

# 螺旋溜槽流场演变及不同粒度赤铁矿与石英分离指标预测

王 乾, 高淑玲, 周孝洪, 刘春雨  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 流体力学特性是决定重选分离效果的关键因素. 采用数值模拟方法研究了 $\phi 400$  mm螺旋溜槽内流体动力学参数沿纵向行程的演变特性. 针对 $90\ \mu\text{m}$ 赤铁矿与 $38\ \mu\text{m}$ 石英和 $59\ \mu\text{m}$ 赤铁矿与 $38\ \mu\text{m}$ 石英两种给矿体系, 分析了颗粒分布、迁移行为与分离效率的变化规律. 结果表明: 流膜形态、速度分布及二次环流强度在首圈行程变化显著, 需2~3圈方能稳定, 趋稳行程与径向位置呈正相关. 赤铁矿和石英形成选择性分布, 最大分离效率沿行程总体提升;  $90\ \mu\text{m}$ 赤铁矿分布靠内, 第2.0圈基本达到迁移平衡, 最大分离效率达82.16%;  $59\ \mu\text{m}$ 赤铁矿分布偏外且在第3.0圈仍未达迁移平衡, 其第2.0, 3.0圈最大分离效率较 $90\ \mu\text{m}$ 赤铁矿体系低约6%. 粗粒赤铁矿运动行为与流膜及速度演变显著相关, 而细粒赤铁矿运动具有随机性, 需延长行程或调整结构参数以优化技术指标.

**关 键 词:** 螺旋溜槽; 流体动力学参数; 趋稳行程; 颗粒迁移; 最大分离效率

中图分类号: TD 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)12-0094-10

## Flow Field Evolution in Spiral Concentrator and Separation Index Prediction of Hematite and Quartz with Different Particle Sizes

WANG Qian, GAO Shu-ling, ZHOU Xiao-hong, LIU Chun-yu

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GAO Shu-ling, E-mail: gaoshuling@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The hydrodynamic characteristics serve as fundamental factors in determining the gravity separation effect. Numerical simulations were used to systematically investigate the evolution of fluid dynamics parameters along the longitudinal travel in a  $\phi 400$  mm spiral concentrator. For the two feeding systems comprising  $90\ \mu\text{m}$  hematite with  $38\ \mu\text{m}$  quartz and  $59\ \mu\text{m}$  hematite with  $38\ \mu\text{m}$  quartz, the variations in particle distribution, migration behavior, and separation efficiency were analyzed. The results indicate that the morphology of the flow film, the velocity distribution, and the intensity of the secondary circulation change significantly within the travel of the first turn, and it takes longitudinal travel of 2~3 turns to stabilize; the stabilization travel is positively correlated with the radial position. Hematite and quartz gradually develop a selective distribution, and the maximum separation efficiency improves overall with the travel. The distribution region of  $90\ \mu\text{m}$  hematite is more toward the inner edge, and its migration amount reaches the equilibrium in the 2nd turn; the maximum separation efficiency obtained is 82.16%. The distribution region of  $59\ \mu\text{m}$  hematite is more outward, and the migration equilibrium is not reached until the 3rd turn. The maximum separation efficiency obtained in the

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274257, 51974065); 中原关键金属实验室开放基金资助项目(GJJSKFYB202406); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201008, N2201004).

作者简介: 王 乾(1994—), 男, 甘肃张掖人, 东北大学博士研究生; 高淑玲(1980—), 女, 河北泊头人, 东北大学特聘研究员, 博士生导师.

2nd and 3rd turns is about 6% lower than that of the 90  $\mu\text{m}$  hematite system. The motion behavior of coarse-grained hematite has an obvious correlation with the evolution of the flow film and velocity distribution. However, the motion of fine-grained hematite exhibits a certain degree of randomness. Consequently, it is necessary to extend the travel or adjust related structural parameters to acquire a satisfactory technical index.

**Key words:** spiral concentrator; fluid dynamics parameter; stabilization travel; migration of particle; maximum separation efficiency

螺旋溜槽是一种典型的基于重力和离心惯性力联合作用的流膜选矿设备<sup>[1-2]</sup>,凭借其独特优势在铁、钨、锡、钽、铌、煤、海滨砂及其他具有密度差异的有色金属、稀有金属和非金属矿物分选中得到广泛应用<sup>[3-6]</sup>.经过几十年的发展,螺旋溜槽分选机理和设计优化等方面的研究进展活跃<sup>[7-12]</sup>,为进一步深化理论研究及拓展应用提供了便利.

螺旋溜槽中的浆流在重力作用下沿槽面向下做旋转运动形成纵向主流,同时受到离心惯性力而产生横向运动,经过一定行程的发展演变最终形成主流和二次环流并存,以及与层流、过渡流和湍流多流态并存的流场特征<sup>[13-19]</sup>.流体动力学参数的空间分布及演变特性从根本上决定着矿物颗粒的轴向分层和径向分带等运动行为<sup>[20-22]</sup>.因此,加强流体参数的研究和调控是实现设备结构参数优化及性能提升的重要途径.近年来,计算流体力学模拟技术的快速发展也为深入及精准研究流体特性提供了更多可能.

基于以上背景,本文借助研究团队前期建立和应用的数值模型及设置方法<sup>[23-24]</sup>,深入考察  $\phi 400\text{ mm}$  螺旋溜槽中流膜厚度、切向速度、径

向速度等流体动力学参数沿纵向行程(过流圈数)的演变特性.在此基础上,分别考察 90  $\mu\text{m}$  和 59  $\mu\text{m}$  两种粒度的赤铁矿与粒度 38  $\mu\text{m}$  石英组合给矿时的颗粒分布特性及其迁移行为,并对不同截矿位置时的分离效率进行预测,探讨螺旋溜槽中流体动力学参数演变特性及其与颗粒分离过程的相关性,以期深化对螺旋溜槽分离机制的理解.

