

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2022.01.010

# 进气速度与质量流率对多密度颗粒分离性能的影响研究

胡浩然<sup>1</sup>, 柳忠彬<sup>1</sup>, 张海周<sup>2</sup>, 谢君科<sup>1</sup>, 曾强<sup>1</sup>, 王金龙<sup>1</sup>

(1. 四川轻化工大学 机械工程学院, 四川 宜宾 644000;

2. 宜宾学院 智能制造学部, 四川 宜宾 644000)

**摘要:**通过建立多密度颗粒在康达效应下的分离模型,利用不同密度颗粒在康达壁附近迁移轨迹不同而实现不同颗粒间的分离。基于计算颗粒流体力学(CPDF)方法模拟混合颗粒在该模型下的流动迁移特征,反映出不同密度颗粒在不同进气速度与质量流率的分离特性。研究表明,进气速度与质量流率对不同密度颗粒在康达壁下的迁移轨迹及分布均具有重要影响,当气流速度为2.8 m/s,质量流率为10 g/s时,在420~480 mm区间,矿粒铜的回收率可达65%,品位可达78%,富集比可达9.75,在480~520 mm区间,矿粒钨回收率可达59.50%,品位可达72%,富集比可达18,说明在康达效应下可以有有效的分选富集高密度金属矿粒铜和钨,对多密度颗粒的分选具有借鉴作用,同时可为我国西北水资源贫乏地区金属矿的分选提供新的思路。

**关键词:**康达效应;CPFD;多密度颗粒

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1671-9492(2022)01-0062-06

## Study on Effect of Inlet Velocity and Mass Flow Rate on Separation Performance of Multi-density Particles

HU Haoran<sup>1</sup>, LIU Zhongbin<sup>1</sup>, ZHANG Haizhou<sup>2</sup>,  
XIE Junke<sup>1</sup>, ZENG Qiang<sup>1</sup>, WANG Jinlong<sup>1</sup>(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering,  
Yibin 644000, Sichuan, China;

2. Intelligent Manufacturing Department, Yibin University, Yibin 644000, Sichuan, China)

**Abstract:** By establishing the separation model of multi-density particles under the Coanda effect, the separation of different density particles can be realized by using the different migration trajectories of particles with different densities near the Coanda wall. Based on the computational particle hydrodynamics (CPFD) method, the flow and migration characteristics of mixed particles in this model are simulated, which reflects the separation characteristics of particles with different densities at different inlet velocities and mass flow rates. The results show that the air inlet velocity and mass flow rate have an important influence on the separation of particles with different density under the Coanda wall. When the air flow rate is 2.8 m/s and the mass flow rate is 10 g/s, in the range of 420—480 mm, the recovery of copper particles can reach 65%, the grade can reach 78%, and the enrichment ratio can reach 9.75. In the range of 480—520 mm, the recovery of tungsten can reach 59.5%, the grade can reach 72%, and the enrichment ratio can reach 18. Under the Coanda effect, different density particles can be effectively separated and enriched, which has a reference and guidance role for the separation of multi density particles.

**Key words:** Coanda effect; CPFD; multi-density particles

收稿日期:2020-12-16

基金项目:自贡市重点科技计划项目(2018GYCX34);钒钛资源综合利用四川省重点实验室科研项目(2018FTSZ22;2018FTSZ27);过程装备与控制工程四川省高校重点实验室项目(GK202004);四川省科技厅项目(2020JDR0080)

作者简介:胡浩然(1995-),男,四川广安人,硕士研究生,主要从事分离机械、环保机械研究。

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。

矿产资源是人类生存与社会发展必不可少的物质,目前我国低品位矿、尾矿有效回收率低,造成了资源的浪费和环境污染<sup>[1-3]</sup>,低品位矿和一些尾矿具有很大的回收再利用空间,如何有效综合利用二次矿产资源越来越受到重视。另外我国西北地区水资源十分贫乏,传统选矿需要水资源和一些助选药剂<sup>[4-5]</sup>,针对西部地区矿产的开发利用回收与水资源节约和环境保护,从绿色和可持续发展的角度出发,提出一种对低品位矿和尾矿具有回收价值的干法回收方法<sup>[6-7]</sup>,本文通过 Barracuda 软件 CFPD 求解气固耦合问题,模拟多密度颗粒在康达效应下分选特性,对不同气体流速和不同进口质量流率矿粒的分选进行研究,以对矿物颗粒干法分选技术进行新的探索。

## 1 基本原理

### 1.1 康达效应下颗粒的运动特征

矿物颗粒由于组分物理性质的不同,为多密度颗粒之间的分离提供条件,不同密度的颗粒与空气组成气固混合介质。当颗粒与空气气经过康达壁的过程中,气流与矿粒在经康达块时贴附于壁面,在贴附壁面流动时会对周围的气体产生吸卷作用<sup>[7-8]</sup>,将使不同密度的颗粒在气流中产生不同的加速作用,因此不同密度的颗粒会产生不同的轨迹运动,多密度矿物颗粒在康达效应下轻、中、重颗粒实现由近到远分布,从而完成对多密度矿物颗粒的有效分离,回收有价值矿物<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2 颗粒动力学分析

