

叶轮转速及颗粒粒径对浮选机固-液两相流场特性影响研究^①

牛福生, 窦念舟, 张晋霞

(华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063200)

摘要: 借助计算流体力学仿真技术, 采用欧拉方法模拟 XFD 型浮选机内部颗粒流动行为, 探究叶轮转速及颗粒粒径对浮选机固-液两相流场分布特征的影响, 揭示浮选机内的流体运动规律; 从速度场、湍流度等方面揭示浮选机的浮选动力学特点。模拟结果表明: 转速 1 800 r/min 时, 存在液相速度最大值 5.32 m/s, 转子区域与下循环区域流体运动速度和湍流动能较高且流场相对稳定, 适合矿物浮选分离; 微细粒矿物颗粒粒径对浮选机内部固-液两相流场特性影响较小, 转子表面压力分布与颗粒粒径密切相关, 且在定子与转子间的区域, 湍流动能显著增强, 促进了赤铁矿颗粒的有效分散。通过赤铁矿浮选试验研究不同叶轮转速下精矿品位以及回收率的变化, 叶轮转速 1 800 r/min 时精矿 Fe 品位为 66.35%, 回收率为 85.34%, 结合浮选流场模拟结果, 叶轮转速 1 800 r/min 比较适合于浮选作业。

关键词: 浮选机; 数值模拟; 固-液两相流; 浮选试验; 湍流动能; 叶轮转速; 流场特征; 颗粒粒径

中图分类号: TD91 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.012

文章编号: 0253-6099(2025)03-0077-07

Effect of Impeller Speed and Particle Size on Solid-Liquid Two-Phase Flow Field Characteristics of Flotation Machine

NIU Fusheng, DOU Nianzhou, ZHANG Jinxia

(College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: By means of computational fluid dynamics simulation technology, the particle flow behavior in a XFD flotation machine was simulated with Euler's method, and the effects of impeller speed and particle size on the distribution characteristics in a solid-liquid two-phase flow field were explored to reveal fluid motion behavior in the flotation machine. The flotation kinetics of the flotation machine was also explored in terms of velocity field and turbulence intensity. The simulation results show that with a rotating speed at 1 800 r/min, the liquid-phase flow moves at a maximum speed of 5.32 m/s, and the fluid motion velocity and kinetic energy of turbulent are higher in the rotor zone and the lower circulation zone. The flow field is relatively stable, which is suitable for mineral flotation separation. The particle size of fine-grained minerals has a minor influence on the solid-liquid two-phase flow characteristics in the flotation machine, and the pressure distribution of the rotor surface is closely related to the particle size. It is found that the kinetic energy of turbulent is significantly enhanced in the region between the stator and rotor, which can effectively promote the dispersion of hematite particles. In a hematite flotation test, the variation in concentrate grade and recovery obtained with different rotation speed of impellers was studied. It is shown that with impeller rotating at a speed of 1 800 r/min, an iron concentrate with Fe grade of 66.35% and recovery of 85.34% can be produced. Based on the simulation of flow field of flotation machine, it is concluded that an impeller with a rotating speed of 1 800 r/m is suitable for flotation operation.

Key words: flotation machine; numerical simulation; solid-liquid two-phase flow; flotation test; turbulent kinetic energy; rotating speed of impeller; flow field characteristics; particle size

① 收稿日期: 2025-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(52374265); 河北省自然科学基金项目(E2022209108); 中央引导地方科技发展资金项目(236Z4106G)

作者简介: 牛福生(1974—), 男, 河北邯郸人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为复杂难选矿理论与工艺。E-mail: niufusheng@126.com

通信作者: 张晋霞(1979—), 女, 山西晋城人, 教授, 主要从事矿物分选理论与工艺等方面的研究工作。E-mail: zhangjinxia163@163.com

浮选作为一种复杂的固液气三相流动和物理变化过程,已成为矿物分选的主要方法之一。浮选机是主要的浮选设备。随着能源和资源日渐匮乏,提升浮选机性能和效率变得尤为重要。优化浮选机性能和效能的基础是合理调控矿物颗粒在浮选机内部的运动状态^[1-2]。虽然实验研究能够直观观察矿浆流场的流动情况,但受矿浆流场的复杂性和可视化水平的限制,测试设备内部矿浆流场的流场参数具有一定难度。

计算流体力学(CFD)可以比较准确地模拟浮选机的内部流场特性,通过求解流体力学的偏微分方程组,利用高性能计算机进行数值计算,可以直观地了解流体的流动状态^[3-5]。使用CFD数值模拟能够大幅降低设备设计成本,并弥补理论研究和实验研究的不足,通过定量或定性分析,优化浮选设备的结构与工作参数,能够改善矿浆流场的动力学状态,进而影响浮选动力学参数,最终显著提升浮选指标,获得更高效的矿物分选效果。

