

微细粒锡石涡流强化浮选及 CFD 数值模拟研究

葛昱谦^{1,2}, 李晓恒^{1,2}, 孙志新^{1,2}, 韩鑫定^{1,2}, 张明青^{2,3}, 闫小康^{1,2}

1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116

中图分类号: TD91; TD923 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)01-0016-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.01.002

摘要 为提高微细粒锡石矿物的浮选回收效果, 采用基于湍流涡调控技术的新型涡流浮选装置对微细粒锡石($d_{50}=16.45\text{ }\mu\text{m}$)进行了浮选实验研究, 考察了涡流发生器结构及矿浆循环量对微细粒锡石浮选的影响。通过涡流矿化管内部流场 CFD 数值模拟, 分析了涡流矿化改善微细粒浮选效果的原因。浮选实验表明, 使用矩形涡流发生器诱导方式且在循环量 $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ ($Re=21\ 220$) 时锡石的回收率为 92.96%, 精矿锡品位为 3.32%。在获得精矿锡品位几乎相同的情况下, 回收率相较于光管提高了 25.73 个百分点; CFD 模拟分析结果表明内置矩形涡流发生器的矿化管内平均湍流耗散率和平均湍流动能最高, 分别是光管的 13.01 倍和 7.03 倍, 碰撞概率从 1.07% 提高到 2.32%, 矩形涡流发生器能显著改善矿化管的湍流环境, 增大了微细颗粒-气泡的碰撞概率, 从而起到强化微细粒锡石浮选的作用。

关键词 锡矿; 微细粒; 浮选; 涡流发生器; 数值模拟

引言

锡金属具有熔点低、耐腐蚀性强等优点, 广泛应用于冶金、电子、航空等行业, 是我国 24 种战略性矿产之一^[1-3]。我国锡资源丰富但品位普遍较低, 共伴生组分复杂^[4-6]。近年来, 随着锡矿被大量开采利用, 锡矿资源贫、细、杂的现象愈发严峻, 低品位微细粒锡石矿高效回收技术的开发也愈发受到研究人员的重视^[7-8]。

浮选是微细粒锡石的常用分选方法^[8-9]。浮选中颗粒-气泡的相互作用过程可分为碰撞、黏附和脱附, 其中界面力主导黏附过程, 碰撞和脱附过程受流体作用力主导, 三个子过程的概率共同决定矿物浮选回收率。一般认为粒径范围在 $20\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ 的中等粒径矿物颗粒有较好的浮选回收率^[10], 大于该范围的粗颗粒在浮选湍流环境中脱附概率较高, 导致其浮选速率较低; 而对于微细粒, 因其质量小、动能低, 故而与气泡极难发生碰撞, 浮选回收异常困难。因此如何提高微细粒级矿物颗粒与气泡的碰撞概率对改善微细粒矿物回收至关重要。根据湍流作用下颗粒-气泡碰撞概率模型可知, 增大湍流能量耗散率可提高微细颗粒-气泡

碰撞概率^[11-12]。因此, 合理地调控湍流浮选环境可以提高颗粒-气泡碰撞概率, 是提高微细粒矿物浮选效果行之有效的手段之一。

涡流浮选是一种新型的微细粒矿物高效浮选技术, 通过涡流发生器^[13]、冲击流^[14]或其他小尺度涡诱导方法, 产生强湍流耗散环境, 提高微细矿物颗粒与气泡之间的碰撞概率, 从而实现微细颗粒矿物的高效回收。张海军等^[15]将管流、错向旋流、撞击流等不同流态集成构建了新型涡流调浆设备, 使精煤回收率提高了 4 个百分点。闫小康等^[16]设计了适用于宽粒级分选的梯级涡流浮选装置, 相比于机械搅拌式浮选机, 选煤气化渣时可燃体回收率提高了 49.74 个百分点。目前, 涡流浮选方法在黄铜矿^[11]、铝土矿^[9]等矿物浮选, 均获得了较好的效果。由于不同矿物颗粒的可浮性不同, 浮选所需的湍流环境也不相同, 涡流浮选技术对微细粒锡石的浮选效果尚未研究, 需要进一步验证其适用性, 并探索适合于微细粒锡石浮选的涡流环境。

本文针对微细粒级锡石颗粒, 使用不同类型的涡流诱导结构来调控浮选湍流环境, 进行了浮选试验研究。结合 CFD 数值模拟分析涡流矿化管内湍动能、湍流耗散率和涡尺度等湍流参数, 比较了不同类型涡

收稿日期: 2024-01-30

作者简介: 葛昱谦(1998—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为浮选多相流动与过程强化, E-mail: geyuqian_0@163.com。

通信作者: 李晓恒(1994—), 男, 河南汝州人, 博士后, 主要研究方向为矿物浮选分离过程强化, E-mail: lixiaoheng0221@163.com。

流矿化管对微细粒锡石-气泡碰撞概率及浮选回收率的影响,提出了适合微细粒锡石矿物浮选的涡流环境,为实现微细粒锡石高效浮选提供了理论依据。

1 样品与方法

1.1 样品

通过对锡石原矿研磨、筛分制备浮选试验样品,样品锡品位为 1.31%,并使用 Bettersize-9300S(中国百特)激光粒度仪测定矿物粒度分布,如图 1 所示。可

