

深锥浓密机直径和锥角优化的模拟仿真

程天冲, 杨仕教, 张仕豪, 梁金成

(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘要] 深锥浓密机最小直径通常由其单位面积处理量确定, 锥角一般取经验值为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 设计时, 结合物料基本性质由经验进行取值, 具有一定的主观盲目性。本文采用数值模拟方法对深锥浓密机直径和锥角进行优化。首先, 通过对直径 $d = 180 \text{ mm}$ 、高度 $h = 2 \text{ m}$ 的大尺寸模型浓密实验机开展浓密实验, 获取入料后不同时间点的底流浓度, 然后, 将实验结果与模拟仿真结果对比, 结果显示均方根误差均小于 0.5, 验证了模拟仿真结果的准确性。最后, 基于某矿山的实际情况, 利用模拟仿真技术优化深锥浓密机的锥角和直径。结果表明, 在深锥浓密机单位面积处理量为 $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、全尾砂处理量 40 t/h 的条件下, 浓密机锥角为 30° 、直径为 11 m 时, 在相同时间内底流浓度最高, 且达到最高浓度的时间也最短。模拟仿真较好地解决了深锥浓密机参数设计时的主观盲目性问题, 可推广应用。

[关键词] 全尾砂浓密; 直径; 锥角; 数值仿真; 沉降模拟

[中图分类号] TD462.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)03-0077-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.03.014

0 引言

全尾砂绿色处置技术^[1]是指将地表全尾砂制成不脱水、不离析、不沉淀的膏状物料, 通过输送管道将其泵送到尾矿库和采空区进行井下膏体充填的方法。浓密机因其浓缩效率高、自动化程度高、节能环保且适应性强等特点, 广泛应用于污水处理、冶金、矿业等行业, 可获得较高的底流浓度, 并使澄清层具有较低的含固量。随着膏体充填技术的发展, 浓密机逐渐成为膏体充填中重要的脱水设备^[2]。

深锥浓密机的关键结构参数(特别是直径和锥角)选型至关重要, 如果参数不合理, 往往会导致整个深锥浓密系统出现运行效率下降、动力负荷过重、运营成本过高、底流不稳及溢流浑浊等问题。全尾砂充填系统中的深锥浓密机关键参数(直径和锥角)主要依据全尾砂沉降实验和深锥浓密机设计经验公式计算获得, 这种方法存在实验成本高、周期长、参数选取主观性大的缺点, 且深锥浓密机直径、锥角参数设计过大或过小都会出现不同的问题, 从而影响底流尾砂浓度。

在浓密机尺寸设计过程中, 通常通过其单位面积处理量求得最小直径作为浓密机的直径^[3]。当浓密机直径较小时, 设备投资小, 其单位面积处理能力大, 添加剂用量较大, 操作成本增加, 容易出现溢流跑浑现象; 当直径较大时, 设备投资增加, 但其单位面积处理能力小, 在保证溢流浓度满足要求的前提下可以减少药剂用量, 从而降低运营成本。在浓密机锥角确立过程中, 通常结合物料基本性质由经验取值^[4]。当锥角选择较小时^[5], 不仅降低浓密机锥部区域比例, 还增加槽体高度; 当锥角选择较大时, 浓密机锥部体积增加, 在注入料浆体积相同时底流浓度降低。即直接采

[收稿日期] 2024-11-04

[作者简介] 程天冲(1999—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事矿山充填理论与技术的研究。

[通信作者] 杨仕教(1964—), 男, 湖南浏阳人, 博士, 教授, 主要从事采矿工程、岩土工程研究。

[引用格式] 程天冲, 杨仕教, 张仕豪, 等. 深锥浓密机直径和锥角优化的模拟仿真[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(3): 77-83.

CHENG Tianchong, YANG Shijiao, ZHANG Shihao, et al. Optimization of diameter and cone angle of deep cone thickener based on simulation [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(3): 77-83.