目前,对于浮选过程中内部流场特征的研究大多基于单相或两相介质,然而实际浮选过程复杂,涉及矿物三相流体相互作用,受压力、流量、浓度等流体参数及颗粒特性、浮选机工作参数等多重因素影响^[6-7]。本文利用CFD方法研究XFD型充气搅拌式浮选机的流场分布,探讨叶轮转速及矿物颗粒粒径对浮选机固-液两相流场分布特征的影响,研究结果对改善浮选机的分选效果具有一定指导意义。

1 计算模型及边界条件

1.1 计算模型

以XFD-II型机械搅拌式浮选机为研究对象进行模拟,基于SpaceClaim软件的机械搅拌式浮选机物理模型如图1所示。浮选机容积1.0 L,槽体尺寸86 mm×86 mm×160 mm,叶片角45°,转子直径55 mm,定子直径60 mm。浮选机工作时,叶轮驱动矿浆进行离心运动,在中心形成负压区,该区域有效吸引并抽吸泡沫槽下部矿浆进入叶轮区域,从而实现矿浆的循环流动,这一过程对浮选至关重要。

为贴近实际浮选矿浆流场条件,模拟中保留了浮选机关键部位的几何结构,仅对非关键且对结果影响较小的部位进行合理简化,以确保模拟结果的准确性和有效性。采用Mesh软件对浮选机内部流场计算域进行细致的网格划分,特别针对旋转区域实施加密处理,以确保计算的准确性。网格总数约120万,且整体质量保持在0.3以上,显示较高的网格质量,充分满足了浮选机内部流场数值模拟的精度与效率要求,网格

划分结果见图2。该建模过程充分考虑了浮选机内部复杂的几何结构和运动特性,使得数值模拟能够更真实地反映实际工况。



图1 机械搅拌式浮选机物理模型

Fig. 1 Physical model of mechanical stirring flotation machine

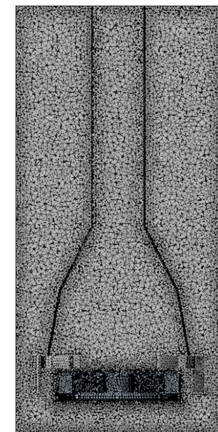


图2 网格划分结果

Fig. 2 Grid division profile

1.2 边界条件

在Ansys Fluent软件中采用Eulerian模型对浮选机进行数值模拟。为了准确模拟叶轮附近区域的流动特性,将叶轮附近区域设置为旋转域,其余计算域设置为静止域。在数值模拟中,液相材料选用清水,固相材料选用密度 5.24 g/cm^3 的赤铁矿颗粒,其体积分数设定为0.1。固相颗粒悬浮在矿浆中,在宏观尺度上很难观察到颗粒与气泡的相互作用,故将固相材料假设为一种具有一定密度的流体,并与清水混合作为矿浆整体。模拟操作环境设定为标准大气压(101 325 Pa),重力加速度为 9.81 m/s^2 。为了保证模拟的准确性,将收敛残差设置为 1×10^{-5} ,以确保数值解足够精确。

选用经典的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来描述浮选机内部的流动行为。对于近壁区的湍流流动采用了标准的壁

面函数来模拟边界层效应。选择压力入口作为进口边界条件,压力出口作为出口边界条件,边界条件的选取符合浮选机内部流动的实际过程。为了处理速度和压力之间的耦合关系,采用 Simple 算法,该算法在求解流场中的压力和速度之间的相互作用方面具有良好的稳定性和收敛性。空间离散梯度采用 Least Squares Cell Based 方法,压力采用 PRESTO 压力差值算法,湍流动能及湍流耗散率采用 Second Order Upwind 方法,在模拟过程中,设定当空气进口流量与出口流量达到平衡状态时,浮选机的运行达到了稳定状态,通过迭代计算直到数值解收敛,终止模拟过程。通过以上设定和假设对 XFD 型浮选机进行数值模拟并计算其内部流场的流动行为。

2 结果与讨论

2.1 叶轮转速对固-液两相流场分布特征的影响

2.1.1 速度分布特征

利用数值模拟可以对浮选机运行参数与矿浆流场特性进行仿真,进而选择较为良好的浮选工作参数,降低实际浮选工作的探索工作量,提高实际生产效率。要想获得良好的固相颗粒悬浮质量,通常采用增大搅拌速度的方法,使矿粒与气泡及浮选药剂发生混合,增加撞击概率,并借助叶轮的搅动,促进难溶性药剂的溶解和分散。但过大的搅拌速度会使电动机负荷迅速增大,从而使轴转矩超出硬件容量,造成严重的损失。