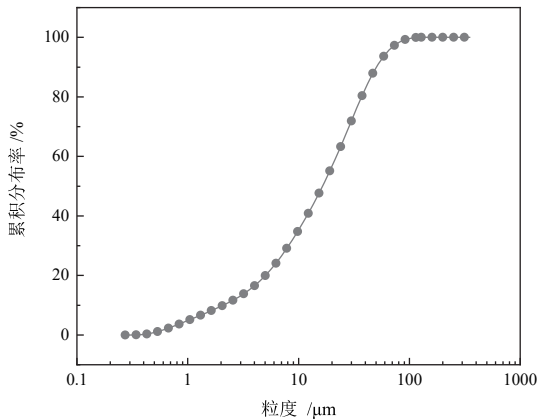


图 1 锡石样品粒度分布
Fig. 1 Particle size distribution of cassiterite samples

以看出,样品中-20 μm 粒级的颗粒占比为 56.65%, -45 μm 粒级的颗粒占比为 86.70%, d_{50} 为 16.45 μm。

1.2 实验方法

实验使用的涡流浮选系统如图 2 所示,该系统由小型泡沫分离柱、涡流矿化管段、电磁流量计、蠕动泵、空压机、调压阀、气体微调流量阀、气体流量计等部分组成,可在实验过程中调节充气量、矿浆循环量、矿浆液位等参数。涡流矿化管内嵌有涡流发生器,本研究将对椭圆形、三角形和矩形三种常见涡流发生器(VG)结构开展微细粒锡石浮选实验研究,实验装置和涡流发生器具体结构参数参考已有文献^[17]。实验时采用蠕动泵循环矿浆,待装置正常工作后进行精矿、尾矿的收集。

经多次探索实验,确定矿浆质量浓度 2%,捕收剂 BY-9 用量 200 g/t,起泡剂(2 号油)用量 200 g/t。锡石浮选实验流程如图 3 所示。浮选开始前,在 XFD 1.5 L 单槽浮选机中进行矿物的分散混合及表面疏水改性。首先称取 30 g 锡石试样与 1.5 L 去离子水在搅拌槽中以 1 800 r/min 转速混合 2 min,使矿物颗粒均匀分散;然后依次加入捕收剂 BY-9、起泡剂 2 号油并分别搅拌 3 min、2 min,使药剂与矿物充分作用。调浆后的矿浆自泡沫分离柱顶部给入,设置蠕动泵流量,待矿浆

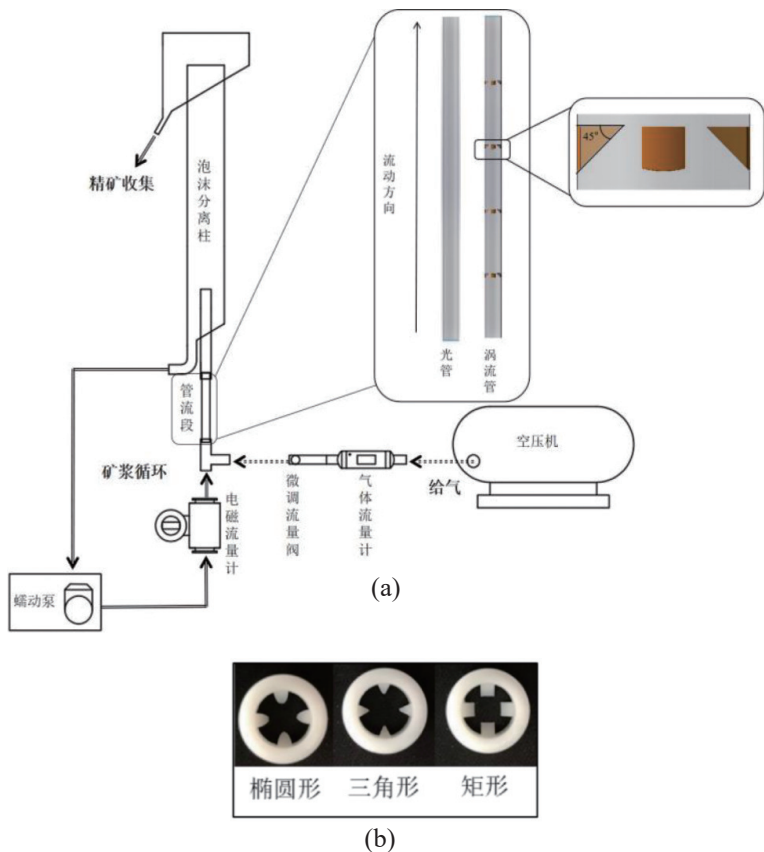


图 2 涡流浮选装置实验系统图 (a) 及椭圆形、三角形、矩形 VG 实物图 (b)
Fig. 2 Experimental system diagram of vortex-driven flotation device (a) and physical drawing of oval, triangle and rectangle VG (b)

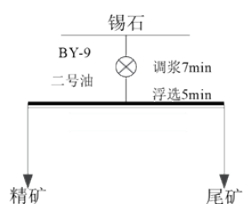


图3 浮选作业流程

Fig. 3 Flow chart of flotation operation

循环稳定后打开进气, 分别在 0.5 min、1 min、2 min、3 min、5 min 从泡沫分离柱顶端溢流槽中收集精矿, 浮选 5 min 后留在矿浆中的矿物颗粒为尾矿, 最后对回收的精矿和尾矿进行烘干称重, 并分析其锡品位。不同结构涡流发生器浮选时, 蠕动泵流量均设置为 0.6 m³/h, 进气量为 1 L/min; 不同矿浆循环量浮选时, 蠕动泵流量分别设置为 0.5 m³/h、0.6 m³/h 和 0.7 m³/h, 进气量为 1 L/min。

