基于CFD-PBM耦合的微细矿物颗粒絮凝动力学模拟*

王学涛[1],毛治然[1],邵宇晨[1],王余莲[1],崔宝玉[2],刘洋洋[1],蒋沂声[1]

(1.沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:鉴于湍流场特性及工艺参数对颗粒絮凝行为的影响,采用CFD-PBM耦合方法,建立了基于局部湍流动能耗散率和矿浆黏度修正的颗粒絮凝动力学数学模型。在流场速度和絮团平均粒度分布试验验证的基础上,研究了给料体积浓度对深锥浓密机内絮凝行为的影响。结果表明,给料井内环形挡板上方湍流动能耗散率高于下方区域约两个数量级,且挡板下方湍流动能耗散率随着给料体积浓度的增加先增大后减小;絮团平均粒度随给料体积浓度的增大先增大后减小,中等给料体积浓度(10%)条件下絮团平均粒度较大;适当增加给料井长度可提升微细矿物颗粒的絮凝效果。研究结果可为湍动絮凝动力学建模及絮凝浓密工艺参数优化提供指导。

关键词:颗粒絮凝;湍流特性;浓密机;群体平衡模型;数值模拟

中图分类号:TD926 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0276-07

Simulation of Flocculation Kinetics of Fine Mineral Particles Based on CFD-PBM Coupling

Wang Xuetao[1], *Mao Zhiran*[1], *Shao Yuchen*[1], *Wang Yulian*[1], *Cui Baoyu*[2], *Liu Yangyang*[1], *Jiang Yisheng*[1]

(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Considering the characteristics of turbulent flow field and the influence of process parameters on particle flocculation behavior, a particle flocculation kinetic mathematical model based on local turbulent energy dissipation rate and slurry viscosity correction was established using the CFD-PBM coupling method. On the basis of test verification of flow velocity and average particle size distribution of flocs, the influence of feed volume concentration on flocculation behavior in deep cone thickener was studied. The results show that the energy dissipation rate of turbulent flow above the annular baffle in the feedwell is about 2 orders of magnitude higher than that in the lower area, and the energy dissipation rate of turbulent flow below the baffle first increases and then decreases with the increase of feed volume concentration. The average particle size of flocs first increases and then decreases with the increase of feed volume concentration, and the average particle size of flocs is larger under the condition of medium feed volume concentration (10%). Appropriately increasing the length of the feedwell can improve the flocculation effect of fine mineral particles. The research results can provide guidance for modeling turbulent flocculation kinetics and optimizing flocculation thickening process parameters.

Key words: Particle flocculation, Turbulence characteristic, Thickener, Population balance model, Numerical simulation

0 引言

絮凝技术是通过添加絮凝剂(如铝盐、铁盐、高分子聚合物等),使水中难以沉降的微小胶体颗粒脱稳、聚集形成较大絮体,从而实现固液分离的方法,被广泛应用于水处理、矿冶、食品、化工等固液分离领域[1-3]。随着矿产资源的不断开发利用,贫、细、杂等难选矿的处理通常需要更细的选别粒度和更高的处理量,不可避免地会产生大量含有微细矿物颗粒的尾矿。这类尾矿经深度浓缩脱水后,不仅可封存

* **收稿日期**:2025-07-30

基金项目:辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212410144059);沈阳理工大学引进高层次人才科研支持计划项目(1010147001204);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2025-BS-0357)

作者简介:王学涛(1990—),男,辽宁朝阳人,博士,讲师,主要从事复杂多相流动过程模拟及矿产资源高效综合利用方面的研究工作。E-mail:wangxuetao@sylu.edu.cn

通信作者:毛治然(2000—),男,江苏东台人,硕士研究生,主要从事絮凝浓密过程模拟方面的研究工作。E-mail:maozhiran@126.com

于尾矿库,还可用于回填采空区或制作建筑材料[2]。在推动矿产资源高效开发利用和生态环境保护协调发展的过程中,絮凝技术因其具有高效、经济、操作相对简便等优点,在矿物浮选、精矿浓缩和尾矿沉降工艺中发挥着至关重要的作用,而矿物颗粒絮凝效果直接影响上述浮选、沉降等工艺技术指标[4]。因此,提高矿物颗粒尤其是微细级矿物颗粒絮凝效果对提高矿产资源利用率和生态环境保护至关重要。