采用上述模拟策略,设定固相材料为粒度 0.038 mm 的赤铁矿颗粒,固液比 1:9,在浮选机叶轮转速分别为 1 200、1 500、1 800 和 2 100 r/min 时进行固-液两相数值模拟,研究叶轮转速对浮选机内部流场流动特性的影响,不同叶轮转速下 $Y=0$ 纵截面的速度云图如图 3 所示。从图 3 可以看出,浮选机内液相流动的速度分布相当明显,并可分成两个循环区。浮选流体的下部循环比上部循环大,这与浮选流体的真实情况相符。这种流场可以使矿粒在槽底部充分碰撞、混合^[8-9],而流体在靠近槽壁面向上运动,在运输区流速也逐渐减小,从而加强浮选效率。

需要注意的是,不同转速下浮选机中流体速度的增加呈现一定的非线性趋势。这可能是当叶轮转速增加到一定程度时,流体的运动受到其他因素的限制,如流动的黏性、流道形状等,从而导致速度增幅发生变化。转速 1 200 和 1 500 r/min 时,浮选机内的液体因搅拌及离心力较小而无法充分发挥作用,矿浆中没有形成上、下两条大循环流,且呈无序流动,在此条件下,槽内产生了大量固相颗粒,不利于固相悬浮、弥散;转

速 2 100 r/min 时,由于转速过大,近壁面区域被挤压,流速梯度增加,不利于有用矿物与气泡的碰撞、吸附。

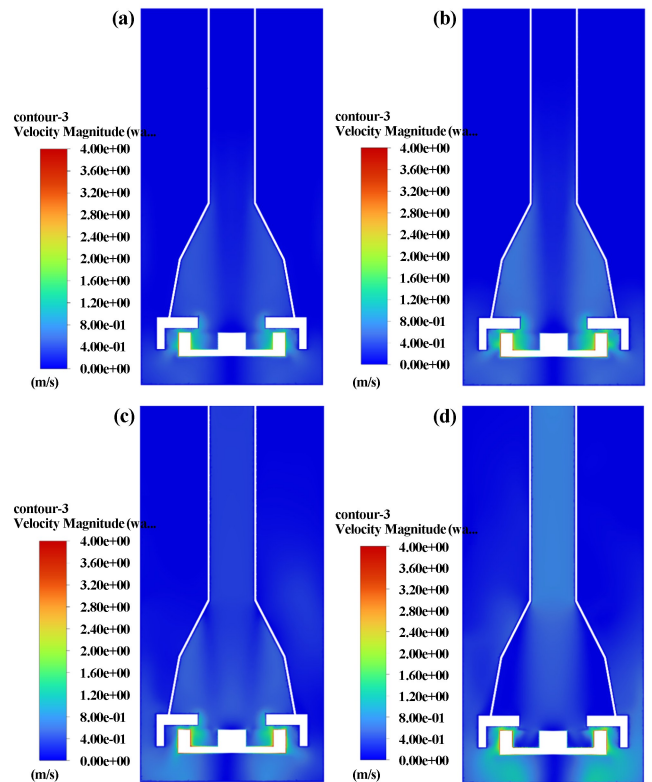


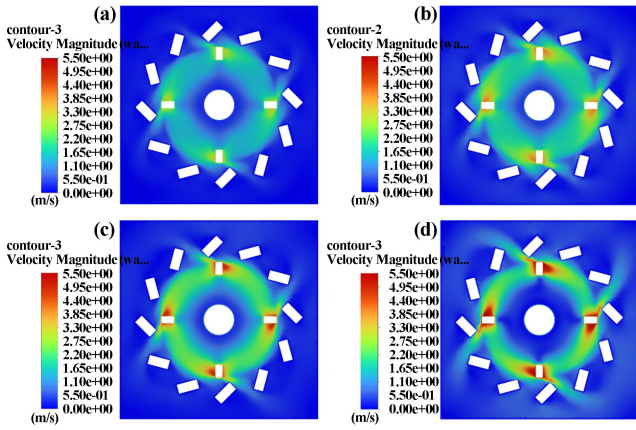
图 3 不同叶轮转速下 $Y=0$ 纵截面速度云图

Fig. 3 Velocity nephogram at longitudinal section ($Y=0$) with impeller at different rotating speeds

对比固-液两相流速分布特征,可以得出以下结论:叶轮转速 1 800 r/min 时,在浮选机上升区中,颗粒移动速度较为平缓,既满足矿物颗粒与浮选药剂之间的碰撞需求,又能保证矿化颗粒的运输。随着叶轮转速增大,电机扭矩增加,浮选机功耗增大。从浮选机功耗及内部流场特征两方面来看,叶轮转速 1 800 r/min 较适于浮选作业。