1.3 数值模拟方法

1.3.1 物理模型及网格划分

对矩形、椭圆形、三角形 VG 矿化管及光管进行 3D 建模。以矩形 VG 矿化管举例说明, 使用 ICEM 软件进行网格划分, 模型结构及网格如图 4(a)和(b)所示, 网格 y+值为 33.70; 以体积平均湍流耗散率为特征参数进行网格无关性验证(如图 5 所示)。在流量为 0.6 m³/h 条件下, 当网格数量超过 6.8 万时体积平均湍

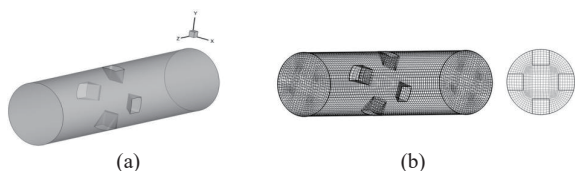


图4 矩形 VG 管几何模型 (a) 及网格模型 (b)

Fig. 4 Geometric model (a) and mesh model (b) of rectangular VG tube

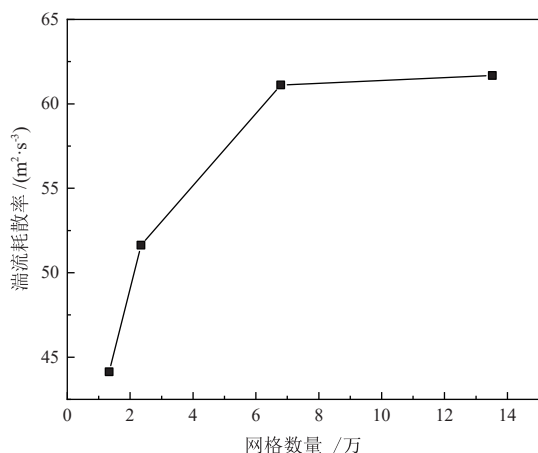


图5 网格无关性验证

Fig. 5 Verification of grid independence

流耗散率趋于稳定, 因此选取数量为 6.8 万的网格模型进行计算。

1.3.2 参数设置

借助 ANSYS FLUENT 软件进行求解矿化管内的流动特征。湍流模型选用 Standard k-ε 模型, 入料口设置为速度入口, 流速分别设置为 1.768 m/s、2.122 m/s、2.476 m/s, 对应流量分别为 0.5 m³/h (Re=17 680)、0.6 m³/h (Re=21 220)、0.7 m³/h (Re=24 760)。出口设置为压力出口 (Pressure Outlet), 静压设置为 0, 固体壁面为无滑移壁面。

采用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合计算, 离散格式采用 Least Squares Cell Based, 动量项和压力项采用二阶迎风格式, 湍流动能项和湍流耗散率项采用一阶迎风格式, 收敛残差精度设为 10⁻⁴, 计算采用非稳态求解, 时间步长设置为 10⁻⁴~10⁻⁵ s, 计算达到统计学稳定后, 选取 2~3 个计算周期进行时均处理。

2 结果与讨论

2.1 不同结构涡流发生器对锡石浮选的影响

矿浆循环量 0.6 m³/h 不同结构管流段累计浮选产率如图 6 所示。根据图 6 可以看出使用 VG 管时的浮选产率要明显优于光管的产率, 如当浮选时间 300 s 时矩形 VG 管产率比光管高 11.59 个百分点, 与三角形 VG 管相比高 3.24 个百分点。值得注意的是使用矩形与椭圆 VG 管时产率较为接近, 相差仅 0.79 个百分点。通过计算矩形 VG 管、椭圆 VG 管、三角形 VG 管和光管的浮选速率常数分别为 0.010 4、0.006 9、0.008 7 和 0.003 0, 可见矩形 VG 管的浮选速率最高。

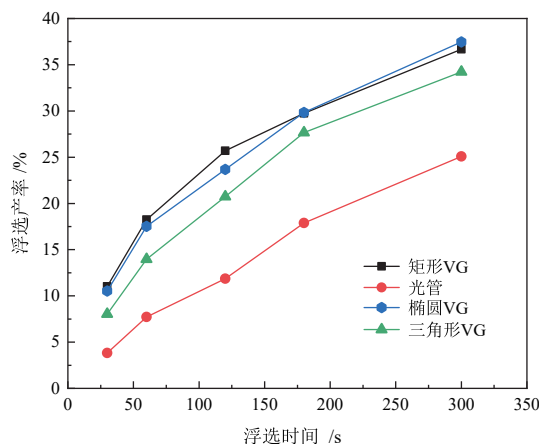


图6 不同管流段下累积浮选产率

Fig. 6 Cumulative flotation yield at different pipe flow section

使用不同结构涡流管得到的精矿锡品位、回收率如图 7 所示。使用光管时获得的精矿锡品位最高达到了 3.51%, 其次为矩形 VG 管, 锡品位为 3.32%; 使用

