

# 流动阻力对螺旋分选流稳定性的影响研究

朱合钧<sup>1</sup>,刘惠中<sup>2</sup>,邓华军<sup>1</sup>,刘嘉虎<sup>1</sup>,刘茜茜<sup>2</sup>

1. 赣州职业技术学院,江西 赣州 341000;

2. 江西理工大学机电工程学院,江西 赣州 341000



**摘要:**螺旋分选流液面因失稳所产生的滚波,势必会扰乱分选流场,对矿物分选造成影响。为了解决螺旋分选流稳定性机制复杂、难以调控的问题,借助CFD(Computation fluid dynamics)技术对不同流动阻力条件下螺旋分选流稳定性的影响规律进行研究。结果表明:在螺旋分选流流动过程中,惯性力具有不稳定性,对流动稳定性起到破坏作用,而表面张力则能抑制小扰动的进一步发展,增强流动稳定性;随着槽面粗糙度的增大、流体黏度的增大以及槽面刻槽数量的增多,流动阻力逐渐增大,螺旋分选流所能达到的最大雷诺数有所降低;流动阻力的增大同样使得弗劳德数和韦伯数有所降低,当粗糙度由0.1 mm增加至0.5 mm和1.0 mm时,弗劳德数分别下降了4.8%和14.0%;当黏度由0.010 Pa·s增加至0.020 Pa·s和0.025 Pa·s时,弗劳德数分别下降了8.9%和20.7%;当槽面刻槽数量由0增加至10和19时,弗劳德数分别下降了13.6%和16.7%,即流动阻力的增大可增强流动稳定性。研究结果可为螺旋溜槽的设计及矿浆黏度的选择提供参考。

**关键词:**螺旋溜槽;流动阻力;数值模拟;流动稳定性;滚波

中图分类号:TD922+.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)01-0231-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.169

引用格式:朱合钧,刘惠中,邓华军,等.流动阻力对螺旋分选流稳定性的影响研究[J].黄金科学技术,2026,34(1):231-242.  
ZHU Hejun, LIU Huizhong, DENG Huajun, et al. Study on the Effect of Flow Resistance on the Stability of Spiral Separation Flow [J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 231-242.

螺旋溜槽是一种重力选矿设备,凭借其污染少、生产成本低和配置简单等优点,被广泛应用于赤铁矿、镜铁矿、铬铁矿和钛铁矿的选矿中(刘惠中, 2011; Veiga et al, 2020; Ye et al, 2021)。在螺旋溜槽选矿过程中,流膜表面常因失稳而出现明显的波浪现象,该现象在水力学中被称为“滚波”。滚波的形成会显著影响分选流场结构,进而影响矿物的分选效果。滚波的发展过程受多种因素的影响,其中流动阻力是主要影响因素之一。

国内外针对螺旋分选流稳定性的研究较少,部分学者通过构建螺旋分选流模型分析了部分结构参数对于螺旋分选流稳定性的影响,结果表明,直径和距径比的增大,均会导致流体稳定性降低(刘

惠中等, 2023; 李陈金, 2023)。除此之外,未查阅到更多关于螺旋分选流稳定性的研究成果。然而,流动阻力作为水力学的研究重点,自20世纪70年代以来,陆续得到学术界的关注。Roels et al(1984)和沙际德等(1995)针对浅层水流阻力特性建立了一系列数学模型,但关于阻力系数与雷诺数之间的定量关系,不同试验条件下得出的结论不尽相同,呈现出复杂的非单调特性(Woolhiser et al, 1967; 丁文峰等, 2002; Tatard et al, 2008)。这种复杂的阻力特性与流动稳定性密切相关。研究表明,流动阻力(受粗糙度和黏滞系数等因素的影响)存在维持流动稳定的特定范围,当流动阻力超出该范围则失稳产生滚波等现象(Smith et al, 2011; 张宽地, 2011;

收稿日期:2025-05-20;修订日期:2025-10-22

基金项目:江西省研究生创新专项基金“螺旋选矿机分选槽截面形状对矿物颗粒运动轨迹影响研究”(编号:YC2023-S650)资助

作者简介:朱合钧(1998—),男,江西南康人,助教,从事选矿装备及智能化等方面的研究工作。E-mail:15216180565@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

杨苗,2017)。这为进一步探究螺旋分选流流动稳定性提供了理论基础。综上可知,流动阻力是自由液面失稳发展成滚波的影响因素之一(潘成忠等,2009),此前有关流动稳定性的研究主要集中于水力学领域的坡面流,难以直接应用于空间曲率复杂的螺旋分选流中。螺旋分选流失稳所产生的滚波会显著改变分选流场结构,进而影响分选效果(李陈金,2023)。然而,目前流动阻力因素对螺旋分选流稳定性的影响研究尚属空白,因此,深入探究流动阻力对螺旋分选流稳定性的影响,对揭示失稳机理、优化分选过程具有重要意义。

鉴于此,本文借助水力学相关研究成果,围绕槽面粗糙度、矿浆黏度及槽面刻槽等流动阻力因素,系统探究流阻因素与流动稳定性之间的关系。首先分析流动阻力与流动稳定性之间的理论关系,然后建立CFD模型并验证网格独立性,最后讨论粗糙度、黏度和刻槽数量对 $Re$ 、 $Fr$ 和 $We$ 的影响。本研究创新性地引入 $Re$ 、 $Fr$ 和 $We$ 等无量纲数作为螺旋分选流稳定性的判别依据,系统阐明流动阻力对螺旋分选流稳定性的影响机理,以期对螺旋溜槽的结构设计和工程应用提供理论指导。

## 1 流动阻力规律分析

### 1.1 流动阻力规律

螺旋分选流的流动阻力是指矿浆在槽内流动时所受到的阻滞作用。从水力学角度来看,流动阻力与流体流态密切相关。螺旋分选流通常并非单一层流或紊流流态,而是多呈层流与紊流共存的复杂流态。不同流态会导致流道内流速和水深等参数存在显著差异,从而使得流动阻力发生变化,表明流态与流动阻力之间存在一定的关联(胡鹏等,2020;赵汉青等,2023)。假设流体为不可压缩牛顿流体、自由液面薄膜流动、重力主导,根据达西阻力系数计算公式:

$$\lambda = \frac{8gRJ}{\bar{u}^2} \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为阻力系数; $g$ 为重力加速度; $R$ 为水力半径(过水断面与湿周之比); $J$ 为比降; $\bar{u}$ 为平均流速。

在达西阻力系数计算公式的基础上,将 $J$ 由曼宁公式表示,并结合 $Re$ 定义,可得雷诺数与阻力系

数之间的关系:

$$\lambda = \eta Re^{3m-2} J^{-3n+1} \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为常系数; $Re$ 为雷诺数; $m$ 为与流态相关的指数; $n$ 为幂指数。

