

粗糙壁面螺旋溜槽中矿浆流场参数及颗粒分离行为演变特性

高淑玲, 周孝洪, 王乾, 刘文宝

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD922 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0127-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.015

摘要 借助于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型、VOF 多相流模型及 Eulerian Multi-fluid VOF 模型对螺旋溜槽内的流场及颗粒运动行为进行数值模拟, 系统考察了光滑壁面和粗糙壁面条件下的清水流场参数、赤铁矿-石英矿浆流场参数、颗粒分布、分离效率随过流圈数的演变特性。结果表明: 相较于清水体系, 矿浆流膜存在局部凸起, 内缘区域的矿浆流体切向速度变大, 中部和外缘矿浆流体的切向速度降低, 其径向速度分布具有明显波动特性; 与光滑壁面条件相比, 粗糙壁面条件下的矿浆流膜凸起高度降低, 矿浆切向速度整体偏高, 内缘矿浆切向流速差异较小, 内环流强度减弱, 外环流强度增大; 当流体纵向行程达到第 3 圈时, 各流场参数径向分布的差异缩小并接近一致; 相比于光滑壁面, 粗糙壁面中的赤铁矿颗粒在内半槽的分布减少, 随过流圈数增多向内迁移量增大, 但在外缘最外微区的停留量也增大, 石英颗粒则随流场演变逐渐在第 3 圈槽面中部区域形成较多分布; 赤铁矿和石英的最大分离效率随过流圈数增多而升高且逐渐平衡, 粗糙壁面条件下赤铁矿和石英的最大分离效率降低。本文研究范围内粗糙壁面对螺旋溜槽矿浆流场及颗粒分离行为影响显著, 研究结果可以为螺旋溜槽壁面粗糙度设计及过程调控提供参考。
关键词 壁面粗糙度; 螺旋溜槽; 矿浆流; 颗粒分布; 分离效率

矿产资源是我国经济社会发展的重要物质基础, 随着环保要求的提高, 如何消除或降低矿业活动造成的环境破坏、建设绿色矿山逐渐成为矿业发展主题^[1-3]。重选以其对生态环境友好、生产成本低且生产能力大的优势成为矿石分选富集所采用的首要方法之一。螺旋溜槽作为典型的复合力场重选设备, 凭借其结构简单、占地面积小、成本低等特点, 在鞍山式赤铁矿、煤炭、钨矿、锡矿及海滨砂矿分选中应用广泛^[4-8]。

由于不同制作工艺及矿浆磨蚀的综合影响, 螺旋溜槽的壁面粗糙度具有差异并不断变化。早期使用的螺旋溜槽容易发生堆矿和磨损, 给分离效果造成极大影响^[9]。目前, 螺旋溜槽主体多由玻璃钢、尼龙等材质制成, 内表里涂布聚氨酯或掺入金刚砂的环氧树脂等耐磨材料, 槽面平整性及耐磨性得到了进一步提高。同时, 针对螺旋溜槽、旋流器等复合力场设备开展的壁面粗糙度方面的研究工作^[10-16], 也为进一步阐明其影响机制奠定了良好基础。

螺旋溜槽的给料往往是具有较高浓度的矿浆流体, 颗粒的存在对薄层水流场参数的影响不可忽视。在此方面, Doheim 等人^[17]基于欧拉法对四种湍流模型(标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、SST $k-\omega$ 和 RSM)在给料浓度 0.3% 和 3% 下的预测值和实验值进行比较, 结果表明, 当采用在 RNG $k-\varepsilon$ 模型时预测最为准确。基于该方法 Mahran 等人^[18]进一步研究了质量浓度为 15% 时的分选效果, 模拟结果与物理试验结果取得了较好一致性。Ye 等^[19]采用 CFD-DEM 耦合法对给料浓度为 1% 时颗粒在螺旋分离初始阶段的运动特性进行研究, 分析发现在 0.125~0.5 mm 内的煤粒粒度越细就越有可能聚集在螺旋槽的外缘。大多研究中采用的固体给料浓度距实际工况有一定差距, 与此同时, 已有研究中的壁面条件均是光滑壁面, 忽略了实际壁面粗糙度的影响。因此, 本文借助前期确立的具有较高精度的螺旋流场及颗粒相计算模型, 对光滑壁面和粗糙壁面条件下的清水流场和赤铁矿-石英矿浆流场进行模

收稿日期: 2023-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(52274257; 51974065)

作者简介: 高淑玲(1980—), 女, 河北泊头人, 副教授, 博士生导师, 主要从事复合力场分选过程强化与调控研究, E-mail: gaoshuling@mail.neu.edu.cn。

通信作者: 周孝洪(1995—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 主要从事螺旋溜槽流场仿真与调控研究, E-mail: 948455121@qq.com。

拟,考察不同条件下的流场参数分布特性及颗粒分离行为,着重查明粗糙壁面螺旋溜槽中矿浆流场参数及颗粒分离行为的演变特性,为螺旋溜槽壁面粗糙度设计及过程调控提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 螺旋溜槽几何参数及网格划分

以实验室 $\phi 400$ 型螺旋溜槽为研究对象,其结构参数如表 1 所示,断面形状如图 1 所示,计算域划分如图 2 所示。根据网格无关性试验,将计算域划分为 8.71×10^5 个六面体网格,同时对底壁网格进行局部加