矿物颗粒絮凝是在湍流场环境下实现的,矿浆流体的动力学特性对颗粒凝聚及絮团破碎的动态平衡具有重要影响。相较于传统的物理试验研究方法,基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)-群体平衡模型(Population Balance Model,PBM)耦合的数值模拟方法虽然无法预测絮团的空间结构特征,但可观测絮凝反应器内部流场特性和絮团粒度分布情况,对湍动液固两相流场下的颗粒絮凝行为进行预测,为全面理解絮凝过程中流体力学和物理化学之间的复杂平衡提供了技术手段[5-6]。PBM 框架下的颗粒絮凝动力学模型主要包括 Smoluchowski 模型、Camp & Stein 模型、Saffman & Turner 模型和来自澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)学者 Heath 等开发的群体平衡模型。其中,Smoluchowski 模型基于层流和絮团球形假设,Camp & Stein 模型采用体积平均湍流描述湍流诱导的颗粒凝聚速率,Saffman & Turner 模型进一步确立了局部湍流对颗粒凝聚速率的定量化描述,但上述三者均未考虑絮团破碎作用。相比之下,Heath 等[7]不仅考虑了局部湍流、颗粒碰撞效率、矿浆黏度、絮团分形结构等对颗粒凝聚速率的影响,同时考虑了絮团破碎作用,其模型可靠性通过全尺度的浓密机给料井絮凝试验进行了验证,为浓密机给料井结构设计及微细矿物颗粒絮凝浓密工艺优化提供了重要理论指导和技术参考。同时,Gheshlaghi 等[8]、Ruan 等[9]也采用了 Fluent 中 PBM 模块的内置模型对浓密机内尾矿絮凝浓密过程进行了数值模拟,但上述模型对矿物颗粒絮凝动力学的数学描述适用性略显不足。

本研究基于 CFD-PBM 耦合框架,考虑了絮团分形结构特征对矿浆黏度和絮团有效密度的影响,建立了有机高分子类絮凝剂吸附模型和基于局部湍流特性的微细矿物颗粒凝聚速率模型,以及絮团破碎速率模型,通过实验室尺度深锥絮凝浓密试验验证了所建立数值模型的可靠性。在此基础上,研究了给料体积浓度对浓密机内部流场特性和絮凝性能的影响规律。研究结果可为丰富絮凝动力学理论及提高浓密机工作效率提供技术参考。

1 物理模型的建立

以自建的实验室连续絮凝浓密系统(如图 1 所示)为研究对象,并根据深锥浓密机结构建立物理模型(见图 2)。该模型结构特征和主要几何参数如图 2(a)所示,其中给料井为大高径比变径式结构,耙架刮板为变径三叶片式结构。

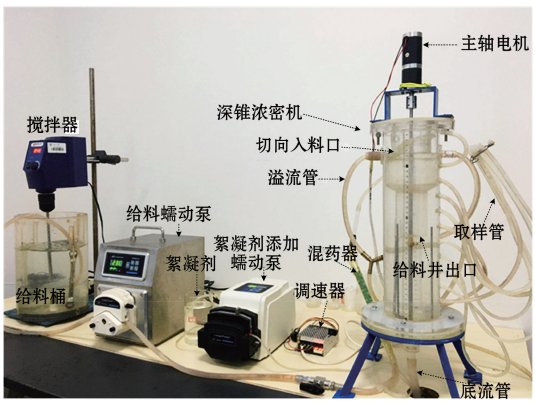


图 1 实验室连续絮凝浓密系统

Fig.1 Continuous flocculation thickening system in laboratory scale

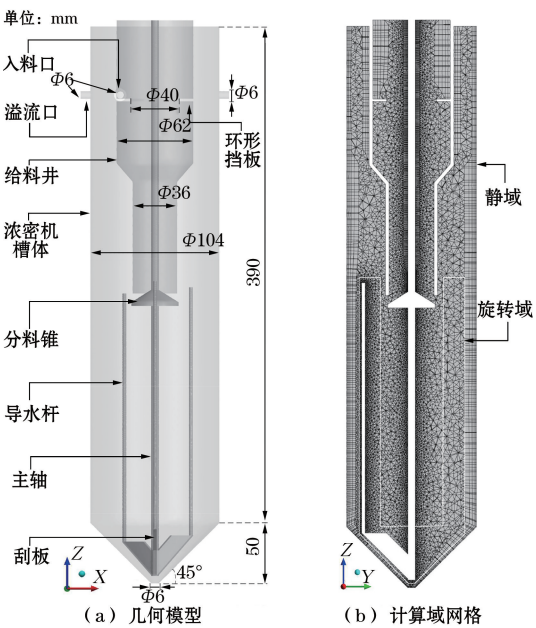


图 2 深锥浓密机几何模型及计算域网格划分

Fig.2 Geometry model and computational domain mesh division of deep cone thickener