矩形 VG 管时回收率最高为 92.96%, 相较于光管提高了 25.73 个百分点。使用三种 VG 矿化管时的回收率均高于光管, 但精矿锡品位低于光管。在三种形状 VG 管的对比实验中, 使用矩形 VG 管时回收率和精矿锡品位均高于其余两组。综合精矿锡品位和回收率来看, 在试验工况下使用矩形 VG 管能提高锡石的回收率, 且基本保障精矿锡品位, 浮选效果较好。

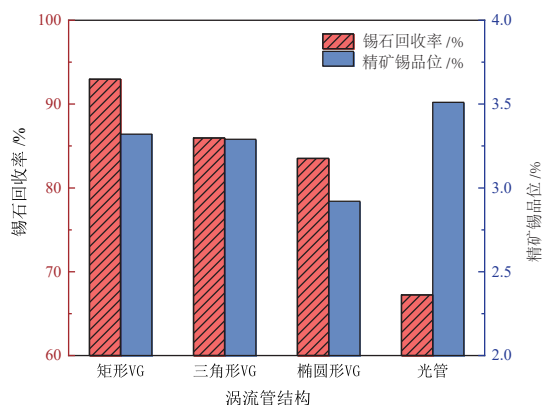


图 7 不同结构管流段试验结果对比

Fig. 7 Comparison of test results of pipe flow section with different structures

2.2 矿浆循环量对锡石浮选的影响

为研究矿浆循环量对锡石浮选效果的影响, 选用浮选效果最优的矩形 VG 管, 对比了 0.5 m³/h、0.6 m³/h、0.7 m³/h 三组矿浆循环量下锡石的浮选效果, 浮选产率如图 8 所示。由图 8 可知, 浮选产率随矿浆循环量增大而增大, 如浮选时间 300 s 时, 当矿浆循环量由 0.5 m³/h 增大至 0.6 m³/h, 累计产率增大了 10.66 个百分点, 产率有明显的提升。通过计算, 三组矿浆循环量下浮选速率常数分别为 0.0054、0.0104 和 0.0138, 可见矿浆循环量 0.7 m³/h 时矩形 VG 管的浮选速率最高。

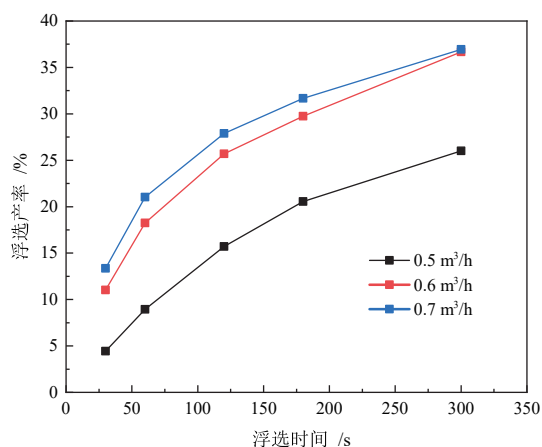


图 8 不同矿浆循环量累计浮选产率

Fig. 8 Accumulative flotation yield under different pulp circulation

三组矿浆循环量下的锡石精矿锡品位、回收率见图 9。在循环量 0.5 m³/h 时得到最高精矿锡品位

3.98%, 循环量 0.7 m³/h 时得到最高回收率 96.42%。可以看出, 当矿浆循环量由 0.5 m³/h 增大至 0.7 m³/h 时, 精矿锡品位降低了 0.57 个百分点, 回收率增大了 17.32 个百分点; 当矿浆循环量由 0.6 m³/h 增大至 0.7 m³/h 时, 回收率和精矿锡品位均有轻微提升, 回收率仅仅增大了 3.46 个百分点, 精矿锡品位升高 0.09 个百分点。综上所述, 使用矩形 VG 管流段在矿浆循环量 0.7 m³/h 时, 可以提高回收率, 同时保证精矿锡品位, 浮选效果较好。

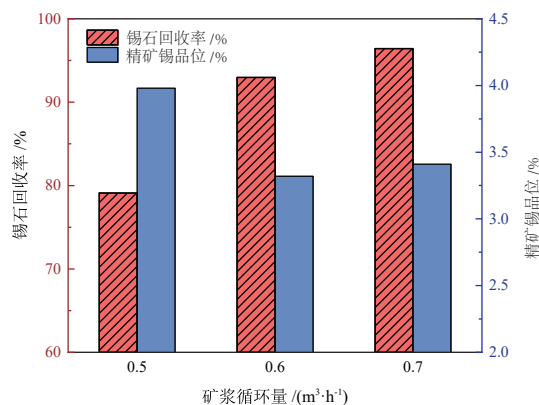


图 9 不同矿浆循环量结果对比

Fig. 9 Comparison of different pulp circulation results

3 CFD 数值模拟结果及分析

3.1 涡流矿化管内端流流动特征分析

流体流经 VG 时受阻流的影响速度特征会发生改变, 图 10 为矩形 VG 矿化管内流体速度矢量分布。从流动方向来看, 流体在 VG 前方速度分布均匀, 速度大小在 2.2 m/s 左右, 速度矢量方向与管流流动方向一致; 流体流经 VG 时, 过流面积减小, 受涡流发生器独特尖端结构影响, 流体速度及速度梯度增大, 且在每个 VG 后方形成涡旋。从 VG 所在的横截面来看,