密,以便对底壁处的复杂流动进行捕捉,最小底壁网格为 0.1 mm,最小 y^+ 为 2。

表 1 螺旋溜槽结构参数一览表

Table 1 List of Parameters for spiral separator Structure

结构参数	数值
外半径 (R)	200 mm
内半径 (r_0)	50 mm
螺距 (P)	240 mm
下斜角 (γ)	12.81°
过流圈数	3.25

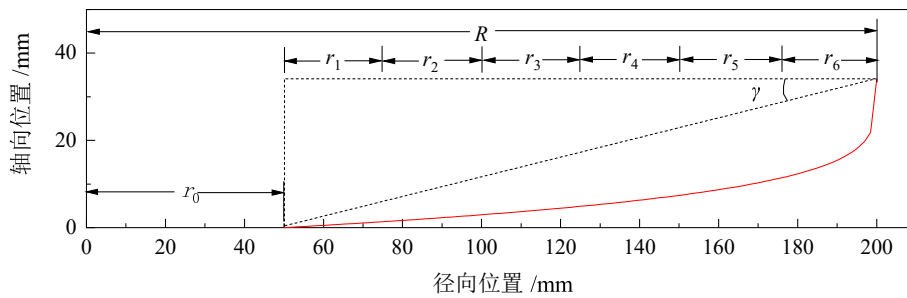


图 1 螺旋溜槽断面形状

Fig. 1 Cross sectional drawing of spirals

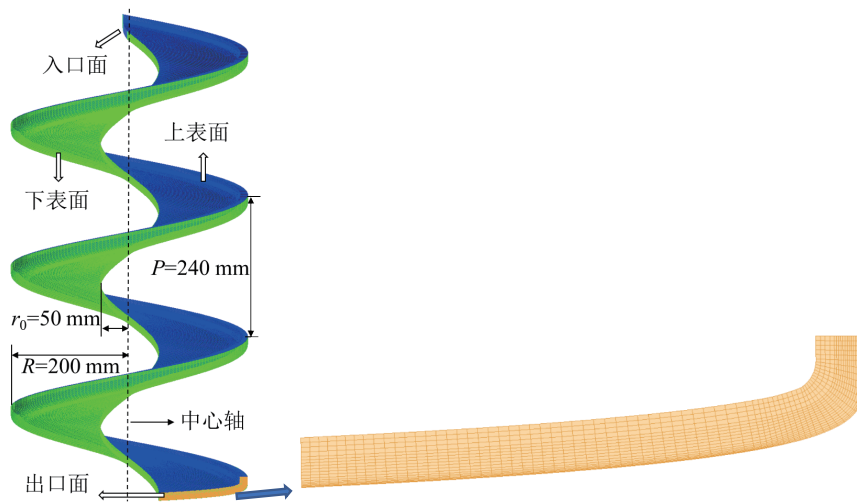


图 2 螺旋溜槽计算域网格划分

Fig. 2 Mesh division of the computational domain of spirals

1.2 数值模型

首先采用 VOF 多相流模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对清水场进行模拟,VOF 模型控制方程^[20]如式(1)、式(2)所示,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型湍流动能和湍流耗散率的微分输运方程^[21]如式(3)、式(4)所示:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} v_j = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

式中, α_q 为某一相的体积分,当 $q=1$ 时为水相,当 $q=2$ 时为气相,%; t 为时间, s; x_i (或 x_j) 为坐标分量; v_i (或 v_j) 为速度在 i (或 j) 方向上的分量, m/s; g_i 为重力加速度, m/s²; ρ 和 μ 分别为流体的平均密度和黏度, kg/m³, kg/(m·s)。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (4)$$

式中, G_k 表示湍流动能产生项; μ_{eff} 为有效黏度(分子黏度与湍流黏度之和), $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; R_ϵ 为湍流动能耗散率方程中的附加项; k 为湍流动能, J/kg ; ϵ 为湍流动能耗散率, W/kg ; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 为模型中的系数。

在清水流计算稳定的基础上, 采用考虑拜格诺效应的 Eulerian Multi-fluid VOF 模型对赤铁矿和石英组成的矿浆体系进行模拟^[22]。此模型是 Euler-Euler 模型和 VOF 模型的耦合模型, 可以同时考察离散相并且适合尖锐和分散的界面。相间作用力同时考虑曳力 F_D 和升力 F_L , 其中曳力模型采用 Gidaspow 模型和 symmetric 模型分别预测液-固和气-液作用, 升力模型则通过 UDF(User defined function) 将拜格诺升力公式加载至升力系数模块中。

针对薄膜流动特性, 计算中采用标准壁面函数。粗糙管道和渠道相关实验表明, 当以半对数标度绘制粗糙壁附近的平均速度分布时, 速度分布相对光滑面会有一些的偏移。因此, 壁面平均速度定律修正为^[23]:

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta B \quad (5)$$

式中, u_p 为平行壁面方向与壁面距离 y_p 位置的速度, m/s ; u^* 为剪切流速, m/s ; τ_w 为壁面剪切应力, N/m^2 ; κ 为冯·卡门常数; E 为经验系数; y_p 为 p 点与壁面的间距, m ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ΔB 是粗糙度形状和大小的函数。

对于砂粒粗糙度和类似均匀粗糙度元件, ΔB 与粗糙度高度 K_s^+ ($K_s^+ = \frac{\rho K_s u^*}{\mu}$, K_s 表示砂粒粗糙度高度或直径) 密切相关。在 CFD 软件 ANSYS Fluent 中, 通常采用 Cebeci 和 Bradshaw 提出的公式^[24] 计算 ΔB , 如式(6)所示。

$$\Delta B = \begin{cases} 0, & K_s^+ \leq 2.25 \\ \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right) \times \sin \{0.4258 (\ln K_s^+ - 0.811)\}, & 2.25 < K_s^+ \leq 90 \\ \frac{1}{\kappa} \ln [1 + C_s K_s^+], & K_s^+ > 90 \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_s 为粗糙度类型的修正系数, 对于均匀砂粒为 0.5。

1.3 模拟条件及数据处理

数值试验中, 螺旋溜槽壁面粗糙度 K_s 相应设置为 0 mm 和 0.03 mm, 分别代表光滑壁面及粗糙壁面。以鞍山式赤铁矿矿石中的赤铁矿和石英作为分离对象, 两者密度相应分别设置为 $4950 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。给料粒度组成参考齐大山铁矿选矿厂螺旋溜槽的给矿条件, 因直接对全粒级颗粒模拟计算量较大, 故对两矿物均设置 $90 \mu\text{m}$ 和 $38 \mu\text{m}$ 两个粒度, 分别代表重选作业中的粗粒和细粒。给料中各粒度的赤铁矿及石英颗粒按照质量比 1.87 : 1(体积比 1 : 1) 进行配比, 给矿铁品位为 45.59%, 给矿固体质量浓度和矿浆流量分别为 20% 和 $0.72 \text{ m}^3/\text{h}$ ($12 \text{ L}/\text{min}$)。

提取流体数据时, 将流体沿径向均分为 36 个微区, 对各微区内的切向速度及径向速度进行面积加权平均。为了系统考察粗糙壁面对二次环流的影响, 将 36 个微区进一步按径向速度方向分为外环流和内环流(向外为正; 向内为负), 共获得 72 个径向速度分布区间, 并通过平均径向速度来表征二次环流强度。