针对深锥浓密机内部流体计算域结构复杂的特点,采用对复杂几何结构适应性较好的四面体网格划分方法对流体计算域进行离散,同时对浓密机给料井边壁、刮板及导水杆邻近区域网格进行局部加密。经网格无关性验证试验,确定计算域网格数量为 888 083,网格剖面如图 2(b)所示。

2 数值模型的建立

2.1 多相流模型

絮凝过程中固体颗粒相与液相存在密度差异,受流体曳力作用,相间作用形式为两相间的相对运动速度。采用 Euler-Euler 法描述固-液两相流的相间作用,求解固体颗粒相和液相的动量方程和连续性方程可参见相关文献[10]。

Schiller-Naumann 模型[11]在高雷诺数时,拖曳力会无限增大,不符合物理实际。因此,采用修正后的 Schiller-Naumann 模型计算固-液两相曳力作用。该模型通过引入颗粒雷诺数和连续相速度的模,避免当颗粒速度接近流体速度时出现非物理加速或减速现象,保证惯性体系下颗粒的极限行为符合物理规律。修正曳力模型数学表达式如下:

$$C_D=\max\left(\frac{24}{Re_s}(1+0.15\,Re_s^{0.687}),0.44\right) \tag{1}$$

$$Re_s=\varphi_1\rho_1\frac{|\boldsymbol{U}_s-\boldsymbol{U}_1|\bar{d}_s}{\mu_1} \tag{2}$$

式中:C_D为曳力函数;Re_s为固体颗粒雷诺数;ρ 为密度;$\boldsymbol{U}$ 为速度矢量;φ 为体积分数;$\bar{d}_s$ 为固体颗粒平均粒径;μ 为动力黏度;下标 l、s 分别为液相和固相,即水和矿物颗粒。

2.2 湍流模型

浓密机内部尤其是给料井内为复杂湍流场,湍流的产生和发展为非稳态、多尺度的随机运动,矿浆压力损失、絮凝剂和料浆的混合、颗粒之间的碰撞、凝聚及絮团的破碎在很大程度上受湍流尺度和湍流动能耗散率的影响[12]。考虑浓密机切向给料条件下给料井内为强旋流湍流态,因此采用对大曲率涡旋流具有更好预测性的 RNG k-ε 湍流模型描述液相湍流涡黏性。

2.3 絮凝动力学模型

尾矿中固体颗粒粒度分布范围较宽,一般为几微米至上百微米,因此,采用对宽粒度分布条件及多相流输运方程求解有较强适应性的多尺寸群组(MUSIG)模型求解颗粒凝聚和絮团破碎行为。颗粒群粒度变化通过耦合在 MUSIG 框架下的群体平衡方程进行求解,数学模型框架[13]如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s\varphi_s f_i)+\frac{\partial}{\partial x^i}(\boldsymbol{U}_s^i\rho_s\varphi_s f_i)=B_{Bi}-D_{Bi}+B_{Ai}-D_{Ai} \tag{3}$$

式中:f_i为颗粒体积分数;$\boldsymbol{U}_s^i$为颗粒速度;B_{Bi}为絮团破碎生成小絮团/颗粒的生长速率;D_{Bi}为絮团破碎生成小絮团/颗粒的消亡速率;B_{Ai}为颗粒凝聚生成絮团的生长速率;D_{Ai}为颗粒凝聚生成絮团的消亡速率;i、j、k 分别为第 i、j、k 粒度组。其中,B_{Bi}、D_{Bi}、B_{Ai}、D_{Ai}均是凝聚速率 $\eta(m_i;m_j)$和破碎速率 $\xi(m_i;m_j)$的函数。

