



煤炭学报
Journal of China Coal Society
ISSN 0253-9993, CN 11-2190/TD

《煤炭学报》网络首发论文

题目: 煤矿地下水库复杂流场下除氟剂运移沉降机制
作者: 吴敏, 陈冲, 包一翔, 张志军, 王靖宇, 刘德钱, 李井峰, 胡嘉敏, 刘迪, 梁鼎成
DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.WP26.0671
网络首发日期: 2026-08-19
引用格式: 吴敏, 陈冲, 包一翔, 张志军, 王靖宇, 刘德钱, 李井峰, 胡嘉敏, 刘迪, 梁鼎成. 煤矿地下水库复杂流场下除氟剂运移沉降机制[J/OL]. 煤炭学报. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.WP26.0671>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.13225/j.cnki.jccs.WP26.0671

煤矿地下水库复杂流场下除氟剂运移沉降机制

吴敏¹, 陈冲², 包一翔¹, 张志军², 王靖宇¹, 刘德钱³, 李井峰¹, 胡嘉敏¹, 刘迪², 梁鼎成²

(1.煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102299;

2.中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083;

3.安庆师范大学 安徽省先进催化与能源材料重点实验室, 安徽 安庆 246133)

摘要: 针对煤矿地下水库复杂流场中除氟剂颗粒运移规律难以观测及局部淤积严重的技术痛点, 旨在揭示受限空间起伏地形约束下除氟剂的多相流演化规律与流固耦合沉降机制。构建圆柱阵列室内相似模型以模拟煤矿地下水库岩体堆积特征, 利用图像处理提取颗粒分布序列。在 ANSYS Fluent 中建立 EEM 与 Realizable $k-\varepsilon$ 耦合的多相流模型, 基于除氟剂的真实物性参数进行校正并通过余弦相似度验证。在此基础上, 拓展模拟了 20 ~ 60 L/h 进水流速下, 前、中、后部变构型复杂流场的颗粒时空演化。通过实验数据迭代修正流体力学模型, 使模拟与实验结果的余弦相似度由 0.85 提升至 0.977, 显著提高了模型的预测精度与可靠性, 证实了室内相似模型试验与多相流模拟相结合的验证方法具备可靠性。地形主峰阻水致使迎水面颗粒聚集, 背水面因边界层分离形成了低动能“动力学阴影区”, 在 20 L/h 低流速下, 前、中、后部复杂流场模型的底层相对体积分数峰值分别高达 1.30、1.27 和 1.25。且地形主峰越靠后, 上游平稳发展段越长, 越利于长距离安全输运。揭示了复杂起伏地形引发除氟剂局部淤积的动力学机制, 增大流速可有效重构空间动能并冲刷局部淤积区, 当流速由 20 L/h 提升至 60 L/h 时, 全场流速回升至约 2.0×10^{-2} m/s, 中、后部复杂流场模型湍流动能分别稳定在 8.0×10^{-5} m²/s² 和 6.0×10^{-5} m²/s²; 前、中、后部底层最高相对体积分数分别降至 1.19、1.19 和 1.17, 其中中部淤积中心随流速增大向后移动, 实现了除氟剂从局部淤积向均匀运移的转变, 阐明了进水流速对除氟剂分布与局部淤积的改善机制, 并据此提出了基于流场动力学调控的防淤积运行策略, 在实际工程应用中, 应结合地下水库具体的空间构型特征合理调节进水量, 平衡底板清除淤积与控制系统运行能耗之间的关系。

关键词: 煤矿地下水库; 协同除氟; 物理模拟; 计算流体力学; 局部淤积; 流场调控

Study on Transport and Deposition Mechanisms of Defluorination Agents in Coal Mine Underground Reservoirs Based on Physical Experiments and Multi-phase Flow Simulations

WU Min¹, CHEN Chong², BAO Yixiang¹, ZHANG Zhijun², WANG Jingyu¹, LIU Deqian³, LI Jingfeng¹, HU Jiamin¹, LIU Di², LIANG Dingcheng²

(1.State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102299, China;

2.School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3.Anhui Provincial Key Laboratory of Advanced Catalysis and Energy Materials, School of Chemistry and Chemical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: To reveal the multiphase flow evolution and fluid-solid coupling sedimentation mechanisms of defluorination agents constrained by undulating terrains in the confined space of coal mine underground reservoirs, a cylindrical array physical similarity model was constructed to simulate the rock mass accumulation characteristics, and image processing was utilized to extract particle distribution sequences. A multiphase flow model cou-

基金项目:煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室 2024 年度开放基金 (GJNY-24-107)

Open Fund of State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining (GJNY-24-107)

作者简介:吴敏(1988—),女,湖南常德人,高级工程师,博士。E-mail:20051815@ceic.com

通讯作者:梁鼎成(1989—),男,安徽淮南人,副教授,博士生导师。E-mail:liangdc@cumtb.edu.cn

pling the Eulerian-Eulerian Model (EEM) and the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was established in ANSYS Fluent. This model was calibrated using the physical properties of the defluorination agent and validated via cosine similarity. Particle spatiotemporal evolution was simulated under inlet flow rates of 20 to 60 L/h across complex flow fields with front-, middle-, and rear-positioned undulating configurations. Iterative calibration of the computational fluid dynamics (CFD) model with experimental data improved the cosine similarity between the simulated and experimental results from 0.85 to 0.977. The results show that the blocking effect of the primary terrain peak leads to particle accumulation on the windward slope, while boundary layer separation on the leeward slope forms low-kinetic-energy "kinetic shadow zones." At 20 L/h, the peak relative volume fractions at the bottom of the front, middle, and rear complex flow field models are 1.30, 1.27, and 1.25, respectively. A more backward position of the primary terrain peak extends the upstream stable development section, favoring long-distance transport. Increasing the flow rate reconstructs spatial kinetic energy to flush localized siltation zones. When the flow rate is increased from 20 to 60 L/h, the global flow velocity recovers to approximately 2.0×10^{-2} m/s, while the turbulent kinetic energy of the middle and rear models stabilizes at 8.0×10^{-5} m²/s² and 6.0×10^{-5} m²/s², respectively. Correspondingly, the maximum relative volume fractions at the bottom of the front, middle, and rear models decrease to 1.19, 1.19, and 1.17, respectively. The siltation center in the middle-configured model shifts downstream with the increasing flow rate, achieving a transition from localized siltation to uniform transport. Based on these findings, an anti-siltation operation strategy using flow field dynamic control is proposed. In engineering practice, the inlet flow rate should be regulated in combination with the specific spatial configuration of the underground reservoir to balance the trade-off between bottom siltation clearance and system energy consumption.

Key words: Coal mine underground reservoir; Synergistic defluorination; Physical simulation; Computational fluid dynamics; Local deposition; Flow field regulation

0 引言

煤矿地下水库作为我国西部矿区矿井水储存与利用的核心工程设施,其水质的安全与稳定直接关系到区域水资源的高效循环利用^[1-5]。然而,矿井水在流经采空区内垮落岩块空隙时极易导致氟浓度升高,虽然煤矿地下水库具备一定的截留净化能力,却对氟离子的去除十分有限,严重制约了矿井水的规模化回用^[6-18]。相较于传统的地面水处理厂,利用煤矸石等煤基固废制备改性煤基固废除氟剂,并将其直接投加至井下与煤矿地下水库协同除氟,具有工艺简捷、运行成本低以及实现“以废治废”的显著优势^[19-31]。该技术成功应用的核心,在于除氟剂颗粒在水库复杂内部环境中的运移与分布是否可控。由于煤矿地下水库内部存在大量的垮落岩体,流场空间构型错综复杂^[32-35],若除氟剂颗粒群无法在目标水域有效滞留,或在局部区域发生大规模非线性沉积,将直接导致除氟效率骤降及库底严重淤积。因此,解析除氟剂颗粒在水库复杂流场约束下的运移演化规律与沉降机制,是实现改性煤基固废井下协同除氟技术工程应用的关键先决条件^[36-37]。

目前,国内外学者针对煤矿井下协同除氟的

研究,多聚焦于煤基功能材料自身的孔隙重排构筑、表面改性及吸附动力学优化,以期提升材料的选择性与容量^[38-42]。然而,针对除氟剂投加后在煤矿地下水库宏观水体中的运移行为,尤其是在受限空间多变流场下的固液两相流耦合机制,相关研究仍处于起步阶段。由于煤矿地下水库受外部人工坝体及上覆岩层阻隔,其内部的流体动力学演化呈现出典型的“黑盒”特征,难以直接观测。现有研究已广泛采用 MODFLOW、COMSOL 及 Ansys Fluent 等软件开展多尺度模拟研究,宏观维度的数值模型已广泛应用于评估深部含水层的回灌效应,以及复杂地质条件下的溶质迁移特征^[43-47],而针对更为细微的局部尺度,则多采用 CFD-DEM 耦合等方法,揭示煤矿地下水库破碎岩体中污染物的运动规律,并深入探讨受限裂隙内固液两相流的动力学输运机制^[48-49]。然而,现有研究中多数宏观模型将矿井水视为单一流体或均相溶液,忽略了除氟剂颗粒群在重力沉降、相间曳力阻滞及湍流演化等方面的复杂多相流物理过程^[50-53]。此外,常规的计算流体力学(CFD)模拟若缺乏物理实验观测事实的比对验证,其预测的微观流固耦合行为往往存疑,尤其是对于起伏地形和圆柱绕流等复杂尾迹特征的解

析^[54-57]。更重要的是,在实际多相流体系中,除氟剂的宏观淤积行为往往受宏观进水流速与微观局部流场(如涡旋区、湍流动能耗散)的非线性耦合控制,传统手段难以定量剥离主控驱动因素,导致目前对除氟剂运移与沉降行为的动力学驱动机制认识尚不完善。

针对上述研究局限,本研究创新性地提出了一套物理实验观测、CFD 多相流模拟与数据驱动特征提取相融合的综合研究方法。首先,构建了模拟煤矿地下水库内部岩体堆积特征的物理实验装置,引入数字化图像识别技术,将传统的定性观测转化为反映颗粒群相对空间分布演化趋势的离散数据序列。在此基准上,借助 ANSYS Fluent 平台建立了 Euler-Euler Mixture (EEM) 多相流数值模型,通过将模拟获得的颗粒体积分数场演化规律与实验图像中高浓度富集区的宏观动力学行为进行对比验证,确立了模型在捕捉相对时空演化上的可靠性。进一步地,本研究将该验证模型拓展应用于具有变构型起伏特征的复杂受限流场中,探究地形障碍诱发的复杂流线重排与湍流脉动对除氟剂局部沉降行为的驱动机制。在此基础上,通过引入数据驱动的分析手段,试图量化宏观流场条件与微观流体力学变量对底板淤积效应的非线性影响权重。本研究不仅为有效规避煤矿地下水库除氟剂淤积、优化投加工艺提供了关键的理论依据,同时所提出的研究范式也为深部地下空间流固耦合多相流机制的探讨提供了一种全新的切入视角。

