叠式台阶流对铜矿分选特征的影响研究*

彭帝[1,2,3]，杨明悦[4]，柳忠彬[1,2,3]，曾涛[1,2,3]，刘少北[1,2,3]，蒋春蕾[5]

（1.四川轻化工大学 机械工程学院， 四川 宜宾市 644000；
2.过程装备与控制工程四川省高校重点实验室， 四川 宜宾市 644000；
3.四川省矿山尾渣资源化利用工程实验室， 四川 宜宾市 644000；
4.四川省特种设备检验研究院， 四川 成都 610199；
5.西昌学院 机械与电气工程学院， 四川 西昌市 615013）

摘要：为高效分选铜矿，基于离心重选技术，结合反向流化与台阶流原理，在Knelson选矿机基础上提出了一种叠式台阶流分选模型，在离心分选的基础上实现二次分选。利用Fluent软件对叠式台阶流模型分选流场的压强、切向速度与轴向速度的分布规律进行分析；研究了转速与反向流流速对铜矿分选特征的影响。结果表明，流场压强分布从中心到壁面逐渐增大，但由于存在反向流作用力，压强最大值并未完全贴合壁面；切向速度在台阶处发生突变，表明有涡旋产生，有利于轻颗粒分选；轴向速度整体呈现上升流，有利于分选后的轻颗粒从上出口排出；Cu颗粒的轴向体积浓度分布呈现由下到上递减的趋势，靠近壁面处径向体积浓度最高，SiO_2颗粒在轴向方向顶部体积浓度最高，径向方向壁面处体积浓度较低；当进料速度为0.5 m/s、转速为50 r/min、反向流流速为0.012 m/s时，Cu颗粒的回收率为87.70%，富集比为13.45，叠式台阶流模型对SiO_2颗粒与Cu颗粒的分选效果最佳。颗粒体积分数云图表明，Cu颗粒富集在台阶流内壁凹面处，SiO_2颗粒由于涡旋与反向流作用力分选后，在壁面凹处体积分数低，更加直观体现了叠式台阶流模型的分选效果。研究结果可为离心选矿设备的改进提供参考。

关键词：叠式台阶流；离心分离；反向流化；分选特征

中图分类号：TD952；TD922 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)03-0261-10

Influence of Stacked Step Flow on the Separation Characteristics of Copper Mine

PENG Di[1,2,3], *YANG Mingyue*[4], *LIU Zhongbin*[1,2,3], *ZENG Tao*[1,2,3], *LIU Shaobei*[1,2,3], *JIANG Chunlei*[5]

(1.School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engneering, Yibin, Sichuan 644000, China;
2.Sichuan Provincial Key Lab of Process Equipment and Control, Yibin, Sichuan 644000, China;
3.Sichuan Province Engineering Laboratory of Mine Tailings Resource Utilization, Yibin, Sichuan 644000, China;
4.Sichuan Special Equipment Inspection Institute, Chengdu, Sichuan 610199, China;
5.School of Mechanical and Electrical Engineering, Xichang University, Xichang, Sichuan 615013, China)

Abstract: In order to efficiently separate copper ore, a stacked step flow separation model was proposed according to Knelson concentrator based on centrifugal gravity separation technology combined with reverse fluidization and step flow principle, and secondary separation was realized on the basis of centrifugal separation. The distribution of pressure, tangential velocity and axial velocity in the separation flow field of the stacked step flow model was analyzed by Fluent software. The effects of rotational speed and reverse flow velocity on the separation characteristics of copper ore were studied. The results show that the pressure distribution of the flow field increases gradually from the center to the wall surface. However, due to the presence of reverse flow force, the maximum pressure does not fully fit the wall surface. The abrupt change of tangential velocity at the step indicates that there is a vortex, which is conducive to the separation of light particles. The axial velocity as a whole presents an upward flow, which is conducive to the discharge of light particles from the upper outlet after separation. The axial

* **收稿日期**：2024-04-15

基金项目：四川省科技厅重点研发计划项目(2021YFG264)；四川省凉山州重点研发计划项目(22ZDYF0164)；过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金项目(GK202410)；四川轻化工大学“652”科研创新团队项目(SUSE652A010)

作者简介：彭帝(1995—)，男，四川宜宾人，硕士，助理实验师，主要从事矿物分选与设备开发、流体机械研究。E-mail：1787137364@qq.com

通信作者：柳忠彬(1972—)，男，四川彭州人，博士，教授，主要从事过滤与分离研究。E-mail：172232288@qq.com

volume concentration distribution of Cu particles shows a decreasing trend from bottom to top, and the radial volume concentration is the highest near the wall surface, while the volume concentration of SiO_2 particles is the highest at the top of the axial direction, and the volume concentration is lower at the radial direction. When the feed speed is 0.5 m/s, rotational speed is 50 r/min, and reverse flow velocity is 0.012 m/s, it can be obtained that the recovery of Cu particles is 87.70%, and enrichment ratio is 13.45. The stacked step flow model has the best effect on the separation of SiO_2 particles and Cu particles. The cloud images of particle volume fraction show that Cu particles are enriched in the concave of the inner wall of the step flow, and SiO_2 particles have a low volume fraction in the concave of the wall due to the separation force of vortex and reverse flow, which more directly shows the separation effect of the stacked step flow model. The research results can provide references for the improvement of centrifugal beneficiation equipment.