2.3.1 凝聚速率模型

前期研究大多基于平均剪切率对颗粒凝聚速率进行描述,且对颗粒碰撞效率考虑不足[8-9],而局部湍流特性和碰撞效率对颗粒凝聚行为具有重要影响,因此,建立凝聚速率模型[13]如下:

$$\eta(m_i;m_j)=\alpha\times1.294\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_1}}(a_i+a_j)^3 \tag{4}$$

式中:α 为颗粒有效碰撞效率,本研究假定颗粒具有较高的碰撞效率,取 0.5;a 为颗粒半径;m_i、m_j 分别为第 i、j 黏度组的颗粒质量;ε 是湍流动能耗散率;μ_1是液相水的动力黏度。

由于絮团具有分形结构特征,内部空隙通常被水填充,因而其包裹体积(有效体积)通常大于真实体积,导致其有效密度低于真密度,局部矿浆表观体积分数和矿浆的黏度同时增加。为更准确地描述矿浆的局部黏度,本文采用有效黏度μ_{eff}对式(4)中的流体运动黏度 μ_1 进行修正,其满足:

$$\mu_1=\frac{\mu_{eff}}{\rho'}=\frac{\mu_{eff}}{\rho_s\varphi_s+\rho_1(1-\varphi_s)} \tag{5}$$

式中,μ_{eff}为矿浆有效黏度。

引入分形维数 D_f对矿浆黏度进行修正,建立矿浆有效黏度、固相颗粒有效体积分数、固相最大体积分数、絮团平均粒度和絮团分形维数的函数关系[13]:

$$\mu_{eff}=\mu_1\left(1-\frac{\varphi_{eff}}{\varphi_{max}}\left(\frac{\bar{d}_f}{\bar{d}_0}\right)^{3-Df}\right)^{-k_0} \tag{6}$$

$$\rho_f=\rho_s\left(\frac{d_f}{d_0}\right)^{D_f-3} \tag{7}$$

$$\bar{d}_f=\frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2} \tag{8}$$

式中:φ_{eff}是固相颗粒有效体积分数;φ_{max}是固相颗粒最大体积分数;$\bar{d}_f$ 是絮团平均直径;d_f是絮团直径;d_0是初始颗粒直径;D_f是絮团质量分形维数;k_0是模型常数;ρ_f是絮团有效密度;N_i 是第 i 组颗粒数量;d_i 是第 i 组颗粒直径。参考先前研究结

果[7, 10, 14],φ_{max}、D_f、k_0分别取0.65,2.40,2。

2.3.2 破碎速率模型

本文假设絮团破碎均以二元破碎机制进行,即一个絮团破碎生成两个等直径的子絮团/颗粒。综上所述,建立絮团破碎速率数学模型:

$$\xi(m_i;m_j)=\frac{k_1\varepsilon^{k_2}}{\psi_f}\mu_{eff}d_{agg,i} \tag{9}$$

式中:k_1,k_2分别为破碎核修正常数项和指数项,分别取 38.1 和 0.677;ψ_f为单位面积絮凝剂吸附量;$d_{agg,i}$为絮团的特征直径。

$$\psi_f=\chi\frac{M_f}{A_s}(1-\zeta) \tag{10}$$

$$A_s=N\cdot 4\pi\bar{R}^2 \tag{11}$$

$$N=\frac{V_t}{V_0}=\frac{M_s/\rho_s}{4\pi\bar{R}^3/3} \tag{12}$$

式中:χ 为絮凝剂混合指数,取 0.8;M_f为絮凝剂用量,取 20 g/t;ζ 为絮凝剂降解率,取 0.1,即絮凝剂在固体颗粒表面具有较强的吸附强度;A_s为颗粒表面积总和;$\bar{R}$ 为给料颗粒的平均半径;M_s为给料中颗粒总质量;N 为颗粒总数量;V_t为颗粒总体积;V_0为单个颗粒体积。

2.4 物性参数测定及数值模型参数

本研究参考辽宁某选厂铁尾矿物性参数测定结果[10],密度为 2 673 kg/m^3,动力黏度为 1.143×10^{-3} Pa·s,给料体积浓度为 6.193%,质量分数约为 15%。液相水的密度为 997 kg/m^3,动力黏度为 8.98×10^{-4} Pa·s。