提取颗粒数据时, 将槽面自内向外均分为 6 个宽度为 25 mm 窄区间, 并依次标记为 $r_1 \sim r_6$, 如图 1 所示。在不同模拟条件下, 分别提取赤铁矿和石英颗粒的质量流量, 依次计算出 6 个径向区间内的各颗粒产率, 据此分析赤铁矿和石英的径向分布特性。在此基础上, 通过调整滑块(截矿器)位置获得不同分布宽度的精矿产物, 如图 3 所示, 进而根据式(7)^[25] 计算分离效率:

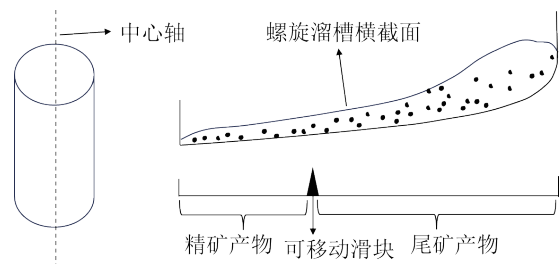


图 3 螺旋溜槽滑块位置调整产物分割示意图
Fig. 3 Schematic of product segmentation when adjusting the spirals splitter position

$$E_s = R_v - R_g \quad (7)$$

式中, E_s 为分离效率; R_v 为精矿中目的矿物产率; R_g 为精矿中脉石矿物产率。

2 结果与讨论

2.1 矿浆流场参数演变特性

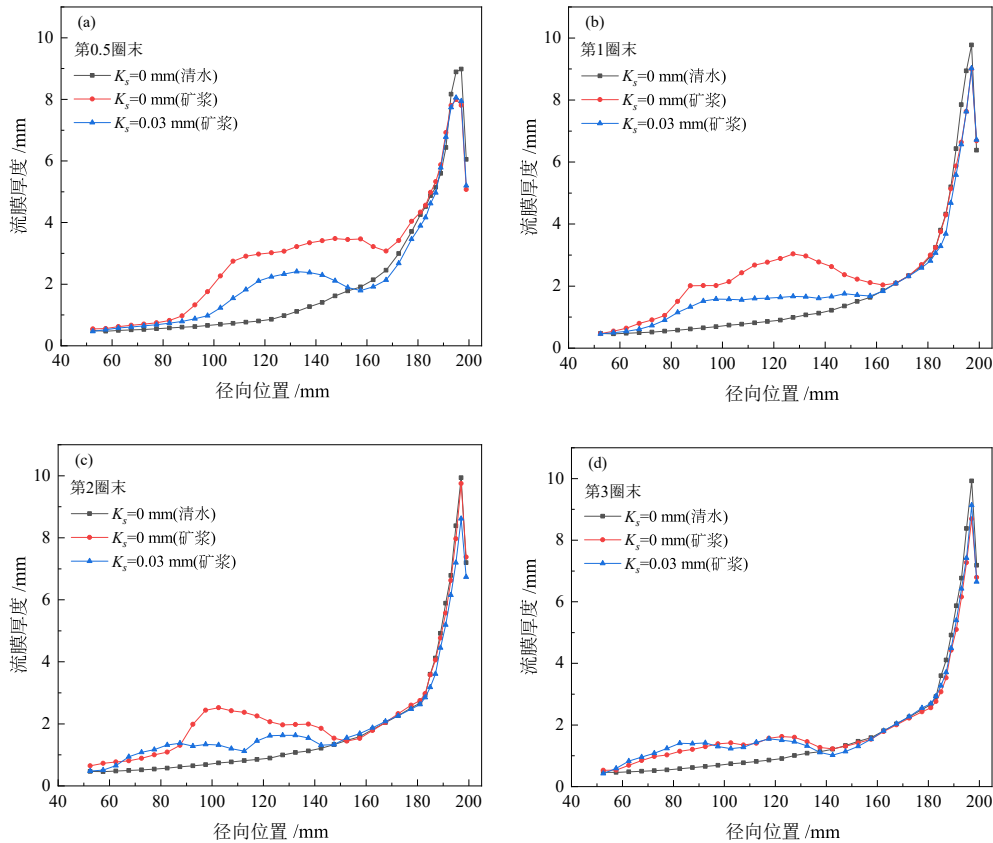
2.1.1 流膜厚度分布

在流膜选矿设备内, 矿浆沿槽分布特性及随过流圈数的演变规律对于矿物分离结果具有重要影响。因此分别在粗糙壁面和光滑壁面条件下, 提取第 0.5、1、2 及 3 圈末槽面中清水和矿浆的流膜厚度, 结果如图 4 所示。

从图 4 可以发现, 在光滑壁面条件下, 清水流膜类似于底壁形状, 矿浆面则在中部存在局部凸起, 流膜较厚; 随过流圈数增多, 流膜厚度逐渐降低, 当运动到第 3 圈末时, 清水及浆流均达到稳定铺展状态。在粗糙壁面条件下, 中部矿浆面的凸起高度显著降低, 但随过流圈数增多, 矿浆流膜厚度沿径向分布渐趋一致, 内缘及中部矿浆流膜厚度仍高于清水体系。

2.1.2 矿浆切向流速分布

进一步对不同条件下的流体切向速度进行对比分析, 结果如图 5 所示。



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 4 各圈末槽面中的流膜厚度径向分布

Fig. 4 Radial distribution of flow film thickness in each turn's end trough surface

由图 5 可知,光滑壁面条件下,第 0.5 圈中部及外缘区域矿浆流体的切向速度明显降低,而内缘流体速度有一定程度提升。随着过流圈数增加,矿浆切向速度分布形态逐步与清水条件一致。在粗糙壁面条件下,第 0.5 圈中部及外缘区域矿浆流体的平均切向速度显著增大,随着圈数增加,由粗糙度引起的速度差异逐渐减小;而内缘矿浆流体的平均切向速度随过流圈数增多而逐渐演变为高于光滑壁面条件。粗糙壁面对切向速度沿高程演变特性的影响具有区域差异。

2.1.3 矿浆二次环流速度分布

流体从螺旋溜槽上部给入槽面后,由于离心力、重力沿斜面分力及摩擦力的共同作用,流体在螺旋流道中逐渐形成了向下旋转主流和横向二次环流两种运动形式。二次环流是影响流体和颗粒径向运动的关键要素,因此提取不同过流圈数槽面中的矿浆及清水流体的径向速度,结果如图 6~7 所示。

由图 6 可知,各条件下的流体径向速度比切向速度小得多。内环流速度在径向上呈现内小外大的分布趋势。在第 0.5 圈的内缘及中部区域,清水和矿浆内环流平均径向速度具有最大值,随过流圈数增多,清水径向速度分布在第 1 圈基本平稳,矿浆流体径向速度分布具有明显波动特性,到第 3 圈时趋稳。在第

3 圈前的几个槽面内,粗糙壁面条件下的外缘流体最大向内速度、内缘流体向内速度与光滑壁面条件相比有不同程度的降低,表明矿浆流体的内环流强度减弱。

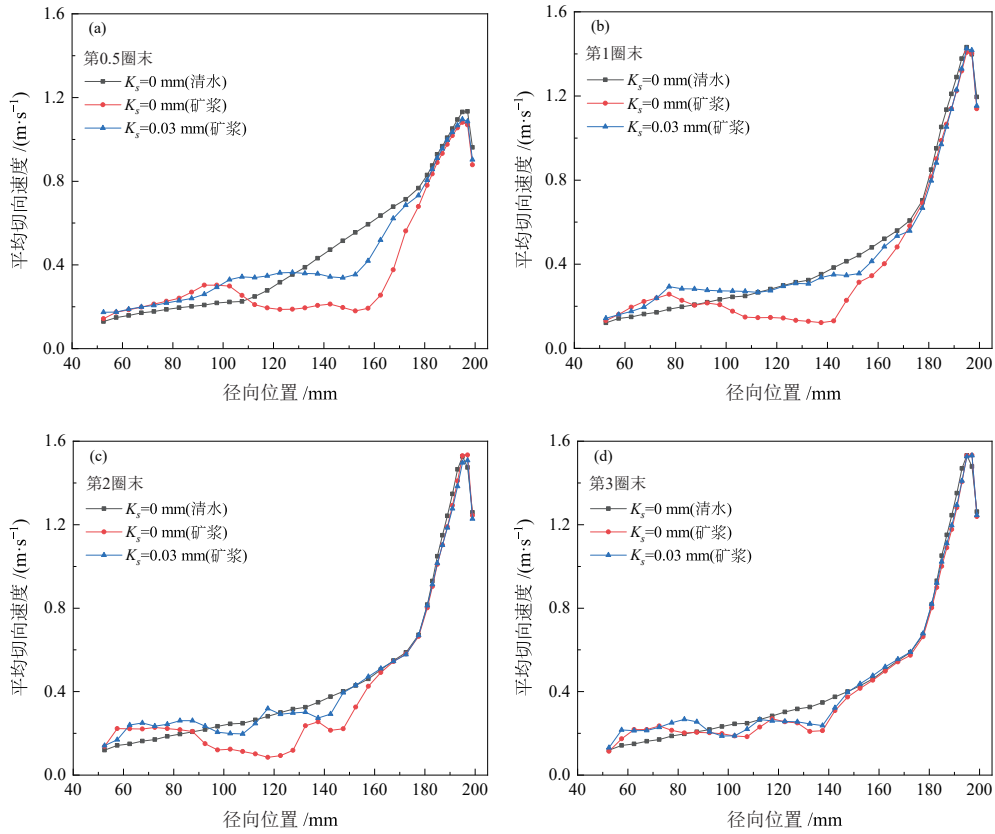
对比图 7 中各圈数据可以看出,第 0.5 圈末槽面中流体的外环流平均径向速度较大,在外半槽(径向位置 125~200 mm),清水向外流速明显高于矿浆流速,而粗糙壁面条件下的矿浆流速又高于光滑壁面条件,内半槽(径向位置 50~125 mm)的流速次序反之。随过流圈数增多,外半槽流体的最大向外速度不断降低直至趋同,内半槽矿浆流体的向外速度也有一定程度的降低,但仍高于清水体系。在较稳定的第 2 和第 3 圈槽面流场中,除第 3 圈中间区域小部分流体外,其他区域的流体向外流速均是在粗糙壁面条件下更高。由此可见,粗糙壁面条件总体上可使矿浆的外环流强度加强。

2.2 矿浆中颗粒分离行为演变特性

2.2.1 赤铁矿和石英颗粒的径向分布特性

在光滑壁面和粗糙壁面条件下,赤铁矿和石英颗粒产率径向分布分别如图 8、图 9 所示。

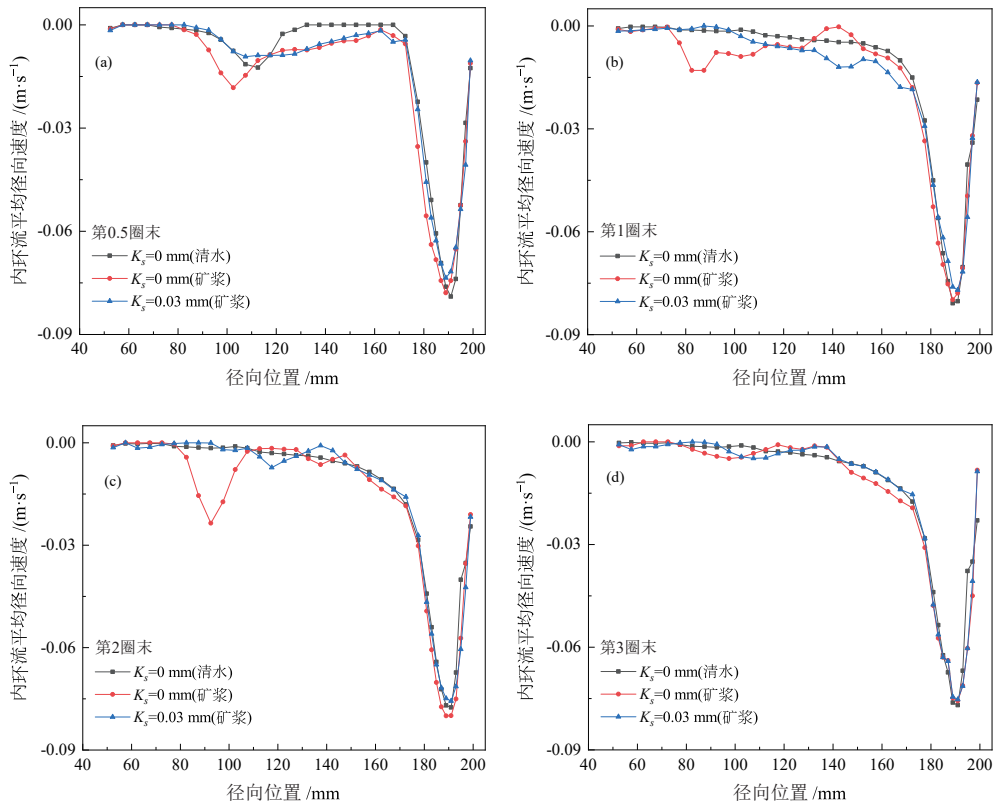
由图 8 可知,在光滑壁面条件下,赤铁矿产率在第 0.5 圈槽面中呈现中间高、内缘及外缘低的分布特



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 5 各圈末槽面中的流体微区平均切向速度径向分布

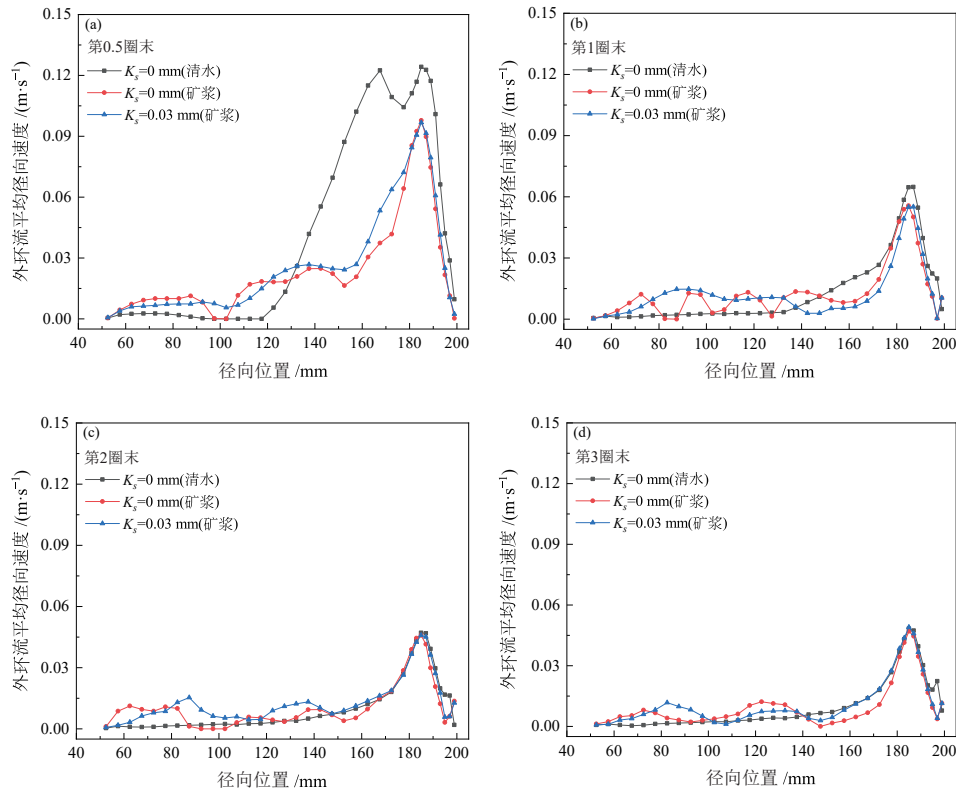
Fig. 5 Radial distribution of average tangential velocity of fluid microregions in each turn's end trough surface



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 6 各圈末槽面中的内环流平均径向速度径向分布

Fig. 6 Radial distribution of average radial velocity of internal circulation flow in each turn's end trough surface



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 7 各圈末槽面中的外环流平均径向速度径向分布

Fig. 7 Radial distribution of average radial velocity of outer circulation flow in each turn's end trough surface

点, 主要分布区为 $r_3 \sim r_5$; 随着过流圈数增加, 赤铁矿逐渐向内半槽各区域迁移, 最终以 $r_1 \sim r_3$ 为主要分布区, 当流体运动到第 3 圈末时赤铁矿在外半槽仅有少量分布, 但在外缘区域 r_6 中的产率变化不大, 这是由于给料中的细粒赤铁矿的随流运动所致。在粗糙壁面条件下, 赤铁矿在第 0.5 圈内半槽三个区域中的分布量显著降低, 其而外半槽 r_4 、 r_6 区域中的分布量增大; 随着过流圈数的增加, 赤铁矿同样向内半槽迁移富集, 但与光滑壁面条件相比, 赤铁矿最终在外缘区域 r_6 中的产率升高, 损失将加重。

由图 9 可知, 在两种壁面条件下, 石英颗粒在第 0.5 圈槽面中的径向分布均呈递增趋势, 以外缘 r_5 和 r_6 为主要分布区域。光滑壁面条件下, 随过流圈数增多, 石英由内半槽向外运动, 但从第 2 圈到第 3 圈时, 中部 r_3 区域中的石英产率提升; 在粗糙壁面条件下, 石英颗粒随过流圈数的增加首先向外运动, 之后明显向中部区域运动, 最终在 r_3 和 r_4 中形成较多分布(产率均在 35% 左右), 同时在内缘 r_1 和 r_2 区域中的产率轻微升高, 因此对比图 8 可见粗糙壁面加剧了石英与赤铁矿在槽面中部区域的混杂, 对于产物指标不利。

2.2.2 赤铁矿-石英分离效率变化趋势

由于赤铁矿和石英单矿物颗粒在不同径向区域的产率发生显著变化, 势必导致赤铁矿和石英分离指

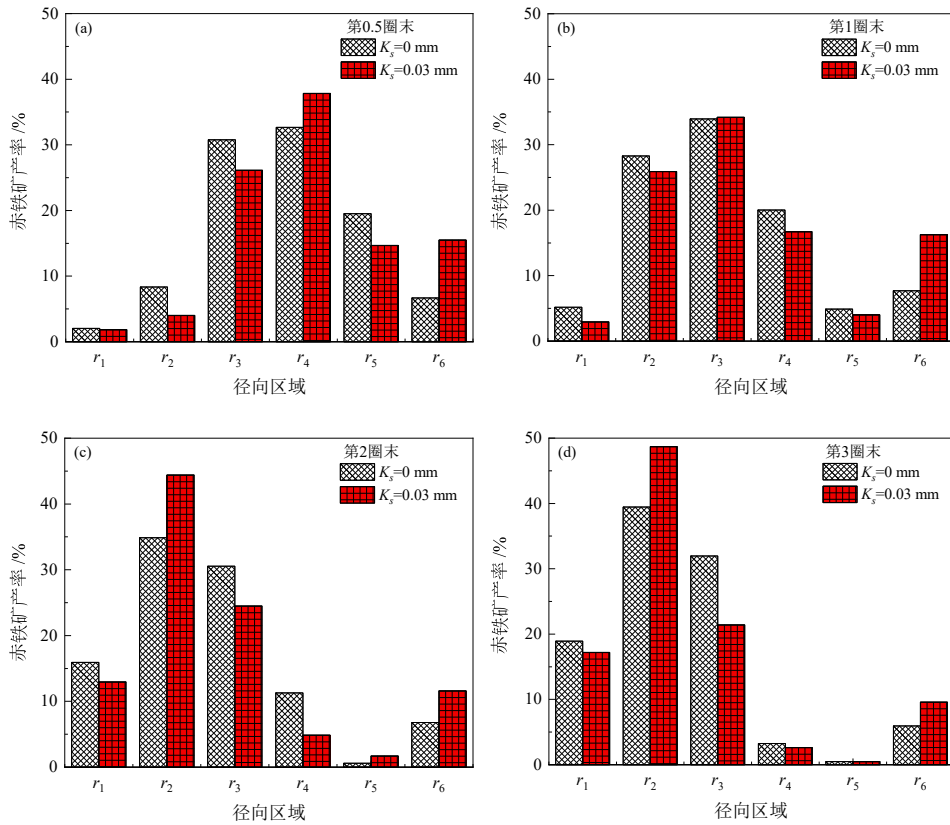
标改变。调整滑块位置时(滑块位置为距螺旋中心轴的距离), 分离效率曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 在两种壁面条件下, 赤铁矿和石英的分离效率随滑块位置外移均呈现先升高后降低的趋势, 存在最大分离效率及最佳截矿位置。随着过流圈数增加, 最大分离效率逐渐升高, 表明赤铁矿和石英的分离精度随流体运动不断提高, 增高幅度递减, 与流体参数逐渐平衡相关。光滑壁面及粗糙壁面条件下的最高分离效率分别为 75.31% 和 68.01%, 粗糙壁面导致指定粒度组成的赤铁矿和石英的分离指标下降。

3 结论

(1) 与清水流膜的类底壁形状不同, 矿浆流膜存在局部凸起, 粗糙壁面条件下的凸起高度低于光滑壁面条件下的凸起高度, 随过流圈数增多, 两条件下的矿浆流膜厚度减小并逐渐统一, 但在第三圈稳定状态下槽面内缘和中部的矿浆流膜厚度仍然高于清水体系。

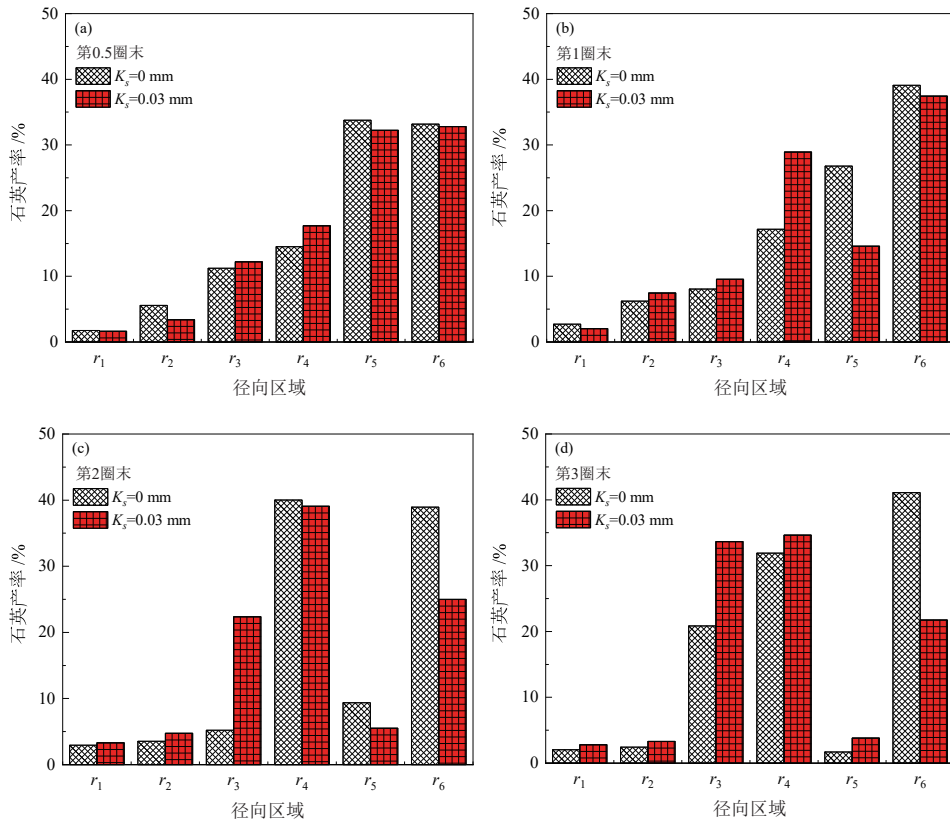
(2) 在第 0.5 圈槽面内, 中部和外缘矿浆流体的切向速度显著低于清水流速, 与光滑壁面条件相比, 粗糙壁面条件下的切向速度整体偏高, 之后随过流圈数增多上述速度差异均缩小; 内缘区域的矿浆流体切向速度高于清水体系, 由粗糙度引起的内缘切向流速差异较小。



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 8 不同圈末槽面中的赤铁矿产率径向分布

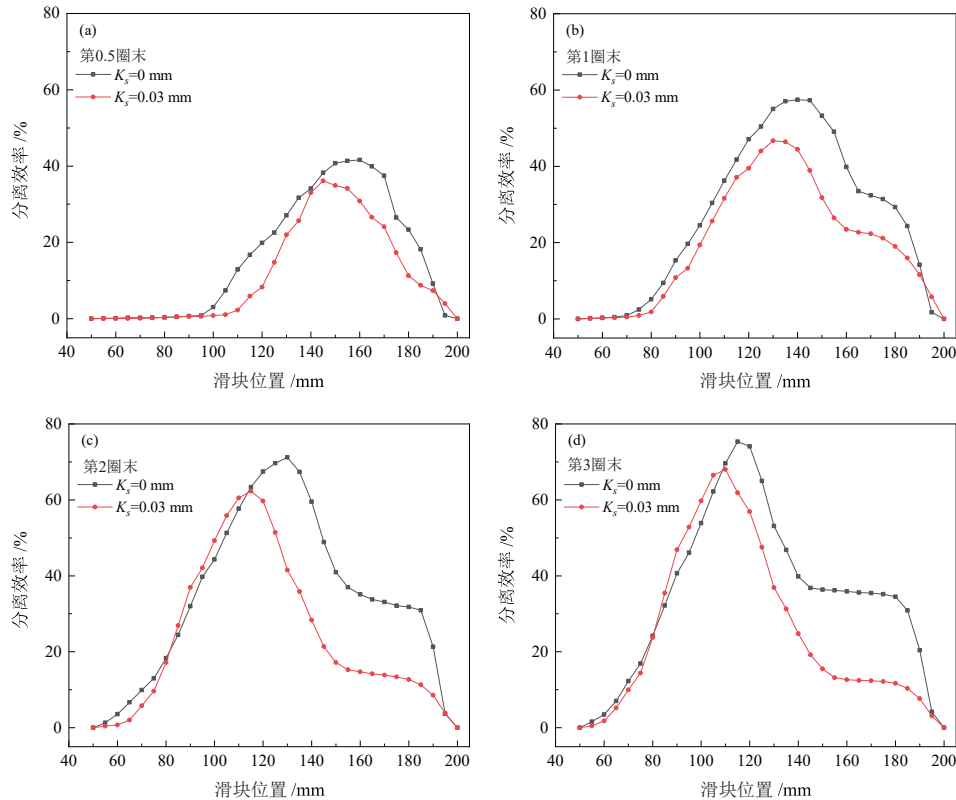
Fig. 8 Radial distribution of hematite yield in the end trough of different turns



(a) 第 0.5 圈末; (b) 第 1 圈末; (c) 第 2 圈末; (d) 第 3 圈末

图 9 不同圈末槽面中的石英产率径向分布

Fig. 9 Radial distribution of quartz yield in the end trough of different turns



(a) 第0.5圈末; (b) 第1圈末; (c) 第2圈末; (d) 第3圈末

图 10 不同圈末槽面中赤铁矿和石英的分离效率

Fig. 10 Separation efficiency of hematite and quartz in the end trough of different turns

(3) 矿浆流体的径向速度分量较小, 与清水流场相比具有明显波动特性。在粗糙壁面条件下, 矿浆内环流强度减弱, 外环流强度加强, 随过流圈数增多, 二次环流速度径向分布逐渐趋于一致。

(4) 赤铁矿产率在第 0.5 圈槽面内呈单峰形分布, 而石英产率由内至外呈递增分布。在粗糙壁面条件下, 赤铁矿在内半槽的分布减少, 随过流圈数增多向内迁移量增大, 但相比于光滑壁面条件, 赤铁矿在外缘最外微区的停留量增大, 而石英在第 3 圈槽面中部区域的分布明显增多, 容易造成分离指标降低。

(5) 赤铁矿和石英的分离效率在各圈槽面内均呈峰形分布, 最大分离效率随过流圈数增多而升高, 逐渐在第 3 圈达到平衡, 粗糙壁面条件下的最大分离效率低于光滑壁面条件下的最大分离效率, 针对论文指定粒度组成的赤铁矿和石英的混合给矿来讲, 粗糙壁面螺旋溜槽的分离性能降低。

参考文献:

[1] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 我国智能绿色矿业发展战略研究[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(12): 4-10.
WANG G F, REN S H, PANG Y H, et al. Research on development strategy of intelligent green mining industry in China[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(12): 4-10.
[2] 寿嘉华. 走绿色矿业之路——西部大开发矿产资源发展战略思考[J]. 中国地质, 2000(12): 2-3+6.

SHOU J H. Taking the road of green mining – strategic thinking on the development of mineral resources in the western development[J]. Geology in China 2000(12): 2-3+6.
[3] 伍伟, 尹琼, 任卓隽, 等. 国内外绿色矿业发展历程及策略[J]. 现代矿业, 2021, 37(2): 1-4.
WU W, YIN Q, REN Z J, et al. The development history and strategy of green mining at home and abroad[J]. Modern Mining, 2021, 37(2): 1-4.
[4] 陆占国. 强化鞍山式赤铁矿分级-重选工艺试验研究[C]//第二十三届辽鲁冀晋粤川京七省市金属学会矿业学术交流论文集. 辽宁省金属学会、山东金属学会、河北省冶金学会、等, 2016: 167-170.
LU Z G. Research on improving the classification-gravity separation technology for Anshan-type hematite ore[C]// Proceedings of the 23rd Liaoning, Shandong, Hebei, Shanxi, Guangdong, Sichuan, and Beijing Metallurgical Society Mining Academic Exchange Conference. Liaoning Province Society for Metals, Shandong Society for Metals, Metallurgy of Hebei Province, et al, 2016: 167-170.
[5] 刘惠中, 吴华冬. 螺旋选矿设备的应用现状及展望[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5): 151-158.
LIU H Z, WU H D. Application and prospect of spiral concentrator[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 151-158.
[6] SIVRIKAYA O. Cleaning study of a low-rank lignite with DMS, Reichert spiral and flotation[J]. Fuel, 2014, 119: 252-258.
[7] 沈新春, 古吉汉, 黄云松. 螺旋选矿设备在钨选矿中的应用研究现状[J]. 矿山机械, 2017, 45(10): 44-49.
SHEN X C, GU J H, HUANG Y S. Research status on application of spiral dressing equipments in tungsten ore beneficiation[J]. Mining & Processing Equipment, 2017, 45(10): 44-49.