Key words: Stacked step flow, Centrifugal separation, Reverse fluidization, Separation characteristic

0 引言

铜作为我国重要战略矿产之一,广泛应用于建筑、电力、机械制造、交通运输等领域,是支撑我国经济社会高速发展的重要工业金属。近年来,我国铜需求量大幅增长,对外依存度一直保持在70%左右,已由净出口国转变为全球第一大净进口国与消费国,供需缺口很大[1-3]。我国的铜矿石普遍具有嵌布粒度细、含泥多、品位低等特点[4]。低品位这一特点给铜矿颗粒的分选回收带来了困难,加上细铜矿颗粒易损失在细泥之中,导致大量的铜矿资源浪费,使其选矿成为一个难题。目前铜矿的分选回收多采用快速、分步优先浮选、电化学浮选、低碱度浮选工艺等浮选相关工艺[5-9]。但浮选工艺分选效果会受到原矿矿物组成和含量、氧化和泥化程度等性质以及磨矿粒度等因素影响;并且分选工艺流程较为复杂、要求高,加上大量使用各类药剂导致分选成本较高,且会对人体健康与生态环境造成危害。另外,磁选技术[10-12]在铜矿分选上也有应用。近年来,研究人员致力于重选技术在细粒级矿物分选上的应用优化研究。离心分离、机械摇动等重选工艺各具分选优势,能够有效利用矿物颗粒之间的密度与粒度差异实现分选,最具代表性的有 Knelson 选矿机、Falcon 选矿机与摇床[13-16]。

本文基于离心重选技术,结合反向流化与台阶流原理,在 Knelson 选矿机基础上提出了一种叠式台阶流分选模型,将离心机内锥壁结构设计为叠式台阶流结构,在离心分选的基础上实现二次分选。以云南某铜矿为研究对象,探讨叠式台阶流模型的分选原理、数值模拟分析内部流场以及矿物颗粒的分离规律,研究操作参数对分选性能的影响,获取叠式台阶流模型的铜矿分选特征,以期为国内离心选矿装置结构的设计提供参考,为铜矿的高效分选探索新的途径。

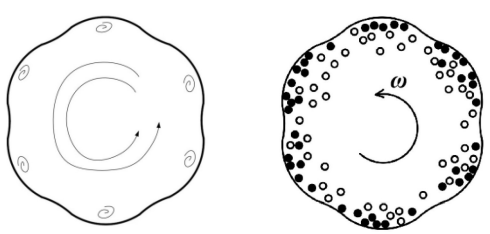
1 叠式台阶流分选原理

1.1 台阶流分选原理

台阶绕流是基本流体力学绕流模型之一,后台阶流现象在工程与生活中随处可见,比如:河道的突扩、大迎角机翼及气体绕建筑物流动等[17-18]。流体流过台阶时产生流动分离,部分流体在台阶角部形成涡旋,其余绕过涡旋重新与壁面接触,然后继续沿壁面流动。涡旋中存在大量的脉动能量[19],当涡旋与壁面重新接触后会发生动量与热量交换。

依据台阶流模型提出一种台阶流内壁,用于矿浆中矿物的分离。传统的离心分选设备内锥截面为圆形,当旋转水流流过壁面时会保持均匀流动,不会产生动量交换。在此基础上将壁面设计成凹凸结构,在中心搅拌器作用下,内锥水流做旋转运动,靠近壁面的水流经过凹凸壁面时在凹处产生涡旋,如图1(a)所示,ω 为旋转角速度。

涡旋中包含有大量的脉动能量,使密度不同的颗粒在涡旋处受力不同,轻矿物颗粒比重矿物颗粒更易被选出。轻、重矿物颗粒在涡旋作用下的分布图,如图1(b)所示。重矿物颗粒富集在凹处壁面的数量多于轻矿物颗粒,从而使轻、重矿物颗粒实现二次分选。



(a) 台阶流内壁流动 (b) 轻、重矿物颗粒分布

图1 台阶流内壁流动与轻、重矿物颗粒分布示意

Fig.1 Inner wall flow of step flow and distribution of light and heavy mineral particles

1.2 叠式台阶流模型结构

将台阶流理论应用到选矿设备中,其分选模型结构如图 2 所示。该模型采用呈现一定锥度的台阶流内壁,在内壁上间隔设置月牙形带孔隔离板,分隔出多层分选区域,隔离板与内壁缝隙为反向流入口,中心设置搅拌装置,搅拌轴旋转角速度为 ω。

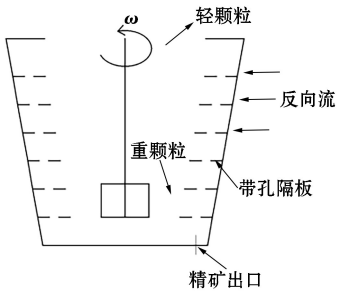


图 2 叠式台阶流分选模型结构

Fig.2 Structure of stacked step flow separation model

在模型内部,水流呈螺旋上升状,贴近壁面凹处产生涡旋,进入到内锥的矿物颗粒在搅拌离心力的作用下快速贴近壁面,在切向力的作用下沿壁面发生整体迁移运动。在叠式台阶流分选过程中,矿物颗粒在靠近壁面处进行分选,低密度的轻颗粒和高密度的重颗粒在壁面处松散分层,同时发生位置交换。重矿物颗粒更多地富集在壁面凹处,在重力的作用下穿过隔板小孔,再进行二次或多次分选,逐步下沉从精矿出口排出;轻矿物颗粒向中心轴方向迁移,随螺旋上升流经上出口排出,由此实现轻、重矿物颗粒的分选。

1.3 分选流场中颗粒受力及运动规律分析

1.3.1 矿物颗粒在分选流场中的受力分析

矿物颗粒在叠式台阶流分选流场内部主要受到重力、离心力、浮力、流体阻力、反向流作用力等力的相互作用,不考虑颗粒间的碰撞与摩擦效应、Basset 力、附加质量惯性力等其他外力对颗粒的作用。矿物颗粒在分选流场中的受力情况如图 3 所示。

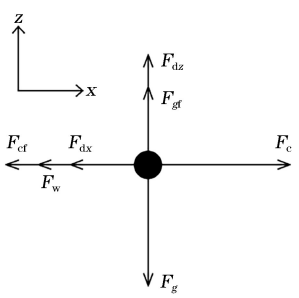


图 3 矿物颗粒在分选流场中的受力情况

Fig.3 Force of mineral particles in separation flow field

(1) 重力 F_g:

$$F_g = \frac{\pi d^3}{6}\rho g \tag{1}$$

(2) 离心力 F_c:

$$F_c = \frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{v_\theta^2}{r} \tag{2}$$