从式(2)可以发现,阻力系数 $\lambda$ 与雷诺数 $Re$ 的 $2-3m$ 次方成反比,与比降 $J$ 的 $3n-1$ 次方成反比。其中, $m$ 与流态相关,当液流流态为层流时, $m$ 取值为 $1/3$ ,此时阻力系数与雷诺数呈负相关关系,当液流流态为紊流时, $m$ 取值为 $0.6$ ,此时阻力系数与雷诺数的 $0.2$ 次幂成反比。

### 1.2 流动阻力对流动稳定性的影响

螺旋溜槽作为流膜类重选设备,整个分选过程是在薄薄的一层流膜中完成的,可将其近似为液膜流动。规范化的液膜演化公式(Takeshi,1999)如下:

$$\partial_t h - \frac{4}{21} Re \partial_x \partial_t h^5 - \partial_x (h^2 \partial_x \partial_t h) + \frac{2}{3} \partial_x \left[ h^3 - \partial_x \left( \frac{\cot \theta}{4} h^4 + \frac{72}{245} Reh^7 \right) + Weh^3 \partial_x^3 h \right] = 0 \quad (3)$$

式中: $Re$ 为雷诺数; $We$ 为韦伯数; $h$ 为水面无扰动情况下的归一化水层厚度; $t$ 为时间。

从式(3)可以发现,滚波的演化过程与雷诺数 $Re$ 和韦伯数 $We$ 密切相关,对雷诺数 $Re$ 和韦伯数 $We$ 进行量纲分析可得:

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{(L/T)L}{(L^2/T)} = \frac{ML/T^2}{ML/T^2} \quad (4)$$

$$We = \frac{\rho h \bar{v}^2}{\sigma} = \frac{(ML^{-3})(L)(L/T)^2}{MLT^{-2}/L} = \frac{ML/T^2}{ML/T^2} \quad (5)$$

式中: $u$ 为流速; $L$ 为流场特征长度; $\nu$ 为运动黏度; $\rho$ 为流体密度; $h$ 为流膜厚度; $\bar{v}$ 为平均流速; $\sigma$ 为表面张力系数。

通过量纲分析发现,雷诺数和韦伯数均为2个力的比值。雷诺数表征惯性力与黏滞力之间的关系,可用来区分流动为层流或紊流,一般情况下,当 $Re < 1000$ 时为层流, $1000 < Re < 2000$ 时为过渡流态, $Re > 2000$ 时为紊流;韦伯数则表征惯性力与表面张力之间的关系。其中,惯性力具有不稳定性,将进一步加强小扰动的作用;表面张力则能够抑制扰动发展,有利于流动的稳定性(Benjamin,1957)。当流场中惯性力起主导作用时,小扰动进一步加剧,逐渐形成滚波;当表面张力起主导作用时,扰动将被抑制,流动趋于平稳。在螺旋溜槽分选过程中,

槽内流体在回转中向下流动,将受到离心力和重力的作用,即槽内流体受到2个惯性力;矿浆的黏滞力主要与矿浆浓度有关,矿浆黏度随矿物粒度和浓度的变化而变化;矿浆液面的表面张力则与温度、矿物性质和浓度等有关。当螺旋溜槽分选过程中的流动阻力因素发生改变时,槽内流体的雷诺数 $Re$ 和韦伯数 $We$ 均发生改变,进而影响螺旋分选流的稳定性。

## 2 流体稳定性判别方法

在水力学中,当自由面的小扰动随着时间的推移无法得到衰减时,液面将会发生失稳形成滚波。不论是层流还是紊流流态,均可能发生失稳现象,通常将弗劳德数( $Fr$ )作为流动稳定性的判别标准(张宽地,2011),其计算公式如下:

$$Fr = \frac{\bar{v}}{\sqrt{g\bar{h}}} \quad (6)$$

式中: $\bar{v}$ 为横断面平均流速; $g$ 为重力加速度; $\bar{h}$ 为横断面平均水深。

层流状态下对应的临界弗劳德数为0.527,紊流状态下对应的临界弗劳德数为1.5~2.0(Julien et al, 1986; Chen, 1992)。螺旋分选流类似于明渠流,但也存在差异,其中螺旋槽横断面内存在着随径向变化的横向倾角,这导致螺旋分选流中不仅有纵向流动,还伴随有横向流动。这种差异使得螺旋分选流稳定性的判定标准与明渠流不同。为消除纵向倾角的影响,本研究将计算出若干径向位置的弗劳德数、雷诺数和韦伯数,通过观察这些无量纲参数随流动阻力变化的趋势来评价螺旋分选流的稳定性,如:若弗劳德数等参数随流动阻力的变化呈下降趋势,则认为流动趋于稳定;反之,则认为稳定性降低。该方法为定量分析流动阻力对螺旋分选流稳定性的影响提供了依据。

## 3 螺旋溜槽分选流流场CFD模型建立

### 3.1 三维模型与网格

为便于模拟结果的试验验证,选用直径为400 mm和距径比为0.54的螺旋溜槽构建模型。螺旋溜槽的截面曲线影响着螺旋分选流流场的分布,

采用立方抛物线作为螺旋溜槽的截面曲线,计算公式如下:

$$x = ay^3 \quad (7)$$

式中: $a$ 为与螺旋溜槽内外径相关的系数。

本文所采用的刻槽宽度为4 mm,深度为2 mm,长度为124 mm,槽长方向与径向方向夹角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 。图1所示为槽面刻槽示意图。

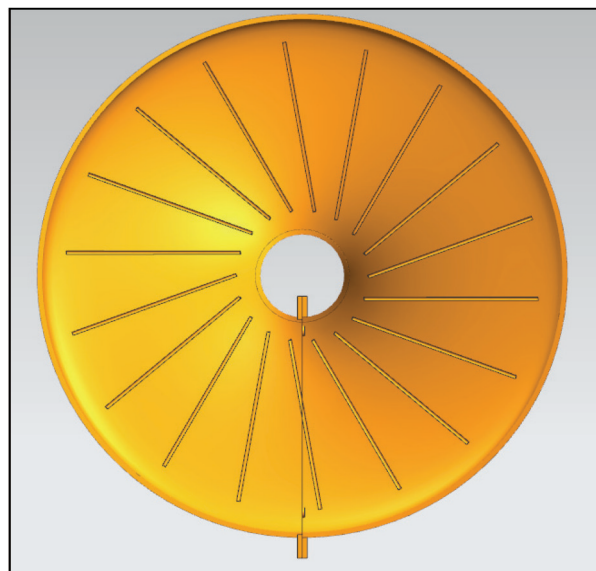


图1 螺旋溜槽槽面刻槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spiral concentrator surface grooves

一套高质量、数量适宜的网格能够有效提高模拟精度,节省模拟时间(刘凯欣等,2003)。本研究采用ICEM CFD软件对流体域进行网格划分。为便于对壁面参数进行捕捉,对流体域边界部分进行了相应细化,如图2所示,最终得到4套网格,网格数量分别为 $3.35 \times 10^5$ 、 $4.60 \times 10^5$ 、 $6.05 \times 10^5$ 和 $7.41 \times 10^5$ 。对以上4套网格进行网格无关性验证,以切向流速作为评判标准,结果如图3所示。由图3可知,当网格数量达到 $6.05 \times 10^5$ 后,切向流速沿径向分布曲线几乎重叠,为此采用网格数量为 $6.05 \times 10^5$ 的网格进行模拟计算,计算后显示溜槽壁面平均 $y^+$ 值为5。为了适合高雷诺数流动并避免在低 $y^+$ 值时出现不稳定,采用可拓展的壁面函数(Scalable Wall Functions)。