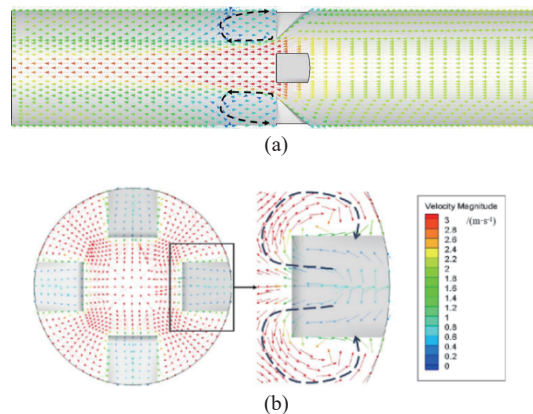


图 10 矩形 VG 矿化管内流向中心截面合速度矢量分布 (a) 和 VG 截面合速度矢量分布 (b)

Fig. 10 Distribution of the resultant velocity vector on the central section (a) and VG section (b) inside rectangular VG mineralization tube

矿化管中心速度较高,速度大小在 3 m/s 左右,每个 VG 附近有一对反旋涡。可见,流体流经矩形 VG 时流向和展向有明显的涡旋特征,且 VG 对时均流动的剪切现象增大了 VG 后方的流体速度梯度,有利于湍流能量的快速耗散。

以矩形 VG 矿化管为例,对流体流经 VG 前后的湍流耗散率和湍流动能变化进行分析,所取分析位置如图 11 所示,矿浆循环量 0.6 m³/h 下不同位置湍流耗散分布如图 12 所示。在 Z=17 mm 位置,流体流动未经过 VG,中心湍流耗散较低,靠近管壁面位置湍流耗散率略有增大;当流体经过 VG 后,在 Z=21 mm、Z=23 mm 和 Z=25 mm 三个位置湍流耗散率的分布接近,从中心到管壁湍流耗散率呈现先增大后降低的趋势,这三个位置的湍流耗散率明显高于其他位置,说明在 VG 结构后方存在较大湍流耗散;在远离 VG 后方的 Z=35 mm 时,湍流耗散已基本回落至初始值。不同位置湍流动能分布如图 13 所示,湍流动能随位置变化趋势与湍流耗散趋势基本一致,但流体流过 VG 结构后由 Z=21 mm 流至 Z=35 mm 时湍流动能降低速度比湍流耗散相对缓慢,Z=35 mm 时依旧存在较高的湍流动能。可见,流体流经 VG 时,在其附近具有较高的湍流耗散和湍流动能,提高了 VG 管内湍流强化能力。

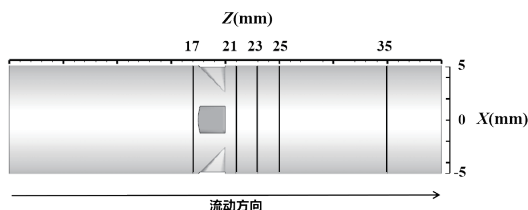


图 11 不同分析位置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of different positions

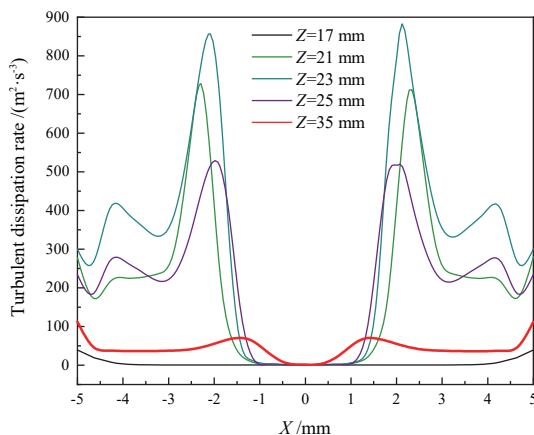


图 12 矩形 VG 管内不同位置湍流耗散率分布

Fig. 12 Distribution of turbulent dissipation rate at different locations in a rectangular VG Tube

湍流涡直接作用于颗粒运动,对颗粒-气泡碰撞过程有重要影响。鉴于湍流的随机脉动特征,湍流涡的尺度特征较难直接计算,因此本文采用最小涡尺度

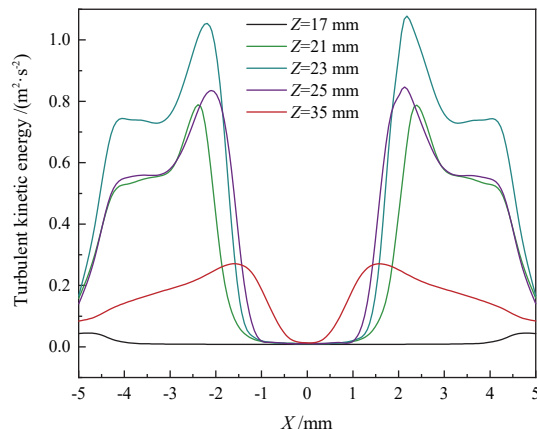


图 13 矩形 VG 管内不同位置湍流动能分布

Fig. 13 Distribution of turbulent kinetic energy at different positions in a rectangular VG tube