(3) 径向、轴向方向上的浮力 F_{cf}、F_{gf}:

$$F_{cf} = \frac{\pi}{6}d^3\rho_f\frac{v_\theta^2}{r} \tag{3}$$

$$F_{gf} = \frac{\pi}{6}d^3\rho_f g \tag{4}$$

式中:d 为矿物颗粒直径,m;ρ 为矿物颗粒密度,kg/m^3;ρ_f 为水介质的密度,kg/m^3;g 为重力加速度,m/s^2;v_θ 为颗粒切线速度,m/s;r 为颗粒旋转半径,m。

(4) 径向、轴向方向上的流体阻力 F_{dx}、F_{dz}:

$$F_{dx} = 3\pi\mu d v_x \tag{5}$$

$$F_{dz} = \varepsilon\frac{\pi d^2}{8}\rho_f v_z^2 \tag{6}$$

式中:v_x、v_z 为矿物颗粒在径向、轴向方向上相对于流体的运动速度,m/s;μ 为流体动力黏度,Pa·s;ε 为轴向流体阻力系数。

(5) 反向流作用力 F_w:

$$F_w = \rho_f Q_m v = \rho_f S v^2 \tag{7}$$

式中:Q_m 为流体的流量,m^3/s;v 为反向流流速,m/s;S 为反向流通过的面积,m^2。

1.3.2 矿物颗粒在分选流场中的运动规律分析

在叠式台阶流分选流场中,在轴向上,矿物颗粒受到重力、轴向浮力、轴向流体阻力,由牛顿第二定律可得:

$$\frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{dv}{dt} = \sum F_z = F_g - F_{gf} - F_{dz} \tag{8}$$

将式(1)、式(4)、式(6)代入式(8)可以得到:

$$\frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{dv}{dt} = \frac{\pi}{6}d^3\rho g - \frac{\pi}{6}d^3\rho_f g - \varepsilon\frac{\pi d^2}{8}\rho_f v_z^2 \tag{9}$$

在受力平衡状态时,$\sum F_z = 0$,经整理可知,在叠式台阶流分选流场中,矿物颗粒相对于流体的运动速度为:

$$v_z = \sqrt{\frac{4d(\rho-\rho_f)g}{3\varepsilon\rho_f}} \tag{10}$$

由上述公式可知,对于介质水来说,在轴向上,当粒径一定时,颗粒密度影响着颗粒运动,密度大的颗粒做沉降运动至下出口排出;密度小的颗粒向上迁移至上出口排出,矿物颗粒由此实现重力沉降分离。

在叠式台阶流分选流场中,径向上的矿物颗粒受力,由牛顿第二定律可得:

$$\frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\sum F_x=F_c-F_{cf}-F_{dr}-F_w \tag{11}$$

将式(2)、式(3)、式(5)、式(7)代入式(11)可以得到:

$$\frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\pi}{6}d^3\rho\frac{v_\theta^2}{r}-\frac{\pi}{6}d^3\rho_f\frac{v_\theta^2}{r}-3\pi\mu d\,v_x-\rho_f S v^2 \tag{12}$$

在受力平衡状态时,$\sum F_x=0$,经整理可知,在叠式台阶流分选流场中,矿物颗粒相对于流体的运动速度为:

$$v_x=\frac{\frac{\pi}{6}d^2(\rho-\rho_f)\frac{v_\theta^2}{r}-\rho_f S v^2}{3\pi\mu} \tag{13}$$

因此,在叠式台阶流分选流场中,矿物颗粒的运动速度除了与矿物颗粒在流场中的旋转位置半径、颗粒与流体密度差外,还与颗粒切线速度、反向流流速等有关。

2 叠式台阶流分选模型分析

2.1 模型分析

分选内锥是矿物完成分选的主要场所,因此主要对分选内锥进行数值模拟。叠式台阶流模型截面如图4所示。

叠式台阶流模型主要由尾矿出口、月牙形带孔隔板、反向流入口、精矿出口、搅拌桨、进料口、分料盘等构成。该模型为倒锥体,锥体内部呈凹下突起的台阶流线形,在每个凹下处均匀设置月牙形带孔隔板,并在每层隔板处开有反向流入口,进料口位于内锥中下部,进料口的正下方设置分料盘。搅拌桨采用三叶直叶桨。尾矿出口位于内锥顶部,精矿出口位于内锥底部边缘处。模型主要结构参数见表1。

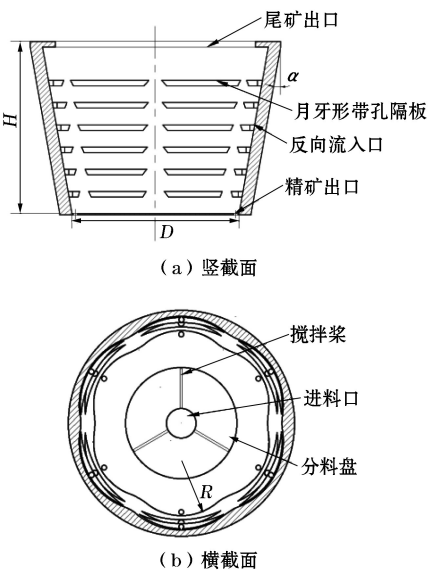


图4 叠式台阶流模型截面

Fig.4 Cross section view of stacked step flow model

表1 模型主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of model

分选锥参数			台阶参数			隔板层数	反向流化参数	
高度 H/mm	锥度 α/(°)	底部直径 D/mm	半径 R/mm	高度/mm	个数		层数	流缝宽度/mm
155	10	150	45	10	6	6	6	1