## 1 试验方法

### 1.1 物理模型及网格划分

立方抛物线型螺旋溜槽的断面曲线控制方程如式(1)所示,其断面形状通常选取笛卡尔坐标系下第三象限的函数图像,如图1所示,其他结构参数如表1所示.结合螺旋溜槽实际分选过程中分带情况,将槽面从内至外分为内缘区域( $r=35\sim 90\text{ mm}$ )、中间区域( $r=90\sim 145\text{ mm}$ )和外缘区域( $r=145\sim 200\text{ mm}$ ),再将这3个区域均分为  $r_1\sim r_6$  共6个微区进行相关试验研究.

$$|x| = 0.0038|y|^3. \quad (1)$$

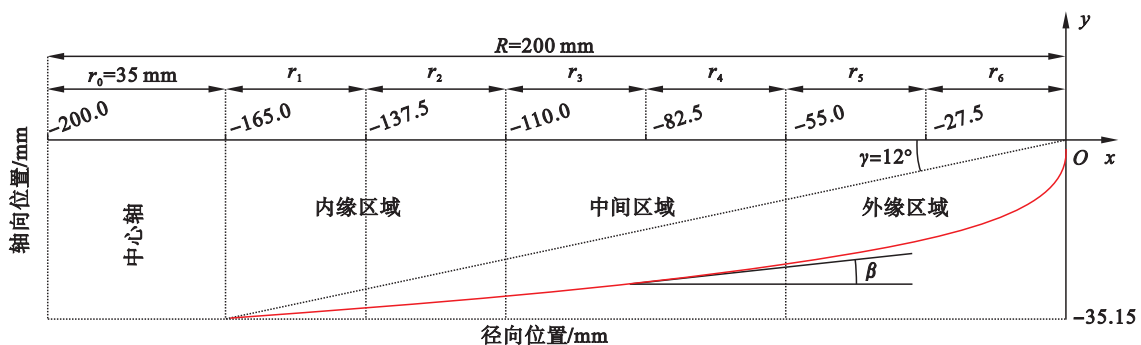


图 1 螺旋溜槽断面形状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-sectional shape of spiral concentrator

表 1 螺旋溜槽结构参数

Table 1 Structural parameters of spiral concentrator

直径 $\phi/\text{mm}$	外半径 $R/\text{mm}$	内半径 $r_0/\text{mm}$	下斜角 $\gamma/(\text{°})$	螺距 $P/\text{mm}$	圈数 $N$
400	200	35	12	240	3.25

对近槽底壁处的网格进行局部加密以提高数值计算精度,首圈流体计算域网格划分如图 2 所示,各圈网格划分方式相同.以第 3 圈末的流膜厚度和表面切向速度为判定依据,进行网格数量与计算结果之间的无关联性验证,如图 3 所示.当整个螺旋溜槽计算域六面体网格数量超过 1 037 036 时,计算结果与网格数量无关.

## 1.2 颗粒性质

根据鞍钢集团齐大山选矿厂精选段螺旋溜槽的给矿粒度组成,对赤铁矿选取 90 和 59  $\mu\text{m}$  两个粒度,对石英选取 38  $\mu\text{m}$  作为固定粒度.赤铁矿和石英的密度分别为 4 950 和 2 650  $\text{kg}/\text{m}^3$ .两种颗粒按总固体质量分数 20%,入口体积流量 12 L/min,铁品位 45.59% 的混合给料方式,共进行 2 组分离数值

试验.

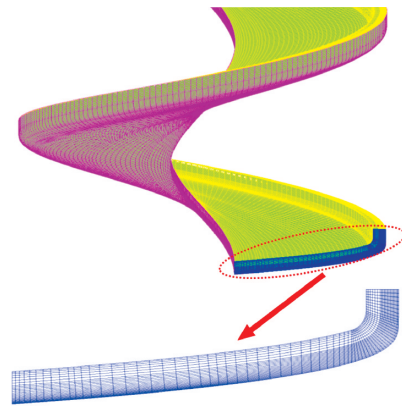


图 2 螺旋溜槽单圈流体域网格划分

Fig. 2 Fluid domain meshing of single-turn spiral concentrator

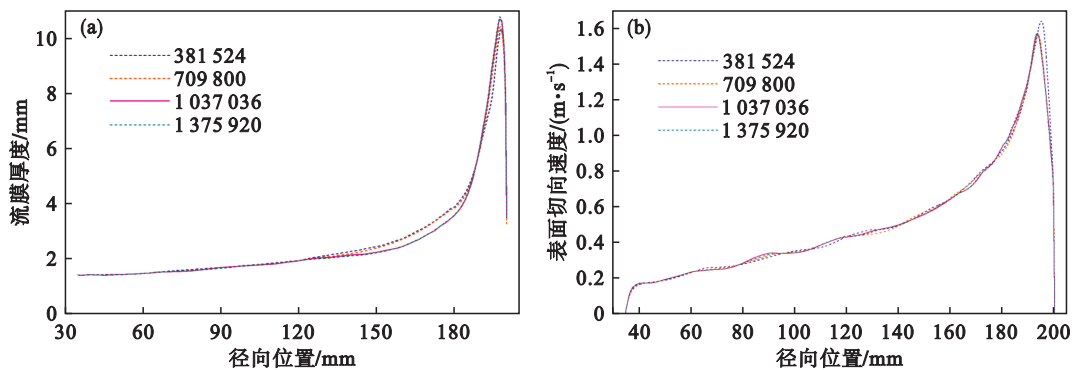


图 3 螺旋溜槽网格无关联性验证

Fig. 3 Mesh independence verification on spiral concentrator

(a)—流膜厚度对比; (b)—表面切向速度对比.

## 1.3 数值模型与试验条件

借助 Ansys Fluent 软件进行基于压力的非稳态求解,采用 VoF (volume of fluid) 多相流模型和 RNG (renormalization group)  $\kappa$ - $\varepsilon$  湍流模型对液膜铺展过程进行模拟,以获得清晰的气-液界面和收敛的稳定流场<sup>[25-28]</sup>.采用考虑拜格诺效应 (Bagnold effect) 的 Multi-fluid VoF 模型,实现对矿浆流场中气-液连续界面和颗粒离散相行为的同步模拟.在此基础上引入颗粒相,对于相间作用力主要考虑曳力  $F_d$  和升力  $F_L$ ,液-固曳力和气-液曳力分别通过 Gidaspow 模型和 Symmetric 模型予以求解,升力模型采用拜格诺升力经验公式,并通过用户自定义函数 (user-defined function, UDF) 加载至升力系数模块<sup>[29]</sup>.