采用 Malvern 2000 激光粒度分析仪器测试铁尾矿粒度分布,如图 3 所示。由图 3 可知,铁尾矿平均粒度为 32 μm。为了更精确模拟不同粒级颗粒间的碰撞和絮凝作用,将给料粒度按等直径离散法则离散成 30 个粒级,离散后的颗粒粒度范围为 10.78~346.22 μm,各粒级详细占比可参考文献[10]。

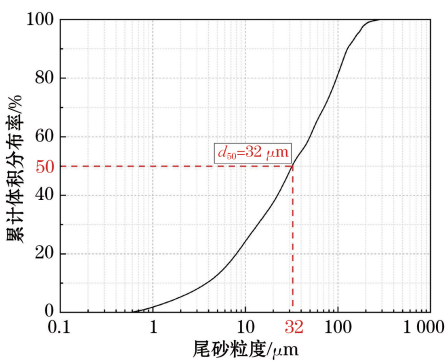


图 3 铁尾砂粒度分布

Fig.3 Particle size distribution of iron tailings

2.5 边界条件及数值求解

参考实际絮凝沉降试验,设定给料入口为速度入口边界条件,速度为 0.4 m/s;湍流强度为中等湍流强度,取 5%;底流口为速度出口边界条件,速度为 0.08 m/s;溢流口为压力出口边界条件,静压值为 0,即允许液相自由流出;其余计算域边界均设为无滑移壁面,采用 Scable 壁面函数求解近壁面处方程。考虑耙架转动,旋转域设定耙架外缘线速度约为 0.026 m/s。采用基于多重参考坐标系法的冻结转子模型处理动、静两流体域交界面。

采用稳态方法在 ANSYS CFX 软件上求解 CFD-PBM 耦合方程,其中高阶和低阶迭代格式各占 50%。采用自动时间尺度法则进行计算,即求解器根据选择的物理模型、几何体特征、边界条件、流动特性等自动计算物理时间尺度。收敛性以残差均方根(Root Mean Square,RMS)为参考,考虑浓密机内部湍流作用强、絮团成长和破碎过程复杂且随机性强的特点,将 RMS 收敛参考值设定为 10^{-3},即方程中各项迭代残差值低于该值时,判定计算达到收敛。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

3.1.1 速度场验证

深锥浓密机给料井内为湍流强度较高的湍流场,其局部速度波动受复杂湍流影响,且流场速度对颗粒运动特性具有显著影响。为了验证所建立模型对流体运动速度描述的准确性,采用激光多普勒测试仪(Laser Doppler Velocimetry,LDV)对给料井上段空间参考位置的流体切向运动速度进行了测定,如图 4 所示。

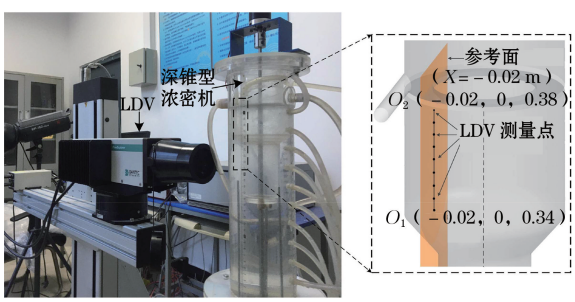


图 4 LDV 测试给料井内参考位置液相切向速度

Fig.4 Liquid tangential velocity of references position in the feedwell by LDV

给料井内液相切向速度的 LDV 测试结果与数值模拟结果对比如图 5 所示。由图 5 可知,二者具

有较好的一致性,初步验证了数值模型对流场特性的描述具有较强的可靠性。

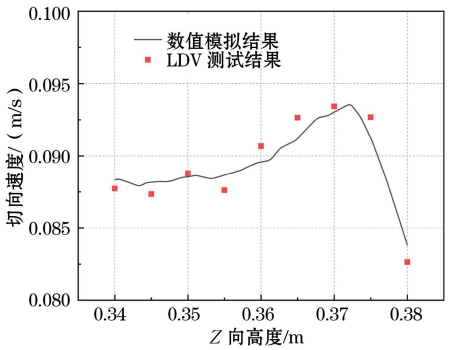


图 5 给料井内液相切向速度 LDV 测试与数值模拟结果对比

Fig.5 Results comparison between LDV test and numerical simulation of liquid tangential velocity in the feedwell