1 实验部分

为了解决煤矿地下水库除氟剂运移规律难以直接观测的问题,以及验证模型准确性,本研究设计了一套物理实验与数值模拟深度融合的研究方案。图 1 展示了本研究的技术路线,主要分为实验过程、模拟过程、均匀流场模型的验证与修正、复杂流场模型的应用四个板块。该路线包含了从基础模型和方法的验证,到复杂工况应用的全过程。整个研究首先通过搭建实验装置并结合图像处理技术,将除氟剂的运移过程转化为定量的实验数据,同时构建对应的 CFD 模型,完成网格划分与边界设置。在此基础上,本研究以结构简单的均匀流场模型为切入点,通过余弦相似度等指标,对比实验黑度值与模拟体积分数的相似度,对模型参数进行迭代修正,从而建立实验与模拟的关联,并确保模型的准确性。最后,将这

种研究方法应用于更贴合真实水库的复杂流场模型中,探究空间构型与流速对除氟剂分布的耦合调节机制,通过动力学手段解决除氟剂的淤积问题,对实际工程应用提供科学依据。

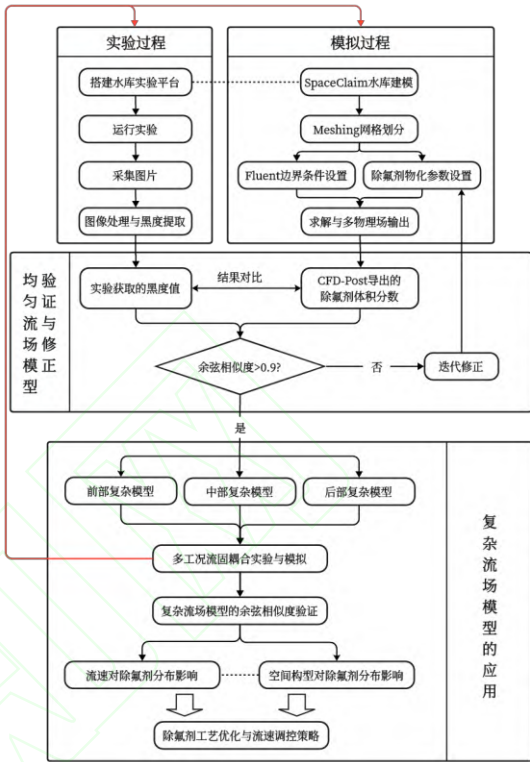


图 1 技术路线图

Fig.1 Technical roadmap

1.1 实验过程

本研究构建了由透明亚克力板制成的水箱模型 (1480 mm × 380 mm × 385 mm), 以模拟煤矿地下水库的流场环境。箱底矩阵式排布了 48 个圆柱体 (直径 99 mm, 高 100 mm), 相邻圆柱体的圆心间距为 107 mm, 旨在近似模拟煤矿地下水库内部岩体的堆积特征与绕流阻力特征^[54-57]。水箱两端各设三个 DN15 八边形接口 (外沿边长 21 mm, 厚度 17 mm), 实验仅启用底端接口进出水, 以构筑单向流场。同时, 箱体底部设置了进水侧高于出水侧 35 mm 的倾斜结构, 以还原实际水库的自然坡降 (正视图及俯视图详见图 2)。本实验所采用的除氟剂为机械化学法制备的改性煤矸石除氟剂^[58]。该除氟剂是通过固相机械化学球磨, 重构原始煤矸石的稳定结晶结构, 使其脱羟基缩聚为富含多铝活性位点的无定形铝硅酸盐骨架网络。真实密度为 2500 kg/m³、中位粒径 (D_{50}) 为 12.4 μm , 其微观吸附机理符合 Langmuir 单层化学吸附模型, 理论最大吸附容量为 10.3 mg/g。实验于室温下开展, 将除氟剂以 5.0 g/L 的浓度均匀

分散于纯水中配置成实验流体，并通过阀门系统维持 16 L/h 的恒定进水流速。在实验运行过程中，出水侧流量通过调节阀与初始设定的进水流量保持严格一致，确保出水流速条件与进水边界及数值模拟的自由出流条件始终保持一致，使模型箱内的蓄水液面高度在单向流场构筑过程中始终维持恒定不变。5.0 g/L 的投加浓度源自神东矿区现场 1 ~ 2 t/h 规模短程除氟工艺中试的工业优化数值，用以在模型中高保真还原真实工程的颗粒体积分数与流场特征。为还原水库真实的蓄水状态并建立稳定的初始流场，注入除氟剂前先向水箱预注纯水，且设定液位高于底部圆柱体群。实验启动后，在恒定光照水平与固定拍摄参数的条件下，以 30 min 为时间步长，对水箱内流场及除氟剂的动态运移与沉降过程进行连续图像采集。采集的图像基于 Python（调用 OpenCV 库）自主开发的程序进行量化分析。首先提取原图的像素黑度值，并依据圆柱群边界对目标区域实施透视变换校正，随后以圆柱体为空间参照系，将分析区域离散为若干网格单元。如图 2 所示，通过计算各单元内所有像素黑度值的几何平均值，提取出具有代表性的特征黑度点，并将其与水箱物理坐标精准映射。最终，利用该空间黑度序列定量表征除氟剂浓度的相对分布，为后续数值模拟的准确性验证提供实验基准。

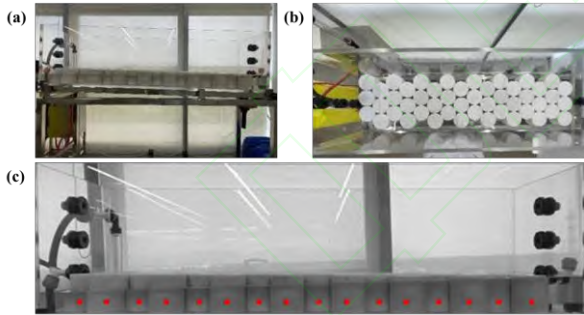


图 2 (a) 水体流场模拟实验装置正视图; (b) 水体流场模拟实验装置俯视图; (c) 采集图片分析

Fig.2 (a) Front view of the water flow field simulation experimental apparatus; (b) Top view of the water flow field simulation experimental apparatus; (c) Analysis of collected images

1.2 模拟计算

数值模型借助 ANSYS SpaceClaim 软件构建，严格遵循 1.1 节所述实验装置的物理尺寸，精准复现了包含水箱、圆柱阵列及进出口在内的复杂空间结构（图 3a）。网格离散化过程借助 ANSYS Meshing 软件完成（图 3b），选用非结构化网格方案。针对流速梯度较大的进出口区域实施了局部

加密处理，并在气液交界的自由液面处设置边界层膨胀与网格细化，全场网格单元尺寸设定为 30 mm，生成的网格节点数为 611,479，单元总数为 2,947,195。网格质量评估结果显示，平均单元质量大于 0.8，正交质量优于 0.75，纵横比控制在 9 以内且最大偏度低于 0.7，良好的网格指标确保了数值计算的收敛性与后续模拟结果的可靠性。

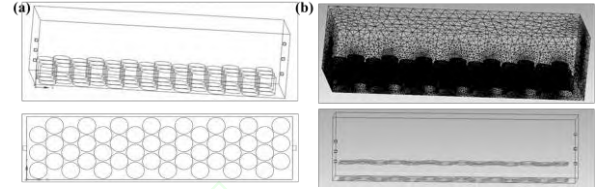


图 3 (a) SpaceClaim 建模; (b) Meshing 网格划分

Fig.3 (a) SpaceClaim modeling; (b) Meshing

针对煤矿地下水库中除氟剂颗粒在受限流场内的运移过程，考虑到颗粒群与连续水相间存在的相对滑移及固液耦合作用，本研究构建了 EEM 多相流模型，并结合雷诺平均纳维-斯托克斯（RANS）方程与 Realizable k-ε 湍流模型，以模拟多相混合流体的非线性输运与动力学演化行为。EEM 模型通过联立求解混合相的连续性方程、动量方程以及离散相（除氟剂）的体积分数方程来描述多相流动^[50-53]。混合相的连续性方程可表示为：

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

式中， $\mathbf{v}_m$ 为质量平均混合速度，m/s； ρ_m 为混合相密度，kg/m³。

混合相动量方程由各相动量方程求和得到，其表达式为：

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) \right] + \rho_m \mathbf{g} + \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_{dr,i} \mathbf{v}_{dr,i} \right) \quad (2)$$

式中， p 为静压，Pa； μ_m 为混合相动力粘度，kg/(m·s)； $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量，m/s²； α_i 和 ρ_i 分别为第 i 相的体积分数与密度； $\mathbf{v}_{dr,i}$ 为第 i 相的漂移速度矢量，m/s；方程右侧最后一项为漂移应力（Drift Stress）项，用于表征颗粒相在混合相中的相对滑移。

为了追踪除氟剂在水体中的分布状态，模型求解除氟剂颗粒相（记为 p 相）的体积分数连续性方程：

$$\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) \quad (3)$$

该方程右侧项直接决定了除氟剂因重力和电力作用产生的沉降与富集行为。

在湍流模型方面, 选用 Realizable k- ε 湍流模型, 其方程如式 4 所示。该模型是在标准 k- ε 模型基础之上, 对湍流动力粘度计算公式和耗散率输运方程做了改进, 保证了雷诺应力的数学约束, 能给出更符合物理实际的预测结果, 并且相较于 SST k- ω 模型, 可以呈现出良好的收敛性和计算效率, 并且可在保证计算精度的前提下, 兼顾求解的稳定性与经济性。

$$\nabla \cdot (\rho_m k \mathbf{v}_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho_m \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho_m \varepsilon \mathbf{v}_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho_m C_1 S \varepsilon - \rho_m C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5)$$

且其中湍流动力粘度系数计算及辅助常数

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (6)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (8)$$

式中, k 为湍流动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; μ_t 为湍流动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; ν 为流体运动粘度, m^2/s ; S_{ij} 为平均应变率张量; G_k 是因平均速度梯度而产生的湍流动能生成项; G_b 是由浮力引发的湍流动能生成项; Y_M 表示可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的贡献; C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 的湍流普朗特数。

数值模拟借助 Ansys Fluent 平台开展, 计算域内涉及气、液、固三相物质的耦合输运, 其中水相设定为连续介质 (密度 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, 动力粘度 $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$), 除氟剂设定为离散颗粒相 (密度 $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 动力粘度 $1.72 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$), 气相 (密度 $1.225 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$, 动力粘度 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。多相流计算选用 EEM 模型, 并耦合 Realizable k- ε 湍流模型, 相间动量传递与流固耦合采用 Schiller-Naumann 曳力模型进行表征。边界条件严格对标物理实验的实际运行参数, 水箱外壳内壁及内部圆柱体阵列表面均设定为固定壁面, 进水口配置为质量流量入口, 其具体输入通量与 1.1 节中所述的物理实验流速保持严格一致。在数值求解方案上, 选用基于压

力 (Pressure-based) 的稳态求解器, 并采用 SIMPLE 算法实现压力与速度的计算。为兼顾计算精度与收敛稳定性, 空间梯度离散采用基于单元的最小二乘法 (Least Squares Cell Based), 并且动量、体积分数、湍流动能及其耗散率等核心物理量的离散, 均统一采用一阶迎风格式 (First Order Upwind)。该离散策略能够有效抑制高阶格式在复杂流场中可能引发的数值震荡, 从而增强多相流计算过程的稳定性与最终结果的收敛性。

1.3 复杂流场模型的应用

在验证并修正均匀流场模型的基础上, 为了模拟真实煤矿地下水库中的非均匀、起伏多变的地形特征, 探究不同空间构型对流场及除氟剂运移规律的影响, 本研究通过构建一套完善的对比体系, 将实验与模拟结合的方法进一步应用于更复杂的复杂流场模型中。该系列模型在继承基础水箱尺寸与边界条件的前提下, 对内部圆柱体阵列的高度分布进行了空间拓扑设计 (如图 4 所示)。具体而言, 通过将圆柱高度在 50 mm 至 230 mm 区间内进行连续梯度配置, 构筑了三种具有差异化起伏特征的空间构型, 前部、中部和后部复杂地形模型, 其地形最高峰分别位于水箱总长的约 $1/4$ 、 $1/2$ 和 $3/4$ 处, 其中后部复杂流场模型实验装置如图 5 所示。这种非均匀的障碍物矩阵能够高保真地复现真实煤矿地下水库的复杂岩体堆积地形, 从而在计算域内激发出更具挑战性的三维绕流与界面演化环境。

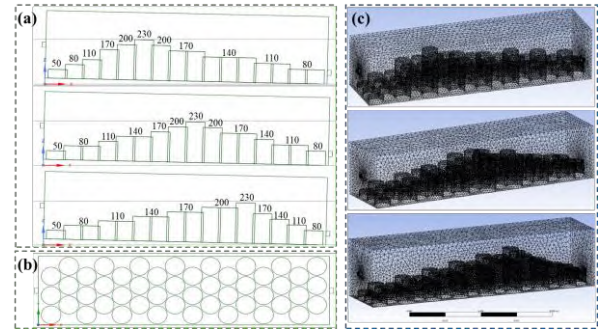


图 4 (a) 复杂流场模型建模; (b) 复杂流场模型俯视图; (c) 复杂流场模型网格划分

Fig.4 (a) Modeling of complex flow field model; (b) Top view of complex flow field model; (c) Meshing of complex flow field model

为探究水动力条件与空间构型对除氟剂时空运移的耦合影响机制, 本研究设计了多工况交叉实验方案, 在维持除氟剂初始浓度与流体物性恒定的条件下, 针对上述三种变构型地形, 分别设定 $20 \text{ L}/\text{h}$ 、 $40 \text{ L}/\text{h}$ 和 $60 \text{ L}/\text{h}$ 三个梯度的进水流速, 共构建 9 组核心实验。在数值计算方面, 复杂流

场模型沿用前期校准的多相流参数，开展稳态求解。前期的基准实验表明，系统运行至 120 min 时内部流场与浓度分布已达到宏观稳态。据此，本阶段 9 组实验的数据采集与后处理流程均与前期保持一致，在恒定光照环境下，依托相同的图像采集系统，对 0 ~ 120 min 运行周期内的关键时间节点（0、5、10、20、30、40、50、60、75、90、105 及 120 min）进行定点连续追踪。所得图像序列沿用标准化的处理，涵盖白平衡校准、黑度特征提取、透视变换校正、目标域分割及黑度均值量化等算法步骤，以此确保数据的绝对可比性与量化精度。



图 5 后部复杂流场模型实验示意图

Fig.5 Experimental schematic diagram of the rear complex flow field model

2 结果与讨论

2.1 均匀流场宏观演化特征验证与多相流参数修正

由于煤矿地下水库受限空间内流场具有典型的黑盒特征，单纯的数值模拟极易因物性参数的简化和边界条件的理想化而偏离真实工况。为了构建具有高保真度的 CFD 预测模型，本节以结构规则的均匀流场为基准对照组，通过提取实验图像与模拟结果中的无量纲宏观特征，对模型进行物理校准。

在初步验证阶段，本研究分别提取了实验侧面图像（图 6a）特征采样路径上的灰度/黑度像素演化曲线，以及初始 CFD 模型在相同空间路径下的颗粒体积分数分布曲线（图 6c）。考虑到光学透射衰减与流体力学绝对变量在量纲上的差异，本研究对两组数据进行了极大极小归一化（Min-Max Normalization）处理，旨在剥离绝对数值的干扰，聚焦于颗粒群相对空间分布与沉降富集行为的宏观动力学演化趋势。

为了量化两组归一化曲线的空间演化相似度与相对偏差，引入了余弦相似度（见式 9）与平均绝对误差（MAE，见式 10）。初始对比结果显示，两组曲线的总体演化趋势大致相符（余弦相似度为 0.85）。然而，分区段计算 MAE 表明，在水箱后半段（稳定运移区），实验与模拟的相对偏

差极小（归一化 MAE 为 0.0637）；但在进水端的前半段（扰动沉降区），偏差显著增大（归一化 MAE 达 0.2256）。结合流场可视化结果可知，初始 CFD 模型（图 6b）预测除氟剂进入水箱后，会在入水口附近发生非自然的、不连续的大规模骤降；而实验图像（图 6a）则清晰地显示出颗粒群沿水流方向呈现连贯、平滑的扩散演化特征。

$$S_{\cos} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}} \quad (9)$$

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (10)$$

式中， X_i 与 Y_i 分别代表对应空间节点 i 处，实验获取的归一化黑度特征值与 CFD 模拟提取的归一化体积分数值； n 为采样的空间节点总数。

上述空间分布演化趋势的显著背离，本质上源于初始 EEM 多相流模型中连续性方程漂移通量项 $\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p})$ 的计算偏差。该项高度依赖于离散相颗粒重力与连续相流体曳力间的强耦合博弈。初始模型对除氟剂物性参数的理想化设置，未能真实反映其实际的物理状态。常规煤矸石基固体废弃物几乎全部富含硅、铝组分，这类硅铝基材料经过改性后，往往具有相对致密的骨架结构与较高的真密度^[32-38]。因此，为了提高 Schiller-Naumann 曳力模型与重力沉降推演的精确度，本研究以材料的真实物理特性为基础对物性参数进行了系统修正：将除氟剂颗粒相密度提升修正为 2500 kg/m³，表面张力系数校正为 72.8 mN/m，水相动力粘度微调为 2.2655×10^{-3} kg/(m s)，并设定入口湍流强度为 5%，同时启用了曲率校正以捕捉潜在的微尺度涡流。此外，通过观测确认液面波动对底部主流区颗粒运移的影响可忽略不计后，本研究引入了刚性盖假定（Rigid Lid Assumption），去除了上方气相区域对计算域的数值耗散干扰，使模型求解更聚焦于核心固液多相流区域。这种通过精细物理假定与实测物性参数对计算域实施边界修正的做法，符合 Van Hoecke 等^[50]与 Garcia-Villalba 等^[51]关于多相受限流体中必须严密校准微尺度滑移边界以抑制数值耗散的研究结论。

对比修正物理参数后的模拟与实验演化数据（图 6f）可知，两者的归一化演化曲线在整体衰减趋势与局部浓度起伏上实现了高度契合，余弦相似度大幅跃升至 0.977。修正后的 CFD 水相体

积分数云图（图 6e）成功消除了前段异常的沉降骤减现象，精准复现了除氟剂颗粒群在均匀流场中连贯扩散的真实物理图像（图 6d）。需要说明的是，由于初始模型采用理想纯水粘度参数，其模拟的定常流场在精细度上较适用于对标物理实验运行中期的特定阶段（图 6a，拍摄于 120 min）；而在引入实测的动力粘度并校准颗粒真密度后，高保真稳态模拟（图 6e）则精准对接了物理实验中流场充分发育、进入长期动态平衡的最终稳态时刻（图 6d，拍摄于 240 min）。这一基于“实验

数据驱动-模型参数迭代校准”的闭环互证范式，有力响应了 Marcato 等^[49]提出的耦合物理观测调校计算工作流、以实现颗粒高保真输运预测的理念。这一验证过程不仅证实了“归一化相对趋势对比”方法在评估宏观动力学行为上的有效性，更确保了经除氟剂真实性修正后的 CFD 多相流模型具备了极高的预测可靠性，为后续深入探究复杂变构型流场下的非线性动力学淤积机制奠定了坚实的模型基准。

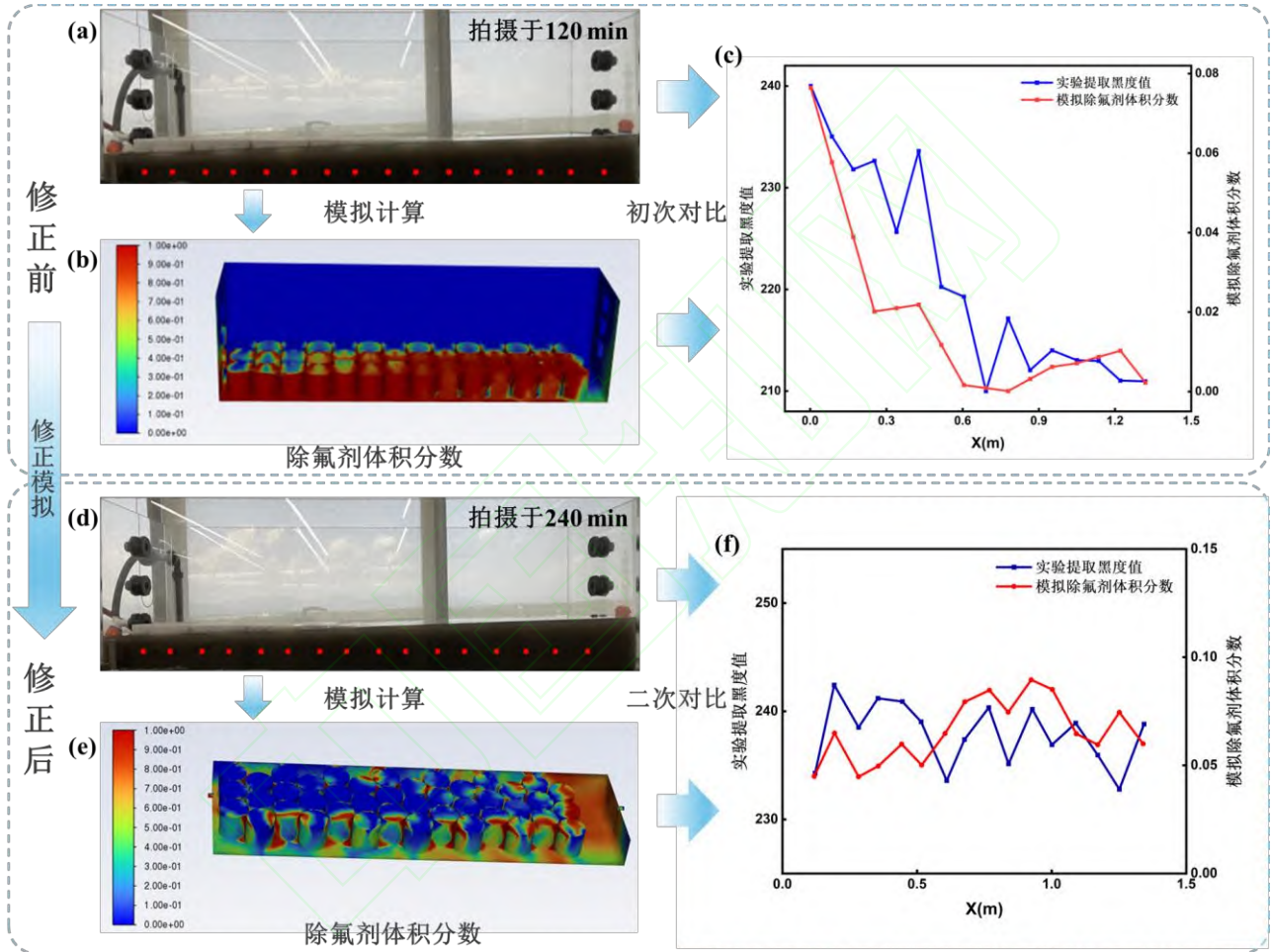


图 6 (a) 实验初步对比照片; (b) 修正前水相体积分分数分布云图; (c) 修正前模拟和试验结果对比; (d) 实验最终对比照片 (e) 修正后水相体积分分数分布云图; (f) 修正后模拟和试验结果对比

Fig.6 (a) Initial experimental comparison photograph; (b) Contour map of water phase volume fraction distribution before correction; (c) Comparison between simulation and experimental results before correction; (d) Final experimental comparison photograph; (e) Contour map of water phase volume fraction distribution after correction; (f) Comparison between simulation and experimental results after correction

2.2 复杂流场模型验证与空间构型影响分析

通过 2.1 节中基于除氟剂真实性参数的严格校准，本研究已确立了 CFD 多相流模型在捕捉除氟剂颗粒群宏观动力学行为上的高保真度。然而，真实煤矿地下水库内部多由坍塌岩体构成，

具有显著的非均匀起伏特征^[6-7]。为了探究更具复杂性的地形环境对除氟剂运移的扰动机制，本研究将验证后的 CFD 模型拓展至三种变构型复杂流场（分别将地形最高峰置于水箱的前部、中部和后部）中。结合图 7 的实验图像与模拟云图可知，在受限起伏流场中，CFD 模拟获取的除氟剂空间演化趋势与实验观测到的富集区分布高度契合。

流场达到稳态后，除氟剂的分布以最高峰圆柱为界呈现强烈的空间异质性：高峰迎水面发生大量颗粒聚集，而越峰后受地形屏蔽影响，分布逐渐变得稀疏且沿水流方向呈现下降趋势。为进一步量化验证模型的准确性，本研究分别在装置侧面 50 mm、80 mm、110 mm、140 mm 四个高度设置特征对比线（Line 1 - 4），以全面覆盖除氟剂在水箱垂直空间上的分布。其中，高度 50 mm 的 Line

1 处于底层流域，主导反映颗粒的沉降淤积特征；高度 140 mm 的 Line 4 处于高层流域，反映颗粒的主流悬浮稳定性。计算结果表明，无论是反映底层沉降还是高层悬浮的演化曲线，模拟与实验的余弦相似度均维持在较高水平，普遍大于 0.82。这充分证明，修正后的 CFD 模型在跨构型、非均匀流场中依然具备可靠的预测能力，为透视颗粒沉降的底层物理机制奠定了可信基准。

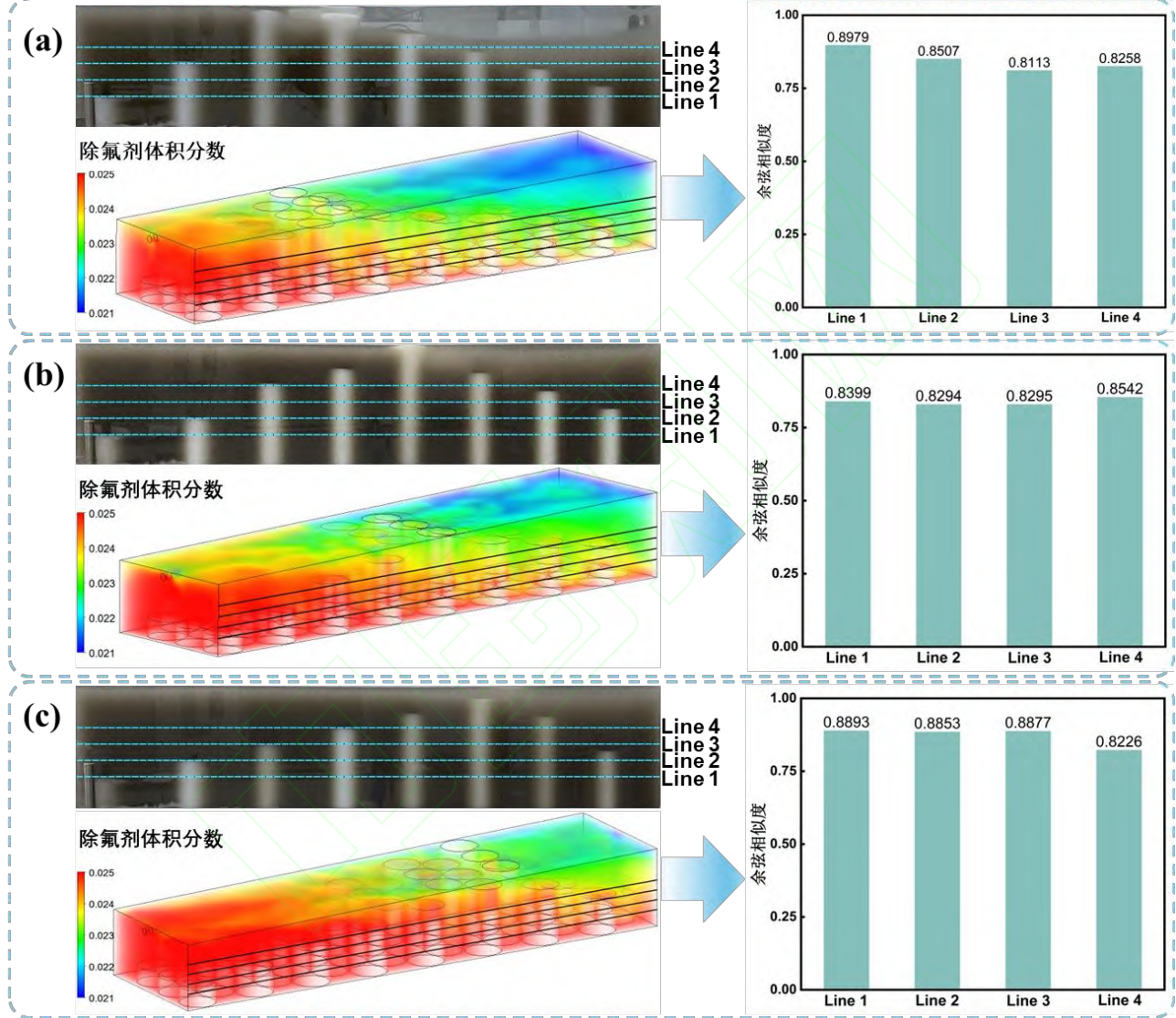


图7 实验与模拟结果对比：(a) 前部复杂流场模型；(b) 中部复杂流场模型；(c) 后部复杂流场模型

Fig.7 Comparison of experimental and simulation results: (a) Front complex flow field model; (b) Middle complex flow field model; (c) Rear complex flow field model

在确立预测模型准确性的基础上，本研究进一步提取了物理实验难以直接测量的微观流体力学变量，以揭示复杂多相流内部的动力学耦合机制。通过对前部复杂流场模型的体积分数、速度及湍流动能云图（图 8a - c）的联合剖析，清晰揭示了除氟剂颗粒在起伏地形约束下的多物理场耦合演化规律。在流体进入水域初期，由于入水口

位于流域高层，附近区域维持着较高的流体速度（约 $2.0 \times 10^{-2} \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ ）与强烈的湍流动能（约 $1.2 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ）。这种高能环境为除氟剂颗粒提供了充足的初始对流动能，使其能够有效克服重力保持悬浮。随着流体向最高峰推进，进入迎水面流域，连续升高的圆柱体障碍物迫使流道逐渐变窄，流体与物理边界发生剧烈

的动能交换。此时区域速度降至 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右,但湍流动能在高峰前水域内稳定维持在 $4.0 \times 10^{-5} \sim 6.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。这种相对稳定的湍流脉动支撑药剂稳步向流场后方推进,并在高峰前区域形成了体积分数高达 $0.024 \sim 0.025$ 的红色高浓度富集区。然而,当流体越过水箱总长 $1/4$ 位置的最高峰后,局部沉降机制发生剧变。流场空间骤然扩大导致流体发生边界层分离,加之高峰前的动能损耗,使得背水面区域形成大尺度的动力学阴影区^[54-57]。这一由于流道截面突变诱发边界层分离并形成低能尾迹涡旋的动力学特征,在童晓剑^[55]与邢鹏飞等^[56]关于低雷诺数圆柱绕流尾迹场特性的研究中得到了充分的理论证实。速度云图显示,流体越峰后的速度由峰顶的 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 骤降至 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$,降幅高达 50%;同时,湍流动能也急剧跌至约 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的低位(云图呈深蓝色分布)。在此低能耗散区内,颗粒群的运移在垂直空间上出现显著分化:高层区域因缺乏持续的上升拽力,体积分数显著下降了约 8.4%;而底层背水面产生的涡旋则引发了颗粒沿水流方向的缓慢沉降,导致除氟剂在背水面局部发生阶梯式沉积,体积分数跃升至 0.024。这一过程深刻揭示了主峰的阻水作用迫使颗粒从高层悬浮急剧向底部沉积转变。随着流体向约 $3/4$ 位置处的中层出口运移,由于圆柱高度下降后再次在出口变窄,流体汇聚产生收缩效应,速度回升至 $2.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$,湍流动能相较高峰后区域提升了约 50%。但此时体积分数云图在出口上方依然呈现低值蓝色(仅为 0.021),这表明绝大部分颗粒已被前端地形拦截或在背水面沉积,导致后方悬浮颗粒稀疏。三场变量的同步演化确凿地证明:速度场的空间变异主导了湍流动能的强弱分布,两者共同打破了颗粒的受力平衡,最终宏观反映在体积分数的变化中。

在对前部复杂流场模型进行深度剖析的基础上,本研究进一步将中部和后部复杂流场模型在相同流速工况下的稳态结果进行了横向对比,以探究宏观空间构型对流场动力学及除氟剂输运格局的调控规律。从体积分数云图(图 8a、d、g)的宏观分布来看,中部与后部复杂流场模型在基本形态上与前部复杂流场模型高度一致,均以最高峰为分水岭。但值得注意的是,后部复杂流场模型在高峰前维持的红色高浓度区域最为广阔,中部次之,前部最小。这一现象直观说明了高峰位置对高浓度颗粒运移长度的绝对控制作用:当

高峰位置后移时,主导地形升高的坡度变缓,流体拥有了更长距离的平稳运移路径,使得颗粒能够更深远地向后方输运。微观流体力学稳态特征进一步印证了该机制。观察湍流动能云图(图 8b、e、h)发现,由前部至后部复杂流场模型,全场湍流动能的颜色梯度显著减小,青绿色波动区域逐步缩小,整体分布趋于高度均匀并维持在稳定低位,表明高峰位置后移极大有利于流场动力的稳定。在前部复杂流场模型中,急剧升高的地形导致入水高动能流体未充分扩散便受到强烈阻挡,剧烈撞击增大了局部湍流耗散;而高峰后移使得流体在遇阻前获得了充足缓冲空间,湍流变化更为平稳。速度云图(图 8c、f、i)同样支撑了该观点:从前部至后部复杂流场模型,流场内部的速度梯度变化明显减弱。在中部复杂流场模型中,速度稳定在 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右;而在后部复杂流场模型中,底层与高层无阻挡区域均呈现出均匀的浅蓝色分布,流体在圆柱缝隙间的速度场更加平稳。

综上所述,本节全面验证了复杂流场模型的可靠性,并通过多物理场云图的深度耦合分析,揭示了空间构型对除氟剂运移与分布的底层调控规律。高峰位置越靠后,流场速度梯度与湍流动能波动越小,除氟剂凭借平稳流场获得的高能输运距离越长,流场整体动力学稳定性显著提升。同时,体积分数云图也证实,流体越峰后的动能衰减必将导致颗粒在背水面发生阶梯式死区沉积。这些微观规律的发现,为地下水库除氟工艺的优化提供了重要启示:在地形无法改变的前提下,精准识别并利用空间构型的平稳流域作为药剂投加点,可极大延长除氟剂的有效反应距离,减少因过早阻碍导致的无效淤积。尽管本模型将真实的垮落岩体等效简化为了实体圆柱阵列,但其揭示的流速与动能场空间变异控制颗粒受力平衡、主导底层沉积的物理本质,与蒋斌斌等^[10]和 Zhang 等^[32]探究破碎岩体网络中悬浮物的宏观迁移、拦截与截留机制具有内在的科学连贯性。然而,在不可避免的局部沉积关键区域内,仅靠优化投加点仍有局限。既然无法改变水库的底板空间构型,那么在既定地形障碍下,能否通过主动调节进水流速这一水力学手段,来重构流场的动能分布、冲刷并突破地形带来的输运瓶颈,以及不同进水流速对除氟剂浓度空间分布的影响机制,后续本研究将针对这些问题展开深度解析。

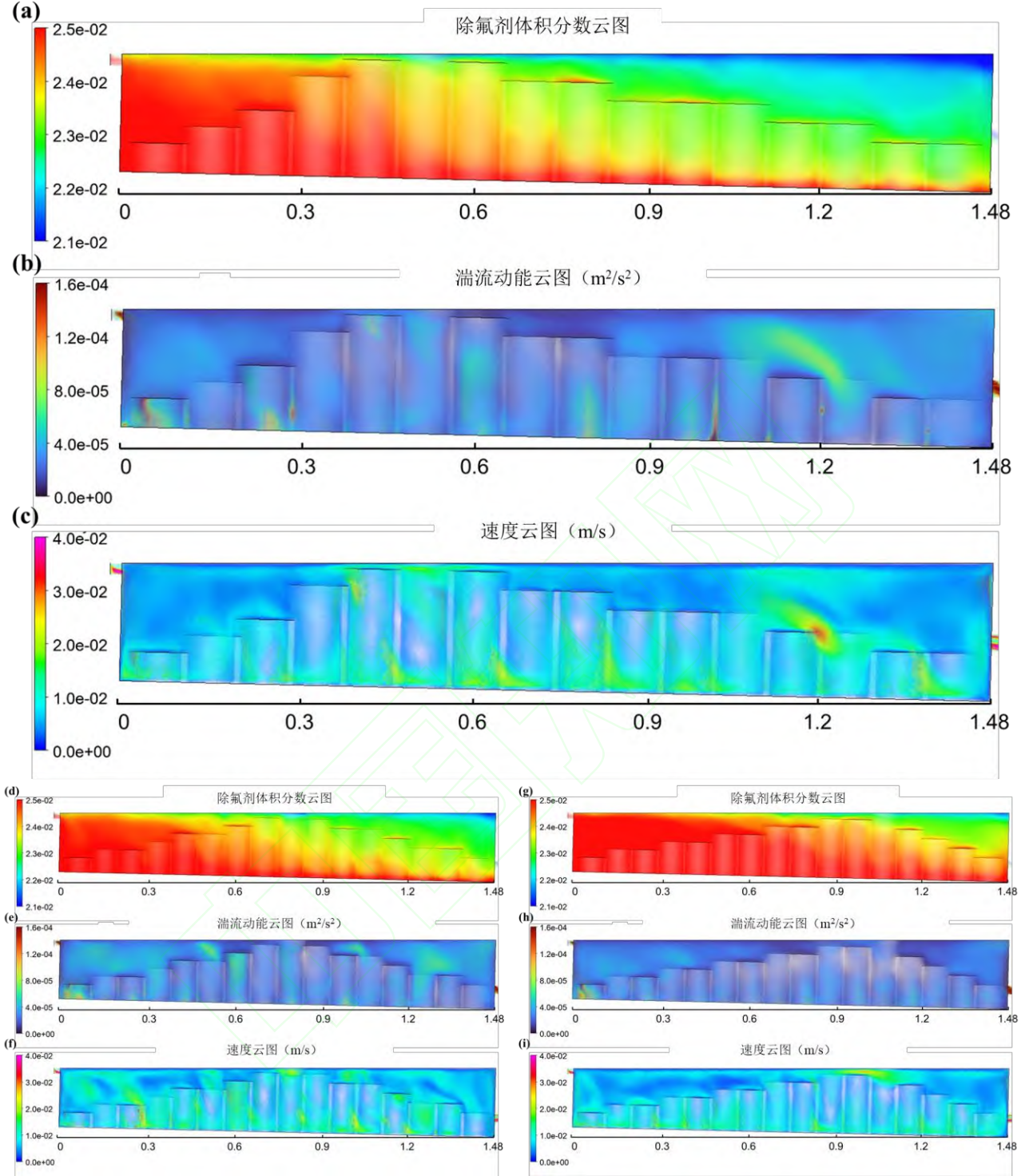


图8 前部复杂流场模型：(a) 体积分数云图；(b) 湍流动能云图；(c) 速度云图；中部复杂流场模型：(d) 体积分数云图；(e) 湍流动能云图；(f) 速度云图；后部复杂流场模型：(g) 体积分数云图；(h) 湍流动能云图；(i) 速度云图

Fig.8 Front complex flow field model: (a) Volume fraction contour; (b) Turbulent kinetic energy contour; (c) Velocity contour; Middle complex flow field model: (d) Volume fraction contour; (e) Turbulent kinetic energy contour; (f) Velocity contour; Rear complex flow field model: (g) Volume fraction contour; (h) Turbulent kinetic energy contour; (i) Velocity contour

2.3 流速大小对除氟剂浓度分布的影响

在上一节中，本研究已全面验证了复杂流场模型的准确性，并且揭示了空间构型对除氟剂运移与分布的底层调控规律。然而，由于地形阻碍

而产生的淤积区域，会导致除氟剂的利用率大幅下降，严重制约了煤矿地下水库的除氟作用^[41-45]。考虑到实际工程中煤矿地下水库地形不可改变，无法通过改变地形来实现清淤的作用，因此调节系统的初始进水流速，便成为了消除局部淤积的

最可行手段。为此，本研究针对三种复杂流场模型，分别增加了 40 L/h、60 L/h 两种流速条件，探究流速大小对除氟剂分布的影响。需要特别指出的是，进水流速的提升必然导致单位时间内进入水箱的除氟剂绝对含量增加，为了聚焦于流场对除氟剂分布格局的均一化能力，本节基于全场均值归一化处理的思路，引入了相对体积分数（Relative Volume Fraction, α_r ）作为评价指标（如式 11），计算得到数值越偏离 1.0 代表局部淤积或稀疏越严重，越接近 1.0 则代表分布越均匀。在

此基础上，结合速度与湍流动能的云图，探究动能增益对除氟剂运移与分布的调控机制，为实际工程的优化提供理论支撑。

$$\alpha_r = \frac{\alpha_i}{\alpha_{avg}} \quad (11)$$

式中， α_i 为 CFD 模拟获取的网格单元局部绝对体积分数； α_{avg} 为流场水域内颗粒体积分数的全场几何平均值。

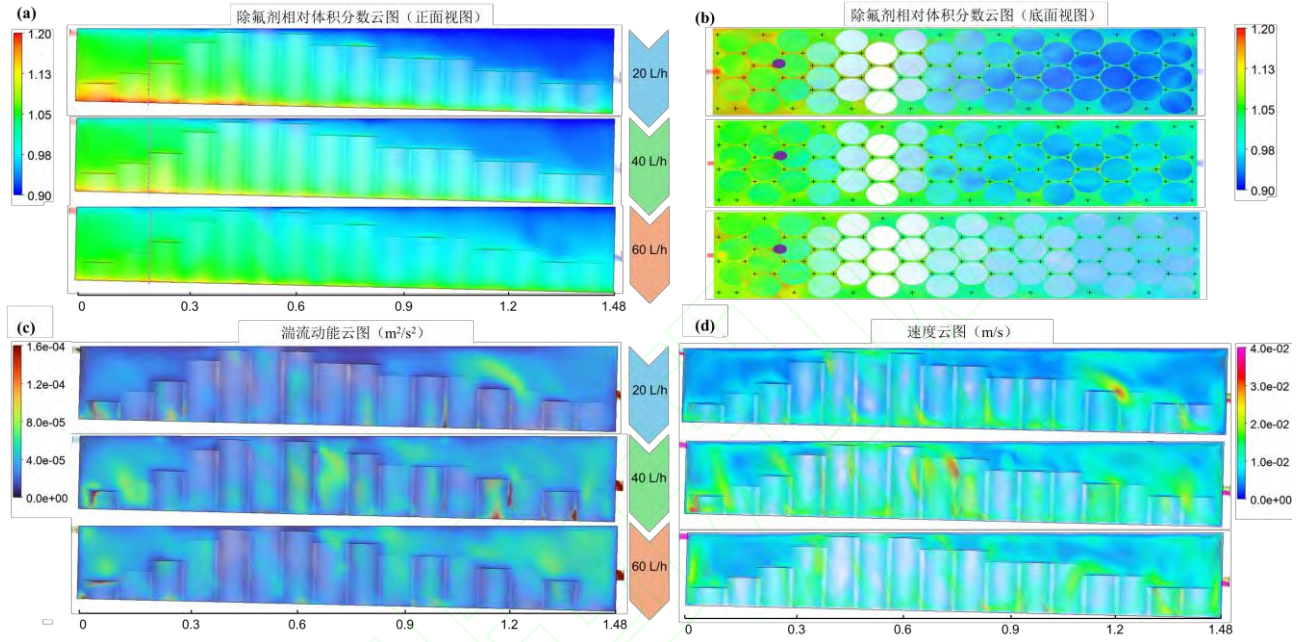


图 9 前部复杂流场模型在 20 ~ 60 L/h 流速下：(a) 正面相对体积分数云图；(b) 底面相对体积分数云图；(c) 湍流动能云图；(d) 速度云图

Fig.9 Front complex flow field model under flow rates of 20 to 60 L/h: (a) Front relative volume fraction contour; (b) Bottom relative volume fraction contour; (c) Turbulent kinetic energy contour; (d) Velocity contour

由图 9a 中相对体积分数云图可以看出，在 20 L/h 工况下，相对体积分数大于 1.1 的红色高值区，密集分布于入水口至高峰前流域的底层，表现为重力沉积特征。进一步提取云图极值可以发现，局部相对体积分数最高的位置均出现在约 $x = 0.2$ m（图 9a 虚线处）的底层区域，在 20 L/h 流速下，该处的相对体积分数为 1.30，当进水流速提升至 40 L/h 和 60 L/h 时，该位置的极值分别下降至 1.26 和 1.19。这种局部最高浓度的持续减小直观地反映出，底部的红色淤积在逐渐消散，全场色调向绿色均值（~ 1.0）靠拢。这表明提高动能可以削弱地形升高带来的阻力，并且可以有效延缓重力主导带来的提前沉积，使得颗粒从前部底层淤积转变为均匀悬浮。同时，流速提升对高峰后方流域起到了补充除氟剂的作用。低流速下，高峰背

水面及高层无阻挡区域存在低浓度区，表现为蓝色区域（~ 0.9）分布较广，而高流速提高了流体的动能剩余，有效补充了后方水域的除氟剂含量，相对体积分数由 0.9 提升至 1.0 左右。同时，随着流体动能的增加，除氟剂在圆柱间隙内的分布变得更加充分。此外，流场全局的浓度波动变小，代表两种极端分布的深红与深蓝的区域明显减少。图 9b 中湍流动能云图的演变进一步印证了这种变化，随着进水流速由 20 L/h 提升至 60 L/h，流体具备了更强的动能，冲刷圆柱间隙的过程，加剧了流体与壁面间的剪切与摩擦，使得间隙内的湍流动能由 $4.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 升高到 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，呈现青绿色均匀分布状态，为除氟剂颗粒持续提供对抗沉降的曳力。此外，在中高层及远端的无障碍水域，动能分布更加均匀，原本低流速下呈现深蓝色的区域，逐渐被大面积的黄绿色

(约 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$) 替代。这表明高流速不仅强化了局部的碰撞扰动,更促使高能湍流输运并充分分散,构建了一个广阔且连贯的悬浮带,有效减少了颗粒的过早沉降,也在微观尺度上印证了 Yang 等^[52]与 Zhou 等^[53]关于初始动力增益能有效重构流场动能分布、进而提升离散颗粒相在多相流体系中悬浮与均匀运移能力的数值模拟结论。值得注意的是,尽管全场绝对湍流动能随流速增大而升高,但地形高峰附近原本剧烈的动能梯度波动反而变得更加平缓。高动能流体充盈了整个水库空间,使得高峰前后动能波动更加平稳。从图 9c 中速度云图的变化可以清晰看出流速增加对流场的改善作用。在 20 L/h 的低流速下,由于流体的初始动能较低,在运移过程中受到密集圆柱群的强烈阻碍,导致流速为 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 的较大区域分布在底层流域,而中上层流域的速度较低,约为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 。同时,水流越过最高峰后,由于向前的动能不足,在背水面形成了一个速度小于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 的深蓝色低速区,这正是除氟剂颗粒容易滞留和淤积的区间之一。当进水流速逐渐提升至 60 L/h 时,流体向前的动力显著增强,原本低速的中层流域颜色逐渐加深,说明高速水流穿过了障碍物,填补了中层流场的动能空白,使得圆柱间隙内的速度分布更加均匀,并且将原本小于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 的深蓝色低速死区大幅压缩,高峰后局部流速升至 $1.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右,上方无障碍区域的速度颜色与圆柱间隙变得越来越接近,上下水层之间的速度差异明显减小,整体流速向 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右的范围均匀分布。这些变化表明,流速的提升有效克服了起伏地形的阻力,打破了水流绕行的分层现象,消除了高峰后的低速淤积死角。

对比中部和后部复杂流场模型的云图可以看出,流速增加对流场的改善作用与前部复杂流场模型基本一致。从图 10 中两种复杂流场模型的体积分数云图来看,随着流速从 20 L/h 提升至 60 L/h,这两种复杂流场模型中除氟剂的体积分数分布同样变得更加均匀,底层的局部淤积被有效冲刷。进一步提取云图的局部极值特征可以发现,对于中部复杂流场模型,在 20 L/h 流速下相对体积分数的最高点位于约 $x = 0.2 \text{ m}$ 处,极值为 1.27,当流速提升至 40 L/h 和 60 L/h 时,最高浓度点分

别后移至约 $x = 0.45 \text{ m}$ 和 $x = 0.55 \text{ m}$ 处,且对应的极值依次下降至 1.22 和 1.19。这表明随着流速增大,不仅局部最高淤积浓度显著下降,淤积中心也受强劲主流推力的影响向后方发生了明显推移。同理,在后部复杂流场模型中,20 L/h、40 L/h 和 60 L/h 流速下的最高浓度点分别出现于约 $x = 0.35 \text{ m}$ 、 $x = 0.2 \text{ m}$ 和 $x = 0.3 \text{ m}$ 处,对应的相对体积分数从 1.25 逐步降至 1.21 和 1.17,同样呈现出高流速下浓度峰值持续衰减的规律。综合前部、中部和后部三种复杂流场模型的极值变化特征可以发现,地形高峰位置越靠后,相对体积分数的全局峰值越小,且进水流速越大,该峰值的削弱效应越显著。同时,从图 10 中两种复杂流场模型的湍流动能云图来看,随着进水流速的增大,在高峰前后区域,中部和后部复杂流场模型的湍流动能变得更加平稳且波动减小,分别维持在约 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $6.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 左右。而从图 10 中两种复杂流场模型的速度云图来看,整体流速变大且分布更加均匀,局部红色高速区扩展并稳定在 $3.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右。这表明流速的提升使得流体能有效冲刷前端底层流域的除氟剂淤积,而且在越过高峰后依然保留了较高的动力,从而补充了后方水域除氟剂的含量,使得该区域的相对体积分数迅速回升并稳定在 0.98 左右。综合这三种空间构型的演变规律可以发现,提高流速对改善复杂地形下的除氟剂淤积是有效的,能够显著提升除氟剂的悬浮与均匀运移能力。

需要说明的是,提高进水流速虽然在一定程度上缩短了流体的水力停留时间,但本研究采用的改性煤矸石除氟剂反应速率极快,在投入水体后仅 20 min 内即可完全达到吸附平衡^[58]。而实际西部矿区地下水库的工程空间极其巨大,走向长度通常长达数千米,系统内部天然具备长达数十小时的高度冗余水力停留时间。因此,为了强力清淤而提升流速后,实际过流时间仍远大于 20 min 的化学吸附反应极限,在工程实践中完全无需担心实际反应不完全的问题。基于此,实际除氟工艺的优化应综合考虑地形特征与动力消耗,在摸清煤矿地下水库空间构型的基础上,寻找能够消除主要淤积区域的流速,从而在规避淤积风险、提升除氟效率与控制运行成本之间取得平衡。

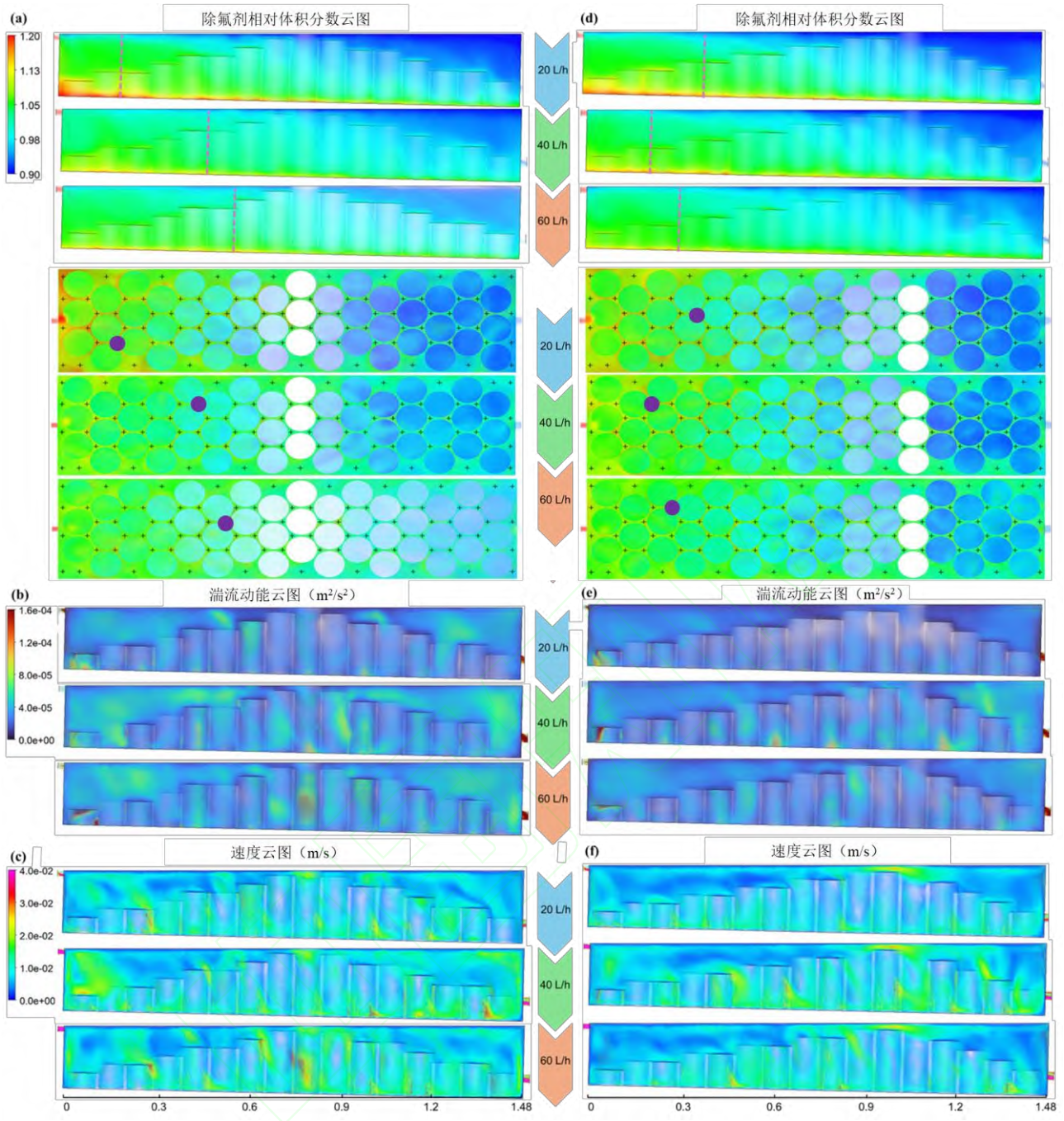


图 10 中部复杂流场模型在 20~60 L/h 流速下: (a) 相对体积分数云图; (b) 湍流动能云图; (c) 速度云图; 后部复杂流场模型在 20~60 L/h 流速下: (d) 相对体积分数云图; (e) 湍流动能云图; (f) 速度云图

Fig.10 Middle complex flow field model under flow rates of 20 to 60 L/h: (a) Relative volume fraction contour; (b) Turbulent kinetic energy contour; (c) Velocity contour; Rear complex flow field model under flow rates of 20 to 60 L/h: (d) Relative volume fraction contour; (e) Turbulent kinetic energy contour; (f) Velocity contour

综上所述,提升进水流速是解决复杂地形下除氟剂局部淤积问题的有效手段。流速的增大可以有效冲刷前段水域底层的淤积物,并且使得圆柱间隙内的水流贯通性更好,湍流动能的分布也更趋于平稳,最终使得除氟剂在水域内的分布更加均匀。相比于常规煤矿地下水流场动态模拟与污染物输运研究(如芦震等^[43]、Cheng 等^[46])多

将矿井水和溶质视为单一均相溶液的宏观评估,本文通过引入 EEM 多相流滑移应力与湍流动能耗散的强耦合剖析,成功实现了初始水力条件对固体药剂空间运移格局调控机制的精细化表征。然而,在煤矿地下水库的实际应用中,盲目追求过高的进水流速是不可取的,不仅会导致系统能耗增加,还会导致运营成本的大幅增加,缺乏工程经济可行性。因此,基于本节的研究结果,实

际除氟工艺的优化应综合考虑地形特征与动力消耗,在摸清煤矿地下水库空间构型的基础上,寻找能够消除主要淤积区域的流速,从而在规避淤积风险、提升除氟效率与控制运行成本之间取得平衡。

3 结论

针对煤矿地下水库封闭空间内除氟剂宏观运移规律隐蔽难测、极易发生局部淤积的工程问题,本文采用室内相似模型实验与CFD数值模拟深度融合、互相验证并迭代修正的方法,探究了复杂起伏地形与初始水力条件对改性煤矸石除氟剂运移与沉降机制的调控规律,核心结论如下:

①室内相似模型试验与多相流模拟相结合的验证方法具备可靠性。通过提取实验观测数据对计算流体力学模型进行迭代与修正,使得基础模型与实验结果之间的余弦相似度由初始的0.85提升至0.977,显著提升了模拟的预测精度,验证了物理实验与数值模拟深度融合的研究方法具备可行性。

②揭示了复杂起伏地形引发除氟剂局部淤积的动力学机制。起伏的地形障碍构成了流体推进的物理屏障。地形主峰的阻水作用迫使大量颗粒在迎水面强行聚集;流体越峰后由于流道突变发生边界层分离,在背水面形成了速度低于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 且低湍流动能的“动力学阴影区”。在20 L/h低速下,前、中、后部复杂流场模型的底层相对体积分数峰值分别高达1.30、1.27和1.25。且地形主峰位置越靠后,全场上游平稳发展段越长,流速梯度与动能波动越小,除氟剂能够获得更长距离的安全平稳输运。

③阐明了进水流速对复杂地形中除氟剂分布与局部淤积的改善机制,并提出了基于流场动力学调控的防淤积运行策略。提升初始进水流速是重构空间动能分布、冲刷起伏死角的有效手段。当流速由20 L/h提升至60 L/h时,全场宏观速度稳定回升至 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 左右,湍流动能也分别在中部和后部复杂流场模型中稳定维持在 $8.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $6.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的区间,这种动能增益有效弥补了地形起伏引发的能量耗散。动力学条件的改善促使前部、中部和后部复杂流场模型的底层最高相对体积分数分别下降至1.19、1.19和1.17,其中中部复杂流场模型的淤积中心随流速增大由 $x = 0.2 \text{ m}$ 后移至 $x = 0.55 \text{ m}$ 。流速增益不仅冲刷了前端的物理拦截区,还使高峰后方的相

对体积分数稳定在0.98左右,实现了颗粒从局部淤积向均匀运移的转变。在实际工程应用中,应结合地下水库具体的空间构型特征合理调节进水量,平衡底板清除淤积与控制系统运行能耗之间的关系。

参考文献(References)

- [1] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
GU Dazhao. Theoretical framework and technical system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [2] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1-7.
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Research progress of water resources protection and utilization technology in coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.
- [3] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304-316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Current status of water environment and progress in mine water treatment and utilization in China's coal mining areas[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [4] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11-18.
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospect of mine water treatment technology in China's coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11-18.
- [5] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Development strategy and engineering technology of mine water protection and utilization in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [6] 蒋斌斌, 李井峰, 吴敏, 等. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 137-145.
JIANG Binbin, LI Jingfeng, WU Min, et al. Research progress on mine water purification mechanism of coal mine underground reservoir[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(2): 137-145.
- [7] 王允卿. 凌志达煤矿矿井污水采空区自净化机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023: 39-57.
WANG Yunqing. Study on self-purification mechanism of mine wastewater in goaf of Lingzhida Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 39-57.
- [8] 智国军, 鞠金峰, 刘润, 等. 水岩相互作用对煤矿地下水库水质影响机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 779-785.
ZHI Guojun, JU Jinfeng, LIU Run, et al. Mechanism of water-rock interaction on water quality of coal mine underground reservoir[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 779-785.

- [9] 蒋斌斌, 李井峰, 马力强, 等. 煤矿地下水库岩石堆积效应对矿井水悬浮物去除规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 352-361.
JIANG Binbin, LI Jingfeng, MA Liqiang, et al. Study on the removal law of suspended solids in mine water by rock accumulation effect in coal mine underground reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 352-361.
- [10] 蒋斌斌. 大柳塔煤矿地下水库悬浮物去除及离子迁移机制研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023: 123-133.
JIANG Binbin. Study on suspended solids removal and ion migration mechanism of underground reservoir in Daliuta Coal Mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2023: 123-133.
- [11] 张海涛, 蒋斌斌, 张海琴, 等. 大柳塔煤矿地下水库水化学特征及来源解析[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 118-130.
ZHANG Haitao, JIANG Binbin, ZHANG Haiqin, et al. Hydrochemical characteristics and source analysis of underground water reservoir in Daliuta Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 118-130.
- [12] GUO Y, LI G, WANG L, et al. Hydrochemical characteristics of mine water and their significance for the site selection of an underground reservoir in the Shendong coal mining area[J]. Water, 2023, 15(6): 1038.
- [13] YANG L, LIU L, LIU Y, et al. Hydrodynamic groundwater modeling and hydrochemical conceptualization of the closure mining area of the WuMa River watershed of China[J]. ACS Omega, 2023, 9(1): 520-537.
- [14] 苏双青, 赵焰, 徐志清, 等. 我国煤矿矿井水氟污染现状及除氟技术研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(11): 5-10.
SU Shuangqing, ZHAO Yan, XU Zhiqing, et al. Current status of fluorine pollution in coal mine water and research on defluoridation technology in China[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42(11): 5-10.
- [15] 杨思敏, 李井峰, 白璐. 神东矿区典型矿井水中氟的分布特征及形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 246-256.
YANG Simin, LI Jingfeng, BAI Lu. Distribution characteristics and formation mechanism of fluorine in typical mine water of Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 246-256.
- [16] 张海琴, 包一翔, 唐佳伟, 等. 神东矿区天然矿物中的氟化物浸出规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 436-448.
ZHANG Haiqin, BAO Yixiang, TANG Jiawei, et al. Study on leaching law of fluoride in natural minerals in Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 436-448.
- [17] CAO H, XIE X, WANG Y, et al. Predicting geogenic groundwater fluoride contamination throughout China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 115: 140-148.
- [18] SHAJI E, SARATH K V, SANTOSH M, et al. Fluoride contamination in groundwater: A global review of the status, processes, challenges, and remedial measures[J]. Geoscience Frontiers, 2024, 15(2): 101734.
- [19] 梁煌, 胡潭楸. 煤矿含氟矿井水除氟技术研究进展[J]. 环保科技, 2024, 30(6): 55-59.
- LIANG Huang, HU Tanqiu. Research progress of defluoridation technology for fluorine-containing mine water in coal mines[J]. Environmental Protection and Technology, 2024, 30(6): 55-59.
- [20] HE J, YANG Y, WU Z, et al. Review of fluoride removal from water environment by adsorption[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(6): 104516.
- [21] MUKHERJEE S, HALDER G. A review on the sorptive elimination of fluoride from contaminated wastewater[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2018, 6(1): 1257-1270.
- [22] SUN X, KE C, LU Q, et al. Recent advances in adsorption techniques for the removal of fluoride ions from wastewater: A review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(46): 19936-19954.
- [23] DAR F A, KURELLA S. Recent advances in adsorption techniques for fluoride removal – An overview[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2023, 23: 101017.
- [24] ARAB N, DERA KHSHANI R, SAYADI M H. Approaches for the efficient removal of fluoride from groundwater: A comprehensive review[J]. Toxics, 2024, 12(5): 306.
- [25] CHUKKA N D K R, GOMATHI NAGAJOTHI P, NATRAYAN L, et al. Investigation on efficient removal of fluoride from ground water using activated carbon adsorbents[J]. Adsorption Science & Technology, 2022, 2022: 7948069.
- [26] ZHANG L, WANG W, AN Y, et al. Investigation of fluoride and turbidity removal from coal mine water by combined micro-flocculation and membrane filtration: Lab to pilot scale[J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 163: 481-491.
- [27] BEHERA B, SAHU H B. Coal mine waste characterization and defluoridation property[J]. Heliyon, 2023, 9(2): e13244.
- [28] 张欣, 彭志业. 煤矸石处理含氟水试验研究[J]. 山东化工, 2021, 50(24): 269-273.
ZHANG Xin, PENG Zhiye. Experimental study on treatment of fluorine-containing water by coal gangue[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(24): 269-273.
- [29] 赵丽, 高剑, 张庆, 等. 改性煤矸石除氟剂制备及其对氟化物的吸附规律研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 1-9.
ZHAO Li, GAO Jian, ZHANG Qing, et al. Preparation of modified coal gangue defluoridation agent and its adsorption law for fluoride[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 1-9.
- [30] WANG D, GUO L, QIAO Z, et al. Portable hydroxyl-functionalized coal gangue-based cordierite porous ceramics sheets for effective adsorption of fluorine-containing wastewater[J]. RSC Advances, 2024, 14(21): 15155-15166.
- [31] BAO Y, QI Y, LI Q, et al. Fluoride removal from coal mining water using novel polymeric aluminum modified activated carbon prepared through mechanochemical process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 146: 226-236.
- [32] ZHANG C, WANG F, BAI Q. Underground space utilization of coalmines in China: A review of underground water reservoir construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103657.
- [33] 张保, 郝秀强, 李会强. 神东矿区采区式煤矿地下水库系统设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(12): 1-6.

- ZHANG Bao, HAO Xiuqiang, LI Huiqiang. Design of mining area type coal mine underground reservoir system in Shendong mining area[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(12): 1-6.
- [34] 鲁敬姑, 周华, 欧阳光明, 等. 煤矿区地下水污染修复技术研究进展[J]. *科技资讯*, 2023, 21(2): 95-98.
- LU Jinggu, ZHOU Hua, OUYANG Guangming, et al. Research progress on remediation technology of groundwater pollution in coal mining areas[J]. *Science & Technology Information*, 2023, 21(2): 95-98.
- [35] 尹飞. 煤矿地下水污染防治分析[J]. *能源与节能*, 2024, (2): 298-320.
- YIN Fei. Analysis of groundwater pollution prevention and control in coal mines[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2024, (2): 298-320.
- [36] 赵丽, 贾祥腾, 张庆, 等. F⁻在煤矿采空区充填矸石中运移规律及其随达西流速变化特征[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(2): 90-98.
- ZHAO Li, JIA Xiangteng, ZHANG Qing, et al. Migration law of F⁻ in backfill gangue of coal mine goaf and its variation characteristics with Darcy velocity[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2025, 44(2): 90-98.
- [37] ZHANG C, JIA S, BAI Q, et al. CFD-DEM coupled simulation of broken rock mass movement during water seepage in an underground goaf reservoir[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(4): 1048-1060.
- [38] CHEN J, YANG R, ZHANG Z, et al. Removal of fluoride from water using aluminum hydroxide-loaded zeolite synthesized from coal fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126817.
- [39] RANASINGHE R A J C, HANSIMA M A C K, NANAYAKKARA K G N. Adsorptive removal of fluoride from water by chemically modified coal fly ash: Synthesis, characterization, kinetics, and mechanisms[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, 16: 100699.
- [40] YUAN N, TAN K, LI Q, et al. In situ synthesis of MIL-53-type eco-MOF from high-alumina fly ash for efficiently removing fluoride from water[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2023, 33(5): 681-690.
- [41] ASARE J A, ALHASSAN S I, ANAMAN R, et al. Synergistic influence of lanthanum and cellulose on fly ash synthesized zeolite for enhanced fluoride removal from wastewater: performance and mechanism[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 379: 134810.
- [42] ZHANG M. Enhanced fluoride removal using montmorillonite clay modified with CoFe₂O₄ and metal-organic frameworks[J]. *Environmental Research*, 2024, 258: 119389.
- [43] 芦震, 张小五, 王鹏, 等. 煤矿地下水流场动态模拟及预测研究[J]. *陕西煤炭*, 2023, 42(6): 63-77.
- LU Zhen, ZHANG Xiaowu, WANG Peng, et al. Dynamic simulation and prediction of groundwater flow field in coal mine[J]. *Shaanxi Coal*, 2023, 42(6): 63-77.
- [44] QU B. A simulation method for underground water flow fields in coal mines based on the radial basis function collocation method[J]. *Journal of Computers*, 2025, 36(2): 139-151.
- [45] AHMAT K, LU H, LIU H. A numerical study on impact of coal mining activity and mine water drainage on flow and transport behavior in groundwater[J]. *Water*, 2024, 16(24): 3596.
- [46] CHENG W, YIN H, DONG F, et al. Research on the simulation of groundwater flow fields disturbed by coal mining based on multi-scale coupled decision-making[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 391: 126441.
- [47] BANAEI S M A, JAVID A H, HASSANI A H. Numerical simulation of groundwater contaminant transport in porous media[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, 18(1): 151-162.
- [48] QIAO P, LAN S, GU H, et al. Simulation of underground reservoir stability of pumped storage power station based on fluid-structure coupling[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2024, 139(2): 1381-1399.
- [49] MARCATO A, BOCCARDO G, MARCHISIO D. A computational workflow to study particle transport and filtration in porous media: Coupling CFD and deep learning[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417: 128936.
- [50] VAN HOECKE L, BOEYE D, QUIROGA A G, et al. Experimental methods in chemical engineering: Computational fluid dynamics/finite volume method—CFD/FVM[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2023, 101(2): 545-561.
- [51] GARCIA-VILLALBA M, COLONIUS T, DESJARDINS O, et al. Numerical methods for multiphase flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2025, 191: 105285.
- [52] YANG Z, LIAN X, SAVARI C, et al. Evaluating the effectiveness of CFD-DEM and SPH-DEM for complex pipe flow simulations with and without particles[J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 288: 119788.
- [53] ZHOU L, WANG B, CAO Y, et al. Fluidisation of spherocylindrical particles: computational fluid dynamics—Discrete element method simulation and experimental investigation[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2024, 18(1): 2297537.
- [54] 邵冲, 刘军祥, 于庆波. 颗粒绕流圆管传热过程的数值模拟[J]. *材料与冶金学报*, 2022, 21(3): 195-205.
- SHAO Chong, LIU Junxiang, YU Qingbo. Numerical simulation of heat transfer process of particles flowing around a circular tube[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2022, 21(3): 195-205.
- [55] 童晓剑. 基于 Fluent 的低雷诺数下圆柱绕流流动特性数值模拟研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021: 28-41.
- TONG Xiaojian. Numerical simulation study on flow characteristics of flow around a cylinder at low Reynolds number based on Fluent[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021: 28-41.
- [56] 邢鹏飞, 孙志强. 低雷诺数开缝圆柱绕流尾迹流场特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 990-997.
- XING Pengfei, SUN Zhiqiang. Wake flow field characteristics of flow around a slotted cylinder at low Reynolds number[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(4): 990-997.
- [57] 李聪洲, 张新曙, 胡晓峰, 等. 高雷诺数下多柱绕流特性研究[J]. *力学学报*, 2018, 50(2): 233-243.

LI Congzhou, ZHANG Xinshu, HU Xiaofeng, et al. Study on characteristics of flow around multiple cylinders at high Reynolds number[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(2): 233-243.

- [58] 李井峰, 包一翔, 胡嘉敏, 等. 改性煤矸石矿井水除氟技术研发及应用[J/OL]. 煤炭学报, 2026: 1-14[2026-06-30]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2026.0242.

LI Jingfeng, Bao Yixiang, HU Jiamin, et al. Study on mechano-chemical preparation of modified coal gangue fluo-ride-removal agent and application for coal mining water defluoridation[J/OL]. Journal of China Coal Society., 2026: 1-14[2026-06-30]. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2026.0242.