采用 VoF 模型模拟气-液两相流时,将空气体积分数设为 1,即整个计算域充满空气且速度为零,其中,水为主相 (primary phase),空气为次相 (secondary phase);采用 Eulerian Multi-fluid

VoF 模型模拟气-液-固多相流时,初始流场采用 VoF 模型的计算结果,在此基础上添加颗粒相并设置颗粒的流场属性后进行数值计算.螺旋溜槽入口边界条件采用速度入口 (velocity inlet),速度值设为 0.120 2 m/s (对应体积流量 12 L/min),湍流强度设为 5%;出口边界设为压力出口 (pressure outlet),表压设为 0,空气回流体积分数设为 1;上表面设为自由滑移壁面 (free-slip wall),底壁和边壁设为无滑移壁面 (no-slip wall),壁面粗糙高度设为 0 mm,采用标准壁面函数 (standard wall functions) 对近壁面处方程进行求解.

采用隐式求解器算法对控制方程进行离散化处理,分别采用 SIMPLE 算法和 phase-coupled SIMPLE 算法进行气-液两相流和气-液-固多相流的压力-速度耦合计算,方程的空间离散格式如表 2 所示.气-液两相流模拟和气-液-固多相流模拟的收敛残差精度分别设为  $10^{-4}$  和  $10^{-3}$ .数值

计算达到统计学稳定后,继续计算 2 s 进行取样平均并作为最终模拟结果。

研究团队前期已通过流膜形态测试及颗粒实际分离试验对上述数值模型的准确性和试验条件的合理性进行了验证与修正<sup>[30]</sup>。

#### 1.4 数据提取与表征

用以表征流场演变特性的参数包括:流膜厚度  $H$  (某一位置流膜表层至槽面底壁的轴向距离)、切向流速和径向流速等。研究流速分布时,分别以 20 mm 为间距选取  $r=35, 55, 75$  mm 和  $r=90,$

110, 130 mm 作为内缘和中间区域的代表性特征径向位置;由于外缘区域流速变化率较高,以 15 mm 为间距选取  $r=160, 175, 190$  mm 作为外缘区域的代表性特征径向位置。提取颗粒数据时,首先分别获取赤铁矿和石英颗粒的质量流量,以此计算出两种颗粒在 6 个径向微区的产率,之后调整截矿位置获得若干精矿物(槽面里侧产物),并用赤铁矿与石英在精矿物中的回收率之差表征分离效率<sup>[31-33]</sup>。

表 2 不同求解模型的空间离散格式

Table 2 Spatial discretization patterns for different solving models

项目	气-液两相流	气-液-固多相流
梯度	Least Squares Cell Based	Least Squares Cell Based
压力	PRESTO	—
动量	Second Order Upwind	QUICK
体积分数	Compressive	Compressive
湍流动能	Second Order Upwind	QUICK
湍流耗散率	Second Order Upwind	QUICK

## 2 结果与讨论

### 2.1 流体动力学参数分布及沿纵向行程演变特性

#### 2.1.1 流膜厚度径向分布及沿程变化趋势

流膜厚度决定了颗粒分离空间的大小,因此,首先考察不同过流圈数槽面中的流膜厚度,结果如图 4 所示。

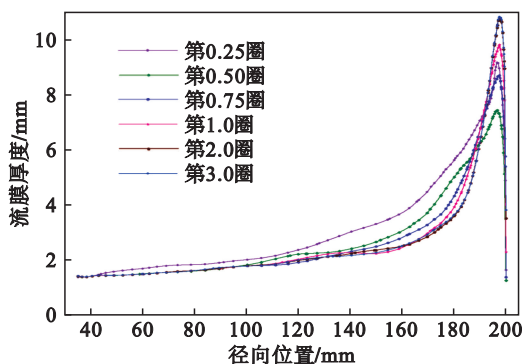


图 4 不同过流圈数槽面中流膜厚度的径向分布

Fig. 4 Radial distribution of flow film thickness across different turns in the trough

由图 4 可以看出,槽面中的流膜厚度由内至外逐渐增大,铺展状态符合螺旋溜槽工作实际且与相关实测结果吻合<sup>[11,30]</sup>。流膜厚度整体上随过流圈数增大而降低,区别是各区域的流膜厚度趋

于稳定的纵向行程不同,内缘、中部及外缘流膜厚度趋稳的纵向行程分别为 0.50, 0.75, 2.0 圈。最大流膜厚度分布在外缘端点以内 5 mm 左右,随过流圈数增大而增大,也是在第 2.0 圈末达到平衡。分析表明,流体所在区域越靠外其铺展稳定所需要的行程越长,流膜的显著性变化体现在首圈行程内,而整个槽面内获得稳定流膜大致需要 2 圈行程。

#### 2.1.2 最大切向速度沿纵向行程的演变特性

切向速度是螺旋溜槽中流体运动的最大速度分量,决定着其他流动参数的分布与演变。因此,依次考察了 9 个特征径向位置处流体最大切向速度的演变情况。

由图 5 可以看出,随纵向行程延长,最大切向速度在内缘区域  $r=35$  mm 处基本保持不变且仅为  $0.094 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;在内缘  $r=55, 75$  mm 处和中部区域,流体最大切向速度先减小而后逐渐稳定;在外缘区域  $r=160$  和  $175$  mm 处,该流体参数先增大后减小而后趋于稳定,在  $r=190$  mm 处则连续增大后在第 1.0 圈附近达到稳定。与流膜厚度演变相似,流体的径向位置越靠外,其切向速度的趋稳行程越长。此外,在任一行程处,随着流体径向位置外移,最大切向速度增大,这也与流膜厚度径向分布趋势一致。

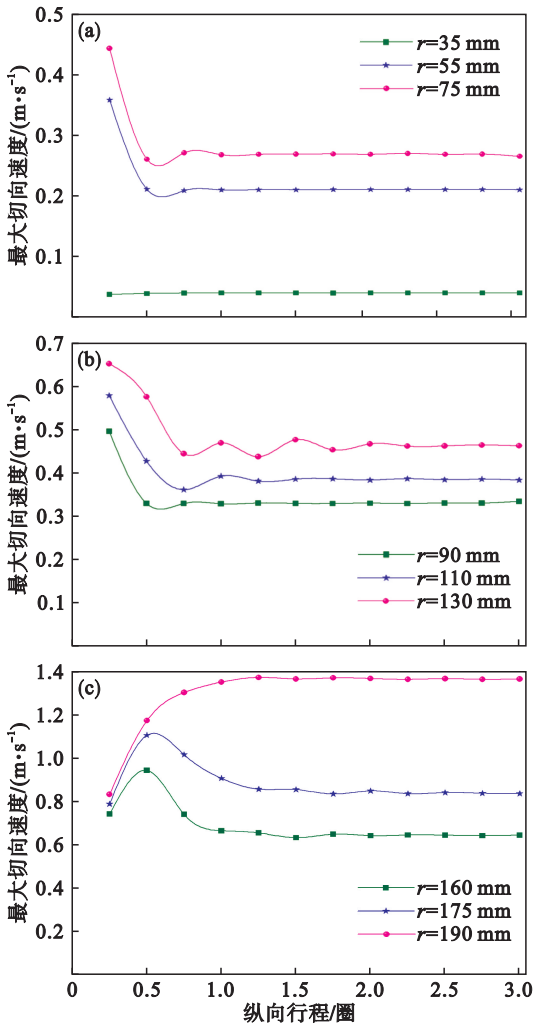


图5 最大切向速度沿纵向行程演变曲线

Fig. 5 Evolution of maximum tangential velocity along longitudinal travel

(a)—内缘区域; (b)—中间区域; (c)—外缘区域.