3.1.2 絮团平均粒度分布验证

为进一步验证矿物颗粒絮凝动力学数学模型的准确性,对相同工况条件下深锥浓密机絮凝模拟结果与絮凝沉降试验的絮团粒度进行对比,其中铁尾矿絮凝浓沉降试验的具体药剂制度及操作条件见表 1。

表 1 絮凝沉降试验条件

Table 1 Experiment conditions of the flocculation-settling

絮凝剂	絮凝剂分子量/万	絮凝剂用量/(g/t)	絮凝剂质量分数/%	温度/℃	絮凝剂添加位置
阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)	1 000	20	0.01	25	给料井入口管道

对浓密机给料井出口区域矿浆进行取样,并采用光学显微镜(Motic BA 210-T)获取絮团图像,如图 6(a)所示。为获得准确的絮团粒度分布,采用阈值调整、二值化等方式对絮团图像进行处理[15],并对絮团粒度进行统计分析。絮团处理过程如图 6(b)至图 6(d)所示。

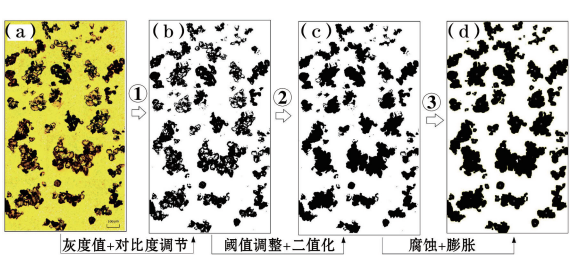


图 6 絮团图像处理过程

Fig.6 Image treatment processing of flocs

浓密机内絮团平均粒度分布模拟结果如图 7 所示。由图 7 可知,尾矿颗粒在给料井内絮凝效果明显,絮团平均粒度沿给料井深度的增加逐渐增加,在给料井出口区域平均粒度最大。以给料井出口处"半环形"区域为取样区域,其絮团粒度加权平均值 d_{area} 为 129.78 μm。绘制该取样区域的絮团粒度累计体积分布率,并与试验结果进行对比,如图 8 所示。

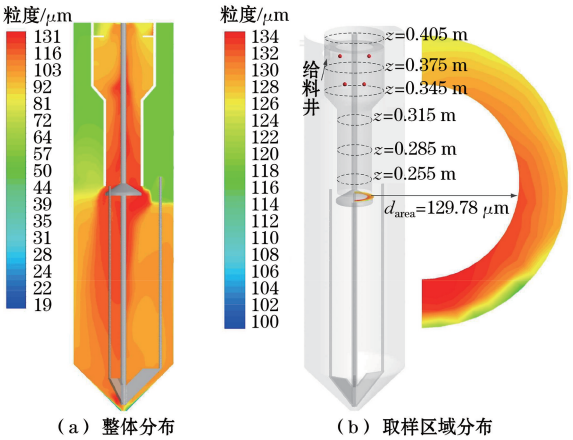


图 7 浓密机内絮团平均粒度分布模拟结果

Fig.7 Simulation results of mean size distribution of floc in the thickener

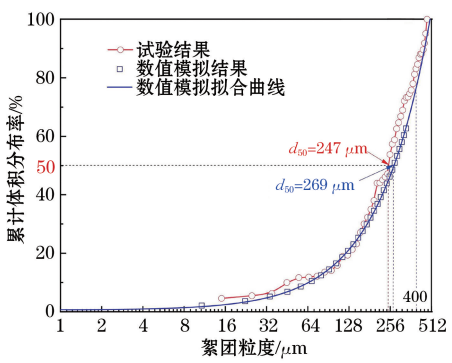


图 8 试验与数值模拟絮团粒度分布结果对比

Fig.8 Results comparison of floc size distribution between experiment and numerical simulation

由图 8 可知,絮团中值粒度约为铁矿尾砂中值粒度的 8 倍,絮凝效果显著。当絮团粒度小于中值粒度时,模拟预测与试验结果的一致性更强。通过去除离散度较高的预测值,对模拟结果进行幂函数拟合,可以看出,拟合曲线与试验结果相近,预测的絮团中值粒度与试验结果的相对误差为 8.91%。综上,数值模型对絮团粒度分布预测结果具有一定的可靠性,能够进行后续计算。