- [8] 马崇振,张华,梁汉.螺旋溜槽发展现状及在海滨砂矿中的应用实践[J].*湖南有色金属*,2020,36(1):18–22.
MA C Z, ZHANG H, LIANG H. Current situation of spiral chute and its application in beach placer[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2020, 36(1): 18–22.
- [9] DAVIES P O J, GOODMAN R H, DESCHAMPS J A. Recent developments in spiral design, construction and application[J]. *Minerals Engineering*, 1991, 4(3-4): 437–456.
- [10] ROMELIJN T, BEHRENS M, PAUL G, et al. Experimental analysis of water and slurry flows in gravity-driven helical mineral separators[J]. *Powder Technology*, 2022, 405: 117538.
- [11] KAYA F, KARAGOZ I, AVCI A. Effects of Surface Roughness on the Performance of Tangential Inlet Cyclone Separators[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, 45(8): 988–995.
- [12] ZHAO Q, CUI B Y, HOU D X, et al. Effects of wall roughness on the separation performance of hydrocyclones under different inlet conditions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60(30): 11251–11266.
- [13] ZHOU F Q, SUN G G, ZHANG Y M, et al. Experimental and CFD study on the effects of surface roughness on cyclone performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 193: 175–183.
- [14] DEHDARINEJAD E, BAYAREH M. Impact of non-uniform surface roughness on the erosion rate and performance of a cyclone separator[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 249: 117351.
- [15] ARNOLD D J, STOKES Y M, GREEN J E F. Thin-film flow in helically wound shallow channels of arbitrary cross-sectional shape[J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(1): 013102.
- [16] 王书礼,王磊,初福栋,等.一种鱼鳞状槽面的螺旋溜槽:CN202121485750.4[P].2021–11–23.
WANG S L, WANG L, CHU F D, et al. A spirals with a fish scale shaped groove surface: CN202121485750.4[P]. 2021–11–23.
- [17] M. A. DOHEIM, A. F. ABDEL GAWAD, G. M. A. MAHRAN, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators: Part I. Low solids concentration (0.3% & 3% solids)[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(1/2): 198–215.
- [18] G. M. A MAHRAN, M. A DOHEIM, A. F. ABDEL GAWAD, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators (15 % solids)[J]. *Afinidad:Revista de Quimica Teorica y Aplicada*, 2015, 72(571): 223–229.
- [19] YE G C, LIU Q X, MA L Q, et al. CFD-DEM investigation of fluid and particle motion behaviors in initial stage of spiral separation process at low solids concentration[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2022: 1–6.
- [20] WANG J H, LUO J, HUANG S X, et al. Numerical simulation of single aluminum droplet evaporation based on VOF method[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 102008.
- [21] HUO J L, WANG Z, LUAN X Y, et al. The CFD modeling of bund overtopping phenomena and prediction of dynamic pressure on the bund[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 74: 104653.
- [22] MENG L G, GAO S L, WEI D Z, et al. Particulate flow modelling in a spiral separator by using the Eulerian multi-fluid VOF approach[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(2): 251–263.
- [23] PATTANAPOL W, WAKES S J, HILTON M J, et al. Modeling of surface roughness for flow over a complex vegetated surface[J]. 2007, 26: 273–281.
- [24] CEBECI T, BRADSHAW P. *Momentum Transfer in Boundary Layers*[M]. Hemisphere Pub. Corp, 1977.
- [25] MISHRA B K, TRIPATHY A. A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(3/4): 192–195.

Evolution Characteristic of Slurry Flow Field Parameters and Particles Separation Behavior in Spirals with Rough Wall

GAO Shuling, ZHOU Xiaohong, WANG Qian, LIU Wenbao

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: Using RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, VOF multiphase flow model and Eulerian Multi-fluid VOF model, the flow field and particle motion behavior in spirals were numerically simulated. The evolution characteristics of water flow field parameters, hematite-quartz slurry flow field parameters, particle distribution and separation efficiency with the turn number of fluid flows through the trough under conditions of smooth wall as well as rough wall were systematically investigated. It was shown that in comparison to the water system, local bulges were observed in the slurry flow film, accompanied by an increase in the tangential velocity of the slurry fluid in the inner edge region and a decrease in the tangential velocity at the middle and outer edges. The radial velocity distribution exhibited noticeable fluctuation characteristics. Compared to the condition of smooth wall, that of rough wall resulted in a reduction of bulges height of the slurry flow film. Additionally, the tangential velocity of the slurry was generally higher, and the difference in tangential velocity at the inner edge of the slurry was smaller. The intensity of the internal circulation weakened while the intensity of the external circulation strengthened. When the longitudinal path of the fluid reached the third turn, the radial distribution difference of flow field parameters were reduced and became similar. Compared with the condition of smooth wall, the distribution of hematite particles decreased in the inner half trough under the condition of rough wall, and the inward migration amount increased with the turn number of fluid flows through the trough, but the amount of stay in the outermost micro-region of the outer edge also increased. Quartz particles formed more distribution in the middle area of the trough of the third turn gradually with the flow field evolution. The maximum separation efficiency of hematite and quartz increased with the turn number of fluid flows through the trough and achieved balance gradually. The maximum separation efficiency of hematite and quartz decreased under the condition of rough wall. It is found that rough wall affected the slurry flow field and particles separation behavior of spirals significantly within the scope of this research, which could provide a reference for the wall roughness design and process control of spirals.

Keywords: wall roughness; spirals; slurry flows; particle distribution; separation efficiency

引用格式: 高淑玲, 周孝洪, 王乾, 刘文宝. 粗糙壁面螺旋溜槽中矿浆流场参数及颗粒分离行为演变特性[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 127-136.

GAO Shuling, ZHOU Xiaohong, WANG Qian, LIU Wenbao. Evolution characteristic of slurry flow field parameters and particles separation behavior in spirals with rough wall[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 127-136.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

高淑玲(1980—), 女, 河北泊头人, 东北大学副教授, 博士生导师, 辽宁省第九批“百千万人才工程”万人层次人选, 主要从事复合力场分选过程强化与调控研究。主持国家自然科学基金面上项目 2 项, 参加国家自然科学基金面上项目、重点研发等国家级项目 6 项。主编及参编出版《新编选矿概论》、《选矿厂设计》等国家规划教材 4 部。



通信作者简介:

周孝洪(1995—), 男, 四川自贡人, 东北大学 2020 级硕士研究生, 2023 级博士研究生。现就读于东北大学矿物加工工程专业, 师从高淑玲副教授, 主要从事螺旋溜槽流场仿真与调控研究。参与国家自然科学基金面上项目 2 项。