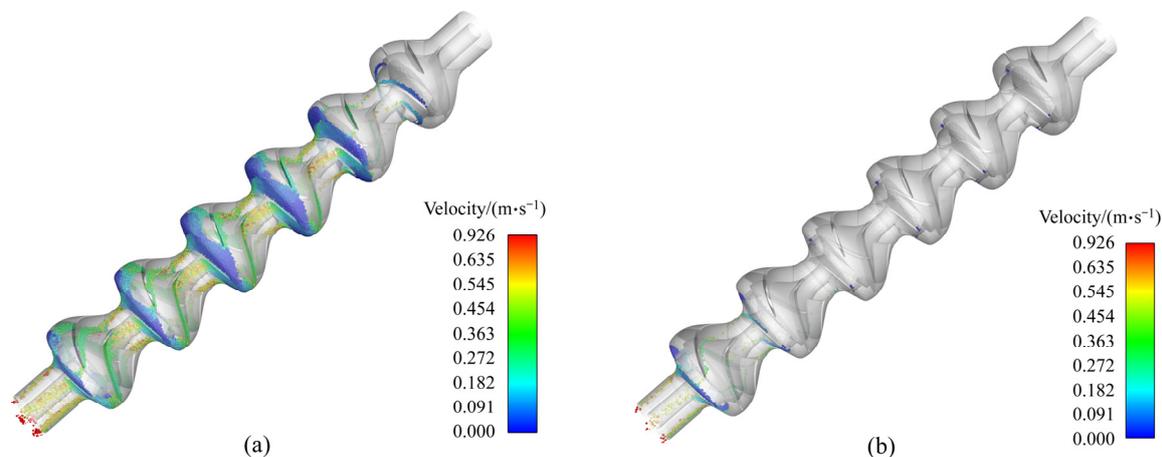


图8 粒径5~20 mm颗粒在泵内的回流情况

Fig. 8 Reflux of particles with size of 5~20 mm in centrifugal pumps: (a) Simulation of particles at 25 s; (b) Simulation of particles at 50 s

出混合颗粒在该流道内发生了堵塞, 颗粒的运动受限导致速度为 0 m/s。当仿真进行到最后时, 颗粒还是完成了回流。因此, 需要继续研究当仿真在继续到 20 s 之后颗粒在泵内的运动状态。图 10(a)所示为仿真运行到 27 s 时的颗粒在第二级泵内堆积堵塞的整体情况。从图 10(a)中可以看出, 颗粒确实在泵内流道发生了较为严重的堵塞。为了更为清楚地区别堵塞流道颗粒的粒径分布, 将颗粒大小以颜色如图 10(b)所示进行了区分: 青色为粒径小于 10 mm 颗粒; 天蓝色为粒径小于 15 mm 颗粒; 蓝色为粒径 20 mm 颗粒; 紫色为粒径 25 mm 颗粒; 淡紫色为粒径小于 30 mm 颗粒; 橙色为粒径小于 35 mm 颗粒; 红色为粒径小于 40 mm 颗粒。观察图中颗粒的堵塞情况可以得出相应的结论: 颗粒在泵内堵塞的机制是较多的大颗

粒堆积在了导叶和叶轮流道的交界处, 导致的上方颗粒无法下落, 最后在泵内流道形成堵塞。而在仿真的最后, 由于下方小颗粒的不断运动, 最后带动大颗粒也进行了运动, 让被堵塞部位恢复通畅, 颗粒最终完成回流。

统计 5~20 mm 颗粒仿真中六级泵的前两级泵的颗粒总质量变化与 10~40 mm 颗粒仿真时两级泵内颗粒总质量的变化情况, 其结果如图 11 所示。从图 11 可以看出, 颗粒粒径较大时会导致泵内颗粒回流速度略微减慢。而粒径 10~40 mm 颗粒的曲线在 27 s 是有一个略微不均匀的波动, 根据前文可知是由于泵内流道发生了轻微堵塞又很快解堵导致的。最后由两条曲线均趋于 0 kg 可知, 在略含有较大颗粒的情况下, 试验用泵仍具有一定的回流能力。

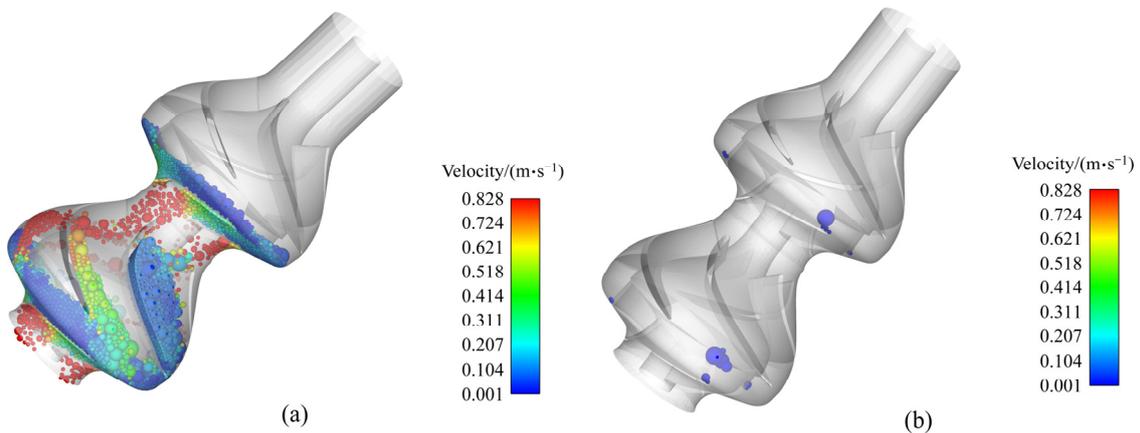


图 9 粒径 10~40 mm 颗粒在泵内的回流情况

Fig. 9 Reflex of particles with size of 10–40 mm in centrifugal pumps: (a) Simulation of particles at 20 s; (b) Simulation of particles at 35 s

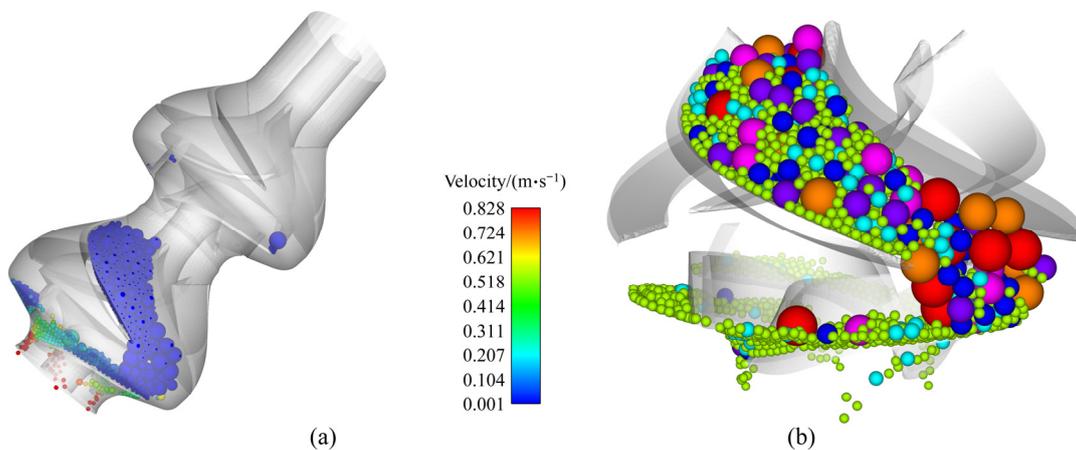


图 10 仿真进行到 27 s 时的颗粒回流情况

Fig. 10 Simulation of particle reflux blockage at 27 s: (a) Overall situation; (b) Details of blockage area