3.2 给料体积浓度对湍流场特性和絮凝性能的影响

3.2.1 给料体积浓度对湍流动能耗散率的影响

为探究给料体积浓度对浓密机给料井絮凝性能

的影响,对不同给料体积浓度(3%、5%、10%、15%、20%)条件下的絮凝行为进行了数值模拟分析。给料体积浓度对给料井内不同高度湍流动能耗散率的影响如图 9 所示。

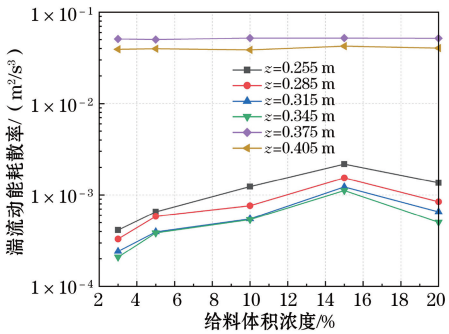


图 9 给料体积浓度对给料井内湍流动能耗散率的影响

Fig.9 Effect of feed volume concentration on turbulence kinetic energy dissipation rate in the feedwell

由图 9 可知,给料井入口高度,即环形挡板上方($z=0.375$ m 和 $z=0.405$ m)的湍流动能耗散率与给料井环形挡板下部空间相比,高出约两个数量级,该区域较高的湍流动能耗散率,有利于絮凝剂混合并提高颗粒碰撞频率。给料体积浓度对环形挡板上部区域影响较小,而环形挡板下方湍流动能耗散率随给料体积浓度的增加呈先增加后降低的趋势。其原因可能是:随着给料体积浓度的增加,颗粒间相互作用距离变小,颗粒扩散对湍流的反向调制作用增强,湍流动能耗散率较高;而当给料体积浓度过高时(>15%),矿浆黏度显著增加,且黏度效应起主导作用,导致湍流动能耗散率降低。

3.2.2 给料体积浓度对絮团平均粒度的影响

给料体积浓度对给料井内絮团平均粒度的影响如图 10 所示。由图 10 可知,随着给料体积浓度的增加,给料井内不同高度处絮团平均粒度均呈先增大后减小的趋势。给料体积浓度为 10%时,絮团平均粒度最大,表明絮凝效果最好。当给料体积浓度过低时,颗粒间相互碰撞频率相对较低,而当体积浓度过高时,矿浆黏度增加显著,黏度主导的矿浆流变特性会降低颗粒有效碰撞频率,且增大絮团破碎速率。固定给料体积浓度条件,矿浆沿着给料井向下运动时,增加其在给料井内的停留时间有助于提高絮团平均粒度。因此,对于当前物料,控制浓密机给料体积浓度在 10%左右,可考虑适当增加给料井长度以提升微细矿物颗粒絮凝效果。

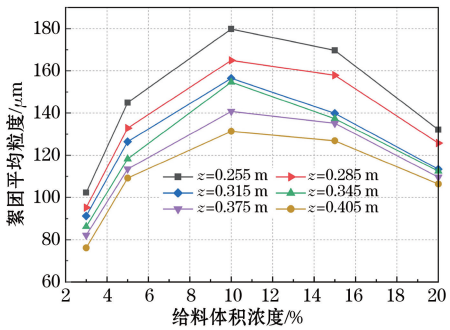


图 10 给料体积浓度对给料井内絮团平均粒度分布的影响

Fig.10 Effect of feed volume concentration on mean floc size distribution in the feedwell

4 结论

本文基于 CFD-PBM 耦合框架,建立了微细矿物颗粒湍动絮凝动力学模型,在试验验证的基础上考查了给料体积浓度对深锥浓密机给料井内湍流特性和絮凝性能的影响规律,得出以下主要结论。

(1) 基于局部湍流动能耗散率和絮团分形维数修正的絮凝动力学模型能够较准确地对微细矿物颗粒絮凝行为进行预测,为湍动絮凝数值模拟提供了理论基础。

(2) 大高径比给料井环形挡板上下区域湍流动能耗散率差异显著,挡板上方区域湍流动能耗散率高于下方区域约两个数量级;给料体积浓度变化对挡板上方区域湍流动能耗散率影响较小,而挡板下方区域湍流动能耗散率随着给料体积浓度的增加呈先增加后降低的趋势,给料体积浓度为 15%时达到最大值。

(3) 絮团平均粒度随给料体积浓度的增加先增大后减小,中等给料体积浓度(10%)条件下,絮团平均粒度最大,絮凝效果最好。适当增加给料井长度可提升微细矿物颗粒的絮凝效果。

参考文献(References):

[1] 吴凡,张凌云,潘瑞凯,等.全尾砂浆絮凝沉降试验及深锥浓密机选型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):46-52.
Wu Fan, Zhang Lingyun, Pan Ruikai, et al. Test of flocculation settlement of whole-tailing slurry and selection of deep cone thickener [J]. Mining Research and Development,2024,44(12):46-52.