### 2.1.3 径向速度的空间分布及其演变

横向二次环流是螺旋溜槽中流体运动的另一种重要形式,也是影响颗粒径向运动的关键流场特征.因此提取了不同过流圈数槽面中的径向速度分布云图,结果如图6所示,其中数值正、负分别表示沿径向向外和向内运动,数值大小可反映内外环流的强度.

由图6可以看出,在初始阶段(第0.25圈末),上层向外运动的流体径向速度大、分布范围广,而最外缘下层向内运动的流体径向速度小、分布范围小.这是由于流体先向外铺展至最外缘后受到边壁阻碍发生折返,进而转变为速度较小的向内运动.该过程中不平衡的内外环流是促使二次环流初步形成的主要原因<sup>[30, 33]</sup>.在第0.25~1.0圈纵向行程内,外环流分布范围及速度逐渐变小,内环流分布范围及速度则相应增大,内、外环流渐趋平衡.在第1.0~3.0圈纵向行程内,内外环流空间分布及径向速度变化幅度较小,表明二次环

流主要在首圈行程完成快速演变,之后在第2圈未达到相对稳定状态.

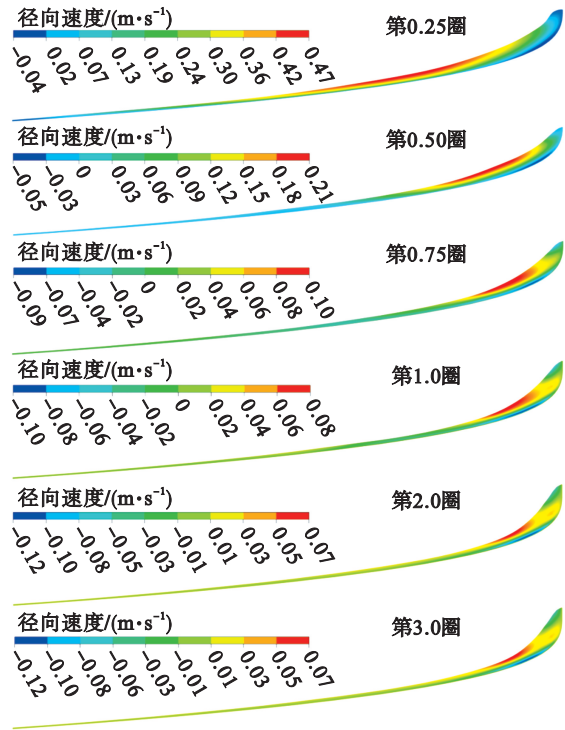
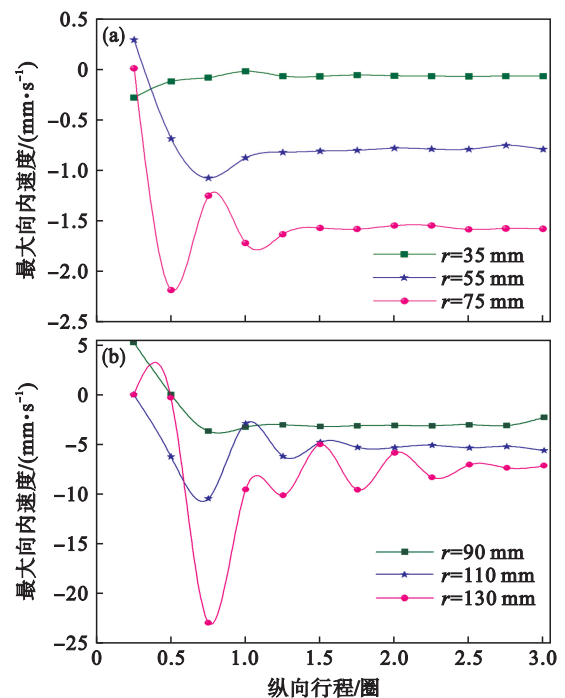


图6 不同过流圈数槽面中的径向速度分布云图

Fig. 6 Contour of radial velocity distribution across different turns in the trough

### 2.1.4 最大径向速度的演变特性

流体的径向速度可以反映二次环流的强度.对内缘、中间和外缘区域9个特征位置的最大向内速度和最大向外速度沿纵向行程的演变特性进行考察,结果分别如图7和图8所示.



纵向行程/圈

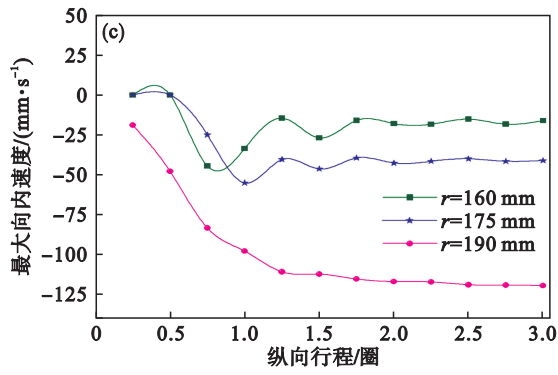


图 7 最大向内速度随纵向行程的演变

Fig. 7 Evolution of maximum inward velocity along longitudinal travel

(a)—内缘区域; (b)—中间区域; (c)—外缘区域.