将叠式台阶流模型导入Ansys Workbench软件中,在SpaceClaim软件中抽取流体域,并设置叠式台阶流流体域模型,如图5所示。

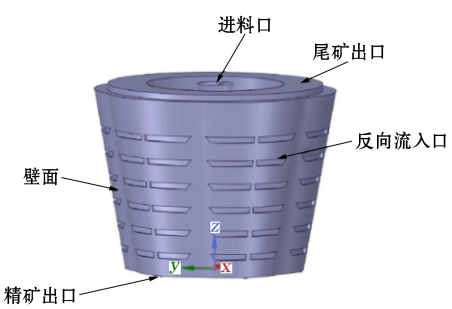


图5 叠式台阶流流体域模型

Fig.5 Stacked step flow fluid domain model

模型内部存在搅拌桨,选用多重参考系法将流体域划分为动区域和静区域两部分,并分别对模型动区域和静区域进行网格划分。

2.2 仿真参数与边界条件

为简化计算,假设叠式台阶流模型内部流体为理想的不可压缩流体,采用Pressure-Based数值解法,以Transient为时间方程,以Absolute为速度方程进行求解,湍流模型选择RNG k-ε模型。

本文以云南某铜矿为研究对象,该铜矿主要由铜、锡、铁等高密度颗粒以及铝、镁、硅等低密度颗粒构成,粒度较细,其中Cu的品位为1.28%,其余物质包括Fe、Al_2O_3、MgO、SiO_2,其含量分别为4.5%、11.49%、1.84%、65.75%[20]。在不影响结果的前提

下，模拟时对矿物组分进行简化，分别用 SiO_2 颗粒和 Cu 颗粒代表轻颗粒和重颗粒，其密度分别为 2 200 kg/m^3、8 960 kg/m^3，粒度均为 0.074 mm，分选介质为水。根据上述 Cu 品位，设置水为 80%，SiO_2 为 19.93%，Cu 为 0.07%。

进料口选择速度入口，速度为 0.5 m/s。反向流为水，选择速度入口，速度为 0.006～0.018 m/s。精矿和尾矿出口均为正常压力出口。由于该模型有搅拌桨，所以流体域动、静区域之间设置交界面，动区域为旋转域，设置转速为 40～80 r/min。

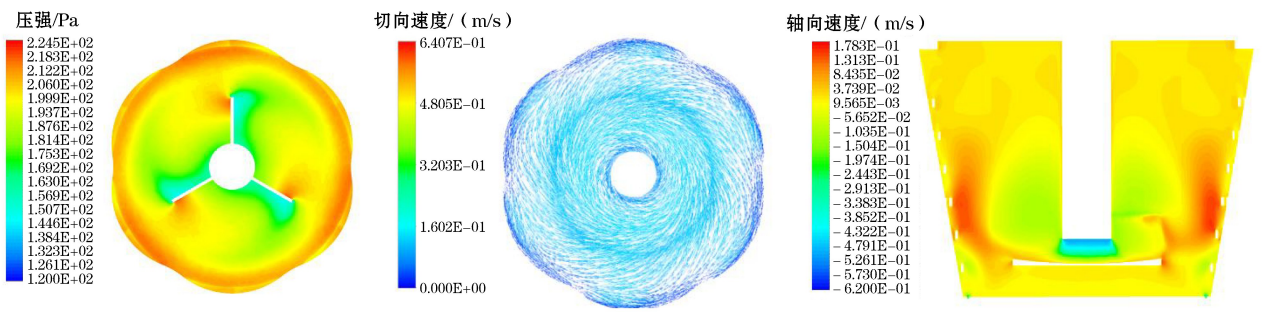
3　结果与分析

3.1　分选流场压强、切向速度与轴向速度分析

叠式台阶流内部流场的压强主要由搅拌桨产生的离心流场与台阶流流场共同形成。图 6(a)为转速 60 r/min、$z=40$ mm 处流场的压强分布云图。由图 6(a)可知，从中心到壁面处，压强逐渐增大，在靠近壁面处，压强最大，主要是因为随旋转半径的递增，离心力逐渐增大。另外，由于反向流的作用，压强最大值的位置并未完全贴在壁面。在分选时，颗粒进入反向流作用区域，由于密度差颗粒受到离心力不同，Cu 颗粒能较好地克服反向流的压力，更多地富集在壁面处，实现了铜矿颗粒的分选。

图 6(b)为转速为 60 r/min 搅拌叶片上部切向流场速度矢量图。由图 6(b)可知，流场速度随着台阶流结构而改变，由于凸起凹下的台阶形状，在壁面凹下处，流速较慢，矿物颗粒在此处平缓分层；在靠近壁面凸起处，流体与壁面发生的分离引起水速变化，水速变化处产生了涡旋。在切向速度的作用下，壁面处的矿浆贴着壁面做整体迁移，在多种力的作用下松散分层，迁移至涡旋处时，轻颗粒被涡旋分选出来，随螺旋上升流从上出口排出，重颗粒继续贴着壁面运动，在重力的作用下从精矿出口排出。

在矿物分选过程中，轴向速度对轻、重矿物颗粒整体的分离起着重要作用。图 6(c)为转速 60 r/min、$y=0$ 时截面处的轴向速度云图。速度以竖直向上为正方向，向下为负方向。矿浆的进料速度导致在进料口附近向下的轴向速度较大。在分料盘附近，由于分料盘的阻挡，其周围产生了微弱的涡旋，但并不影响整体的分选。由于搅拌桨的旋转作用，在搅拌桨叶处产生了最大的上升速度；随着高度的升高，轴向上升速度逐渐减小。在旋转流的作用下，内流场在主要分选区呈现上升流，其作用是将分选出的轻颗粒从上出口排出。另外，在底部均布了 6 个精矿出口，有利于精矿的排出，但不影响整体分选流的形成。



(a) 压强　　(b) 切向速度　　(c) 轴向速度

图 6　分选流场压强云图、切向速度矢量图与轴向速度云图

Fig.6　Pressure cloud image, tangential velocity vector image and axial velocity cloud image of sorting flow field