[2] 阮竹恩,吴爱祥,焦华喆,等.我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J].中国有色金属学报,2022,32(1):286-301.
Ruan Zhuen, Wu Aixiang, Jiao Huazhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 286-301.

[3] 李杰,杨文俊,景思雨,等.黏性泥沙絮凝研究现状与进展[J].长江科学院院报,2022,39(4):8-13.
Li Jie, Yang Wenjun, Jing Siyu, et al. Research status and progress of cohesive sediment flocculation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 8-13.

[4] 陈格仲,李翠平,阮竹恩,等.膏体充填中絮凝条件对絮团结构及固液分离效率的影响[J].中国有色金属学报,2022,32(10):3169-3182.
Chen Gezhong, Li Cuiping, Ruan Zhuen, et al. Influence of flocculation conditions on floc structure and solid-liquid separation in cemented paste filling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(10):3169-3182.

[5] 王学涛,崔宝玉,魏德洲,等.浓密机内部流场数值模拟研究进展[J].金属矿山,2019(11):161-168.
Wang Xuetao, Cui Baoyu, Wei Dezhou, et al. Research progress on the numerical simulations of internal flow field of thickener[J]. Metal Mine,2019(11):161-168.

[6] 王小宇,崔宝玉,王学涛,等.浓密机给料井结构优化及模拟仿真研究现状[J].金属矿山,2024(9):220-228.
Wang Xiaoyu, Cui Baoyu, Wang Xuetao, et al. Research status on optimization and simulation of thickener feedwell structure[J]. Metal Mine,2024(9):220-228.

[7] Heath A R, Bahri P A, Fawell P D, et al. Polymer flocculation of calcite: population balance model[J]. AIChE Journal,2006,52(5):1641-1653.

[8] Gheshlaghi E M, Goharrizi A S, Shahrivar A A, et al. Modeling industrial thickener using computational fluid dynamics (CFD), a case study: tailing thickener in the Sarcheshmeh copper mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2013,23(6):885-892.

[9] Ruan Z E, Li C P, Shi C. Numerical simulation of flocculation and settling behavior of whole-tailings particles in deep-cone thickener[J]. Journal of Central South University,2016,23(3):740-749.

[10] Wang X T, Cui B Y, Wei D Z, et al. CFD-PBM modelling of tailings flocculation in a lab-scale gravity thickener[J]. Powder Technology,2022,396:139-151.

[11] 韩超.基于气液两种控制机制协调的鼓泡塔流动结构研究[D].天津:天津大学,2020.
Han Chao. Research on flow structure in bubble column based on compromise of gas-dominated and liquid-dominated mechanisms[D]. Tianjin: Tianjin University,2020.

[12] Fawell P D, Nguyen T V, Solnordal C B, et al. Enhancing gravity thickener feedwell design and operation for optimal flocculation through the application of computational fluid dynamics[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2019,42(7):496-510.

[13] 王学涛.细粒级矿物颗粒絮凝过程及沉降脱水特性数值模拟研究[D].沈阳:东北大学,2022.
Wang Xuetao. Numerical simulation of flocculation process of fine mineral particles and characteristics of subsequent sedimentation and consolidation[D]. Shenyang: Northeastern University,2022.

[14] Wang X T, Cui B Y, Zhao Q, et al. Particle flocculation in a stirred tank: a microscopic test by coupled CFD-DEM approach[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2022,10(1):107005.

[15] 杨莹,吴爱祥,王先成,等.基于图像处理的尾砂絮凝沉降与浓密机关键参数研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):68-76.
Yang Ying, Wu Aixiang, Wang Xiancheng, et al. Study on flocculation and sedimentation of tailings based on image processing and the key parameters of thickener[J]. Mining Research and Development,2023,43(6):68-76.