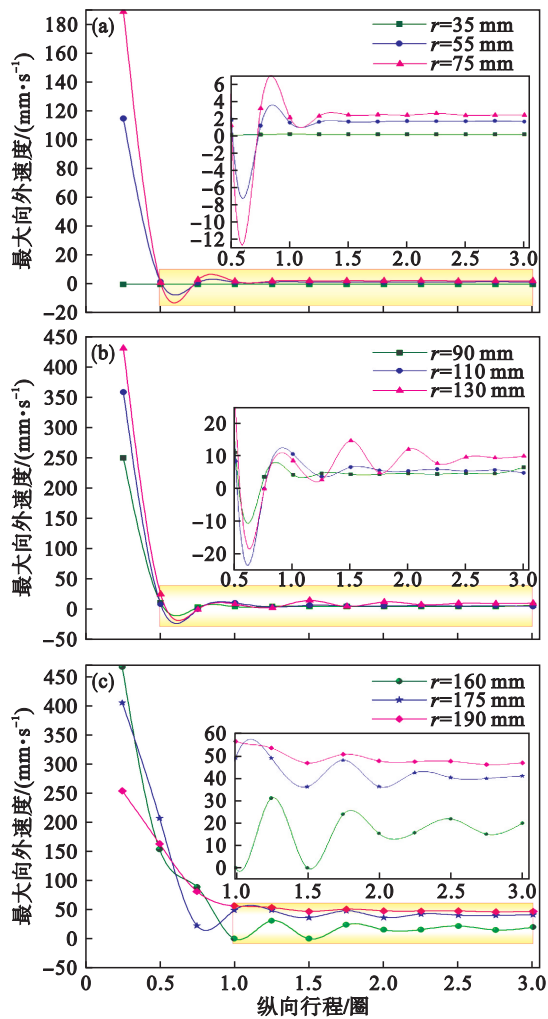


图 8 最大向外速度随纵向行程的演变

Fig. 8 Evolution of maximum outward velocity along longitudinal travel

(a)—内缘区域; (b)—中间区域; (c)—外缘区域.

从图 7 可以看出,内缘  $r=35\text{ mm}$  处的最大向内速度很小且随纵向行程延长无明显变化;外缘  $r=190\text{ mm}$  处的最大向内速度持续增大后趋于稳定.其他径向位置的最大向内速度变化规律相

似,均呈现出在首圈行程内迅速增大而后逐渐稳定的趋势.从内至外,最大向内速度呈增大趋势,且发展至稳定的纵向行程更长,波动性也更加显著.

图 8 表明,随着纵向行程延长,除  $r=35\text{ mm}$  位置外,内缘和中部流体的最大向外速度均在第 0.25~0.50 圈行程内快速下降后趋于稳定,而外缘流体的最大向外速度则是在首圈行程内快速下降后趋于相对稳定,局部流体趋稳所需行程在 2 圈以上.此外,外缘流体最大向外速度远大于内缘和中部区域.

## 2.2 赤铁矿-石英颗粒在螺旋溜槽流场中的分离指标预测

### 2.2.1 颗粒沿槽分布特性及其迁移行为

分别提取两种给料体系下不同过流圈数槽面中赤铁矿和石英颗粒在 6 个径向微区中的产率,考察赤铁矿和石英颗粒的空间分布特性及迁移规律,结果分别如图 9 和图 10 所示.

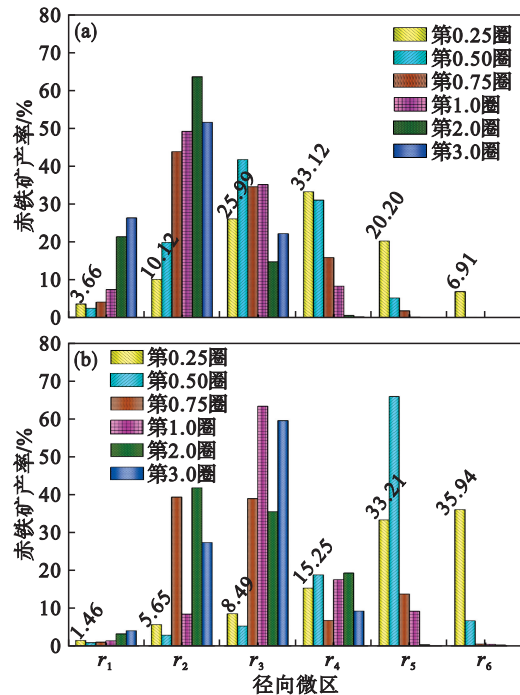


图 9 不同过流圈数槽面中赤铁矿在各径向微区的产率

Fig. 9 Yield of hematite in various radial regions across different turns in the trough

(a)— $90\text{ }\mu\text{m}$  赤铁矿与  $38\text{ }\mu\text{m}$  石英给料体系;

(b)— $59\text{ }\mu\text{m}$  赤铁矿与  $38\text{ }\mu\text{m}$  石英给料体系.

由图 9a 可知,  $90\text{ }\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒在第 0.25 圈槽面中大量分布在中部  $r_3, r_4$  及外缘  $r_5$  区域;在第 0.50 圈和 0.75 圈时,逐渐向内迁移至  $r_2, r_3$  和  $r_4$ ;第 1.0 圈时则主要集中在内半槽  $r_2$  和  $r_3$  两个微区,在中部  $r_4$  还有 10% 左右的产率分布;到第 2.0 圈和第 3.0 圈时持续向内迁移并在内缘  $r_1$  和  $r_2$  形成明显富集,最终在中部  $r_4$  中产率降至 0.5% 以下.由

图 9b 可知, 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒在第 0.25 圈时主要分布在外缘区域; 在第 0.50 圈时向内迁移, 但仍以外缘为主要分布区域; 在第 0.75 圈时继续内移并以内缘  $r_2$  和  $r_3$  为主分布区间; 至第 1.0 圈时以  $r_3$  为主分布区间; 到第 2.0 和 3.0 圈时又主要富集在  $r_2$  和  $r_3$ , 在中部  $r_4$  中仍有 9.20% 的错配颗粒. 与 90  $\mu\text{m}$  赤铁矿相比, 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿随流场演变在槽面形成的局部分布具有一定的波动性和随机性, 最终在内缘两个微区的产率明显较低, 而在中间  $r_3$  和  $r_4$  两个微区的产率明显偏高, 不易获得较好的分离效果. 这与 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿粒度相对较小、受到外向流的影响更明显有关.

由图 10a 可知, 对于 90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给矿体系, 石英颗粒在第 0.25 圈槽面各微区的分布与赤铁矿有明显差异, 其主要分布区域包括  $r_4$  及外缘区域  $r_5$  和  $r_6$ . 随着过流圈数增加, 其在外缘  $r_6$  中的产率明显升高, 在  $r_4$  和  $r_5$  中的产率总体降低, 在  $r_2$  和  $r_3$  中的产率略微升高, 在  $r_1$  中分布较少且几乎不受圈数影响. 由图 10b 可知, 在 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给矿体系中, 石英颗粒在第 0.25 圈槽面中的主要分布区域也是  $r_4$  及外缘区域  $r_5, r_6$ , 且在最外缘  $r_6$  中的产率更高. 随着过流圈数增加, 石英颗粒在各微区的产率变化与前述给矿体系相似, 最终均以  $r_6$  为最主要分布区域. 区别是此体系中的石英产率变化更具波动性和随机性, 与 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿的产率变化特点一致, 进一步表明

颗粒粒度越小, 颗粒运动的随机性越明显.

为进一步考察颗粒的迁移规律, 对不同微区中赤铁矿和石英颗粒的产率变化进行计算, 结果如表 3~表 6 所示.

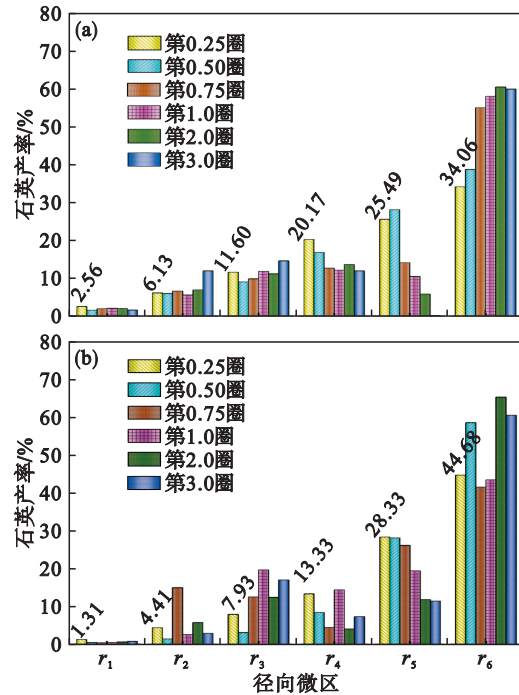


图 10 不同过流圈数槽面中石英在各径向微区的产率  
Fig. 10 Yield of quartz in various radial regions across different turns in the trough  
(a)—90  $\mu\text{m}$  赤铁矿和 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系;  
(b)—59  $\mu\text{m}$  赤铁矿和 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系.

表 3 不同径向微区中 90  $\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒的产率变化值

Table 3 Yield variation of 90  $\mu\text{m}$  hematite particles in different radial regions

纵向行程/圈	内半槽产率变化/%				外半槽产率变化/%			
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	总和	$r_4$	$r_5$	$r_6$	总和
0.25→0.50	-1.14	9.66	15.57	24.09	-2.21	-14.98	-6.90	-24.09
0.5→0.75	1.65	23.89	-7.12	18.42	-15.08	-3.34	0.00	-18.42
0.75→1.0	3.29	5.32	0.57	9.17	-7.48	-1.70	0.00	-9.17
1.0→2.0	13.86	14.34	-20.27	7.92	-7.74	-0.18	0.00	-7.92
2.0→3.0	4.96	-11.99	7.41	0.37	-0.38	0.00	0.00	-0.37

表 4 不同径向微区中 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒的产率变化值

Table 4 Yield variation of 59  $\mu\text{m}$  hematite particles in different radial regions

纵向行程/圈	内半槽产率变化/%				外半槽产率变化/%			
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	总和	$r_4$	$r_5$	$r_6$	总和
0.25→0.50	-0.60	-2.80	-3.26	-6.67	3.49	32.49	-29.31	6.67
0.5→0.75	0.15	36.37	33.60	70.12	-12.02	-51.99	-6.11	-70.12
0.75→1.0	0.35	-30.84	24.35	-6.14	10.79	-4.57	-0.08	6.14
1.0→2.0	1.83	33.27	-27.81	7.29	1.72	-8.82	-0.19	-7.29
2.0→3.0	0.84	-14.40	24.01	10.46	-10.03	-0.32	-0.11	-10.46

由表 3 和表 4 可看出, 随着流体纵向行程延长, 90  $\mu\text{m}$  赤铁矿在内半槽各微区的产率总和不断增大, 但增幅逐渐变小, 表明此粒度的赤铁矿

断增大, 但增幅逐渐变小, 表明此粒度的赤铁矿从外向内持续迁移并逐渐在第 2.0 圈达到平衡.

相比之下,59  $\mu\text{m}$  赤铁矿在内半槽的产率总和随流体纵向行程延长呈现波动性变化,最终向内半

槽的迁移量为 75.06%.从每步行程的产率总变化值判断,其向内迁移运动在第 3.0 圈仍未平衡.

表 5 不同径向微区中石英颗粒的产率变化值(90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系)

Table 5 Yield variation of quartz particles in different radial regions (90  $\mu\text{m}$  hematite and 38  $\mu\text{m}$  quartz feeding system)

纵向行程/圈	内半槽产率变化/%				外半槽产率变化/%			
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	总和	$r_4$	$r_5$	$r_6$	总和
0.25→0.50	-0.97	-0.14	-2.57	-3.67	-3.39	2.54	4.53	3.67
0.5→0.75	0.38	0.65	0.82	1.85	-4.12	-13.97	16.24	-1.85
0.75→1.0	0.15	-1.05	1.98	1.09	-0.53	-3.57	3.02	-1.09
1.0→2.0	-0.04	1.35	-0.65	0.66	1.49	-4.61	2.46	-0.66
2.0→3.0	-0.44	4.99	3.39	7.93	-1.69	-5.70	-0.54	-7.93

表 6 不同径向微区中石英颗粒的产率变化值(59  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系)

Table 6 Yield variation of quartz particles in different radial regions (59  $\mu\text{m}$  hematite and 38  $\mu\text{m}$  quartz feeding system)

纵向行程/圈	内半槽产率变化/%				外半槽产率变化/%			
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	总和	$r_4$	$r_5$	$r_6$	总和
0.25→0.50	-0.84	-2.97	-4.84	-8.66	-4.93	-0.24	13.82	8.66
0.5→0.75	-0.02	13.53	9.42	22.93	-3.94	-1.97	-17.02	-22.93
0.75→1.0	0.07	-12.38	7.15	-5.16	9.91	-6.70	1.95	5.16
1.0→2.0	0.13	3.17	-7.26	-3.96	-10.30	-7.57	21.83	3.96
2.0→3.0	0.13	-2.81	4.64	1.96	3.27	-0.42	-4.81	-1.96

由表 5 和表 6 可知,两种给矿体系中的 38  $\mu\text{m}$  石英颗粒也随着流体纵向行程的延长而向内半槽迁移,迁移量与赤铁矿相比均不大,但在从第 2.0 圈至第 3.0 圈的运动过程中,石英颗粒在内半槽的产率总和增大了 7.93%,将对精矿产品指标产生一定影响.同时可以发现,石英颗粒在每步流体行程的产率总变化没有明显规律,这一方面反映出此粒度石英的运动随机性,也预示着在不

同行程高度截取的产物指标的差异性.此外,两种体系中的石英具有一定运动差异,表明颗粒运动也受给料参数的影响.