图4所示为流场速度分布云图,由图4可知,流场中槽内缘至槽外缘云图颜色逐渐由蓝绿色转变

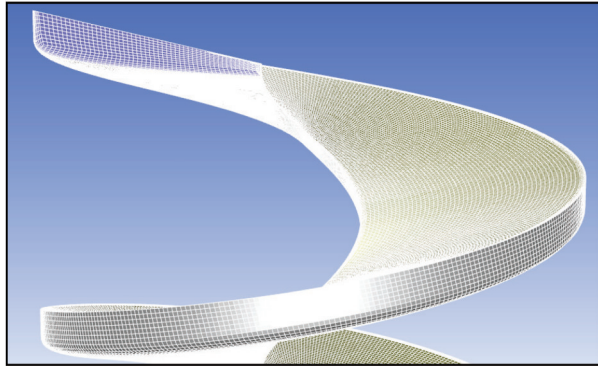


图2 网格划分  
Fig. 2 Grid division

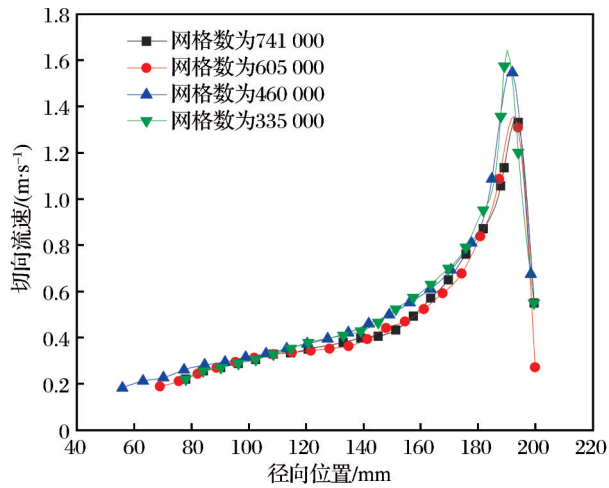


图3 网格无关性验证  
Fig. 3 Grid independence verification

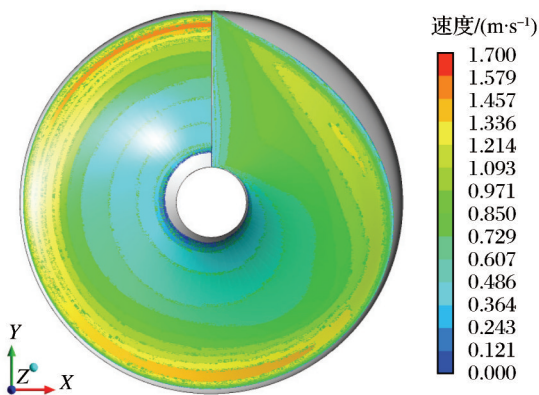


图4 速度分布云图  
Fig. 4 Contour map of velocity distribution

为橘黄色,即槽内缘至槽外缘流速逐渐增大。该模拟结果与实际生产观测及试验结果相一致,表明模拟结果具有较高的预测精度。

槽面刻槽的计算域模型较为复杂,刻槽尺度相较整体溜槽较小,采用结构化网格难以适应复杂的几何细节。因此,本研究采用非结构化网格对带有刻槽的螺旋分选流进行模拟计算,刻槽网格如图5所示。

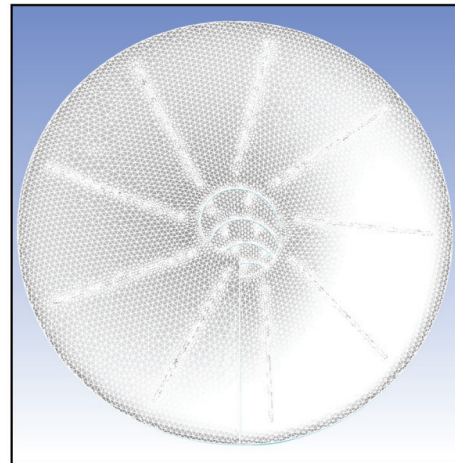


图5 刻槽网格  
Fig. 5 Grooved grid

### 3.2 边界条件

边界条件的准确设置是模拟结果与实际结果相符合的基础,边界条件必须与实际情况相符合,准确适宜的边界条件可以让模拟结果更精准且更可靠(李会雄,2007)。将入口设置为速度入口,根据螺旋溜槽处理量  $Q=0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,换算可得到入口速度为  $0.027 \text{ m/s}$ 。螺旋溜槽底部出口设置为压力出口,气相回流系数设置为1;螺旋槽上方直接与大气相连通,为贴近实际情况,将上壁面设置为 symmetry;螺旋槽侧边与底面设置为无滑移壁面 (No slipwall),壁面附着力接触角设置为  $0^\circ$ ,表示槽底面为亲水表面。

### 3.3 模型选择

螺旋槽内给入流体后,计算域中同时混杂着液体和气体,即可将其视为气液两相流动,考虑到流动过程中,流体直接与空气接触,有明显的气液分界面,因此选择采用 VOF 多相流模型,主相为空气,次相为水,初始状态计算域中充满空气。螺旋分选流中层流和紊流共存,同时存在径向方向的二次环流, RNG  $k-\varepsilon$  模型能够较好地求解二次流与旋流等问题,本文将采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行模拟 (Abu-Ali

et al, 2013)。

## 4 模拟结果分析

根据以往研究成果,在螺旋分选流第3圈时流场处于稳定状态,本文模拟数据均选自螺旋槽第3圈末。依据螺旋槽加工工艺范围确定粗糙度为0.1~1.0 mm;矿浆黏度与矿浆浓度密切相关,此前已有研究探明矿浆黏度与质量浓度的对应关系(刘惠中等,2024),据此选取质量浓度为20%~45%时的矿浆黏度作为模拟黏度,黏度取值范围为0.010~0.025 Pa·s。