用最小直径以及锥角经验值具有盲目性以及不准确性的。

本文根据湖南某矿山的具体情况,基于模拟仿真软件,在给料浓度和给料体积一定时,改进无耙深锥浓密机的锥角和直径,以获得较高的底流浓度和含固量较低的溢流水。

1 全尾砂浓密沉降模型实验

1.1 全尾砂理化性质及其对底流浓度的影响

1.1.1 化学成分及其对底流浓度的影响

全尾矿的主要矿物组成见表 1。

表 1 全尾砂主要成分及含量

组成	闪石	绿泥石	黄铁矿	磁铁矿	钠长石	滑石
含量/%	49.5	15.6	8.9	8.32	6.29	1.2

全尾矿化学元素组成见表 2。

表 2 全尾砂化学元素组成及含量

元素	Fe、Si	Mg、Ca	S	Al	Na、Cl
含量/%	17.5	6	3.5	2.3	1.4

对于含硅量较高的全尾砂,二氧化硅的存在使得颗粒更加坚硬,在剪切作用下,颗粒之间的摩擦和碰撞可能会导致部分颗粒破碎,从而影响底流浓度。如果破碎的颗粒较小,可能会悬浮在溶液中,降低底流浓度;如果破碎的颗粒较大,可能会继续参与沉降过程,对底流浓度的影响相对较小。

对于含铝量较高的全尾砂,氧化铝的存在会增加全尾砂的黏性,在剪切作用下,黏性较大的颗粒可能会相互粘连,形成较大的团块,从而影响底流浓度。如果团块能够快速沉降,底流浓度可能会增加;如果团块不易沉降,底流浓度可能会保持稳定或下降。

1.1.2 物理性质及其对底流浓度的影响

参照国标《土工实验方法标准》(GB/T 50123—2019),采用比重瓶法及相对密度法分别测定全尾砂的真密度及松散密度,结果见表 3。

表 3 全尾砂物理性质

性质	堆密度 ρ_p / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	真密度 ρ_0 / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙率 η /%
数值	1.51	3.202	52.94

全尾砂粒径级配采用激光粒度仪进行分析,可以实现精确测试。该矿山全尾砂的粒径分布见表 4。

表 4 全尾砂粒径分布

筛网/目	粒级/mm	粒级含量/%
+60	+0.250	0.44
-60 ~ +100	-0.250 ~ +0.150	2.32
-100 ~ +150	-0.150 ~ +0.100	4.52
-150 ~ +200	-0.100 ~ +0.074	7.05
-200 ~ +325	-0.074 ~ +0.045	12.55
-325 ~ +400	-0.045 ~ +0.038	5.00
-400	-0.038	68.12

全尾砂的松散密度和真密度决定了全尾砂的孔隙率,进而影响全尾砂料浆的理论饱和浓度。

由斯托克斯定律可知,在密度及分散介质恒定的情况下,颗粒直径越小,其沉降速度也越小,即达到最大底流浓度所需时间越长。

1.2 实验装置

采用的装置主要有大尺寸模型浓密实验机、两台蠕动泵、搅拌器、1 000 mL 试管、MD100Cl—德国 Lovibond 余氯测试仪。

两台蠕动泵分别用于将稀释矿浆泵送进入浓密装置的给料系统中,从实验装置底部泵出底流矿样。在利用蠕动泵抽取矿浆到大尺寸模型浓密实验机的过程中,需用搅拌器均匀搅拌原矿浆,从而确保被抽取尾砂浓度的准确性。1 000 mL 试管用于接溢流水进行测定。MD100Cl—德国 Lovibond 余氯测试仪用于测定溢流水的含固量。

1.3 实验方法

本实验采用的大尺寸模型浓密实验机直径 $d = 180$ mm,高度 $h = 2$ m,如图 1 所示。在本次浓密实验中,浓度 16% 的尾砂矿浆以恒定速度注入浓密机内,并持续注入 2 h,注入完成后记录尾砂 8 h 内的底流浓度。

实验尾砂为选厂提供的铜矿和铅锌矿的混合矿全尾砂,通过蠕动泵抽取原矿浆,经管道接入 $\phi 180$ mm 大尺寸模型浓密实验机,通过计算和调整进料蠕动泵的转速(流量)来确定入料速度。为确保原矿浆内的浓度,在注入阶段需要人工一直不停地用搅拌器搅拌尾砂,避免被抽取的尾砂因重力下沉使得入料浓度不准确的现象发生。

1.4 结果与讨论

浓密实验条件为给料浓度 16%,单位处理量为 $500 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。在注入 2 h 后,抽取溢流水及底流矿浆进行检测,此时底流浓度为 50.12%,溢流水的

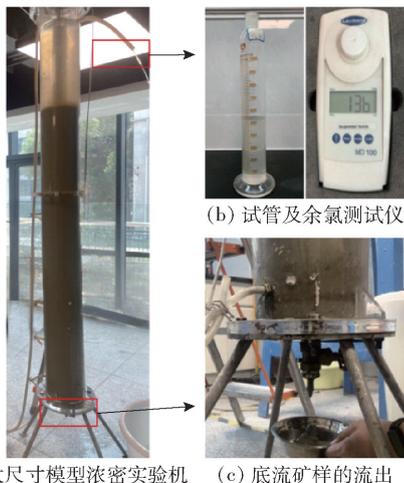


图1 大尺寸模型浓密实验

含固量为 136 mg/L。取样后,大尺寸模型浓密实验机停止运行,其底流进行静置压缩,每 2 h 测一次底流浓度,实验结果如图 2 所示。

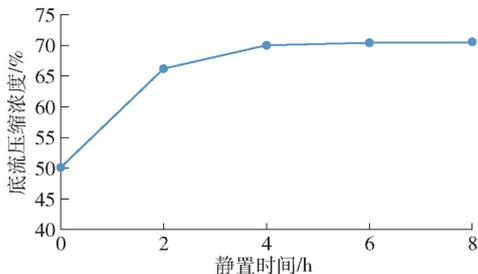


图2 不同静置时间对应的底流压缩浓度

由图 2 可知,随着静置时间的增长,底流浓度逐渐增加。在静置 2 h、4 h 后,底流浓度分别达到 66.2%、70.01%;但后续随着时间的延长,底流浓度的增加不再明显,静置 6 h、8 h 较 4 h 时,底流浓度只增加了 0.41%、0.56%,说明此时的底流浓度已达到最大值,其值为 70.57%。

2 全尾砂浓密沉降模拟仿真

2.1 物理场景及模拟模型

模拟的沉降物理场景是基于图 1 建立无耙大尺寸模型浓密实验机的模拟模型,在得到静置 2 h、4 h、6 h、8 h 的底流浓度后与物理实验结果进行比较,证明模拟结果的准确性。全尾砂真密度为 3.202 g/m^3 ,粒径分配见表 4。

2.2 模拟方法

2.2.1 几何模型

考虑到大尺寸模型浓密实验机具有轴对称特性,在不影响结果准确性的前提下,采用二维轴对称分布进行建模。

2.2.2 边界条件

本次模拟实验的边界条见表 5。

表5 边界条件的设置

参数	入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	滤水出口压力/Pa	底部出口	壁面
数值	5	0	封闭	无滑移

此外,整个模型受到竖直向下的重力,重力加速度为 9.8 m/s^2 。

2.2.3 模型选择

1) 混合物模型可用于两相或多相流(流体或颗粒),因为在混合物模型中,每个相都被看作是一个连续的物体相互连接。混合物模型求解的是混合物的动量方程,并用相对速度描述离散相。混合模型也可用于不含离散相相对速度的均相多相流系统。混合物模型可以通过求解混合物的动量、连续性和能量方程、分散相的体积分数方程和相对速度的代数表达式来模拟相(流体或颗粒),典型的应用包括沉降分离器、旋风分离器、低负荷颗粒流和低体积分数的气泡流。混合模型允许选择选择颗粒相并计算颗粒相的所有性质,适用于固液两相流^[6]。

2) 欧拉模型是一个非常复杂的多相流模型。它建立了一套包含 n 个动量方程和连续方程的方程组来求解每一相。耦合方法取决于所包含相的情况,颗粒流的处理与非颗粒流不同。对于颗粒流,可以应用分子运动理论获得颗粒流的流动特性,它们之间的动量交换也取决于混合物的类型^[6]。

本文采用混合物模型,因为混合模型是一个简化的多相模型,其计算量远小于双欧拉模型,在求解较少变量时,其性能与双欧拉模型相当^[7-8]。

混合物模型由连续相和分散相组成^[9-10],其中,连续相由水构成,分散相由颗粒组成,根据表 4 不同粒径范围,分散相划分为 7 个,大幅提高了精度^[11]。

2.2.4 网格划分

基于流体动力学原理,大尺寸模型浓密实验机模型网格划分如图 3 所示。网格形状为自由三角形网格。在网格划分过程中,如果网格过密会导致计算量过大,如果网格过稀疏则会影响计算精度。故本文在入口 1 和滤水出口 2 处采用较小单元三角形网格,增加网格数量,在其他位置则采用较大单元三角形网格,减少网格数量。这样的网格划分既保证了特别位置处的计算精度又保证计算量不会过大。

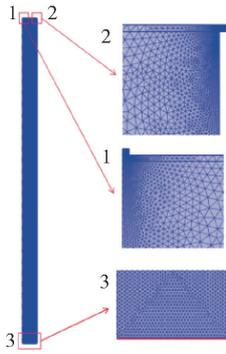


图3 网格划分

2.2.5 网格独立性检验

对比不同网格数量条件下浓密机的底流浓度,结果如图4所示。

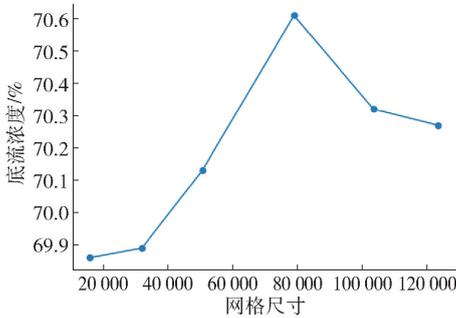


图4 网格独立性检验

由图4可知,随着网格数增多,底流浓度先上升后下降,当网格数为79 085时,浓密效果最好,且在误差范围内。其中最大单元大小为0.002 55 m,最小单元大小为 3.64×10^{-5} m,最大单元增长率为1.1,曲率因子为0.25,狭窄区域分辨率为1,整个模型的求解自由度为486 840。此外,为了探究浓密机内底部的浓度,在模型底部处添加了边界探针。

2.2.6 收敛性

本文采用的是分离式瞬态求解器进行求解计算,相对容差为物理场控制,数值上为0.005,绝对容差采用已缩放的全局方法,容差因子为0.05,计算过程中迭代收敛图如图5所示。

从图5中可以看出,在初始计算过程中,步长倒数迅速下降,说明在模型的初始计算阶段计算速度越来越快,然后逐渐变慢,在一定范围内上下波动,总体上趋于稳定,此时模型达到收敛。

2.3 结果分析

模拟得到浓密机内中心点处的全尾砂浓度随时间变化的情况如图6所示。

由图6可知,注入2 h后静置2 h、4 h、6 h、8 h,

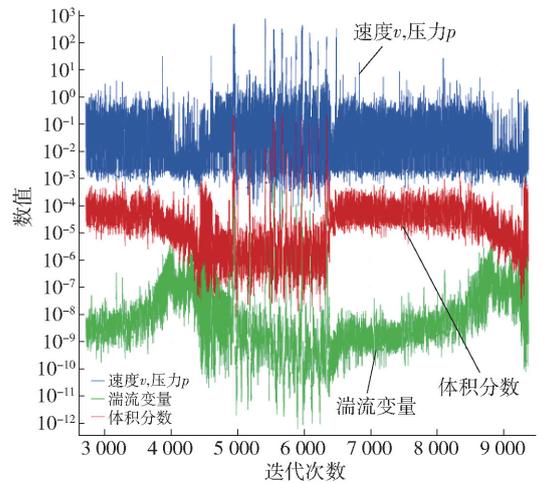


图5 迭代收敛图

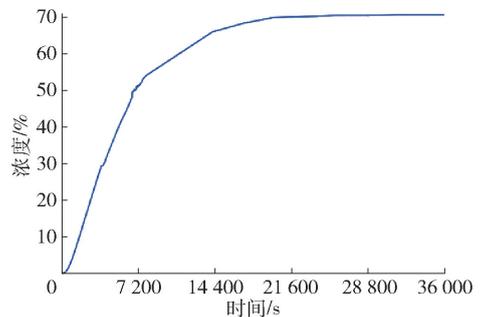


图6 浓密机底部随时间变化的浓度

底流浓度分别为65.81%、69.86%、70.27%、70.61%。前3个节点的模拟值略低于实测值(图2),其原因如下:由于沉降层的压力作用,较下端的尾砂颗粒、絮团可被轻微压缩,少量的内部水^[12]被挤压到上层,从而导致实际底流浓度略高于模拟值。第4个节点的模拟值略高于实测值,其原因如下:在实验模拟中,样品从大模型浓密机底端排出,之后底部又要重新进行自然沉降,且经历了前三次高浓度尾砂的排出,尾砂的干重减少,进而在静置8 h时,底流浓度的模拟值略高于实测值。

通常采用RMSE(均方根误差)来衡量预测值和真实值之间的差异^[13],其计算如式(1)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

式中: n 为样本数量; y 为第 i 个实测值; \hat{y} 为第 i 个模拟值。

以上述4个节点作为样本,通过计算,RMSE值均 <0.5 ,在合理误差范围内,说明此模型模拟仿真的结果具有可靠性,也验证了模拟思路的准确性。

3 深锥浓密机直径和锥角的优化

上述大尺寸模型实验机物理实验与模拟仿真结果的对比,验证了模型以及模拟思路的正确性。但由于工业浓密机规模较大,现场开展优化浓密机参数的实验存在困难,所以本文基于数值模拟优化浓密机参数。

3.1 深锥浓密机参数的初步确立

3.1.1 直径

根据该尾砂动态浓密沉降实验结果,深锥浓密机的单位面积负荷设计为 $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

深锥浓密机直径 d 计算公式^[14]见式(2)。

$$d = \sqrt{\frac{4t}{\pi q}} \quad (2)$$

式中: d 为深锥浓密机直径, m ; t 为全尾砂供给能力, t/h ; q 为单位面积处理能力, $\text{t}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。

需要处理的全尾砂干固量 $t = 40 \text{ t}/\text{h}$, 计算得到深锥浓密机的直径不应小于 10.096 m , 因此, 设计深锥浓密机的直径分别为 11 m 、 13 m 、 15 m 、 17 m 。

3.1.2 锥角

本文采用的锥角范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$, 为避免偶然性, 采用大步长, 即锥角分别设置为 30° 、 45° 、 60° 。

3.2 优化方法

为方便建模, 使用仿真软件的多物理场建模平台构建了一个简化的几何模型, 考虑到深锥浓密机模型具有轴对称特性, 在不影响结果准确性的前提下, 采用二维轴对称分布进行建模^[6], 剖面图如图7所示。

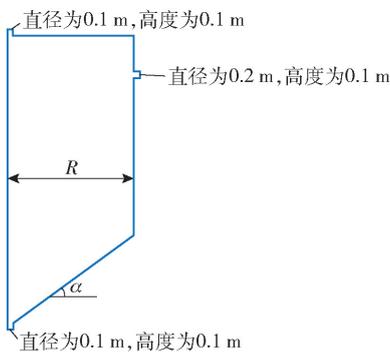


图7 几何图形剖面图

如图7所示, 由于深锥浓密机关于中心轴对称, 在不影响计算结果的前提下, 为减少计算量建立二维轴对称模型。此模型包含了一个入口(直径为 0.1 m 、高度为 0.1 m)、两个滤水出口(直径为 0.2 m 、高度为 0.1 m) 和一个底部出口(直径为 0.1 m 、高度为

0.1 m)。

将上述4种不同的直径和3种不同的锥角进行两两组合, 构建出12种不同的深锥浓密机模型, 然后通过对比这12种不同的模拟仿真结果, 得出最优的模型参数。

3.3 结果分析

12种模拟仿真结果分别如图8~图14所示。

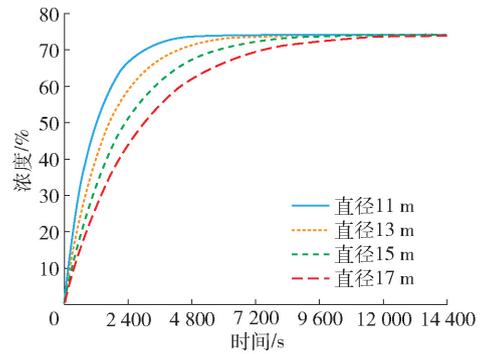


图8 α 为 30° 时不同 d 对应的浓度变化

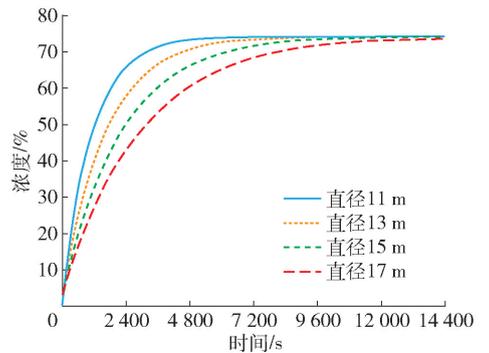


图9 α 为 45° 时不同 d 对应的浓度变化

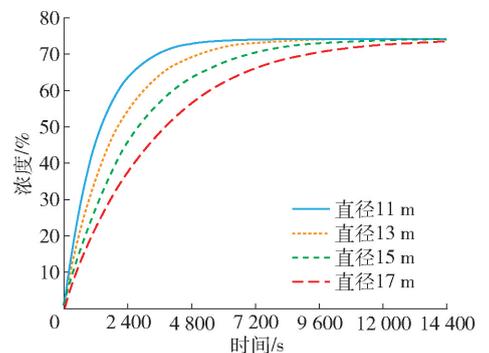


图10 α 为 60° 时不同 d 对应的浓度变化

由图8可知, 当浓密机锥角同为 30° , 相同时间下底流浓度随着直径的减小而增大。当锥角相同时, 浓密机的直径越大, 锥部高度也越大, 从而锥部体积也增大, 沉降层高度会减低, 从而在相同时间下达到的浓度也会逐渐降低。如图9、图10所示, 当锥角为 45° 、 60°

时,模拟仿真结果也与锥角 30°时类似。

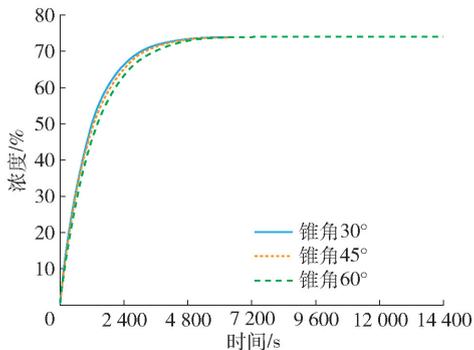


图 11 d 为 11 m 时不同 α 对应的浓度变化

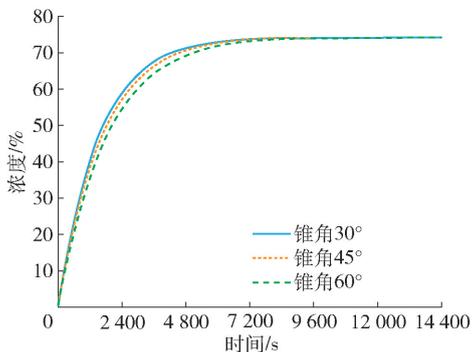


图 12 d 为 13 m 时不同 α 对应的浓度变化

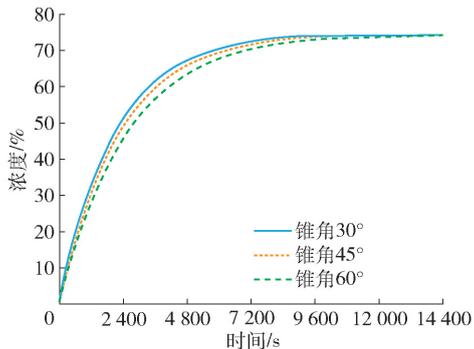


图 13 d 为 15 m 时不同 α 对应的浓度变化

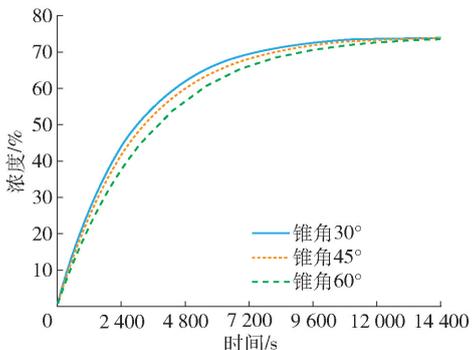


图 14 d 为 17 m 时不同 α 对应的浓度变化

由图 11 可知,当浓密机直径同为 11 m,沉降 30 min 时,锥角 30°、45°、60° 的底流浓度分别为

60.34%、58.89%、56.52%,且最大底流浓度均为 74.1%,达到最大底流浓度的时间分别为 7 942 s、8 393 s、8 545 s。其中,锥角为 30°时所用时间最短,锥角为 60°所用时间最长,这是因为当浓密机的半径相同时,随着锥角的增大,锥部高度也逐渐变高,进而锥部体积也增大,所以在注入料浆的体积相同时,沉降层的高度降低,使得底部压缩的能力降低,所以所需的沉降时间较长一些。

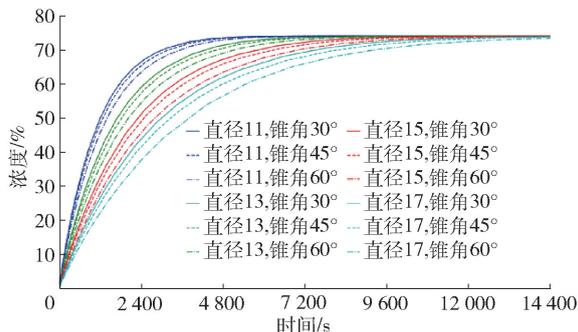


图 15 12 种模拟仿真结果曲线汇总

如图 15 所示,这 12 种模拟仿真的浓度随时间变化趋势基本相同,但在锥角为 30°、直径为 11 m 时,不仅在相同时间内底流浓度最高,且达到最高浓度的时间也最短。

4 结论

1) 将基于大尺寸浓密机模型的模拟仿真结果与大尺寸浓密实验机的实验数据进行对比,误差小于 0.5,在合理范围内,验证了仿真模型的准确性。

2) 基于模拟仿真建立深锥浓密机直径和锥角优化的方法,较好解决了深锥浓密机参数设计时的主观盲目性问题,具有很好的推广应用潜力。

3) 浓密机的直径及锥角设计、优化还会受到其他因素的影响,比如充填过程中尾砂停留时间问题、物料黏度等,将在后续的研究中继续完善。

[参考文献]

- [1] 刘晨生. 全尾砂絮凝沉降行为及浓密强化研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2020.
- [2] 陈鑫政,郭利杰,许文远,等. 基于尾矿沉降试验的深锥浓密机尺寸确定方法[J]. 有色金属(矿山部分), 2020,72(6):107-111.
- [3] 徐继业,帅培,张良兵,等. 基于动态沉降试验的浓密机关键技术参数研究[J]. 采矿技术,2022,22(6):197-201.
- [4] 廖永全. NXZ-25 高效深锥浓密机的改造[J]. 磷肥

- 与复肥,2016,31(10):37-39.
- [5] 刘桂泉,刘林楠. 大型锥斗形全钢结构高效浓密机的开发及应用[J]. 水力采煤与管道运输,2017(3):30-35.
- [6] 肖崇春. 基于全尾砂深度浓密演绎机理的智能预测模型研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [7] SATO Y, SHIMA S, TOMITA H. Numerical convergence of shallow convection cloud field simulations: Comparison between double-moment Eulerian and particle-based Lagrangian microphysics coupled to the same dynamical core [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(7): 1495-1512.
- [8] HUANG S. Numerical simulation of oil-water hydrocyclone using reynolds-stress model for eulerian multiphase flows[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2005, 83(5): 829-834.
- [9] 任伟成. 立式砂仓连续高浓度稳定放砂模型研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [10] MANNINEN M, TAIVASSALO V, KALLIO S. On the mixture model for multiphase flow[J]. 196
- [11] 杨宏丽. 双排尾重浮联合分选机的分级与旋流分选充气机构性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.
- [12] 杨柳华,王洪江,吴爱祥,等. 絮凝沉降对全尾砂料浆流变特性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016,47(10):3523-3529.
- [13] 杨昭. 基于深度学习的屏幕内容图像质量评估[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2024.
- [14] LUO Q. *Solid-liquid Separation*. Beijing[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.

Optimization of Diameter and Cone Angle of Deep Cone Thickener Based on Simulation

CHENG Tianchong, YANG Shijiao, ZHANG Shihao, LIANG Jincheng

(School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The minimum diameter of the deep cone thickener is determined by its unit area processing capacity. The cone angle is generally taken as the empirical value of $30^\circ - 60^\circ$. In the design, they are taken by experience according to the basic properties of the material, which has certain subjective blindness. In this paper, the diameter and cone angle of deep cone thickener were optimized by numerical simulation. Firstly, the underflow concentration at different time points after feeding was obtained by carrying out the thickening experiment on the large-scale model thickening experimental machine with diameter $d = 180$ mm and height $h = 2$ m. Then, the experimental results were compared with the simulation results. The results show that the root mean square error is less than 0.5, which verifies the accuracy of the simulation results. Finally, based on the actual situation of a mine, the cone angle and diameter of the deep cone thickener are optimized by simulation technology. The results show that under the condition that the unit area processing capacity of the deep cone thickener is 40 t/h, the cone angle of the thickener is 30° and the diameter is 11 m, the underflow concentration is the highest in the same time, and the time to reach the highest concentration is the shortest. The simulation solves the subjective blindness problem in the parameter design of deep cone thickener, which can be promoted and applied.

Key words: complete tailings thickening; diameter; cone angle; numerical simulation; deposition modeling