2.2.2 赤铁矿-石英分离效率沿纵向行程的变化  
为更直观地分析不同粒度的赤铁矿和石英的分离指标,在不同圈数槽面中分别调整截矿位置,相应提取颗粒分离效率,结果如图 11 所示.

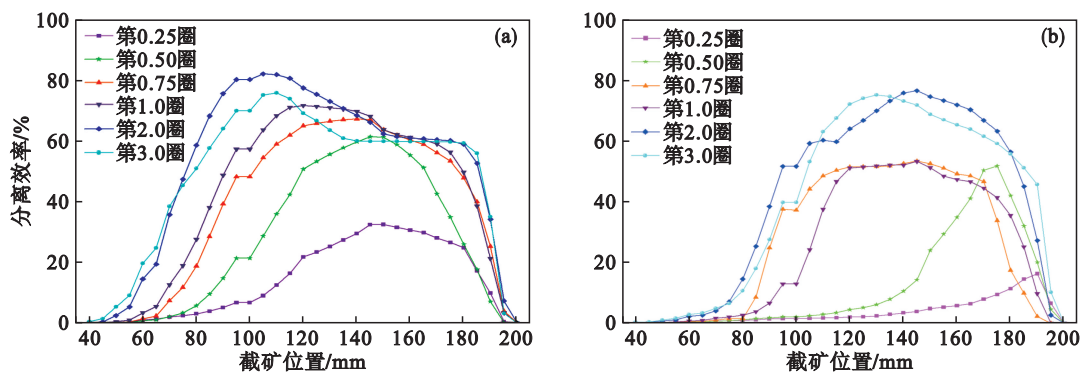


图 11 不同圈数槽面中截矿位置对颗粒分离效率的影响

Fig. 11 Influence of splitter position on particle separation efficiency across different turns in the trough (a)—90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系; (b)—59  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系.

由图 11 的总体趋势可以看出,两种给料体系下,颗粒分离效率均随截矿位置外移呈现先增大后减小的峰型分布规律.随着流体纵向行程延长,最大分离效率不同程度升高,对应的截矿位

置内移,这与两种矿物颗粒的迁移规律相关.

从图 11 还可以发现,90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系下,在第 2.0 圈、截矿位置为 105 mm 时获得的最大分离效率为 82.16%;在第 3.0 圈、截

矿位置为 115 mm 时获得的最大分离效率为 75.94%。分离效率指标下降与石英在第 2.0 圈到第 3.0 圈行程内的向内迁移量增幅变大密切相关,也与相关流体参数在第 2.0 圈达到平衡相关;59  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系下,在第 2.0 圈、截矿位置为 145 mm 时可获得最高分离效率 76.55%;在第 3.0 圈、截矿位置为 130 mm 时获得的最高分离效率为 75.14%,分离效率指标略微下降。由于 59  $\mu\text{m}$  赤铁矿的迁移运动未达平衡,因此欲获得更好的分离效果,需继续延长流体纵向行程或调整相关结构参数。此外,在相同纵向行程处,90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英给料体系的最佳截矿位置明显更靠内,这与该给料体系下赤铁矿颗粒显著向内迁移有关。

### 3 结 论

1) 随流体纵向行程延长,分选面内流膜变薄,流体铺展、最大切向速度趋稳所需的行程与其径向位置坐标呈正相关;流体参数的显著性变化主要体现在首圈行程内,整个槽面获得稳定流膜和速度分布需要 2 圈行程。

2) 二次环流的强度随流体行程变化显著。在 0.5 至 1.0 圈行程内,内环流强度快速增大,外环流强度快速减小,之后均逐渐趋于稳定;趋稳所需行程也与流体径向位置坐标正相关,其中外缘局部流体趋稳行程需 2 圈以上。中部和外缘区域流体的径向速度演变具有明显波动性。

3) 赤铁矿和石英颗粒随流体运动逐渐在槽面内形成选择性分布,两矿物集中分布区的间距与赤铁矿粒度呈正相关。90  $\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒的迁移在第 2.0 圈基本达到平衡,其运动与流膜及速度分布演变过程密切相关;59  $\mu\text{m}$  赤铁矿颗粒的迁移在第 3.0 圈仍未平衡,其运动具有一定随机性。

4) 颗粒最大分离效率随流体纵向行程总体上不断提高,最佳截矿位置内移。90  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英在第 2.0 圈槽面中获得最大分离效率 82.16% 后下降明显,其最佳分离行程为 2 圈。59  $\mu\text{m}$  赤铁矿与 38  $\mu\text{m}$  石英在第 2.0 圈槽面中获得最大分离效率 76.55% 后略降,后续行程的分离效率指标变化有待于进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 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.