### 4.1 流动阻力对螺旋分选流雷诺数的影响

#### (1)粗糙度对雷诺数的影响

图6所示为3种槽面粗糙度下第3圈末雷诺数沿径向分布情况。从图6可以看出,雷诺数整体呈现先缓慢增大,再急剧增大,最后迅速减小的变化趋势。一般情况下,当 $Re < 1\,000$ 时为层流, $1\,000 < Re < 2\,000$ 时为过渡流态, $Re > 2\,000$ 时为紊流,槽面绝对粗糙度 $k_s$ 为0.1 mm、0.5 mm和1.0 mm时对应的层流区域分别为50~178 mm、50~172 mm和50~166 mm;对应的紊流区域分别为185~198 mm、188~197 mm和183~195 mm。其中,三者的雷诺数曲线在径向位置36~135 mm处几乎重叠;在径向位置140~185 mm处, $k_s=1.0$  mm的雷诺数大于另外2种情况,且在185 mm处达到峰值; $k_s$ 为0.1 mm和0.5 mm的雷诺数则在径向位置188 mm之后出现差异, $k_s=0.1$  mm的雷诺数继续增长,而 $k_s=0.5$  mm的雷诺数则开始下降, $k_s$ 为1.0 mm、0.5 mm和0.1 mm时所能达到的最大雷诺数分别为2 500、3 500和5 900。随着绝对粗糙度的增大,螺旋槽外缘的雷诺数逐渐减小,意味着惯性力在流动中所起的作用不断减弱,流动中的小扰动得到抑制,流动趋于向稳定发展。

#### (2)黏度对雷诺数的影响

本文仅探究流动阻力对螺旋分选流流动稳定性的影响,并未考虑矿物颗粒对流动的作用。

图7所示为3种槽面粗糙度下第3圈末雷诺数沿径向分布情况。从图7可以看出,雷诺数同样呈现先增大后减小的变化趋势,但矿浆黏度的增加使得雷诺数上升或下降的急剧程度有所缓和。对比4种不同矿浆黏度的雷诺数曲线发现,矿浆黏度 $\mu$

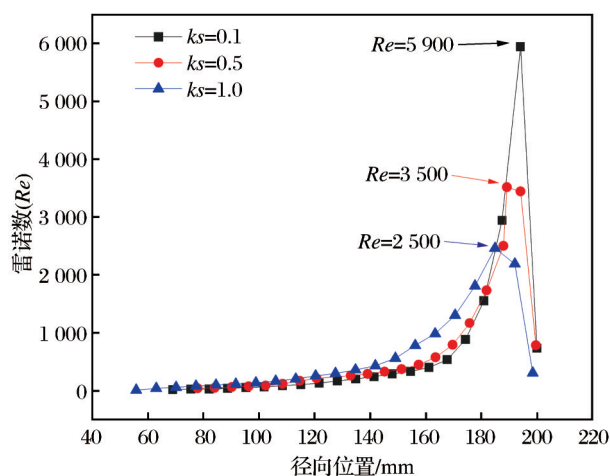


图6 不同粗糙度下雷诺数沿径向分布

Fig. 6 Radial distribution of Reynolds number under different roughnesses

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

为0.01, 0.015, 0.02, 0.025 Pa·s时对应的层流区域分别为36~141 mm、36~140 mm、36~137 mm和36~133 mm;对应的过渡流区域分别为141~185 mm、140~183 mm、137~173 mm和133~163 mm。在径向范围为36~145 mm,同一径向位置处的雷诺数随矿浆黏度的增大而增大,但总体上差距不大;在径向范围为145~200 mm,同一径向位置的雷诺数随矿浆黏度的增大而减小;黏度 $\mu$ 为0.010, 0.015, 0.020, 0.025 Pa·s时所能达到的最大雷诺数分别为1 800、1 580、1 300和1 200。矿浆黏度的增大在一定程度上可以降低最大雷诺数,扰动波的发展得到限制,流动更趋于向稳定发展。

#### (3)槽面刻槽对雷诺数的影响

图8所示为3种槽面刻槽数量下第3圈末雷诺数沿径向分布情况。从图8可以看出,槽面添加刻槽后雷诺数变化趋势更为平缓,每圈刻槽数量为19和10的雷诺数曲线几乎重叠。带有刻槽和无刻槽对应的层流范围分别为70~162 mm和70~172 mm;每圈刻槽数为19、10和0时对应的紊流范围为175~190 mm、175~195 mm和184~198 mm。每圈刻槽数为19、10和0所能达到的最大雷诺数分别为2 300、2 500和3 500;在径向范围为120~180 mm,带有刻槽的雷诺数高于无刻槽,但数值相差不大。整体而言,槽面添加刻槽,能够有效降低槽外缘的雷诺数,减少惯性力对槽外缘稳定性的破坏。综合

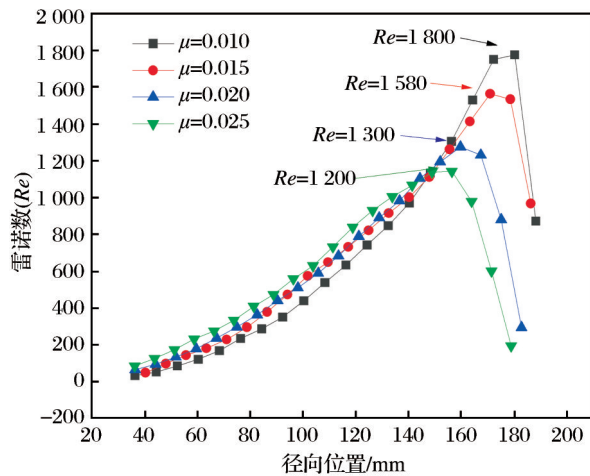


图7 不同黏度下雷诺数沿径向分布

Fig. 7 Radial distribution of Reynolds number under different viscosities

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

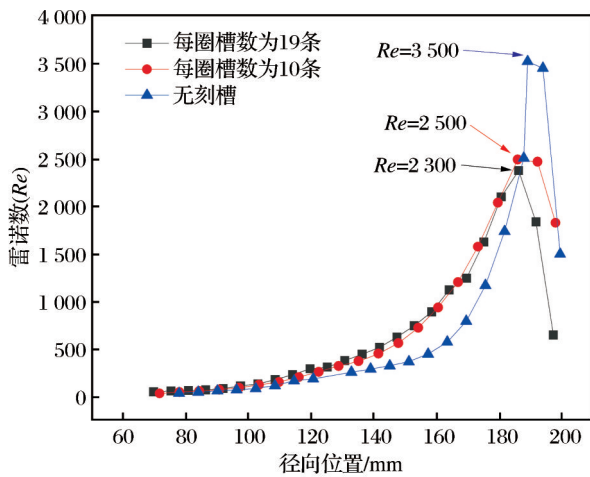


图8 不同刻槽数下雷诺数沿径向分布

Fig. 8 Radial distribution of Reynolds number under different number of grooves

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

上述3种增加流动阻力的方式,可以发现,流动阻力与雷诺数呈负相关关系,该研究结果与 Woolhiser et al(1967)的结论相一致。

#### 4.2 流动阻力对螺旋分选流弗劳德数的影响

##### (1)粗糙度对弗劳德数的影响

图9所示为3种槽面粗糙度下第3圈末弗劳德数沿径向分布情况,弗劳德曲线均呈现先减小后增大的变化趋势。根据弗劳德数的计算公式,弗劳德数主要与流速成正比,与流膜厚度成反比。溜槽内