不同叶轮转速下 $Z=22$ 横截面液相及固相速度云图如图 4~5 所示。由图 4~5 可知,浮选机固-液两相流场中, $Z=22$ 横截面处固相矿物颗粒与液相流体速度分布有较好的一致性,固-液两相流场中转速变化对流场速度分布影响较大。该平面叶轮顺风面存在较大值区域,且圆心处的速度较小。搅拌强度不够时,空气在叶轮区域滞留,尽管这样可以使叶轮区域的矿粒与气泡接触更多,但会影响浮选时间和精矿品位。随着叶轮转速增加,较大值逐渐向外扩散。叶轮转速 1 800 r/min 时,较大值已经扩散至接近四周浮选槽壁的位置,使空气能够均匀分散在槽内,并能够快速离开浮选槽。综

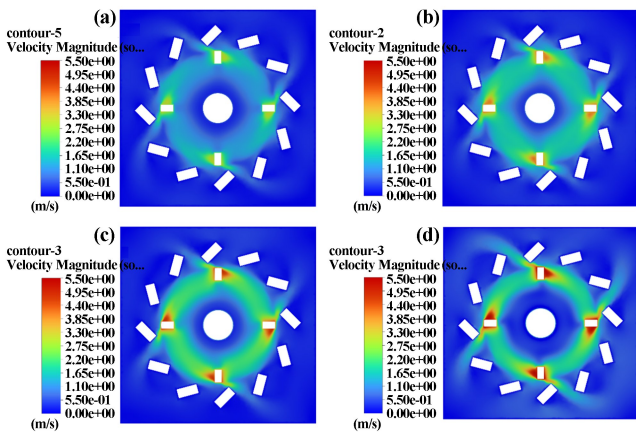
上所述,低叶轮转速时,速度径向过渡显著,扩散受限。提高叶轮转速有助于速度更均匀地扩展至外围区域。这时外沿处的速度增加较快,与附近区域的差值增大。



(a) 1 200 r/min; (b) 1 500 r/min; (c) 1 800 r/min; (d) 2 100 r/min

图4 不同叶轮转速下 Z = 22 横截面液相速度云图

Fig.4 Velocity nephogram of liquid phase at cross section (Z=22) with impeller at different rotating speeds



(a) 1 200 r/min; (b) 1 500 r/min; (c) 1 800 r/min; (d) 2 100 r/min

图5 不同叶轮转速下 Z = 22 横截面固相速度云图

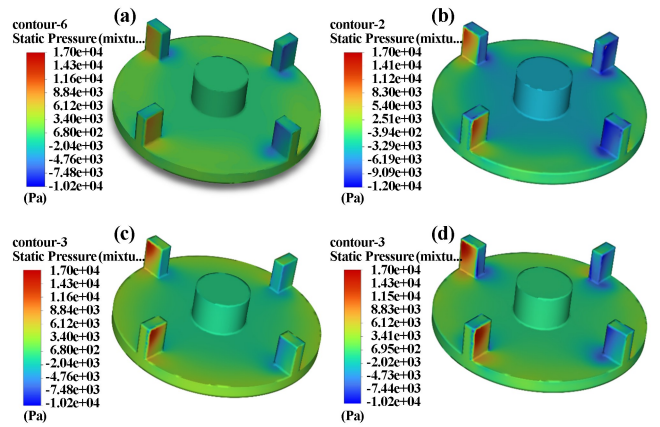
Fig.5 Velocity nephogram of solid phase at cross section (Z=22) with impeller at different rotating speeds

在 Z=22 横截面内,叶轮转速 1 200、1 500、1 800、2 100 r/min 对应的较大值区域分别为 3.50、4.64、5.32 和 6.14 m/s,叶轮转速 2 100 r/min 时的较大值区域取值约为 1 200 r/min 时较大值区域取值的 2 倍,矿浆流体速度跨度较大。模拟过程中,叶轮转速 1 800 r/min 可能是叶轮的最佳转速,这是因为叶轮转速 1 800 r/min 能使转子区域与槽内形成较为稳定的固相速度,从而提高叶轮的吸浆能力和吸气能力。与叶轮转速 2 100 r/min 相比,转速 1 800 r/min 条件下上循环近壁面处的速度梯度较低,能形成更稳定的气泡流,使得气泡能负载更多的矿粒,并具有足够的浮力脱离负压区域的影响进

入泡沫层。

2.1.2 压力分布特征

图 6 为不同叶轮转速下转子压力云图。从图 6 可以看出,增加叶轮转速会使叶轮中心区域压力下降,这是因为转子高速转动会产生一个负压区,压力也会随着叶轮转速增加而减小。叶轮转速 1 200 r/min 时,只有叶轮叶片区域出现负压区,影响范围较小;叶轮转速升至 1 500 r/min,负压区域扩大并在叶轮中心区域散开,随着叶轮转速升高,负压区逐渐变大,区域中心压强降低。结果表明,在一定叶轮转速范围内,浮选机的混合性能和自身的吸浆、抽吸性能均能得到改善。



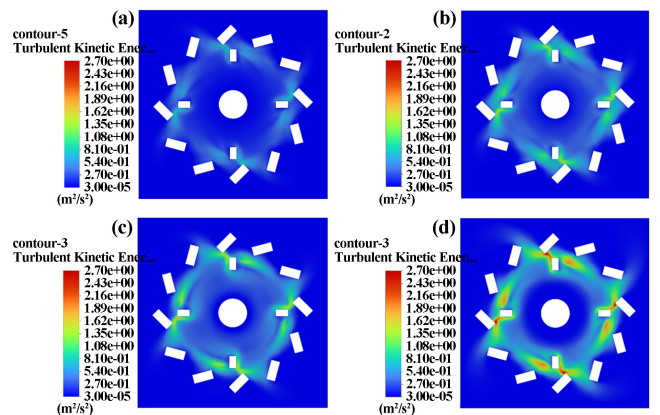
(a) 1 200 r/min; (b) 1 500 r/min; (c) 1 800 r/min; (d) 2 100 r/min

图6 不同叶轮转速下转子压力云图

Fig.6 Pressure nephogram of rotor with impeller at different rotating speeds

2.1.3 湍流动能分布特征

流体的湍流强度反映了浮选机内流体的紊流强度,使赤铁矿颗粒能够悬浮,与气泡有效碰撞,循环矿浆。图 7 为不同叶轮转速下 Z=22 横截面处流体的湍流动能分布云图。从图 7 可以看出,浮选机内湍流强



(a) 1 200 r/min; (b) 1 500 r/min; (c) 1 800 r/min; (d) 2 100 r/min

图7 不同叶轮转速下 Z = 22 横截面流体湍流动能云图

Fig.7 Turbulent kinetic energy nephogram at cross section (Z=22) with impeller at different rotating speeds

度较高的区域主要分布在定子和转子之间,且在叶轮与定子交界处明显存在较为显著的高湍流强度集中区域,这与叶轮旋转时形成的尾涡有关,尾涡形成区域与运动区域的湍流动能最大,叶轮区域的强湍流使颗粒与气泡分散,其他区域弱湍流便于矿物颗粒的运输。随着叶轮转速增大,浮选机内流体的湍流动能明显增强,矿物颗粒更分散,与矿浆中的气泡充分碰撞、吸附,能更好地实现有用矿物与脉石矿物的分离。

2.2 颗粒粒径对固-液两相流场分布特征影响

2.2.1 速度分布特征

选定叶轮转速 1 800 r/min、固液比 1:9,对浮选粒度分别为 0.015、0.038、0.050 mm 的赤铁矿颗粒的固-液两相流体特征进行数值模拟研究, $Y=0$ 纵截面的液相速度矢量图如图 8 所示。在浮选槽内部呈上下两循环运动方式,3 种粒径的赤铁矿颗粒在浮选槽内部速度矢量图一致。

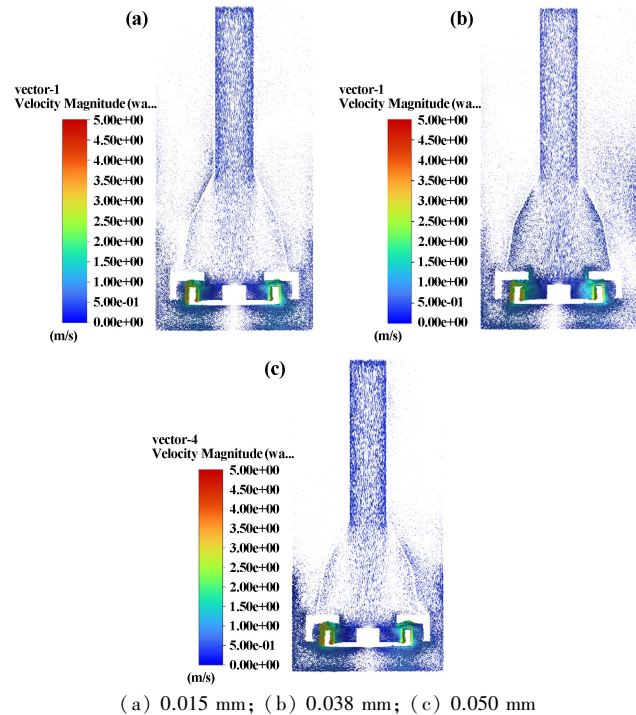


图 8 不同颗粒粒径下 $Y=0$ 纵截面液相速度矢量图

Fig.8 Liquid-phase velocity vector at longitudinal section ($Y=0$) with different particle sizes

不同颗粒粒径下 $Z=22$ 横截面的液相和固相速度云图如图 9~10 所示。由图 9~10 可知,3 种粒径赤铁矿颗粒在 $Z=22$ 横截面处固相和液相流场速度分布基本一致。由此可知,微细粒矿物粒径对浮选机固-液两相流场中的流体运动轨迹影响不大。在下循环区,固液两相流动速度均很快,但离槽深度越大,流速越慢;确保下循环区的搅拌强度足以使循环区气泡与上升区

气泡充分接触、碰撞,能提高矿物浮选的回收率及精矿品位。与此同时,转子区域流速约为定子径向射流速度的两倍,夹缝区存在相邻定子叶片间的径向射流,其分布受静叶数量影响显著。增加定子叶片数能有效提升矿浆在浮选机底部的导流效率。

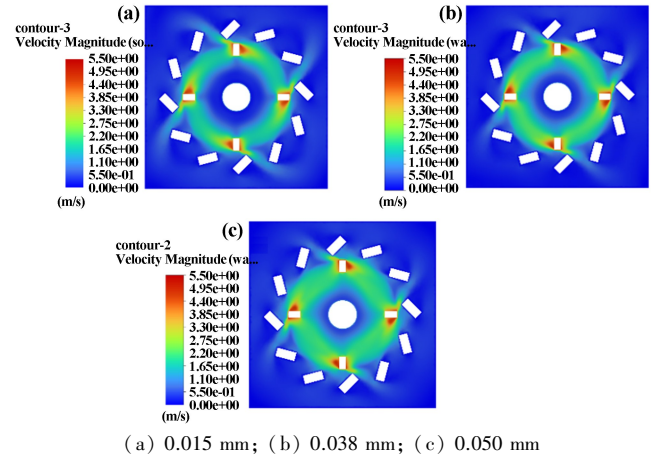


图 9 不同颗粒粒径下 $Z=22$ 横截面液相速度云图

Fig.9 Velocity nephogram of liquid phase at cross section ($Z=22$) with different particle sizes

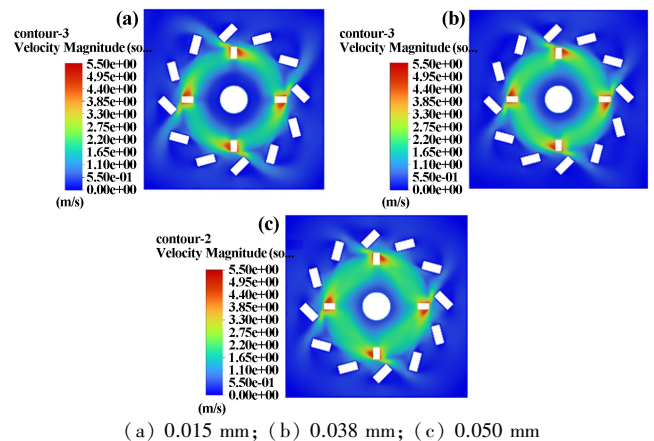
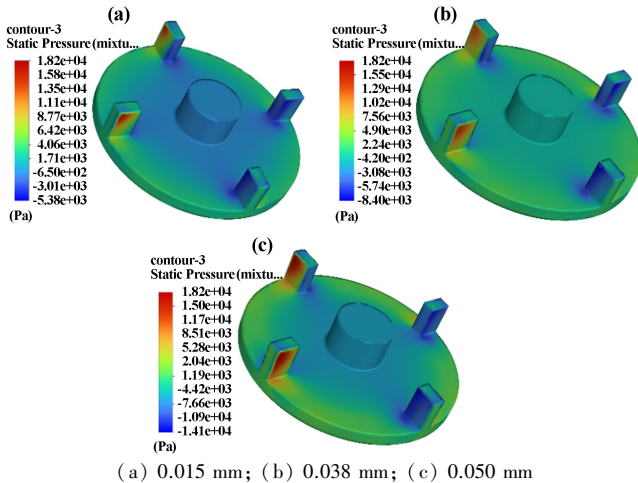


图 10 不同颗粒粒径下 $Z=22$ 横截面固相速度云图

Fig.10 Velocity nephogram of solid phase at cross section ($Z=22$) with different particle sizes