(η)来定性衡量,该参数是维持湍流宏观运动的最小尺度涡,涡的能量主要在该尺度涡中被黏性耗散掉,只与湍流耗散率(ϵ)和流体运动黏度系数(ν)相关^[18]。根据 Kolmogorov 湍流理论,最小涡尺度可由公式(1)计算,计算结果如图 14 所示。从图中可知,流体未经过 VG 时,在 Z=17 mm 位置 η 的分布范围为 12.5~35 μm ,在壁面附近较小;在 Z=21~35 mm 区间,VG 后方($x=2$ mm 至 $x=5$ mm)的 η 值显著减小,分布在 5~15 μm 。可见,流体流经 VG,最小涡尺度显著减小,能更有效作用于微细颗粒浮选。

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (1)$$

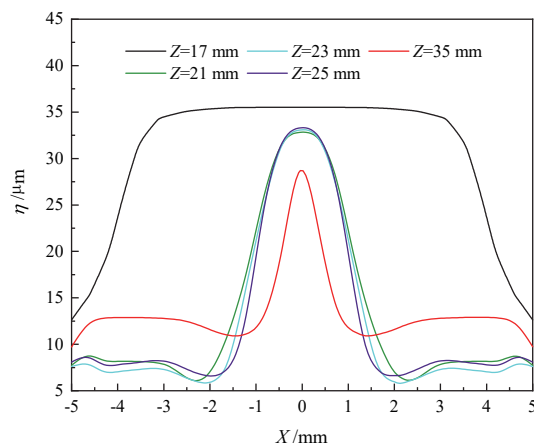


图 14 矩形 VG 管内不同位置最小涡尺度分布

Fig. 14 Smallest eddy size distribution at different positions in a rectangular VG tube

3.2 不同结构涡流矿化管内湍流参数分析

在矿浆循环量 0.6 m³/h 下对比矩形、椭圆形、三角形 VG 管和光管内部湍流耗散率(ϵ)、湍流动能(k)的极大值及平均值和碰撞概率,结果如表 1 所示。表 1 湍流耗散率和湍流动能的极大值为管内湍流参数的

最大值; 平均值为管内体积平均值, 是每个参数值与其体积分数相乘后求和得到的加权平均值; 颗粒-气泡碰撞概率由公式(2)计算^[10], 其中湍流耗散率为表中平均值, 颗粒直径选取微细粒锡石平均粒径 $d_{50}=16.45\text{ }\mu\text{m}$, 气泡直径假定为均一尺寸 $d_b=400\text{ }\mu\text{m}$, $\rho_l=1\text{ }000\text{ kg/m}^3$, $\rho_b=1.225\text{ kg/m}^3$, $\nu=1.006\times10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。从表中数据分析, 三组 VG 管内部湍流动能及湍流耗散率均高于光管, 其中矩形 VG 管内部湍流耗散率及湍流动

能最大, 平均值分别是光管的 13.01 倍和 7.03 倍。根据碰撞概率计算结果可知, 三组 VG 管中的颗粒-气泡碰撞概率均大于光管, 矩形 VG 管中碰撞概率最大, 相较于光管从 1.07% 提高到 2.32%。

$$E_c=\left(\frac{d_p}{d_b}\right)^2\left\{\frac{3}{2}+\frac{4}{15}\left[0.4\frac{\varepsilon^{4/9}d_b^{16/9}}{\nu^{4/3}}\left(\frac{\rho_l-\rho_b}{\rho_l}\right)^{2/3}\right]^{0.72}\right\}\quad(2)$$

式中: d_p 和 d_b 分别为颗粒和气泡直径, ρ_l 和 ρ_b 分别为流体和气泡密度, ν 为流体运动黏度, ε 为湍流耗散率。

表 1 不同管流段结构 0.6 m³/h 下湍流参数

Table 1 Turbulent flow parameters of different pipe flow section structures at 0.6 m³/h

结构	湍流耗散率/(m²·s⁻³)		湍流动能/(m²·s⁻²)		碰撞概率/%
	平均值	极大值	平均值	极大值	
光管	4.696	20.41	0.018 9	0.015 4	1.07
矩形 VG 管	61.11	907.4	0.132 9	0.991 9	2.32
椭圆形 VG 管	43.12	768.75	0.079 4	0.653 8	2.09
三角形 VG 管	25.32	575.70	0.043 3	0.309 6	1.77

对比图 7 中不同管流段锡石浮选的试验结果可以发现, 光管内的湍流耗散率和碰撞概率较小, 回收率低; 矩形 VG 管内湍流耗散率和碰撞概率较大, 使用矩形 VG 管时回收率最高。可见, 相同流量下不同型式 VG 管内的湍流强度有较大差异, 矩形 VG 管内湍流强度较高, 更有利于提高微细粒锡石的回收率。

3.3 不同循环量下涡流矿化管内湍流参数分析

为了分析不同循环量下矩形 VG 管内的湍流流

动特征, 使用相同的方法计算了矿浆循环量 0.5 m³/h、0.6 m³/h、0.7 m³/h 时矩形 VG 管内湍流耗散率、湍流动能的极大值及平均值和颗粒-气泡碰撞概率, 计算结果如表 2 所示。随着矿浆循环量增大, 涡流管内湍流耗散率和湍流动能增大, 颗粒-气泡间碰撞概率增大。在矿浆循环量 0.7 m³/h 时矿化管内湍流耗散率平均值为 95.84 m²/s³, 极大值为 1 431.7 m²/s³; 湍流动能平均值为 0.178 0 m²/s², 极大值为 1.396 m²/s², 此时矿化管内的湍流强度较高, 碰撞概率为 2.67%。