缘流膜厚度较薄,弗劳德数较高,但由于溜槽内缘及中部区域流速增长率较低,而流膜厚度增长率较高,因此弗劳德数在内缘及中部区域呈下降趋势;对于溜槽外缘,由于流速急剧上升,弗劳德数也呈相应上升趋势。在3种槽面粗糙度下,弗劳德数均在槽中部取得最小值, $k_s$ 为0.1 mm、0.5 mm和1.0 mm时所能达到的最小弗劳德数分别为2.70、2.55和2.30; $k_s$ 为0.1 mm时的最大弗劳德数出现在槽内缘位置,而 $k_s$ 为0.5 mm和1.0 mm时对应的最大弗劳德数则出现在槽外缘位置,所能达到的最大弗劳德数分别为3.55、3.30和3.10。总体而言,随着槽面粗糙度的增大,弗劳德数曲线整体下移,即螺旋槽面粗糙度的增大在一定程度上可以降低弗劳德数,增强流动稳定性。

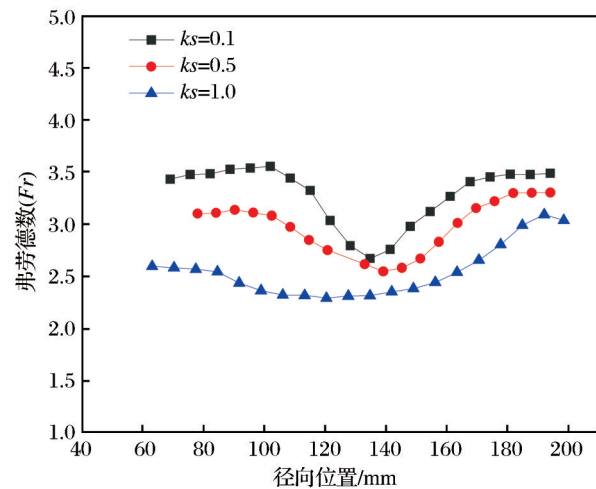


图9 不同粗糙度下弗劳德数沿径向分布

Fig. 9 Radial distribution of Froude number under different roughnesses

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

##### (2)黏度对弗劳德数的影响

图10所示为3种矿浆黏度下第3圈末弗劳德数沿径向分布情况,矿浆黏度的增加导致弗劳德数曲线变化趋势与清水流有所区别,弗劳德数呈现先缓慢增加后急剧减小的变化趋势。这是因为黏度的增大导致流体不再向槽外缘聚集,流膜在槽面上铺展得更为均匀,流膜厚度沿径向的增长速率降低,同时,流速的增长更为平缓,因此弗劳德数沿径向变化趋势改变。

由图10可以看出,随着矿浆黏度的增大,槽

内流体弗劳德数整体有所下降;当矿浆黏度 $\mu$ 为 $0.010\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $0.020\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 $0.025\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,弗劳德数能达到的最大值分别为2.00、1.80和1.58,达到最大弗劳德数时对应的径向位置分别为170、160、155 mm;随着矿浆黏度的增大,弗劳德数的增长速率有所降低,同时槽外缘的弗劳德数下降速率也有所降低。总体而言,矿浆黏度的增大能够有效降低流体弗劳德数,流体流动稳定性有所加强,这是因为黏度的增大导致流动阻力增大,矿浆流速整体降低,甩向槽外缘的流体减少,溜槽内缘及中部区域流膜厚度增大,惯性力在流动中的作用减弱,而表面张力的作用有所加强,流动趋于向稳定状态发展。

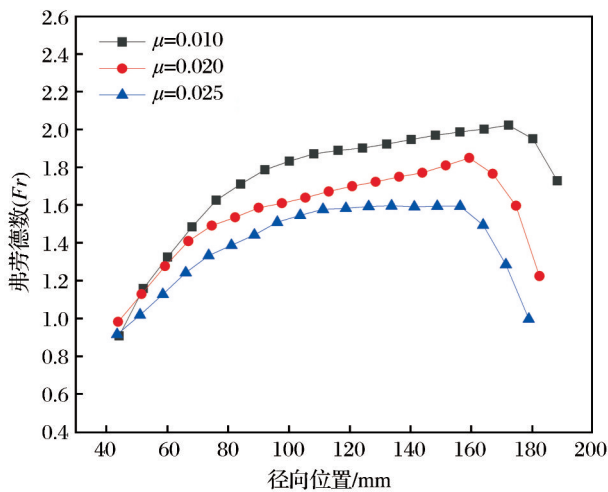


图10 不同黏度下弗劳德数沿径向分布

Fig. 10 Radial distribution of Froude number under different viscosities

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

### (3) 槽面刻槽对弗劳德数的影响

图11所示为3种槽面刻槽数量下第3圈末弗劳德数沿径向分布情况,弗劳德数整体呈现先减小后增大的变化趋势,当槽面刻槽数为19、10和0条时,弗劳德数能达到的最大值分别为2.7、2.9和3.3,其中槽面无刻槽时,在槽外缘取得最大弗劳德数,而槽面刻槽数为10和19条时,在槽内缘取得最大弗劳德数;当槽面刻槽数量为19、10和0条时,弗劳德数所能达到的最小值分别为2.1、2.2和2.6,3种刻槽数量下均在螺旋槽中部取得最小值。此外,对比不同槽数下的弗劳德数分布曲线可以发现,随着槽面刻槽数量的增多,槽内流体弗劳德数整体有所

减小,由此可见,槽面刻槽数量的增多在一定程度上增加了流动阻力,削弱了惯性力在流动中的作用,有效增强了流动稳定性。

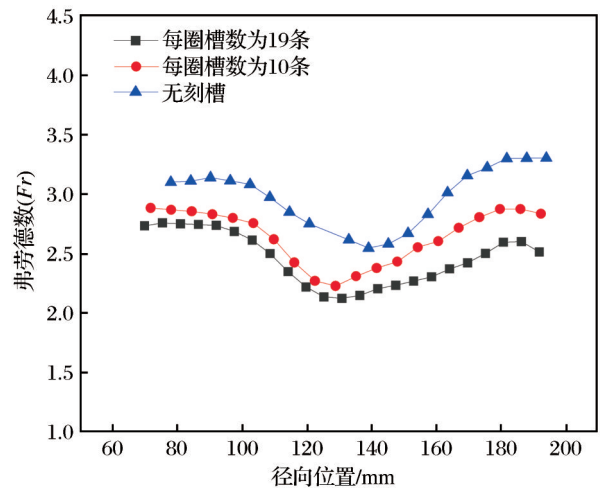


图11 不同刻槽数下弗劳德数沿径向分布

Fig. 11 Radial distribution of Froude number under different number of grooves

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

## 4.3 流动阻力对螺旋分选流韦伯数的影响

### (1) 粗糙度对韦伯数的影响

图12所示为3种槽面粗糙度下第3圈末韦伯数沿径向分布情况,3种槽面粗糙度下韦伯数均呈现先增大后减小的变化趋势。与雷诺数沿径向分布趋势相一致,在槽内缘及中部区域韦伯数的增长速率较为缓慢,在槽外缘先急剧上升后迅速下降。随着槽面粗糙度的增大,槽内流体所能达到的最大韦伯数逐渐减小,当槽面粗糙度 $k_s$ 为 $0.1\text{ mm}$ 、 $0.5\text{ mm}$ 和 $1.0\text{ mm}$ 时,所能达到的最大韦伯数分别为162、78和42,对应的径向位置分别为195 mm、190 mm和185 mm。总体而言,槽面粗糙度的增大将大幅降低槽外缘的韦伯数峰值,同时,取得峰值处的径向位置也逐渐向槽内缘移动。因此,槽面粗糙度的增大能够加强流体表面张力在流动过程中的主导作用,有利于增强流动稳定性。