- [2] 高淑玲,魏德洲,崔宝玉,等.基于 CFD 的螺旋溜槽流场及颗粒运动行为数值模拟[J].*金属矿山*, 2014(11): 121-126.  
(Gao Shu-ling, Wei De-zhou, Cui Bao-yu, et al. CFD-based numerical simulation of flow field of and particles motion behavior in spiral[J]. *Metal Mine*, 2014(11): 121-126.)
- [3] Dixit P, Tiwari R, Mukherjee A K, et al. Application of response surface methodology for modeling and optimization of spiral separator for processing of iron ore slime [J]. *Powder Technology*, 2015, 275: 105-112.
- [4] Yu W, Zhang H L, Wang X B, et al. Enrichment of residual carbon from coal gasification fine slag by spiral separator [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315: 115149.
- [5] 张文杰,叶晗晨,杜云鹏,等.印尼某褐铁型红土镍矿工艺矿物学及选矿工艺的研究[J].*有色金属工程*, 2023, 13 (12): 90-99.  
(Zhang Wen-jie, Ye Han-chen, Du Yun-peng, et al. Research on process mineralogy and beneficiation technology of a limonite-type lateritic nickel ore in Indonesia [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2023, 13 (12): 90-99.)
- [6] 骆洪振,高春庆,沈进杰.某伴生钽铌锂辉石矿选矿试验研究[J].*金属矿山*, 2022(8): 101-107.  
(Luo Hong-zhen, Gao Chun-qing, Shen Jin-jie, et al. Study on mineral dressing of an associated tantalum niobium lithium pyroxene ore [J]. *Metal Mine*, 2022 (8): 101-107.)
- [7] 孙小乐,南凯,睢月婷,等.螺旋溜槽槽床联选对气渣提碳行为研究[J].*中国矿业*, 2023, 32 (12): 235-241.  
(Sun Xiao-le, Nan Kai, Sui Yue-ting, et al. Study on carbon extraction from gasification slag by spiral chute and table concentrator combined separation [J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32 (12): 235-241.)
- [8] Ye G C, Huo Y Y, Li C F, et al. A comparative study of trough profile and operating parameters performance in spiral concentrator [J]. *International Journal of Coal Preparation & Utilization*, 2021, 41(9): 678-691.
- [9] 孟令国,高淑玲,周孝洪,等.入口流量对螺旋溜槽首圈流场演变及矿物颗粒分布的影响[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(6): 856-862.  
(Meng Ling-guo, Gao Shu-ling, Zhou Xiao-hong, et al. Influence of the inlet flow rate on flow field evolution and mineral particle distribution in the first turn of spiral separators [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44 (6): 856-862.)
- [10] Sudikondala P, Mangadoddy N, Kumar M, et al. CFD modelling of spiral concentrator—prediction of comprehensive fluid flow field and particle segregation [J]. *Minerals Engineering*, 2022, 183: 107570.
- [11] 高淑玲,孟令国,周孝洪,等.给料参数对螺旋溜槽内流层铺展及颗粒分离行为的影响[J].*有色金属(选矿部分)*, 2022 (5): 137-143, 158.  
(Gao Shu-ling, Meng Ling-guo, Zhou Xiao-hong, et al. Effect of feed parameters on flow spreading and particle separation behavior in spirals [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2022 (5): 137-143, 158.)
- [12] 高淑玲,周孝洪,王乾,等.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 Shu-ling, Zhou Xiao-hong, Wang Qian, et al. 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.)
- [13] Ankireddy P R, Purushotham S, Narasimha M. Fluid flow modeling and analysis of low- and high-gravity spiral concentrators: experimental and analytical approaches [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2023, 46 (8): 1619–1629.
- [14] 袁俊, 高淑玲, 孟令国, 等. 螺旋溜槽内二次环流分布特性及其分选作用研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2021 (2): 29–35, 43.  
(Yuan Jun, Gao Shu-ling, Meng Ling-guo, et al. Research progress on secondary circulation distribution and separation in spiral chute [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021 (2): 29–35, 43.)
- [15] Holtham P N. Flow visualisation of secondary currents on spiral separators [J]. *Minerals Engineering*, 1990, 3 (3/4): 279–286.
- [16] Jain P K, Rayasam V. An analytical approach to explain the generation of secondary circulation in spiral concentrators [J]. *Powder Technology*, 2017, 308: 165–177.
- [17] Holtham P N. Primary and secondary fluid velocities on spiral separators [J]. *Minerals Engineering*, 1992, 5 (1): 79–91.
- [18] Matthews B W, Fletcher C A J, Partridge A C. Computational simulation of fluid and dilute particulate flows on spiral concentrators [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1998, 22 (12): 965–979.
- [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*, 2023, 44 (7): 475–480.
- [20] Boisvert L, Sadeghi M, Bazin C. Investigation of residence time and fluid volume in spiral concentrators [J]. *Minerals Engineering*, 2023, 202: 108272.
- [21] Kapur P C, Meloy T P. Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design: spiral geometry, fluid flow and forces on particles [J]. *Powder Technology*, 1999, 102 (3): 244–252.
- [22] Arnold D J, Stokes Y M, Green J E F. Particle-laden thin-film flow in helical channels with arbitrary shallow cross-sectional shape [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31 (7): 073305.
- [23] Gao S L, Meng L G, Zhou X H, et al. Design of partial cross-sectional geometry and prediction of separation performance in the spiral separator [J]. *Separation Science and Technology*, 2022, 57 (13): 2127–2144.
- [24] Meng L G, Gao S L, Wei D Z, et al. Effects of cross-sectional geometry on flow characteristics in spiral separators [J]. *Separation Science and Technology*, 2021, 56 (17): 2967–2977.
- [25] Doheim M A, Abdel G A F, Mahran G M A, et al. Computational prediction of water-flow characteristics in spiral separators: part I, flow depth and turbulence intensity [J]. *JES Journal of Engineering Sciences*, 2008, 36 (4): 935–950.
- [26] Doheim M A, Abdel G A F, Mahran G M A, et al. Computational prediction of water-flow characteristics in spiral separators: part II, the primary and secondary flows [J]. *JES Journal of Engineering Sciences*, 2008, 36 (4): 951–961.
- [27] 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.
- [28] 高淑玲, 孟令国, 魏德洲, 等. 螺旋溜槽流场特性与分离性能研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40 (1): 166–171.  
(Gao Shu-ling, Meng Ling-guo, Wei De-zhou, et al. Research advance of flow characteristics in spirals and its separation performance [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40 (1): 166–171.)
- [29] 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.
- [30] Meng L G, Gao S L, Wei D Z, et al. Investigation on the evolution of flow field stability in a spiral separator [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 174: 107224.
- [31] 周孝洪, 高淑玲, 孟令国, 等. 壁面粗糙度对螺旋溜槽中矿浆流动及颗粒分离行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44 (12): 1769–1777.  
(Zhou Xiao-hong, Gao Shu-ling, Meng Ling-guo, et al. Influence of wall roughness on slurry flow and particles separation behaviors in spirals [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44 (12): 1769–1777.)
- [32] Gao S L, Zhou X H, Meng L G, et al. Variation of flow hydrodynamic parameters and prediction of particle separation indices in the spiral concentrator with the regulation of pitch-diameter ratio [J]. *Separations*, 2023, 10 (7): 410.
- [33] 叶贵川. 螺旋分选机流场特征及分选密度调控研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.  
(Ye Gui-chuan. Study on flow field characteristics and control mechanism of separation density in coal spiral separator [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019.)