2.2.2 压力分布特征

图 11 为不同颗粒粒径下转子压力云图。由图 11 可知,随着叶轮高速旋转,转子迎风面及定子迎风面压力较高,转子背风面出现负压区域,表明浮选机具有抽吸作用。随着赤铁矿粒径增大,定子与转子表面承压增强,粗颗粒加剧转子叶片磨损。针对细粒矿物浮选,可适度减薄叶片以提高效率;反之,对粗粒矿物,增加叶片厚度或强化转子表面抗磨处理,能增强耐磨性,避免因磨损导致的搅拌减弱,从而提升矿物浮选分离效果^[10]。



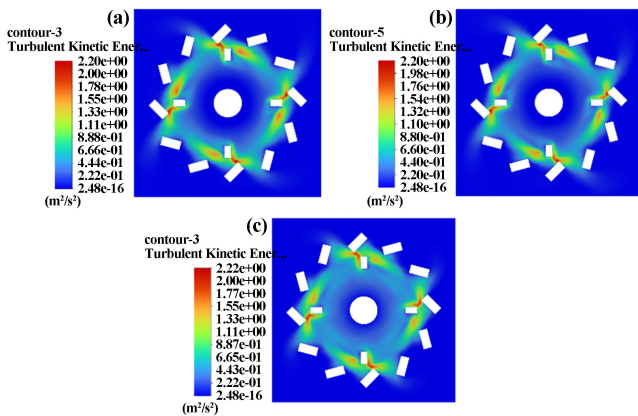
(a) 0.015 mm; (b) 0.038 mm; (c) 0.050 mm

图 11 不同颗粒粒径下转子压力云图

Fig. 11 Pressure nephogram of rotor with different particle sizes

2.2.3 湍流动能分布特征

图 12 为不同颗粒粒径下 $Z=22$ 横截面处流体的湍流动能分布云图。从图 12 可以看出,浮选机内流体湍流动能主要集中在定子和转子附近,叶片尾部区域更显著。此强湍流区域赋予矿物颗粒强大动能,经叶轮高速搅拌后,湍流加速,能显著提升矿物颗粒与矿浆气泡的碰撞概率,改善矿化效果,最终实现有用矿物和脉石矿物的分离。



(a) 0.015 mm; (b) 0.038 mm; (c) 0.050 mm

图 12 不同颗粒粒径下 $Z=22$ 横截面流体湍流动能云图

Fig. 12 Nephogram of turbulent kinetic energy at cross section ($Z=22$) with different particle sizes

3 浮选试验研究

浮选试验矿样来源于河北省唐山市司家营选矿厂,为赤铁矿实际矿物,其主要化学成分分析结果如表 1 所示。由表 1 可知, SiO_2 含量为 30.72%,实际矿物中脉石矿物主要为石英。

表 1 试样主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical analysis of main composition of sample %

TFe	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	CaO	S	P
44.91	30.72	3.98	0.45	0.142	4.34	0.18	0.2

对原矿进行反浮选试验,试验条件为:矿浆浓度 35%,充气量 0.53 m^3/h ;抑制剂玉米淀粉用量 3 000 g/t ,捕收剂用量十二胺用量 300 g/t 。叶轮转速分别为 1 200、1 500、1 800、2 100 r/min 时,不同叶轮转速下精矿品位和回收率变化如图 13 所示。叶轮转速由 1 200 r/min 上升到 1 800 r/min ,精矿 Fe 品位由 63.73% 上升到 66.35%,说明叶轮转速较低时,浮选机内矿浆湍流程度较弱,矿粒与气泡不能充分接触,无法发生有效碰撞。随着叶轮转速增加,精矿颗粒与气泡黏附概率增大,品位增加。叶轮转速由 1 800 r/min 上升到 2 100 r/min ,精矿 Fe 品位降至 64.73%,说明叶轮转速过大,浮选机内部湍流强度较大,无法使矿物颗粒与药剂更好地产生吸附作用,导致精矿 Fe 品位降低。随着叶轮转速增加,精矿回收率轻微下降后小幅上升。试验结果表明,叶轮转速 1 800 r/min 为宜。该结果与模拟结果一致。

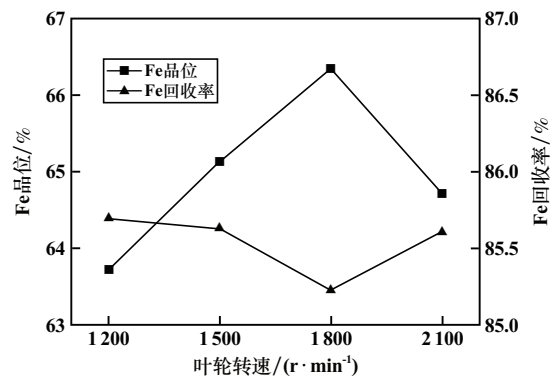


图 13 不同叶轮转速下精矿品位和回收率变化曲线

Fig. 13 Grade and recovery of concentrate with impeller at different rotating speeds

4 结论

1) 叶轮转速 1 800 r/min 时,浮选槽内转子区域与下循环区域流体运动速度增加,上升区矿化颗粒的运动速度分布平稳,气相流场相对稳定,可为矿物的浮选与分离创造条件。

2) 对比分析湍流强度分布特征可知,转子附近的湍流动能明显增加,定子附近、边壁位置以及挡板周围的湍流动能均升高,湍流动能分布更均匀,整体湍流强度提高,更有利于颗粒-气泡的碰撞与黏附作用,进而改善矿化效果。

3) 离散相矿物颗粒与连续相作用微弱,流场分布特征保持稳定。故微细粒矿物粒径对浮选机内固-液两相流场特性影响有限。

4) 微细粒矿物颗粒粒径对固-液两相流湍流动能影响较小,在定子和转子区域附近湍流动能较大,保证了矿物颗粒在该区域的较好分散性,有利于有用矿物和脉石矿物的分离。

5) 对实际赤铁矿进行不同转速浮选试验,叶轮转速 1 800 r/min 时精矿 Fe 品位为 66.35%,回收率为 85.34%,与模拟结果一致。

参考文献(References):

- [1] 王增增,赖茂河,陈强,等. 基于 CFD 方法的浮选机流场及叶轮动力学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4):70-77.
WANG Zengzeng, LAI Maohe, CHEN Qiang, et al. Dynamics of impeller and flow field analysis of flotation machine based on CFD method[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2018(4):70-77.
- [2] 周建军,毛璋亮,袁显宝,等. KYF 型浮选机气泡破碎机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(7):55-61.
ZHOU Jianjun, MAO Zhangliang, YUAN Xianbao, et al. Mechanism research of bubble breaking in KYF flotation machine[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(7):55-61.
- [3] 郭传州,匡敬忠,周原彬. 固相密度对浮选机内固-液两相流悬浮均匀性的影响[J]. 有色金属工程, 2020,10(9):88-97.
GUO Chuangzhou, KUANG Jingzhong, ZHOU Yuanbin. Effect of solid-phase density on the suspension uniformity of solid-liquid two-phase flow in the flotation machine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020,10(9):88-97.
- [4] 韩有理,王星,朱金波,等. 射流-搅拌耦合式浮选装置强化煤泥调浆浮选[J]. 中国矿业大学学报, 2023,52(2):380-388.
HAN Youli, WANG Xing, ZHU Jinbo, et al. Enhancement of coal

slurry conditioning flotation using jet-stirring coupling flotation device[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2023,52(2):380-388.

- [5] WANG G C, GE L H, MITRA S, et al. A review of CFD modelling studies on the flotation process[J]. Minerals Engineering, 2018,127:153-177.
- [6] LEE J W, JUNG K J, KIM Y J. Numerical analysis on performance of induced gas flotation machine using MUSIG model[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020,14:778-789.
- [7] 喻明军,王毓华,周瑜林. 浮选机性能参数对铝土矿反浮选指标影响的试验研究[J]. 矿冶工程, 2010,30(3):46-48.
YU Mingjun, WANG Yuhua, ZHOU Yulin. Influence of performance parameters of flotation machine on reverse flotation of bauxite ores[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010,30(3):46-48.
- [8] 王佩. 煤泥浮选过程模型仿真及其运行状态评价[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
WANG Pei. Model simulation and operating performance assessment for coal slurry flotation processes[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [9] 牛福生,王学涛,张晋霞. 颗粒粒径对浮选机固-液两相流场分布特征影响研究[J]. 中国矿业, 2016,25(10):137-141.
NIU Fusheng, WANG Xuetao, ZHANG Jinxia. Influence of particle size on the flow field characteristics for solid liquid two phase flow in flotation machine[J]. China Mining, 2016,25(10):137-141.
- [10] 张胜,曹骞,康灿,等. 固体颗粒粒径对输送泵叶轮磨损特性的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):19-23.
ZHANG Sheng, CAO Qian, KANG Can, et al. Influence of solid particle size on wear behavior of the impeller of delivery pump[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):19-23.
- 引用本文:牛福生,窦念舟,张晋霞. 叶轮转速及颗粒粒径对浮选机固-液两相流场特性影响研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):77-83.
NIU Fusheng, DOU Nianzhou, ZHANG Jinxia. Effect of impeller speed and particle size on solid-liquid two-phase flow field characteristics of flotation machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):77-83.