### (2) 黏度对韦伯数的影响

图13所示为3种黏度下第3圈末韦伯数沿径向分布情况,矿浆黏度的改变对槽内缘及中部区域的影响不大,3种黏度下的韦伯数曲线相重叠,但槽外缘的韦伯数大小则随矿浆黏度的增大而减小。

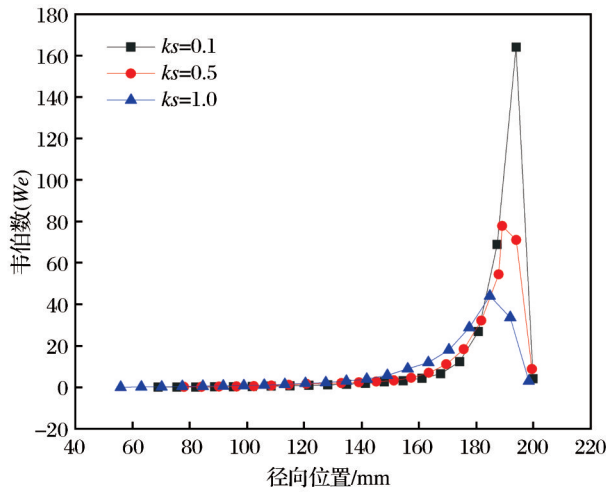


图 12 不同粗糙度下韦伯数沿径向分布

Fig. 12 Radial distribution of Weber number under different roughnesses

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

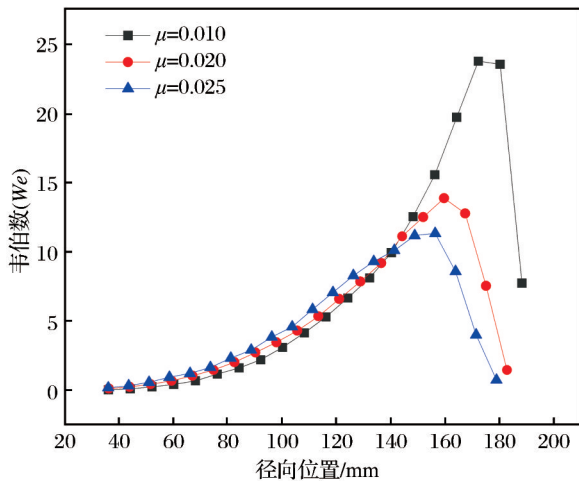


图 13 不同黏度下韦伯数沿径向分布

Fig. 13 Radial distribution of Weber number under different viscosities

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

矿浆黏度增大后,可以明显观察到韦伯数的增长趋势与清水流相比更为平缓,这是因为流体黏度的增加降低了整体的流速,流速的增长速率减缓,因此韦伯数的增长趋势变得平缓。

矿浆黏度 $\mu$ 为0.010 Pa·s、0.020 Pa·s和0.025 Pa·s时,槽内流体所能达到的最大韦伯数分别为23、14和11,对应的径向位置分别为175 mm、160 mm和155 mm。总体而言,矿浆黏度的增大与槽面粗糙度的增大相类似,在一定程度上均能减小槽外缘的

韦伯数大小,同时,取得峰值处的径向位置也逐渐向槽内缘移动一定距离。

### (3) 槽面刻槽对韦伯数的影响

图 14 所示为 3 种刻槽数量下第 3 圈末韦伯数沿径向分布情况,观察 3 条曲线可以发现,每圈刻槽数量为 10 条和 19 条时,韦伯数沿径向分布曲线几乎重叠,仅在槽外缘存在一定差异。当槽面无刻槽、每圈刻槽数为 10 条和每圈刻槽数为 19 条时,槽内所能达到的最大韦伯数分别为 78、43 和 39,即随着槽面刻槽数量的增多,槽外缘螺旋分选流韦伯数逐渐减小,但对于槽内缘而言,槽面刻槽的增多对于韦伯数的影响不大。其实,刻槽的增多导致流动阻力有所增大,槽面流体流速相应减缓,因此甩向槽外缘的流体减少,流膜厚度降低,导致外缘韦伯数有所降低。

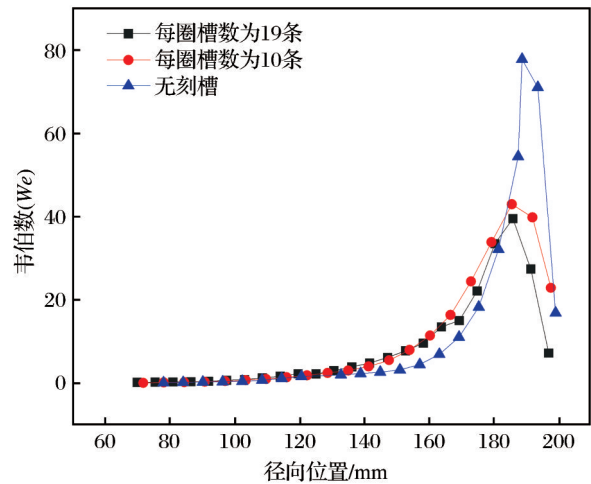


图 14 不同刻槽数下韦伯数沿径向分布

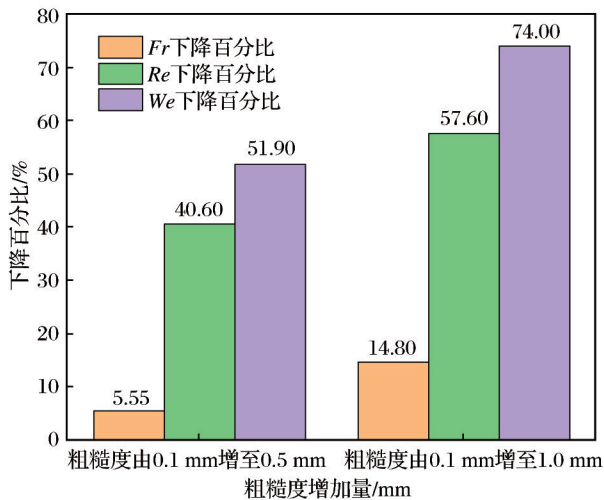
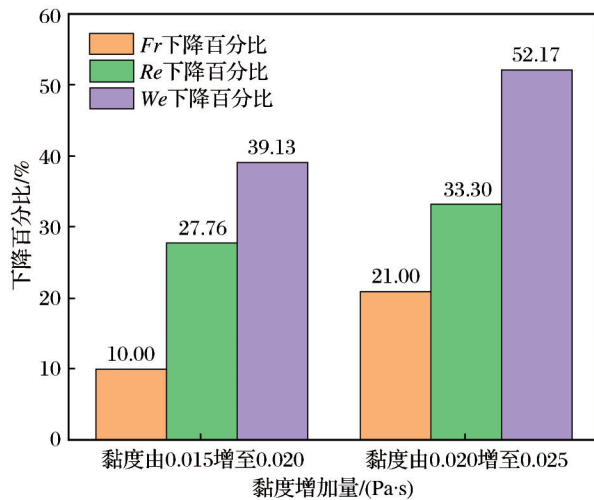
Fig. 14 Radial distribution of Weber number under different number of grooves