3.2　矿物颗粒分布特征

矿物颗粒的分布特征是描述颗粒分离效果的一个重要参考。在分选达到稳定状态时，对 Cu 和 SiO_2 颗粒的体积浓度分布进行量化分析，在仿真时对分选锥底部、中部、顶部截面设置体积浓度监测。体积分数分布曲线如图 7 所示。

由于模型结构的对称性，颗粒的径向分布曲线呈现对称形态。从图 7(a)中 Cu 颗粒的体积分数分布可以看出，底部 Cu 颗粒体积浓度最高，从底部到顶部，Cu 颗粒体积浓度逐渐降低。在底部靠近壁面处体积浓度最高，原因是 Cu 颗粒获得的离心力克服了反向流的反向力而聚集在壁面处，由中心到壁面呈增长趋势，在接近壁面位置时，此处为下出口，流出速度较快，造成 Cu 颗粒的体积分数分布曲线陡然出现波谷。在中部的 Cu 颗粒体积浓度分布较为平缓，由中心到壁面呈增长趋势，在壁面处体积浓度最大。在顶部的 Cu 颗粒经过分选后体积浓度最低，在此处受到的离心力较弱，主要受到反向流和上

升流的影响,因此在壁面处体积浓度不高。

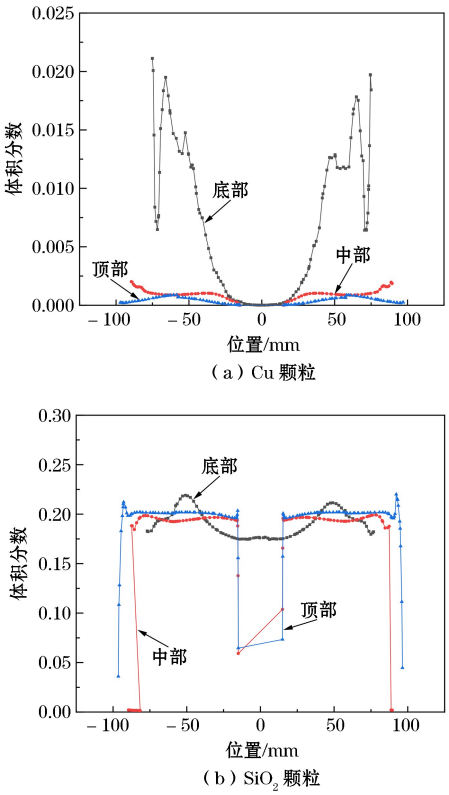


图 7 Cu 和 SiO_2 颗粒体积分数分布曲线

Fig.7 Volume fraction distribution curves of Cu and SiO_2 particles

从图 7(b)中 SiO_2 颗粒体积分数分布曲线可以看出,在底部、中部和顶部整体体积浓度相差不大,底部略高是由于部分颗粒在重力作用下发生了自由沉降;在靠近壁面处,中部的 SiO_2 颗粒体积浓度在壁面位置几乎为 0,这是由于颗粒流在壁面发生迁移过程中 Cu 颗粒与 SiO_2 颗粒不断发生位置交换,Cu 颗粒的密度更大,获得的离心力更大,导致大量 Cu 颗粒占据了壁面的位置。与中部不同,顶部的 SiO_2 颗粒体积浓度在靠近壁面处出现了峰值,原因在于大量的 Cu 颗粒聚集在底部,只有极少量的 Cu 颗粒存在于顶部位置,而 SiO_2 颗粒浓度不减,因此出现体积浓度峰值。同时,顶部的体积浓度略高于中部,说明 SiO_2 颗粒均匀稳定地从上出口排出。这验证了叠式台阶流模型具有较好的分选效果。

3.3 搅拌转速对分选的影响

设置转速分别为 40,50,60,70,80 r/min。不同搅拌转速作用下颗粒的分离状态通过进出口质量流量、精矿的回收率与富集比曲线以及颗粒的体积分数云图进行分析。为了定量分析搅拌转速对模型分选效果的影响,对模型进出口处轻颗粒(SiO_2)、重颗粒(Cu)的质量流量进行监测,统计出不同转速下轻、重颗粒质量流量随时间变化曲线,如图 8 所示。

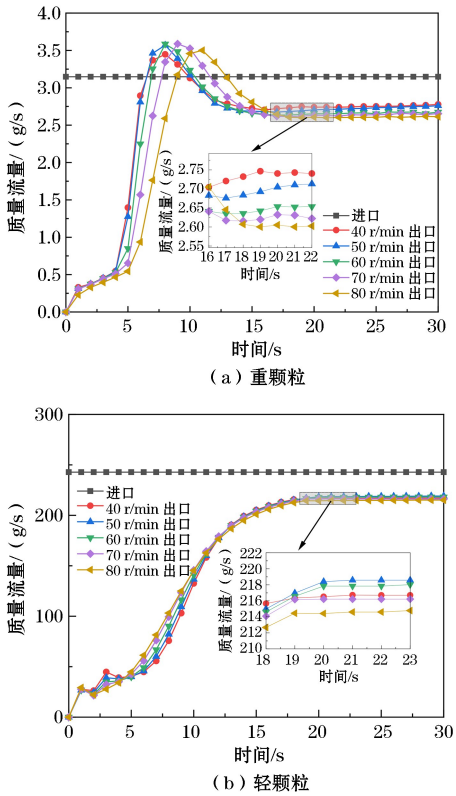


图 8 不同转速下轻、重颗粒质量流量随时间变化曲线

Fig.8 Mass flow curves of light and heavy particles with time at different rotational speeds

由图 8 可知,不同转速下轻、重颗粒的质量流量总体变化趋势一致,在分选进行的过程中,重颗粒的质量流量先增大后减小,一段时间后逐渐趋于稳定;轻颗粒的质量流量在初始阶段有微弱波动,但很快趋于稳定。但不同转速下重颗粒质量流量的峰值和趋于稳定的时间不同。由图 8(a)可知,在分选初期,当转速较小时,颗粒受到径向上的力较小,在切向上运动速度较慢,因此在重力作用下沉降较快,重颗粒质量流量到达峰值时间较短;随着转速的增加,颗粒在径向受力增大,切向速度也逐渐增大,因此到达峰值时间逐渐增大。另外可以观察到不同转速下精矿出口排出的重颗粒都在第 5 秒左右时陡然升高,在第 10 秒左右,出口流量大于进口流量,这是由于分离初期,叠式台阶流模型内部流场情况较为复杂,未形成较稳定的叠式台阶流流场,因此表现出重颗粒质量流量在出口处略大于进口处。

轻、重颗粒分别在 20 s、18 s 左右时，质量流量都趋于稳定，转速为 80 r/min 时，轻、重颗粒质量流量最低，这是由于转速过大，颗粒在壁面处堆积，流动性变差，阻碍了轻、重颗粒的有效分选。从轻、重颗粒质量流量随时间变化曲线可知，绝大部分轻、重颗粒都能分别通过尾矿出口、精矿出口流出，这表明叠式台阶流模型分离性能较好。

图 9 为转速对重颗粒的回收率和富集比的影响。由图 9 可知，在叠式台阶流模型中对于轻、重颗粒的分选，随着转速的增加，重颗粒回收率呈现出逐渐减小的趋势。在转速较小时，颗粒受到径向力较小，在切向上运动速度较慢，在重力作用下能大量从精矿出口排出；随着速度的增大，部分重颗粒开始随着轻颗粒从上出口排出。当速度过大时，矿物颗粒在叠式台阶流流场中得到很大的离心力，轻易克服反向流的反向力，在壁面处大量堆积，流动性变差，轻、重颗粒不能进行有效分选，导致铜精矿回收率较低。

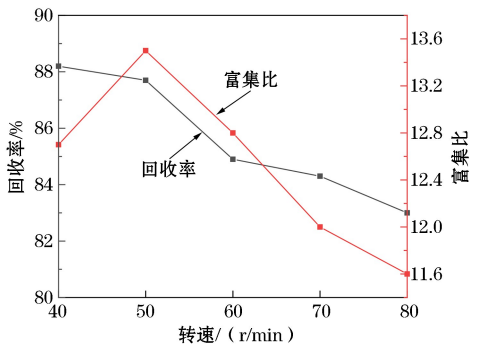


图 9　转速对重颗粒的回收率与富集比的影响

Fig.9　Effect of rotational speed on recovery and enrichment ratio of heavy particles

由图 9 可知，随着转速的增加，富集比呈先增大后减小的趋势，当转速为 40 r/min 时，富集比较低，这是由于较低的转速导致轻、重颗粒较多地从精矿出口排出，因此造成了精矿回收率高但富集比低的现象。在 60 r/min 到 80 r/min 的区间范围内，随着转速的增加，台阶处产生的涡旋能量增大，导致重颗粒也被分选出来，被螺旋上升流从上出口排出。

综合分析可知，搅拌转速太低或太高都对矿物的分选不利。当转速为 50 r/min 时，回收率为 87.70%，富集比为 13.45，既能获得高富集比，又能保障 Cu 颗粒的高效回收，模型分选效果较好。

图 10 为同一时间、同一界面转速(50 r/min)时轻、重颗粒体积分数云图。通过颗粒体积分数云图可以直观观察出叠式台阶流模型的分选效果。由图 10(a)可知，重颗粒受到的离心力较大，能克服反向流作用力从而富集在台阶流内壁凹面处；而从图 10(b)可以看到，由于台阶流产生的涡旋与反向流作用力的共同作用，将轻颗粒从壁面凹处的重颗粒中分选出来，因此轻颗粒在壁面凹处体积分数低，而在靠近壁面处体积分数较高，以便于被螺旋上升流从上出口排出。

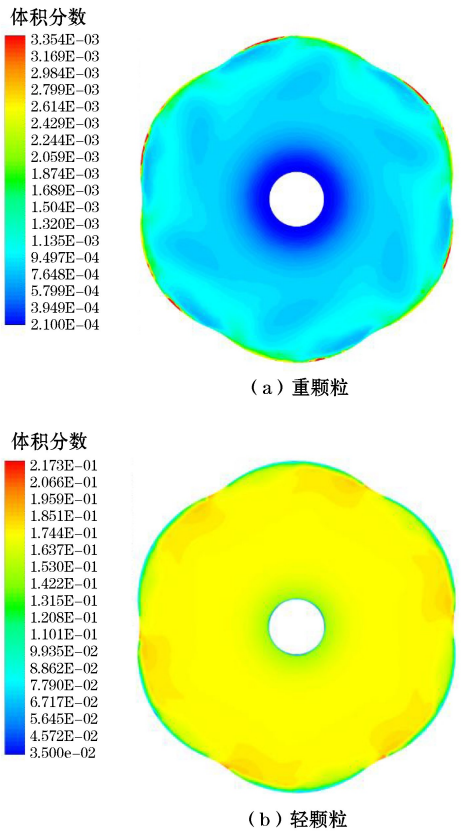
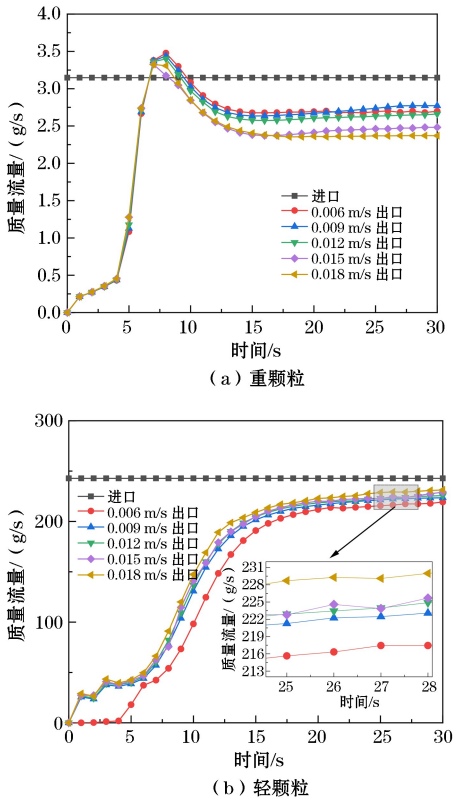


图 10　轻、重颗粒体积分数云图

Fig.10　Volume fraction cloud image of light and heavy particles

3.4　反向流化速度对分选的影响

反向流能够有效防止颗粒床层在壁面板结，使床层处于利于颗粒持续分离的松散状态。在转速为 50 r/min 时，设置反向流流速分别为 0.006，0.009，0.012，0.015，0.018 m/s。反向流作用下叠式台阶流模型对轻、重颗粒的分选效果，通过进出口质量流量与精矿的回收率与富集比曲线分析。不同反向流流速下轻、重颗粒质量流量随时间变化曲线如图 11 所示。



(a) 重颗粒

(b) 轻颗粒

图 11 不同反向流流速下轻、重颗粒质量流量随时间变化曲线

Fig.11 Mass flow curves of light and heavy particles with time under different reverse flow velocities

由图 11(a)可以看出,在反向流流速影响下,重颗粒质量流量的变化趋势大致相同。在前 7 s,反向流流速对重颗粒质量流量的影响几乎相同,说明分选刚开始时,反向流对于重颗粒的分选影响不大;随着分选的进行,重颗粒的质量流量逐渐趋于稳定。当流速为 0.018 m/s 时,重颗粒的质量流量最小,这是由于较大的反向流作用力,使得部分重颗粒与轻颗粒一同随着螺旋上升流从上出口排出,无法到达精矿出口。

由图 11(b)可以看出,轻颗粒变化趋势也大致相同。在反向流流速为 0.006 m/s 时,在前 5 s 的轻颗粒质量流量较为反常,这是由于分选初期较小的流速,影响了轻、重颗粒的有效分离速度;随着分选的进行,轻颗粒的质量流量仍然最低,这是由于过低的反向流流速使得部分轻颗粒也能克服反向力,随重颗粒一同在壁面富集,影响了分选效果。当流速为 0.018 m/s 时,轻颗粒的质量流量最大,这是由于反向流作用力过大,轻颗粒与部分重颗粒都难以克服反向力,随螺旋上升流从上出口排出。

图 12 为反向流流速对重颗粒的回收率与富集比的影响。从图 12 可以看出,重颗粒的回收率呈现先增大后减小的趋势。当反向流速度达到 0.009 m/s 时,重颗粒的回收率达到最大值 89.66%;当反向流速度超过 0.012 m/s 时,重颗粒的回收率急剧下降,原因在于反向流流速的增加,其产生的反向力增大,使部分重颗粒也无法克服反向流作用力从尾矿出口排出,从而使回收率降低。富集比曲线从侧面反映了精矿品位,随着反向流流速的增加,富集比也逐渐增加。当反向流流速为 0.006 m/s 时,重颗粒的回收率较高但富集比较低,这是因为精矿出口回收了较多的轻颗粒,降低了重颗粒的品位。当反向流流速为 0.009 m/s 时,回收率最高,但富集比只有 13.07;当反向流流速为 0.018 m/s 时,富集比最高,为 17.04,但回收率只有 75.83%。

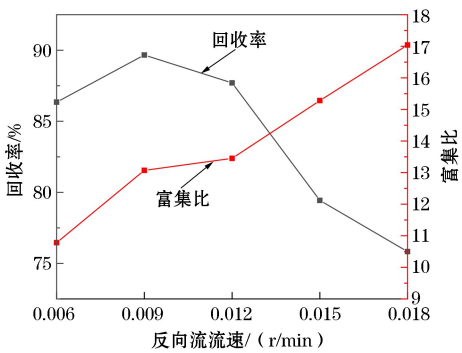


图 12 反向流流速对重颗粒的回收率与富集比的影响

Fig.12 Effect of reverse flow velocity on recovery and enrichment ratio of heavy particles

综合以上分析,为了确保精矿出口重颗粒的回收率与富集比均获得较大值,当反向流流速为 0.012 m/s 时,回收率为 87.70%,富集比为 13.45,叠式台阶流模型对轻颗粒与重颗粒的分选效果最佳。

4 结论

(1) 叠式台阶流分选模型流场压强从中心到壁面逐渐增大,但由于存在反向流作用力,压强最大值并未完全贴合壁面;切向速度在台阶处发生突变,表明有涡旋产生,有利于轻颗粒分选;轴向速度分布表明,在搅拌叶片处上升流速度最大,内流场整体呈现上升流,有利于分选后的轻颗粒从上出口排出。

(2) Cu 颗粒的轴向体积浓度分布呈现由下向上递减的趋势,靠近壁面处径向体积浓度最高;

SiO_2 颗粒在轴向方向顶部体积浓度最高,径向方向壁面处体积浓度较低。这验证了模型可实现 Cu 与 SiO_2 颗粒的有效分选。

(3) 进料速度为 0.5 m/s、转速为 50 r/min、反向流流速为 0.012 m/s 时,Cu 颗粒回收率为 87.70%,富集比为 13.45,叠式台阶流模型对轻颗粒与重颗粒的分选效果最佳。

(4) 颗粒体积分数云图表明,Cu 颗粒富集在台阶流内壁凹面处,SiO_2 颗粒由于涡旋与反向流作用力分选后,在壁面凹处体积分数低,更加直观地体现了叠式台阶流模型的分选效果。研究结果为离心选矿设备的改进提供了参考。

参考文献(References):

[1] 林君.矿产资源保障与国家安全[J].太平洋学报,2023,31(10):1-9.
LIN Jun. Mineral resources security and national security [J]. Pacific Journal,2023,31 (10):1-9.