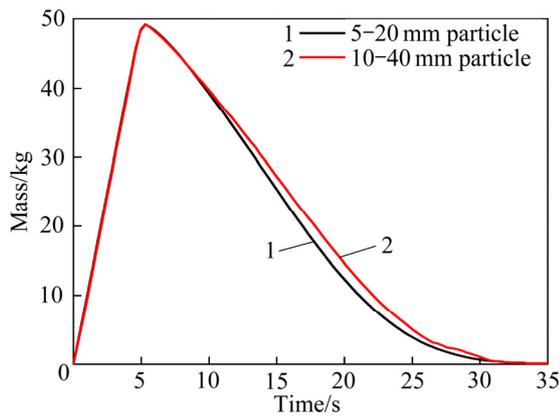


图 11 前两级泵内的颗粒总质量变化

Fig. 11 Total mass variation of particles in first two-stages of pump

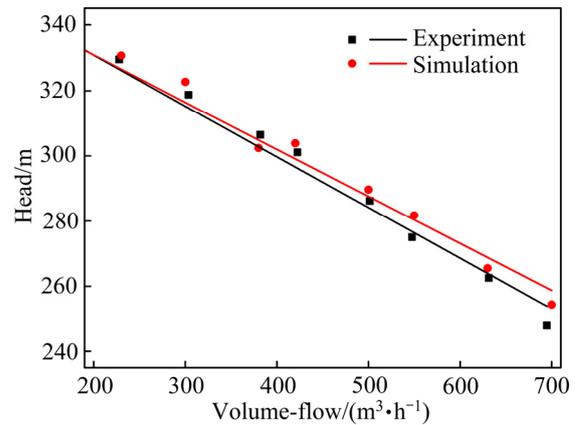


图 12 清水试验与仿真数据扬程对比

Fig. 12 Comparison of head between clear water experiment and simulation data

3 试验验证

3.1 清水试验验证

为验证仿真的准确性，将清水仿真数据与试验数据的总扬程进行对比，其结果如图 12 所示。结果显示仿真结果良好，误差较小，在低流量工况误差在 1%以内；在大流量工况时，拟合数据最大误差约为 2%。考虑到仿真未包含次流场等因素，仿真结果在使用相对较低的计算资源的情况下获得了非常准确的仿真结果。

3.2 矿浆输送实验

为验证 CFD-DEM 耦合仿真的可靠性，在深海矿产资源开发国家重点实验室进行了六级离心泵

矿浆输送试验的水力学试验。获得了输送矿浆时的扬程和流量，再通过 CFD-DEM 耦合仿真对应浓度和流量的工况，对比扬程可以验证其可靠性。试验原理图如图 13 所示，验证结果如表 4 所示。考虑到系统负压有限，两组矿浆试验在 900 r/min 工况下进行，可以看到两组试验与仿真差值最大为 2.04%，与清水试验精度基本一致，验证了仿真具有较高的可信度。

3.3 回流试验验证

在矿浆试验的实验系统上进行调整，将六级离心泵通过起重吊机掉起来进行回流试。其试验系统的如图 14 所示。

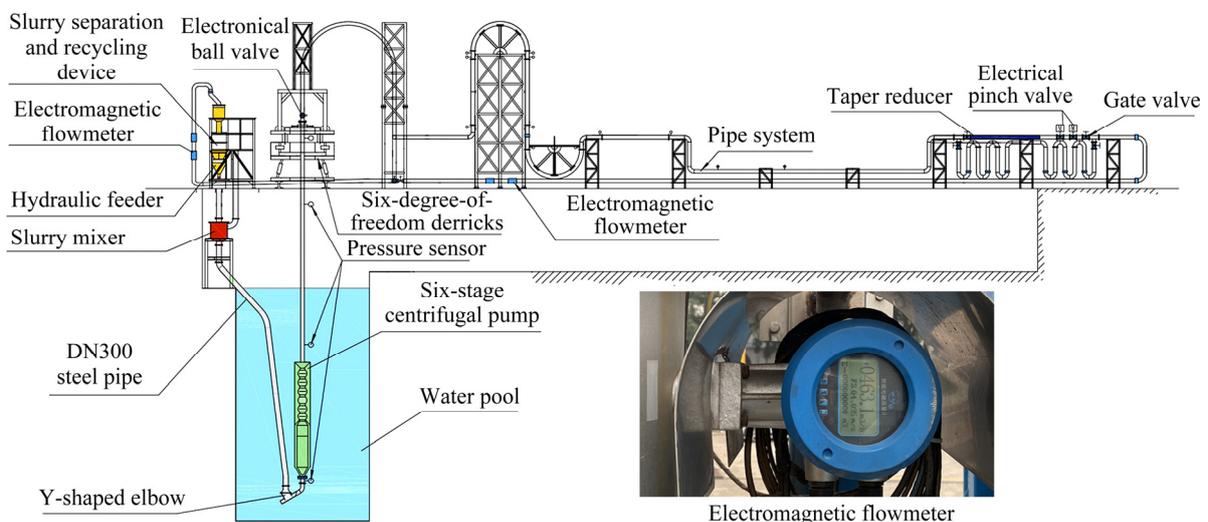


图 13 矿浆试验系统原理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of slurry test system

表 4 矿浆试验与仿真数据对比

Table 4 Important design parameters of six-stage centrifugal pump

Flow rate/(m ³ ·h ⁻¹)	Slurry mass concentration/%	Experimental head/m	Numerical head/m	Error/%
468.31	10.01	97.17	98.24	1.13
425.42	15.92	99.42	101.45	2.04

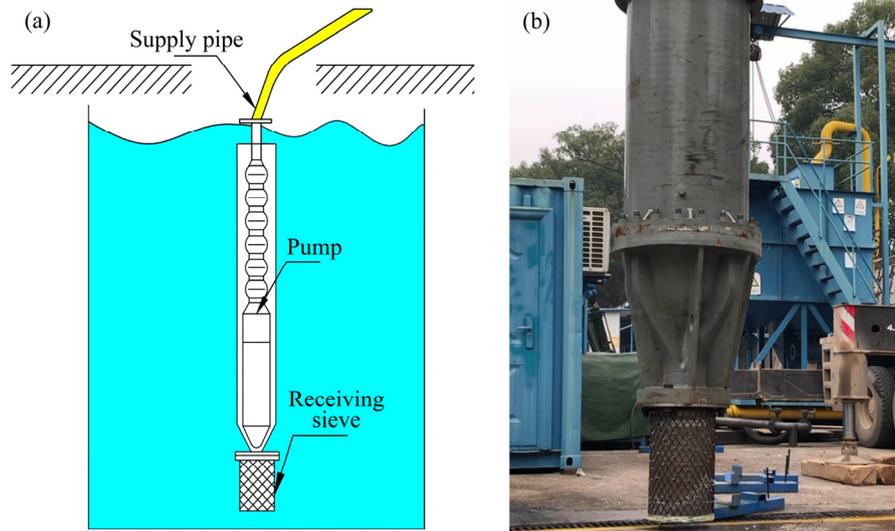


图 14 回流试验系统

Fig. 14 Reflux test systems: (a) Overview of the test system; (b) Field trial diagram

在试验中, 通过给料管进行投料, 将 52.5 kg 的结核颗粒投入六级泵内, 尔后静置 2 min, 待颗粒完全通过泵内流道后, 再使用吊机将泵提起。之后取下泵下方连接的接料网兜进行称取质量, 并记录数据。取下的网兜的总质量为 73.2 kg, 减去网兜的净质量 21.95 kg, 就可以得到回流颗粒质量为 51.25 kg。对比投料前后的颗粒质量就可以得到泵内的回流情况。

对比仿真和试验的颗粒回收率来验证仿真模型的正确性, 其情况如表 5 所示。

由表 5 可知, 仿真和试验所得到的回收率的误差在 2%, 在误差允许范围内。因此, 仿真的结果是可信的, 在一定程度上是能够反映真实的回流情况。

表 5 模拟仿真和试验结果的比较

Table 5 Comparison of simulation situations and experimentation

Result	Total mass/kg	Residual mass/kg	Recovery rate/%
Numerical	50	0.07794	99.84
Experimental	52.5	1.25	97.6

4 结论

1) 在泵的过流流量在额定量±50%变化时, 泵的轴功率变化较小, 等功率设计效果较好, 总扬程变化在可控范围内, 颗粒的输送较为稳定, 未发生输送堵塞现象。

2) 当输送颗粒浓度超过额定体积浓度 5% 的一倍时, 泵仍旧具有良好的输送性能, 泵内输送特征良好, 未发生输送堵塞。

3) 泵输送超过额定最大设计粒径 20 mm 的一倍时, 即输送质量占比为 10% 的 40 mm 颗粒时仍然具有一定的输送能力, 可以应对一些紧急的破碎失效工况。

4) 泵在紧急停泵的极端工况下, 对输送质量占比为 10% 的 40 mm 颗粒时仍旧具备一定的回流能力, 可以在一定程度上保证在颗粒粒径达到 40 mm 时不会发生泵内堵塞。但是值得注意的是, 导叶和叶轮的交界面是最容易发生堵塞的部位, 一旦较多数目的大颗粒在此处堆积, 会很容易造成流道堵塞发生。

REFERENCES

- [1] LIU Lei, YANG Jian-min, LU Hai-ning, et al. Numerical simulations on the motion of a heavy sphere in upward Poiseuille flow[J]. *Ocean Eng*, 2019, 172(1): 245–256.
- [2] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 8–18.
LIU Shao-jun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress of deep-sea mining equipment research and development[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8–18.
- [3] HU Qiong, LI Zou, LÜ Tong, et al. Experimental and numerical investigation on the transport characteristics of particle-fluid mixture in Y-shaped elbow[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(9): 675.
- [4] 黄牧, 石学法, 毕东杰, 等. 深海稀土资源勘查开发研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(10): 2665–2681.
HANG Mu, SHI Xue-fa, BI Dong-jie, et al. Advances on the study of exploration and development of deep-sea rare earth[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(10): 2665–2681.
- [5] 王荣耀, 陈国明, 刘伟, 等. 内波环境下中间仓单体收放过程中的管柱力学分析[J]. *中国有色金属报*, 2021, 31(1): 1–17.
WANG Rong-yao, CHEN Guo-ming, LIU Wei, et al. Mechanical analysis of buffer retrieve/deployment operations considering internal solitary waves[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(1): 1–17.
- [6] KANG Ya-juan, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou, et al. Numerical and experimental investigation of a multistage electric lifting pump for deep-sea mining[C]//*Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE)*. Xiamen: IEEE, 2018: 457–462.
- [7] DAI Yu, XUE Cong, SU Qiao. An integrated dynamic model and optimized fuzzy controller for path tracking of deep-sea mining vehicle[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 249–266.
- [8] DENG Li-wen, HU Qiong, CHEN Jun, et al. Engineering. Particle distribution and motion in six-stage centrifugal pump by means of slurry experiment and CFD-DEM simulation[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(7): 716–738.
- [9] WEN Hao, LIU Shao-jun, ZOU Wei-sheng, et al. Effects of particle diameter on erosion wear characteristic of deep-sea mining pump[C]//*Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. IEEE, Xiamen, 2019: 507–512.
- [10] MILLER K A, THOMPSON K F, JOHNSTON P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4(1): 418–428.
- [11] KANG Ya-juan, LIU Shao-jun, ZOU Wei-sheng, et al. Design and analysis of an innovative deep-sea lifting motor pump[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82(1): 22–31.
- [12] 张宗国, 史秀志, 吝学飞. 基于CFD的充填管网参数优化及输送特性[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(10): 2411–2420.
ZHANG Zong-guo, SHI Xiu-zhi, LIN Xue-fei. Parameters optimisation and transport characteristics of backfilling pipe network based on CFD[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(10): 2411–2420.
- [13] SHAH S, JAIN S, PATEL R, et al. CFD for centrifugal pumps: A review of the state-of-the-art[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 51(7): 15–20.
- [14] 邹伟生, 卢勇, 李哲旻. 深海采矿提升泵的数值模拟分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(6): 59–63.
ZOU Wei-sheng, LU Yong, LI Zhe-huan. Numerical simulation analysis of deep-sea mining lift pump[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2013, 40(6): 59–63.
- [15] 吴波, 严宏志, 徐海良, 等. 渣浆泵内固相颗粒冲蚀特性的数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(1): 124–129.
WU Bo, YAN Hong-zhi, XU Hai-liang, et al. Numerical simulation of the erosion characteristics of solid phase particles in slurry pumps[J]. *Journal of Central South University(Natural Sciences Edition)*, 2012, 43(1): 124–129.
- [16] PAGALTHIVARTHI K, GUPTA P, TYAGI V, et al. CFD prediction of erosion wear in centrifugal slurry pumps for dilute slurry flows[J]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2011, 3(4): 225–245.
- [17] 董喆, 刘少军, 胡小舟, 等. 粗颗粒两相流计算方法研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(3): 110–116.
DONG Zhe, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou, et al. Research on the calculation method of two-phase flow of coarse particles[J]. *Marine Engineering*, 2018, 36(3): 110–116.
- [18] SAFAEI M, MAHIAN O, GAROOSI F, et al. Investigation of micro-and nanosized particle erosion in a 90 pipe bend using a two-phase discrete phase model[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(5): 1–16.
- [19] RASHIDI S, ESFAHANI J A, ELLAHI R. Convective heat transfer and particle motion in an obstructed duct with two side by side obstacles by means of DPM model [J]. *Applied*

- Sciences, 2017, 7(4): 431–445.
- [20] CUNDALL P A, STRACK O D. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.
- [21] CHEN Qian-yi, XIONG Ting, ZHANG Xin-zhou, et al. Study of the hydraulic transport of non-spherical particles in a pipeline based on the CFD-DEM[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 53–69.
- [22] 李亚林. 变曲率流道内固液两相 CFD-DEM 方法及在大型脱硫泵中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- LI Ya-lin. Solid-liquid TWO-phase CFD-DEM method in variable curvature channel and its application in large-scale Desulfurization pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [23] ZHOU Meng-meng, WANG Shuai, KUANG Shi-bo, et al. CFD-DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 893–905.
- [24] KRAVETS B, SCHULZ D, JASEVIČIUS R, et al. Comparison of particle-resolved DNS (PR-DNS) and non-resolved DEM/CFD simulations of flow through homogenous ensembles of fixed spherical and non-spherical particles[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(4): 1170–1195.
- [25] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 3–51.
- [26] SU Xiang-hui, TANG Zhen-ji, LI Yi, et al. Research of particle motion in a two-stage slurry transport pump for deep-ocean mining by the CFD-DEM method[J]. *Energies*, 2020, 13(24): 6711–6730.
- [27] LI Yuan-wen, LIU Shao-jun, HU Xiao-zhou. Research on reflux in deep-sea mining pump based on DEM-CFD[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(6): 744–752.

CFD-DEM coupled simulation and experimental study of deep sea lifting mine pump under extreme working conditions

HU Qiong^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, DENG Li-wen^{1,2}, LIU Shao-jun^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of Deep Sea Mineral Resources Development and Utilization Technology, Changsha 410012, China;

3. Shenzhen Research Institute of Central South University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The deep-sea mining lifting pump is a vital equipment in the deep-sea mining system, whose form is a multi-stage centrifugal pump, which is responsible for lifting the slurry containing coarse particles to the water surface. The internal flow in pump is the complex coarse-seawater two-phase flow, and it is difficult to observe the internal flow characteristics through ordinary tests. Through CFD-DEM coupling simulation, the flow characteristics in the deep-sea lifting electric pump are obtained when the pump is conveying thicker slurry or slurry with extremely big particles, and working under unrated flow rate or when electrical system failed. Experiments with clean water and slurry were carried out to verify the correctness of the simulation. The pump still has good conveying and reflux performance when the flow deviation is 50%, the particle concentration exceeds 100% than the rated one, and the maximum particle size exceeds 100%.

Key words: coupled CFD-DEM simulation; deep-sea mining pump; extreme operating condition; reflux blockage

Foundation item: Projects(2016YFC0304103, 2019YFC0312405) supported by the National Key Research Development Program of China; Project(2021JJ30824) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province; Project(2020GK1020) supported by the Major Science and Technology Program of Hunan Province

Received date: 2021-07-21; **Accepted date:** 2021-08-31

Corresponding author: DENG Li-wen; Tel: +86-13880280823; E-mail: livedeng@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)