注:图中数据取自第3圈末,边界条件同图3设置

### 4.4 流动阻力对流场特征参数的影响分析

为了直观地量化流动阻力增大对各特征参数的抑制效果,分别考察了粗糙度、黏度和槽面刻槽数改变对  $Fr$ 、 $Re$  和  $We$  的影响程度,结果如图 15~图 17 所示。

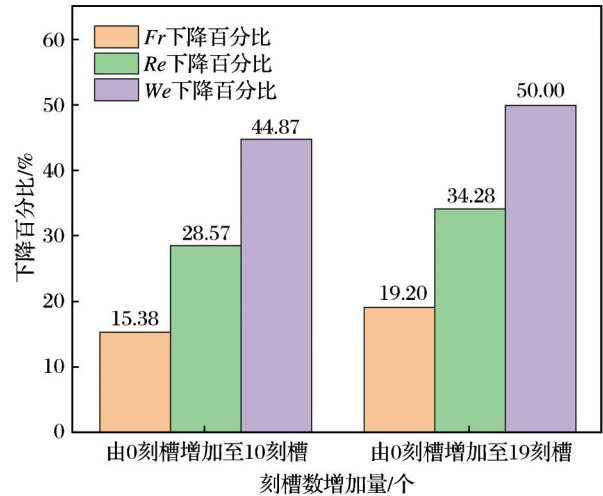
由图 15 可知,当粗糙度由 0.1 mm 增加至 0.5 mm 和 1.0 mm 时,雷诺数分别降低了 40.60% 和 57.60%,弗劳德数分别降低了 5.55% 和 14.80%,韦伯数最大值分别降低了 51.90% 和 74.00%。对比 3 组数据可

图 15 粗糙度改变对  $Fr$ 、 $Re$  和  $We$  的影响程度Fig. 15 Effect degree of roughness change on  $Fr$ ,  $Re$ , and  $We$ 图 16 黏度改变对  $Fr$ 、 $Re$  和  $We$  的影响程度Fig. 16 Effect degree of viscosities change on  $Fr$ ,  $Re$ , and  $We$ 

以发现,韦伯数对粗糙度的改变最为敏感,下降幅度最大,其次为雷诺数,弗劳德数所受影响最小。槽面粗糙度的增大显著削弱了流体能量,有效提高流动稳定性。

由图 16 可知,当黏度由  $0.010 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  增加至  $0.020 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $0.025 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  时,雷诺数分别降低了 27.76% 和 33.30%,弗劳德数分别降低了 10% 和 21%,韦伯数分别降低了 39.13% 和 52.17%。对比 3 组数据可以发现,韦伯数对黏度的改变最为敏感,下降幅度最大,其次为雷诺数,弗劳德数所受影响

最小,该现象与粗糙度的改变相类似,在一定程度上增强了流动稳定性。

图 17 刻槽数改变对  $Fr$ 、 $Re$  和  $We$  的影响程度Fig. 17 Effect degree of groove number change on  $Fr$ ,  $Re$ , and  $We$ 

由图 17 可知,当槽面刻槽数量由 0 分别增加至 10 和 19 时,雷诺数分别降低了 28.57% 和 34.28%,弗劳德数分别下降了 15.38% 和 19.2%,韦伯数分别下降了 44.87% 和 50.00%。对比 3 组数据可以发现,刻槽数量的改变对韦伯数的影响最大,雷诺数次之,弗劳德数最小。无论阻力来源于外部条件(粗糙度改变,增加刻槽)还是流体内部属性(黏度),流动阻力的增大均能降低  $Fr$ 、 $Re$  和  $We$ ,提高流动稳定性。

## 5 结论

(1)在矿浆流动过程中,惯性力具有不稳定性,会使流动产生剪切和扩散,进一步加强小扰动的发展,破坏流动稳定性,表面张力则能够抑制小扰动的发展,促进流动的稳定性。通过确定流动过程中二者谁起主导作用即可确定流动的稳定性情况。

(2)随着流动阻力的增大(槽面粗糙度增大,矿浆黏度增大,槽面刻槽数量增多),螺旋分选流中所能达到的最大雷诺数有所降低。其中,粗糙度的增大将减小槽内缘及中部区域的层流占比,流体黏度的增大将增大槽内层流区域占比,槽面刻槽则使槽外缘紊流区域占比降低。当粗糙度由  $0.1 \text{ mm}$  增加

至 0.5 mm 和 1.0 mm 时,雷诺数分别降低了 40.60% 和 57.60%;当黏度由 0.010 Pa·s 增加至 0.020 Pa·s 和 0.025 Pa·s 时,雷诺数分别降低了 27.76% 和 33.30%;当槽面刻槽数量由 0 增加至 10 条和 19 条时,雷诺数分别降低了 28.57% 和 34.28%。

(3)随着流动阻力的增大,弗劳德数有所降低,流动稳定性得到增强,当粗糙度由 0.1 mm 增加至 0.5 mm 和 1.0 mm 时,弗劳德数分别降低了 5.55% 和 14.80%;当黏度由 0.010 Pa·s 增加至 0.020 Pa·s 和 0.025 Pa·s 时,弗劳德数分别降低了 10% 和 21%;当槽面刻槽数量由 0 增加至 10 条和 19 条时,弗劳德数分别下降了 15.38% 和 19.20%。

(4)螺旋分选流中韦伯数沿径向分布趋势与雷诺数相一致,沿径向外移呈现先增大后减小的变化趋势。随着流动阻力的增大,韦伯数有所降低,当粗糙度由 0.1 mm 增加至 0.5 mm 和 1.0 mm 时,韦伯数最大值分别降低了 51.90% 和 74.00%;当黏度由 0.010 Pa·s 增加至 0.020 Pa·s 和 0.025 Pa·s 时,韦伯数分别降低了 39.13% 和 52.17%;当槽面刻槽数量由 0 增加至 10 条和 19 条时,韦伯数分别降低了 44.87% 和 50%。

#### 参考文献 (References):

Benjamin T B, 1957. Wave formation in laminar flow down an inclined plane [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2 (6) : 554-573.

Chen C L, 1992. Momentum and energy coefficients based on power-law velocity profile [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11) : 1571-1584.

Abu-Ali M H, Doheim M A, Abdel Gawad A F, et al, 2013. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators: Part I. Low solids concentration (0.3% & 3% solids) [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1/2) : 198-215.