表 2 不同循环量下矩形 VG 管内湍流参数

Table 2 Turbulent flow parameters in rectangular VG tube under different circulation

矿浆循环量	湍流耗散率/(m²·s⁻³)		湍流动能/(m²·s⁻²)		碰撞概率/%
	平均值	极大值	平均值	极大值	
0.5 m³/h	35.94	493.7	0.094 1	0.743 5	1.97
0.6 m³/h	61.11	907.4	0.132 9	0.991 9	2.32
0.7 m³/h	95.84	1 431.7	0.178 0	1.396	2.67

结合图 9 中不同循环量下锡石的浮选结果可知, 0.5 m³/h 时矩形 VG 管内的湍流耗散率和湍流动能较小, 颗粒-气泡碰撞概率较低, 锡石回收率低; 0.7 m³/h 时矩形 VG 管内的湍流耗散率和湍流动能较高, 颗粒-气泡碰撞概率大, 锡石回收率高, 但锡品位略有下降, 锡品位下降的原因可能是因为湍流强度过强引起非选择性黏附, 因此流量不易再提高。在所研究的流量范围内, 增大流量可提高矩形 VG 管内的湍流强度, 增大颗粒-气泡碰撞概率, 进而提高微细粒锡石的回收率。

综上所述, 矿浆流经 VG 结构后会在 VG 后方形成强湍流区域, 有利于促进气泡-颗粒间的碰撞, 提高锡石的浮选回收率。矩形、三角形、椭圆形 VG 管及

光管内的湍流参数对比发现, 在矿浆循环量 0.7 m³/h 时矩形 VG 管内湍流强度较高, 微细粒锡石颗粒-气泡碰撞概率较大, 可获得较好的浮选效果。

4 结论

(1) 涡流浮选可有效提高微细粒锡石的浮选速率和回收率, 同时保证精矿锡品位。椭圆形、三角形和矩形三种 VG 管及光管的微细粒锡石浮选实验结果表明, 矩形 VG 管的涡流浮选装置对锡石的浮选效果最佳, 锡石的浮选速率常数为 0.010 4, 回收率 92.96%, 精矿锡品位 3.32%, 相较于光管浮选回收率增大了 25.73 个百分点, 而精矿锡品位仅下降了 0.19 个百分点, 并

且矩形 VG 管可以在保证精矿锡品位的前提下高效回收微细粒锡石。

(2)使用矩形 VG 管的涡流浮选装置浮选微细粒锡石时,通过控制矿浆循环流量可进一步改善微细粒锡石的浮选效果。循环流量 $0.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时锡石的精矿锡品位和回收率分别为 3.41% 和 96.42%。相比于与循环流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时锡品位仅下降了 0.57 个百分点,回收率增大了 17.32 个百分点。

(3)矩形 VG 管内可产生较高的湍流耗散率、湍流动能以及较小的涡尺度,可有效促进微细粒锡石颗粒-气泡间的碰撞,获得更高的回收率。管流段内部流场 CFD 数值模拟结果表明,流体流经涡流发生器后,在其后方形成了强湍流区,最小涡尺度显著降低,更有利于微细锡石颗粒浮选,且矩形、三角形、椭圆形 VG 管内湍流强度均高于光管,其中矩形 VG 管内湍流耗散率及湍流动能最高,可以增大微细颗粒-气泡间的碰撞概率,改善微细粒锡石浮选回收,与实验结果一致。

参考文献:

- [1] 吕中海,胡卫波,张俊,等.锡矿石选矿工艺研究现状与进展[J].现代矿业,2009,25(10): 19-22.
LV Z H, HU W B, ZHANG J, et al. Study status and progress of tin ore dressing process[J]. Modern Mining, 2009, 25 (10): 19-22.
- [2] 宫贵臣,韩跃新,刘杰,等.油酸钠在锡石(211)表面吸附的量子化学研究[J].东北大学学报(自然科学版),2018,5(9): 639-644.
GONG G C, HAN Y X, LIU J, et al. Quantum chemical study on adsorption of sodium oleate on cassiterite (211) surface[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 5(9): 639-644.
- [3] 李宏建,李新冬.国内外锡选矿进展[J].中国矿山工程,2006(5): 10-13.2006(5): 10-13.
LI H J, LI X D. Domestic and foreign tin dressing progress[J]. China Mine Engineering.
- [4] 张文杰,华中宝,谢贤,等.锡石选别工艺和药剂研究进展[J].金属矿山,2021(8): 116-121.
ZHANG W J, HUA Z B, XIE X, et al. Research progress of cassiterite separation process and reagent[J]. Metal Mine, 2021(8): 116-121.
- [5] 李亚超,张怀瑶,贾凯,等.锡石浮选药剂研究进展[J].矿产保护与利用,2023,43(5): 62-70.
LI Y C, ZHANG H Y, JIA K, et al. Research development of cassiterite flotation reagents[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(5): 62-70.
- [6] U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2020[R]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 2020.
- [7] 刘杰,韩跃新,朱一民,等.细粒锡石选矿技术研究进展及展望[J].金属矿山,2014,10: 76-81.
LIU J, HAN Y X, ZHU Y M, et al. Research status and prospective on separation technology of fine cassiterite[J]. Metal Mine, 2014, 10: 76-81.
- [8] 陈文岳.细粒锡石表面特性及可浮性研究[D].沈阳:东北大学,2014.
CHEN W Y. Study on surface characteristics and floatability of fine-grained cassite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [9] 郑恺昕.湍流中颗粒-气泡碰撞概率模型修正及微细粒矿物分选过程流动强化[D].徐州:中国矿业大学,2022.
ZHENG K X. Modification of particle-bubble turbulent collision probability model and hydrodynamic enhancement of fine mineral particles separation process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [10] WANG G, ZHOU S, JOSHI J, et al. An energy model on particle detachment in the turbulent field[J]. Minerals Engineering, 2014, 69: 165-169.
- [11] ZHENG K X, YAN X K, WANG L J, et al. Turbulent effects of vortex generators on the separation of fine particles[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418(11-13): 129373.
- [12] 王超,孙春宝,寇珏.浮选过程中颗粒-气泡黏附作用机理及研究进展[J].工程科学学报,2018,40(12): 1423-1433.
WANG C, SUN C B, KOU J, Mechanism and research progress of the bubble-particle attachment in flotation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(12): 1423-1433.
- [13] WANG L J, WANG Y H, YAN X K, et al. A numerical study on efficient recovery of fine-grained minerals with vortex generators in pipe flow unit of a cyclonic-static micro bubble flotation column[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 158: 304-313.
- [14] 王海楠,杨文清,李丹龙,等.冲击流强化浮选调浆的数值模拟与试验研究[J].煤炭学报,2020,45(S1): 443-450.
WANG H N, YANG W Q, LI D L, et al. Numerical simulation and experimental study of impact flow enhancing flotation pulp conditioning[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 443-450.
- [15] 张海军,王海楠,陈瑞丰,等.煤泥调浆湍流强化作用机理与新型涡流强化调浆过程[J].煤炭学报,2022,47(2): 934-944.
ZHANG H J, WANG H N, CHENG R F, et al. Turbulence enhancement mechanism of coal slime pulp conditioning and new type vortex enhancing pulp conditioning process[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 934-944.
- [16] 闫小康,苏子旭,王利军,等.基于湍流涡调控的煤气化渣灰-灰浮选分离过程强化[J].煤炭学报,2022,47(3): 1318-1328.
YAN X K, SU Z X, WANG L J, et al. Process intensification on flotation separation of carbon and ash from coal gasification slag using turbulent eddy regulation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1318-1328.
- [17] 苏子旭.微细粒分选的湍流过程强化及涡流矿化管优化设计[D].徐州:中国矿业大学,2021.
SU Z X. Process intensification on turbulence for fine particle separation and the optimization design of a vortex mineralization tube[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [18] A. Nguyen, D.-A. An-Vo, T. Tran-Cong, et al. A review of stochastic description of the turbulence effect on bubble-particle interactions in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 156: 75-86.

Study on the Vortex-driven Flotation of Fine Cassiterite and CFD Numerical Simulation

GE Yuqian^{1,2}, LI Xiaoheng^{1,2}, SUN Zhixin^{1,2}, HAN Xinding^{1,2}, ZHANG Mingqing^{2,3}, YAN Xiaokang^{1,2}

1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

3. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

Abstract: In order to improve the recovery efficiency of fine-grained cassiterite minerals, a new type of vortex-driven flotation device based on turbulent control technology was used for flotation experiments of fine-grained cassiterite ($d_{50}=16.45\ \mu\text{m}$), and the influence of the structures and slurry circulation flow rate of vortex generators and slurry circulation flow rate on the flotation efficiency of fine-grained cassiterite was investigated. Meanwhile, the internal flow field of the vortex mineralization tube was calculated through CFD numerical simulation, and the reasons for improving the flotation efficiency of fine particles through vortex mineralization was analyzed. The flotation experiment results show that using a induction method, the concentrate recovery rate of cassiterite was 92.96% at a circulation rate of $0.6\ \text{m}^3/\text{h}$ ($Re=21\ 220$), the tin grade of concentrate was 3.32%. With almost the same tin grade, the recovery rate increased by 25.73 percentage points compared to the empty tube; The CFD simulation analysis results show that the average turbulence dissipation rate and average turbulence kinetic energy inside the mineralization tube with rectangular vortex generator are the highest, which are 13.01 times and 7.03 times higher than that of the empty tube, respectively, and the collision probability increases from 1.07% to 2.32%. The rectangular vortex generator can significantly improve the turbulent environment of the vortex mineralization tube, increase fine particles-bubbles collision probability, and thus enhance the flotation recovery of fine-grained cassiterite.

Keywords: cassiterite; fine minerals; flotation; vortex generator; numerical simulation

引用格式: 葛昱谦, 李晓恒, 孙志新, 韩鑫定, 张明青, 闫小康. 微细粒锡石涡流强化浮选及 CFD 数值模拟研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 16–23.

GE Yuqian, LI Xiaoheng, SUN Zhixin, HAN Xinding, ZHANG Mingqing, YAN Xiaokang. Study on the vortex-driven flotation of fine cassiterite and cfd numerical simulation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 16–23.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn