

基于Mixture模型对浓缩机浓缩沉降过程的数值模拟

史贺喜¹, 陶浩浩¹, 王娟¹, 李同杰^{1*}, 马山², 石晴³, 刘继超³

¹安徽科技学院智能制造学院, 安徽 滁州

²淮北中德矿山机器有限公司, 安徽 淮北

³淮北合众机械设备有限公司, 安徽 淮北

收稿日期: 2025年9月9日; 录用日期: 2025年10月19日; 发布日期: 2025年11月19日

摘要

针对煤泥水沉降过程复杂且难以观测的问题, 本文以直径6 m中心传动式浓缩机为对象, 基于Mixture多相流模型, 结合Realizable k- ϵ 湍流模型与群体平衡模型(PBM), 开展了数值模拟研究。结果表明, 浓缩机内部存在进口回流区、中部回流区、出口回流区和上部溢流区等典型流动区域, 其中中部低速回流区有利于煤泥颗粒与药剂作用。随着时间延长, 颗粒逐渐向底部富集, 沉降规律清晰可见。在相同工况下, 开启PBM模型后颗粒沉降速度明显加快, 底部堆积量增加, 验证了PBM模型对絮凝过程的适用性。研究结果可为浓缩机运行调控和药剂投加优化提供理论依据。

关键词

浓缩机, Mixture模型, PBM模型, 数值模拟, 煤泥沉降

Numerical Simulation of Thickener Sedimentation Using the Mixture Model

Hexi Shi¹, Haohao Tao¹, Juan Wang¹, Tongjie Li^{1*}, Shan Ma², Qing Shi³, Jichao Liu³

¹College of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Chuzhou Anhui

²Huaibei Sino-German Mining Machinery Co., Ltd., Huaibei Anhui

³Huaibei Hezhong Mechanical Equipment Co., Ltd., Huaibei Anhui

Received: September 9, 2025; accepted: October 19, 2025; published: November 19, 2025

*通讯作者。

文章引用: 史贺喜, 陶浩浩, 王娟, 李同杰, 马山, 石晴, 刘继超. 基于 Mixture 模型对浓缩机浓缩沉降过程的数值模拟[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1438-1446. DOI: 10.12677/me.2025.136159

Abstract

To address the complexity and poor observability of coal slurry sedimentation, this study investigates a 6 m diameter center-driven thickener using numerical simulation. A Mixture multiphase flow model coupled with the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and the population balance model (PBM) was applied. Results show that typical flow regions, including inlet, middle, outlet, and overflow recirculation zones, are formed inside the thickener, with the middle low-velocity zone promoting sufficient interaction between coal particles and flocculants. As time progresses, particles gradually accumulate at the bottom, revealing clear sedimentation patterns. Under identical conditions, simulations with PBM enabled faster particle settling and greater bottom accumulation, confirming its applicability in characterizing flocculation processes. The findings provide theoretical support for the operational regulation of thickeners and the optimization of reagent dosage.

Keywords

Thickener, Mixture Model, PBM Model, Numerical Simulation, Coal Slurry Sedimentation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭作为我国的重要能源,在能源领域有着举足轻重的地位。目前,我国大部分选煤厂都采用湿法选煤工艺来提高煤炭的质量同时减少煤炭运输过程中粉尘飞扬的问题。该选煤工艺会产生含有大量煤泥颗粒的工业废水,直接排放不仅会污染环境还会造成资源的浪费,我们需要对其中的煤泥颗粒进行固液分离的处理工作。选煤厂对于煤泥水处理一般采用耙式浓缩机来进行浓缩沉降,由于煤泥颗粒的自然沉降速度很慢,因此需要在浓缩机中加入一定量的絮凝剂和凝聚剂来加速煤泥水中煤泥颗粒的沉降[1] [2]。

对于现场的工作人员来说,浓缩机的内部情况无法凭借肉眼进行观察,煤泥水的沉降过程又是比较复杂且干扰因素多,导致在实际运行过程中发生问题无法根据内部的情况对浓缩机进行合适的调整。浓缩机仿真研究对于指导浓缩机沉降系统的开发有着重要的意义,国内外学者在这方面已经进行了大量的研究工作。Stamou 等[3]提出了浓缩机流动和沉降的数学模型,并利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型使流场结果更加接近真实的速度和湍流扩散的情况,并且能通过计算对不同沉降颗粒的浓度进行分析。贾凯等[4]利用 FLUENT 软件进行了浓缩机的二维仿真模型研究,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Mixture 模型得到了煤泥水在浓缩机内部的速度云图和浓度场云图,提高了仿真的准确性。Gheshlaghi 等[5]采用群体平衡模型与计算流体动力学相结合的方法,对稳态条件下浓缩机内浆液两相流进行了数值模拟仿真,通过将模拟结果与实验测量数据对比,验证了 CFD 建模的准确性。韩有理等[6]根据煤泥颗粒沉降速度的特点,设计出新型深锥脱泥浓缩机,通过 FLUENT 软件对浓缩机内部流场进行数值仿真,得到倾斜管束对流场具有更好的稳流作用。

在实际生产过程中,浓缩机运行涉及多种复杂变量,且煤泥颗粒的沉降过程易受到多种干扰因素影响,导致浓缩效果存在不确定性。本文以淮北中德矿山机器有限公司所生产的浓缩机为研究对象,结合其运行工况,重点分析了药剂投加对浓缩机仿真模型的影响。通过对速度场与浓度场的数值模拟与对比

研究，揭示了缩机内部流场与颗粒分布特征。研究结果可为实际生产中浓缩过程的预测、调控及优化运行提供重要的理论依据与实践参考。

2. 煤泥水沉降特性

煤泥水中的煤泥颗粒在浓缩机中一方面受到自然重力作用的影响而下降，另一方面由于布朗运动又促使浓度趋于均一。在自由沉降的条件下，煤炭颗粒的沉降速度与粒径之间符合 Stokes 定律[7]，即

$$v_{\text{沉降}} = \frac{(\delta - \rho)gd^2}{18\mu} \quad (1)$$

式中： δ 为颗粒密度； ρ 为水的密度； μ 为流体黏度； d 为颗粒直径； g 为重力加速度。

在其他条件相同时，颗粒沉降速度 v 与 d^2 成正比，即随着颗粒粒径的增大，沉降速度显著提高。沉降过程中煤泥颗粒表面含有大量的负电荷，根据同性相斥异性相吸的原理，这些细小颗粒之间相互排斥，无法聚合形成大颗粒群抗衡颗粒受到其他水分子剧烈的布朗运动来实现自由沉降。凝聚剂通常是带正电荷的电解质，电离出来的正离子会与煤泥水中的煤泥颗粒发生电中和反应，使双电层压缩脱稳，脱稳颗粒之间相互凝聚形成初级絮凝体的过程，如图 1 所示。絮凝剂是一种有一定线形长度的高分子有机聚合物，能够与煤泥颗粒发生吸桥架桥、吸附电性中和以及网捕沉淀作用，形成大的絮体团的过程，如图 2 所示。为处理这些带负电荷的细小煤泥颗粒，选煤厂在实际生产中，通常采用添加凝聚剂和絮凝剂的方法来强化细颗粒煤泥水的沉降，实现清水洗煤，确保洗水闭路循环。

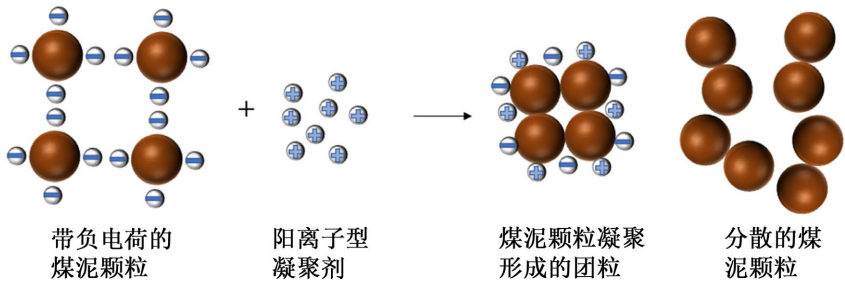


Figure 1. Coagulation process of the coagulant
图 1. 凝聚剂的凝聚过程

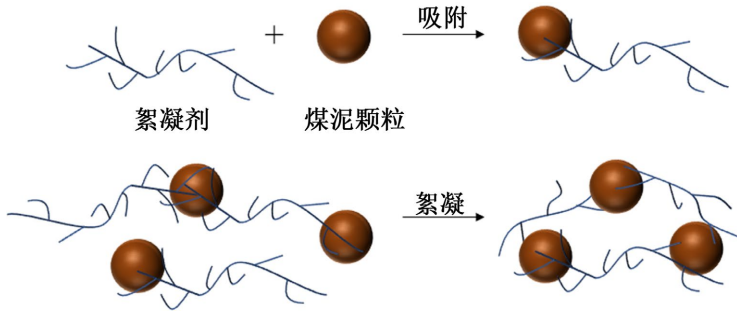


Figure 2. Flocculation process of the flocculant
图 2. 絮凝剂的絮凝过程

3. 数值模拟过程

3.1. 仿真模型的建立与网格划分

(1) 仿真模型的建立。本次模型采用淮北中德矿山机器有限公司所生产的直径 6 m 的中心传动式浓

缩机为模拟原型，浓缩机的简化结构示意图如图 3 所示。该浓缩机的入料方式采用中心入料，浓缩沉降后的煤泥经耙架上的刮板刮入到底部中心排泥口，再由浓缩机底部的底流泵将煤泥抽走，溢流水则从浓缩机外沿处溢流而出。本次仿真主要模拟煤泥水在浓缩机内的絮凝沉降过程，未涉及排泥环节，因此未将底流口设定为出口边界条件。同时，考虑到耙架在浓缩机运行过程中转速极低，其主要功能仅为刮集底部沉积泥浆，对整体流场分布及沉降规律的影响相对有限。为简化模型结构并提高数值计算的稳定性与可行性，本文在建模过程中忽略耙架的影响。

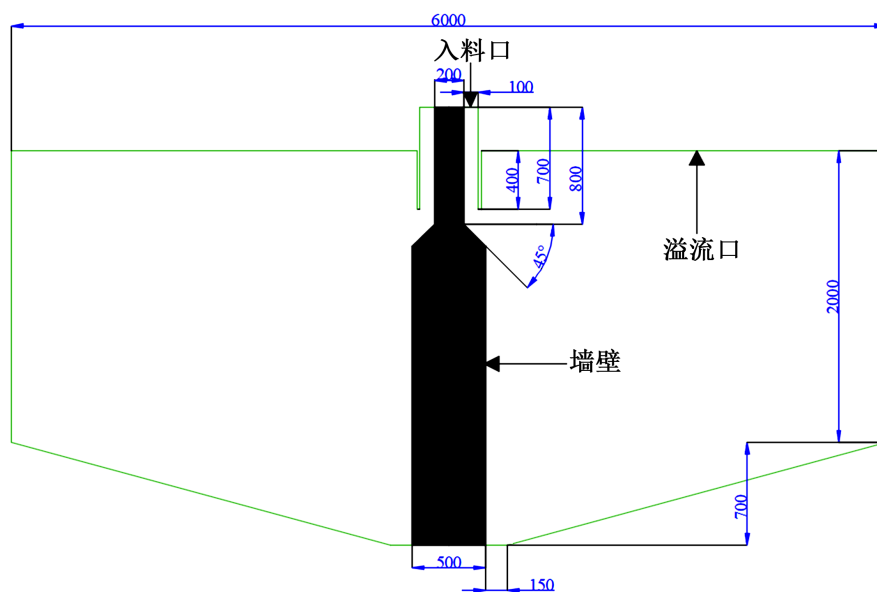


Figure 3. Simplified structural diagram of the thickener
图 3. 浓缩机简化结构示意图

根据图 3 的相关数据，在 Solidworks 中完成三维模型的构建，物理模型如图 4 所示。

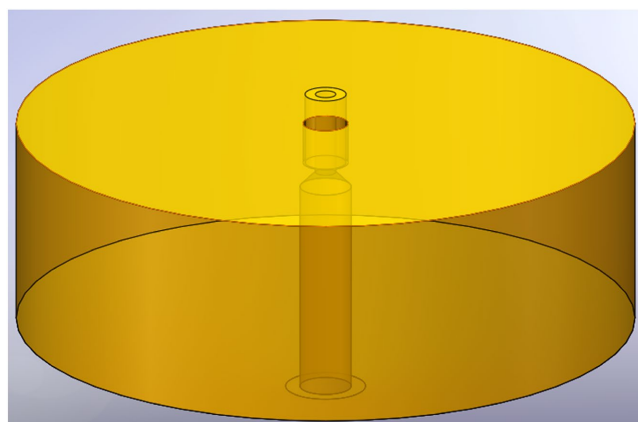


Figure 4. Schematic diagram of the physical model of the thickener
图 4. 浓缩机物理模型示意图

(2) 网格划分。利用 ANSYS Meshing 软件对浓缩机物理模型采用非结构网格进行划分，并对入料口，底部煤泥沉降处以及溢流出口附近对网格进行了局部加密，保证结构的精准度。网格的数量为 202,142 个，网格划分如图 5 所示。

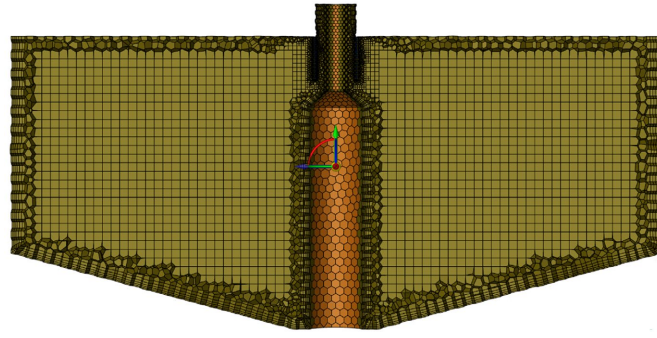


Figure 5. Overall grid division
图 5. 网格整体划分

3.2. 湍流模型

湍流模型选择 Realizable k- ε 模型对流场进行数值模拟计算。与标准 k- ε 模型相比, Realizable k- ε 模型增加了对流体运动过程、浮力因素和流体可压缩因素的分析, 提高了模型的精度, 对雷诺数变化大的流场可以更好分析, 而且对紊流扩散给定了一个表达式可以更精准分析湍流的扩散情况[8] [9]。Realizable k- ε 模型 k 中 ε 和的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3)$$

式中, ρ 表示流体的密度; k 表示湍动能; G_k 表示流体在运动中所产生的湍动能; G_b 表示浮力所产生的能量; ε 表示耗散率; Y_M 表示流体在可压缩流体在运动中所产生的能量; S_k 和 S_ε 为用户自定义源项; μ 为分子动力黏度; μ_t 为湍流黏度; S 表示应变率张量的二范数, 用来度量流场里速度梯度的强度; ν 为湍流运动粘度; C_1 、 C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 均为常数; 各常、系数的取值详见文献[10]。

3.3. 多相流 Mixture 模型

Mixture 模型又称为混合物模型, 该模型为简化后的一种多相流模型, 主要用于模拟各相存在不同速度的多相流动计算, 假定了流动在短空间尺度上局部的平衡, 不同相之间的耦合很强烈[11]。在研究固液两相流问题中, 通常会遇到流体中含有固体颗粒的问题。目前常用的处理方法是将液体作为连续相, 固体颗粒作为拟流体相, 这样可以该模型保证符合三大守恒定律。由于 Mixture 模型在模拟时对于各相速度是否相同没有具体要求, 为仿真模拟提供便利, 因此本文选用 Mixture 模型来进行模拟仿真。

3.4. PBM 模型

在基于 Mixture 多相流模型的数值模拟中, 絮凝剂作用下煤泥颗粒的团聚与断裂过程会显著改变粒径分布, 从而影响沉降效率。本文采用群体平衡模型, 通过建立颗粒数密度分布函数的控制方程, 描述不同体积颗粒的生成与消失机理, 能够反映絮凝动力学特征。PBM 的基本形式可表示为[12]:

$$\frac{\partial [n(v, t)]}{\partial t} + \nabla \cdot [u(n(v, t))] = B_C(v, t) - D_C(v, t) + B_B(v, t) - D_B(v, t) \quad (4)$$

其中, $n(v, t)$ 表示数密度函数, 左端两项分别为时间变化率和对流输运项, 右端依次为团聚生成项、团聚消失项、断裂生成项与断裂消失项。其展开形式为:

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \int_0^v c(v-v', v') n(v-v', t) n(v', t) dv' - \int_0^\infty c(v, v') n(v, t) n(v', t) dv'(t) \\
&\quad + \int_{\Omega_n} pg(v') n(v, v') n(v', t) dv' - b(v) n(v, t)
\end{aligned} \quad (5)$$

其中, $c(v-v')$ 为团聚核函数, 表征体积分布为 v 与 v' 颗粒的结合概率; $g(v')$ 为断裂频率函数, 反映颗粒在外界扰动下的破碎倾向; p 为分裂概率分布, 描述断裂颗粒体积分配情况; $b(v)$ 为断裂消失率。前两项分别对应絮凝颗粒的生成与损失, 后两项描述大颗粒的断裂及其对小颗粒数目的贡献。

3.5. 基本设置

在沿 Y 轴方向上设置重力加速度为 -9.81 m/s^2 , 多相流模型采用 Mixture 模型, 并设置相数为 3 相, 湍流模型选用 Realizable k- ε 模型。参与仿真计算的介质为水、煤泥颗粒和空气。在 Fluent 材料库中水选择 water-liquid (h2o < l), 煤泥颗粒选择 coal-hv-volatiles (hv_vol), 密度设置为 1800 kg/m^3 , 粘性根据经验可设置为 $0.001167 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ [13], 空气选择材料库中的 air 选项即可。相的设置方面, 将水定义为主相, 煤泥颗粒与空气分别作为第二相与第三相。

3.6. 边界条件

使用 Fluent 软件对浓缩机浓缩沉降过程进行数值模拟时, 边界条件设置如下: ① 入料口的速度设置为 0.06 m/s 。② 通过现场浓度计的测量, 煤泥水浓度一般维持在 $30\sim 40 \text{ g/L}$ 之间, 本文选取最大浓度 40 g/L 进行模拟仿真, 通过下面的转化公式将浓度转化为仿真所需的体积分数, 转化公式如下:

$$\eta = \frac{m/\rho}{1000 + m/\rho} \quad (6)$$

式中 m 为单位体积内煤泥的质量, ρ 为煤泥的密度, η 为煤泥在煤泥水中所占的体积分数。通过上式可计算得出煤泥颗粒在流体中的体积分数为 0.0217 。③ 根据相关文献可知, 不同粒径等级的煤泥颗粒在絮凝过程中形成的絮团尺寸存在差异[14]。本文将浓缩机中各相粒径设定为 1.381011 mm 、 0.62476 mm 、 0.28264 mm 、 0.12787 mm 、 0.05785 mm 和 0.02617 mm , 对应的颗粒比例分别为 0% 、 1% 、 3.59% 、 10.03% 、 20.17% 和 65.21% 。将最大絮团尺寸其视为絮凝剂作用下所生成的特征颗粒, 以此完成 PBM 模型的初始条件设定[15]。④ 溢流口定义为压力出口, 压力值设定为 0 。除溢流口和入料口外, 其余边界均设置为壁面, 并采用静止壁面条件以假设其在运行过程中保持不动。同时所有壁面上施加无滑移边界条件, 使流体在壁面处速度为零, 从而更准确地描述流体与设备边界之间的相互作用特征。

3.7. 离散方法

采用 Fluent 求解器中基于压力和速度耦合的求解器进行计算, 采用 SIMPLE 算法实现对压力场和速度场的迭代求解, 对动量和湍流的计算采用二阶迎风法, 保证算法的可靠性。

4. 计算结果及分析

4.1. 速度场分析

通过分析浓缩机模型的速度云图, 如图 6 所示, 可以看出浓缩机的内部存在较大速度的区域。进一步对浓缩机的速度矢量图进行分析, 如图 7 所示, 可以观察到浓缩机的内部的包含着许多复杂的速度分布区域。可大致分为进口回流区、中部回流区、出口回流区以及上部溢流区这四个区域。进口回流区位于入料口的正下方, 煤泥水冲击折流板时, 改变了方向, 形成了明显的向上回流。中部回流区位于浓缩机的中部区域, 该区域存在一个大范围的低速回流区域, 为药剂和煤泥颗粒发生充分接触提供了足

够的时间。出口回流区位于浓缩机底部边缘区域，部分煤泥水遇到壁面的阻挡后形成了二次向上回流，重新汇入中部回流区。上部溢流区位于浓缩机上部液面附近，形成了低速且稳定的溢流水，平稳的流向溢流堰。

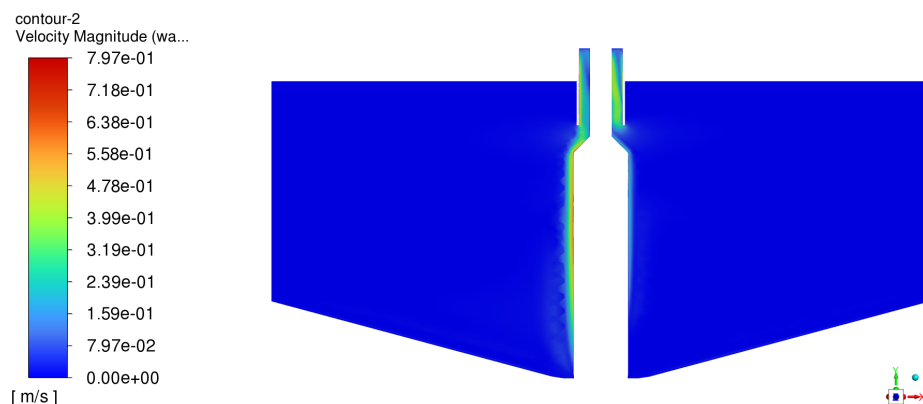


Figure 6. Velocity field cloud diagram of the thickener

图 6. 浓缩机速度场云图

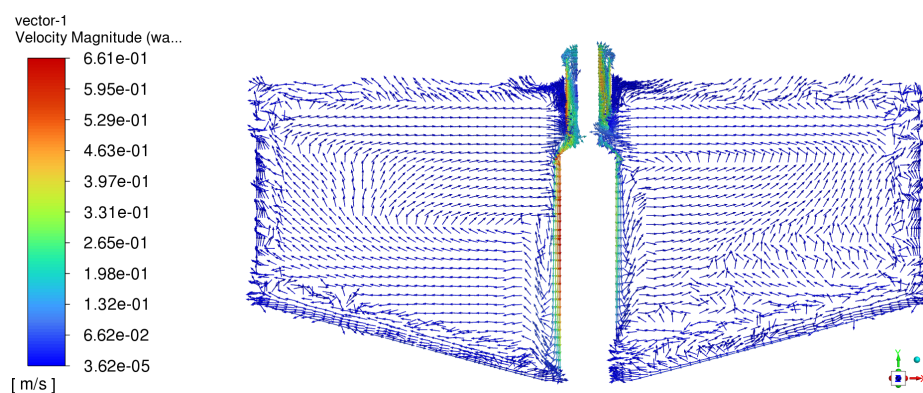
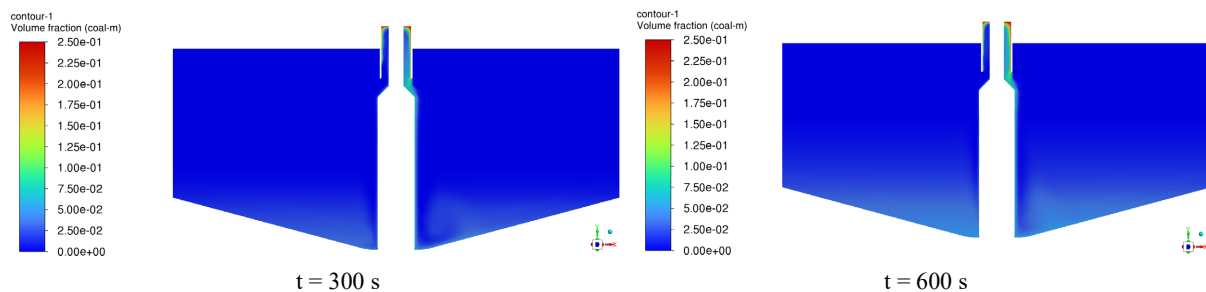


Figure 7. Velocity vector diagram of the thickener

图 7. 浓缩机速度矢量图

4.2. 浓度场分析

经过 20 min 的煤泥水沉降过程模拟，得到了不同时间下的煤泥沉降的浓度情况，如图 8 所示。通过观察图中浓缩机模型内部的颜色深浅，可以得到煤泥颗粒所占体积分数的大小情况。随着时间的不断增加，浓缩机底部区域的颜色逐渐变浅，说明煤泥颗粒在重力和药剂的作用下在底部堆积量逐渐变多，底部区域的浓度也逐渐变大。



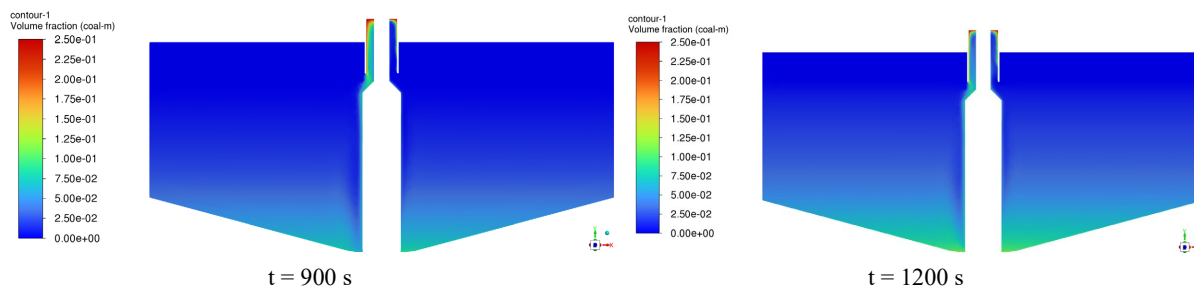


Figure 8. Concentration distribution of slime sedimentation in the thickener at different times

图 8. 不同时刻浓缩机煤泥沉降浓度分布图

4.3. 药剂添加分析

在保证其他的参数设置均相同的情况下, 利用 FLUENT 软件对浓缩机模型中的 PBM 模型进行打开和关闭的操作设置, 进行 20 min 的仿真对比试验, 以此来检验 PBM 模型能否用于模拟药剂对煤泥颗粒沉降过程中的作用, 如图 9 所示。在经过 20 min 的模拟仿真试验后, 打开 PBM 模型比关闭 PBM 模型后的浓缩机底部聚集了更多煤泥颗粒, 说明打开 PBM 模型后颗粒的沉降速度更快。

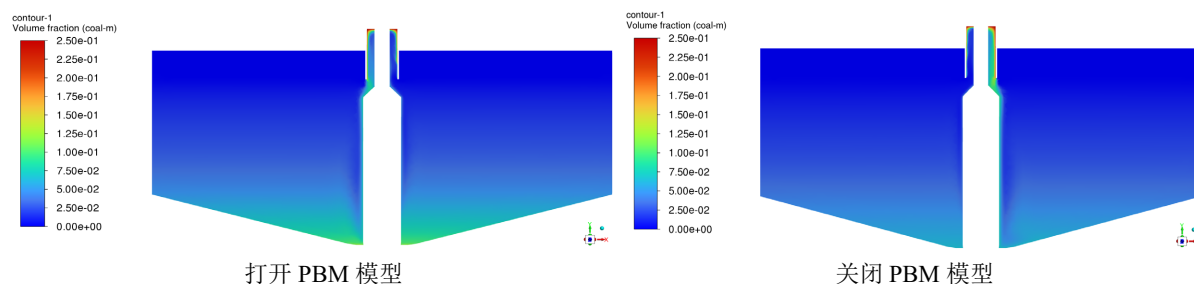


Figure 9. Concentration distribution of slime sedimentation in the thickener after 20 min

图 9. 20 min 后浓缩机煤泥沉降浓度分布图

5. 结论

本文基于 Mixture 多相流模型, 结合群体平衡模型(PBM)与 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 对直径 6 m 中心传动式浓缩机的煤泥水浓缩沉降过程进行了数值模拟研究。结果表明: 浓缩机内部存在进口回流区、中部回流区、出口回流区和上部溢流区等典型流动区域, 其中中部低速回流区为煤泥颗粒与药剂充分接触创造了条件。随着沉降时间的增加, 煤泥颗粒逐渐向底部富集, 底部浓度显著升高, 体现出颗粒在重力与药剂作用下的沉降规律。在相同工况下, 开启 PBM 模型后颗粒沉降速度明显加快, 底部堆积量增加, 说明 PBM 模型能够有效反映药剂对颗粒团聚与断裂过程的影响, 提高了模拟结果的可靠性。

基金项目

安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-100); 安徽省高等学校科学研究项目(2023AH051871); 引进人才项目(RCYJ202104); 企业委托横向课题(881656、882124); 2025 年教育部安徽高等研究院校企联合人才培养和科研攻关项目(高温高辐射耦合场下核电通信箱耐辐射、热稳定关键技术研发及应用); 天长市科技成果转化专项资金项目(tzy202416)。

参考文献

- [1] 武晋川, 樊民强, 刘爱荣, 等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 对微细粒高黏煤泥的化学调控助滤影响[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(4):

- 212-220.
- [2] 闫继宏. 煤泥水浓缩池自动加药系统的设计与应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023, 41(11): 26-28.
 - [3] Stamou, A.I., Adams, E.W. and Rodi, W. (1989) Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers. *Journal of Hydraulic Research*, **27**, 665-682. <https://doi.org/10.1080/00221688909499117>
 - [4] 贾凯, 王永田, 龚豪. 浓缩机内煤泥水沉降流场和浓度分布的数值模拟[J]. 金属矿山, 2012, 47(6): 120-123+168.
 - [5] Gheshlaghi, E.M., Goharrizi, S.A. and Shahrivar, A.A. (2013) Simulation of a Semi-Industrial Pilot Plant Thickener Using CFD Approach. *International Journal of Mining Science and Technology*, **23**, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.010>
 - [6] 韩有理, 朱金波, 周伟, 等. 深锥脱泥浓缩池流场数值模拟与试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 895-902.
 - [7] 董宪姝. 煤泥水处理技术研究现状及发展趋势[J]. 选煤技术, 2018, 46(3): 1-8.
 - [8] Akin, A. and Kahveci, H.S. (2019) Effect of Turbulence Modeling for the Prediction of Flow and Heat Transfer in Rotorcraft Avionics Bay. *Aerospace Science and Technology*, **95**, Article ID: 105453. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105453>
 - [9] Liu, M., Jiang, C., Khoo, B.C., Zhu, H. and Gao, G. (2024) A Cell-Based Smoothed Finite Element Model for the Analysis of Turbulent Flow Using Realizable $k-\epsilon$ Model and Mixed Meshes. *Journal of Computational Physics*, **501**, Article ID: 112783. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.112783>
 - [10] 宋战胜. 中心传动浓缩机及其给料井的设计与仿真分析研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2013.
 - [11] 肖鑫明, 桂林. 基于 Mixture 模型对翼形空化的数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2019, 61(2): 182-186.
 - [12] 宋光春, 李玉星, 王武昌, 等. 基于群体平衡理论的水合物聚集动力学模型[J]. 化工进展, 2018, 37(1): 80-87.
 - [13] 谢广元, 张明旭, 边炳鑫, 等. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 593.
 - [14] 刘云霞, 董宪姝, 樊玉萍, 等. 粒径对煤泥絮团特性及沉降效果的影响[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(5): 59-63.
 - [15] 吴桐. 选煤用浓缩机浓缩过程仿真与控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.