Julien P Y, Hartley D M, 1986. Formation of roll waves in laminar sheet flow [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 24 (1) : 5-17.

Roels J M, 1984. Flow resistance in concentrated overland flow on rough slope surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9(6) : 541-551.

Smith M W, Cox N J, Bracken L J, 2011. Modeling depth distributions of overland flows [J]. *Geomorphology*, 125 (3) : 402-413.

Takeshi O, 1999. Surface equation of falling film flows with moderate Reynolds number and large but finite Weber number [J]. *Physics of Fluids*, 11(11) : 3247-3269.

Tatard L, Planchon O, Wainwright J, et al, 2008. Measurement and modelling of high-resolution flow-velocity data under simulated rainfall on a low-slope sandy soil [J]. *Journal of Hydrology*, 348(1/2) : 1-12.

Veiga M M, Gunson A J, 2020. Gravity concentration in Artisanal gold mining [J]. *Minerals*, 10(11) : 1-50.

Woolhiser D A, Liggett J A, 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane: the rising hydrograph [J]. *Water Resources Research*, 3(3) : 753-771.

Ye G C, Huo Y Y, Li C F, et al, 2021. A comparative study of trough profile and operating parameters performance in spiral concentrator [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 41(9) : 678-691.

丁文峰,李占斌,丁登山,2002.坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究 [J]. *水土保持学报*, 16(3) : 72-75.

Ding Wenfeng, Li Zhanbin, Ding Dengshan, 2002. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(3) : 72-75.

胡鹏,余明辉,2020.坡面径流阻力计算模式对比研究 [J]. *水利学报*, 51(1) : 14-22.

Hu Peng, Yu Minghui, 2020. A comparative study on different roughness models of overland flow simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51 (1) : 14-22.

李陈金,2023.螺旋溜槽主要结构及工艺参数对分选流态及流体稳定性的影响研究 [D]. 赣州:江西理工大学.

Li Chenjin, 2023. Study on the influence of main structure and process parameters of spiral concentrator on sorting flow pattern and fluid stability [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology.

李会雄,2007.多相流及其应用 [M]. 西安:西安交通大学出版社.

Li Huixiong, 2007. Multiphase flow and its applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press.

刘惠中,2011.重选设备在我国金属矿选矿中的应用进展及展望 [J]. *有色金属(选矿部分)*, (增刊1) : 18-23.

Liu Huizhong, 2011. Application progresses and prospects of gravity concentrators in Chinese metal mine processing plants [J]. *Nonferrous Metals*, (Suppl.1) : 18-23.

刘惠中,李陈金,朱合钧,2023.基于滚波理论的螺旋溜槽分选流体稳定性研究 [J]. *有色金属(选矿部分)*, (6) : 132-139.

Liu Huizhong, Li Chenjin, Zhu Hejun, 2023. Study on fluid stability of spiral concentrator separation based on

- CFD[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, (6): 132-139.
- 刘惠中,朱合钧,芮作为,等,2024.流动阻力对螺旋溜槽分选流场的影响[J].*有色金属(选矿部分)*,(3):107-114.
- Liu Huizhong, Zhu Hejun, Rui Zuowei, et al, 2024. Effect of flow resistance on the flow field of spiral concentrator [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, (3): 107-114.
- 刘凯欣,高凌天,2003.离散元法研究的评述[J].*力学进展*, 33(4): 483-490.
- Liu Kaixin, Gao Lingtian, 2003. A review on the discrete element method [J]. *Advances in Mechanics*, 33(4): 483-490.
- 潘成忠,上官周平,2009.降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J].*应用基础与工程科学学报*, 17(6): 843-851.
- Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping, 2009. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 17(6): 843-851.
- 沙际德,蒋允静,1995.试论初生态侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性[J].*水土保持学报*, 9(4): 29-35.
- Sha Jide, Jiang Yunjing, 1995. Attempt for expounding basic dynamic characteristics of very shallow flow on preliminary eco-erosion slopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 9(4): 29-35.
- 杨苗,2017.坡面薄层水流滚波演变规律试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学.
- Yang Miao, 2017. Experimental study on evolution law of thin layer rolling flow on slope surface [D]. Yangling: Northwest A & F University.
- 张宽地,2011.坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学.
- Zhang Kuandi, 2011. Study on hydrodynamic characteristics and sediment-carrying mechanism of slope runoff [D]. Yangling: Northwest A & F University.
- 赵汗青,王伟杰,赵彦芳,等,2023.淹没柔性植被河道阻力系数特性及计算方法研究[J].*中国农村水利水电*, (6): 128-132, 137.
- Zhao Hanqing, Wang Weijie, Zhao Yanfang, et al, 2023. Research on the characteristics and calculation method of resistance coefficient of submerged flexible vegetated river channel [J]. *China Rural Water and Hydropower*, (6): 128-132, 137.

## Study on the Effect of Flow Resistance on the Stability of Spiral Separation Flow

ZHU Hejun<sup>1</sup>, LIU Huizhong<sup>2</sup>, DENG HuaJun<sup>1</sup>, LIU Jiahu<sup>1</sup>, LIU Xixi<sup>2</sup>

1. *Ganzhou Vocational and Technical College, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;*

2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*

**Abstract:** The spiral concentrator is a type of gravity-based beneficiation equipment extensively utilized in the processing of hematite, specular iron ore, chromite, and ilmenite, owing to its advantages of minimal environmental impact, low production costs, and straightforward configuration. In industrial applications, surface instabilities, known as roll waves, are frequently observed in spiral concentrators due to fluctuations in the free surface, with flow resistance being a primary factor influencing flow stability. This study focuses on three key factors affecting flow resistance: wall roughness, fluid viscosity, and trough surface grooving. Utilizing computational fluid dynamics (CFD) technology, we investigated the influence patterns of these parameters on the stability of separation flows in spiral concentrators. Analysis based on the liquid film evolution equation reveals that the inertial forces within the spiral sorting stream are unstable and contribute to destabilizing the flow. In contrast, surface tension mitigates the development of minor disturbances, thereby enhancing flow stability. A CFD model of a spiral concentrator was employed to simulate the flow field under varying flow resistance conditions. The simulation results indicate that an increase in wall roughness, fluid viscosity, or the number of grooves on the surface results in a gradual increase in flow resistance, subsequently reducing the

maximum achievable Reynolds number of the spiral separation flow. Furthermore, the increase in flow resistance led to a decrease in both the Froude number and the Weber number, with reductions of 4.8% and 14.0% observed when the roughness was increased from 0.1 mm to 0.5 mm and 1.0 mm, respectively. Similarly, when the viscosity was elevated from 0.010 Pa·s to 0.020 Pa·s and 0.025 Pa·s, the Froude number decreased by 8.9% and 20.7% respectively. Additionally, increasing the number of engraved grooves on the surface from 0 to 10 and 19 resulted in a reduction of the Froude number by 13.6% and 16.7%, respectively. These findings demonstrate that increased flow resistance contributes to enhanced flow stability.

**Key words:** spiral concentrator; flow resistance; numerical simulation; flow stability; rolling wave