[2] 李鹏远,周平,唐金荣,等.中国铜矿资源供应风险识别与评价:基于长周期历史数据分析预测法[J].中国矿业,2019,28(7):44-51.
LI Pengyuan, ZHOU Ping, TANG Jinrong, et al. Identification and evaluation of copper supply risk for China: using method of long-term historical data analysis[J]. China Mining Magazine,2019,28(7):44-51.

[3] 陆茂欣,向连格,王红,等.宁夏铜矿成矿地质特征与成矿规律[J].矿产综合利用,2024,45(1):27-31+40.
LU Maoxin, XIANG Lian'ge, WANG Hong, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of copper deposits in Ningxia[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(1):27-31+40.

[4] 窦源东,吴凯,王涛,等.新疆某铜矿的浮选实验[J].矿产综合利用,2023(5):154-159+173.
DOU Yuandong, WU Kai, WANG Tao, et al. Flotation technology test of refractory copper ore in Xinjiang[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources,2023(5):154-159+173.

[5] BILAL M, ITO M, AKISHINO R, et al. Heterogenous carrier flotation technique for recovering finely ground chalcopyrite particles using coarse pyrite particles as a carrier[J]. Minerals Engineering,2022,180:107518.

[6] 韦性平,王宇斌,王昌龙,等.铜矿浮选技术、药剂与装备发展概述[J].中国钼业,2021,45(2):36-40.
WEI Xingping, WANG Yubin, WANG Changlong, et al. Overview on the development of copper flotation technology, reagents and equipment[J]. China Molybdenum Industry,2021,45(2):36-40.

[7] 张曙光,简胜,唐鑫,等.某含钼低品位硫化铜矿综合回收钼的选矿研究[J].矿冶工程,2024,44(1):48-51.
ZHANG Shuguang, JIAN Sheng, TANG Xin, et al. Comprehensive recovery of molybdenum resource from low-grade molybdenum-bearing copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(1):48- 51.

[8] 陈昌员.某高泥质铜矿选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(6):49-53.
CHEN Changyuan. Experimental study on mineral processing of a high-pelitic copper ore[J]. Mining Research and Development,2022,42(6):49-53.

[9] 申培伦,刘瑞增,赖浩,等.氧化铜矿浮选基础理论研究新进展[J].中国矿业大学学报,2022,51(3):591-598.
SHEN Peilun, LIU Ruizeng, LAI Hao, et al. New progress in flotation fundamental theory of oxidized copper ores[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2022,51(3):591-598.

[10] XIAN Y J, HONG Y, LI Y R, et al. Pulsating high-gradient magnetic separation of chalcopyrite and talc[J]. Minerals Engineering,2022,178:107410.

[11] 张铂华,邵延海,熊涛,等.SLon-500 磁选机分离细粒铜钼混合精矿研究[J].有色金属(选矿部分),2022(2):53-57+94.
ZHANG Bohua, SHAO Yanhai, XIONG Tao, et al. Study on separation of fine copper-molybdenum bulk concentrate by SLon-500 magnetic separator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(2):53-57+94.

[12] 廖乾.某铜钴硫铁矿综合回收选矿工艺技术研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):57-61.
LIAO Qian. Beneficiation technology study on comprehensive recovery of a copper-cobalt pyrite ore[J]. Mining Research and Development,2022,42(9):57-61.

[13] 王彪,柳忠彬,周红英,等.旋流分选器周期性径向振荡对颗粒分选行为的影响研究[J].有色金属(选矿部分),2023(5):127-133.
WANG Biao, LIU Zhongbin, ZHOU Hongying, et al. Study on the effect of periodic radial oscillation of cyclone sorter on particle sorting behavior[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2023(5):127-133.

[14] 张明炜,谭璐,黄业豪.某金矿尼尔森重选试验研究[J].金属矿山,2022(9):94-99.
ZHANG Mingwei, TAN Lu, HUANG Yehao. Study on gravity separation test of a gold ore with Knelson concentrator[J]. Metal Mine,2022(9):94-99.

[15] 李汶倢,柳忠彬,王欢.超重力选矿机富集槽虚拟化研究[J].有色金属(选矿部分),2019(5):95-101.
LI Wenjie, LIU Zhongbin, WANG Huan. Study on virtualization of enrichment tank of high gravity concentrator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(5):95-101.

[16] 董颖博,赵钰,林海,等.微生物浸出法从石煤提钒尾渣中回收钒和铜的研究[J].稀有金属,2022,46(5):619-626.
DONG Yingbo, ZHAO Yu, LIN Hai, et al. Recovery of vanadium and copper from vanadium tailings from stone coal by microbial leaching[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022,46(5):619-626.

[17] 李卓越.后向台阶流动中三维湍流结构产生机理及演化规律的实验研究[D].大连:大连理工大学,2022.
LI Zhuoyue. Experimental investigation on the large scale coherent motions in a backward facing step flow[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2022.

[18] 张维乐,王芳芳,吴时强,等.凹槽长度对后台阶湍流特性影响研究[J].水力发电学报,2023,42(1):86-94.
ZHANG Weile, WANG Fangfang, WU Shiqiang, et al. Study on effect of groove length on hydraulic characteristics of backward facing step flows[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(1):86-94.

[19] MCQUEEN T, BURTON D, SHERIDAN J, et al. Active control of flow over a backward-facing step at high Reynolds numbers[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2022,93:108891.

[20] 易运来.云南某难选氧化铜矿浮-磁联合选矿试验[J].现代矿业,2018,34(9):16-19+26.
YI Yunlai. Flotation-magnetic separation combined beneficiation experiment on a refractory oxidized copper ore in Yunnan Province[J]. Modern Mining,2018,34(9):16-19+26.