在本文中考虑颗粒所受的主要作用力即颗粒自身重力、环绕康达区流动受到的空气黏度引起的向心黏性阻力、压力梯度力、曳力以及浮力,如图 1 所示。

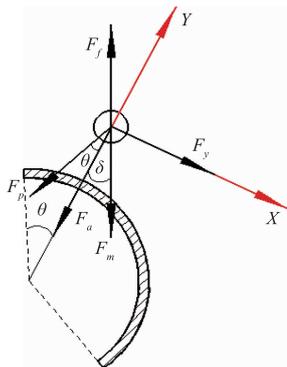


图 1 矿粒受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one grain force

#### 1) 重力

$$F_m = Mg = \frac{\pi d_1^3 \rho_1 g}{6}$$

式中:  $d_1$  — 颗粒有效直径, mm;  $\rho_1$  — 颗粒的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

#### 2) 向心黏性阻力

当颗粒在气流中径向速度与介质的径向速度相等,即  $\omega_r = u_r$ ,将颗粒近似处理为球体,则颗粒受到的向心黏性阻力为:

$$F_a = \frac{\pi d_1^2 \rho_0 \omega_r^2}{8} = \frac{\pi D d_1^2 \rho_0 u_r^2}{8}$$

式中:  $\rho_0$  — 工作介质的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_r$  — 颗粒在主气流中的径向速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\omega_r$  — 工作介质气流的径向速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D$  — 阻力系数。

#### 3) 压力梯度力

$$F_p = -\frac{\pi d_1^3}{6} \frac{\partial p}{\partial l}$$

#### 4) 曳力

$$F_y = 0.055 \pi d_1^2 \rho_0 u_f^2$$

式中:  $c_d$  — 曳力系数;  $u_f$  — 颗粒与流体的相对速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

#### 5) 浮力

$$F_f = \frac{1}{6} \pi d_1^3 \rho_0 g$$

通过以上受力分析结合牛顿第二定律,可得:

#### (1) 颗粒在切向方向上的动力学分析

$$m \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = F_{m\tau} - F_{p\tau} - F_{f\tau} + F_y$$

$$\text{整理得: } \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \frac{1}{r} g \sin \delta - \frac{\partial P}{\partial l} \frac{\sin \theta}{r \rho_1} + \frac{3 \cdot 3 \rho_0 u_f^2}{r \rho_1 d_1} -$$

$$\frac{\rho_0 g \sin \theta}{r \rho_1} - \frac{d\Phi}{r dt}$$

#### (2) 颗粒在径向方向上的动力学分析

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_{fy} - F_a - F_{m\tau} - F_{p\tau}$$

$$\text{整理得: } \frac{1}{6} \pi d_1^3 \rho_1 \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{1}{6} \pi d_1^3 (\rho_0 - \rho_1) g \cos \delta -$$

$$\frac{\pi}{6} d_1^3 \frac{\partial P}{\partial l} \cos \theta - \frac{\pi}{8} D d_1^2 \rho_0 u_r^2$$

当矿物颗粒受的合力提供矿物颗粒的向心力,整理得:

$$r = \frac{u_1^2}{(\frac{\rho_0}{\rho_1} - 1) g \cos \delta - \frac{3D}{4d_1 \rho_1} \rho_0 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial P}{\partial l} \cos \theta}$$

通过以上分析可知,矿物颗粒在径向上的运动迁移轨迹与矿物颗粒的粒径、矿物颗粒密度、气流速度有密切关系,当矿物颗粒粒径相同而密度不同时,

矿物颗粒的运动轨迹也会不同,矿物颗粒密度越大,大密度颗粒越远离康达环,实现轻重矿物颗粒的分离,因此为多密度颗粒在康达区域上的分离提供了理论依据。

## 2 分析模型

建立多密度颗粒康达分离模型,如图2所示,分别由进料部件、进风部件、康达板、矿粒回收部件、排风口组成。矿物颗粒经过进料部件并由气流带动颗粒做迁移运动,不同密度矿粒经过康达壁面发生不同轨迹的迁移,最后颗粒由回收部件收集,空气气流经排风口排出。

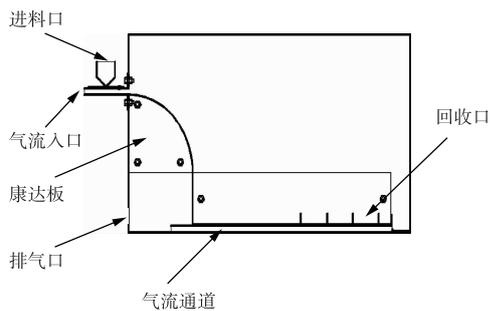


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

本文基于 Barracuda 仿真软件研究多密度矿粒在康达效应下的分选特征,将颗粒相处理为离散体系,建立拉格朗日体系,使用连续的欧拉体系模拟气相,流体通过曳力对颗粒产生影响,颗粒则通过位移与位置与流体耦合,流体相动量方程用 Navier-Stokes 方程描述表示,离散颗粒相则采用 MPPIC 数值方法计算颗粒流体动力学,曳力模型采用 Wen-Yu 模型,最大动能损耗为 0.4,颗粒与流体的滑移率为 0.5,进料流动方向是法向表面流动,单位体积颗粒数为 2 000。给定多密度矿粒组成及含量为钨(W)4%、铜(Cu)8%和二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )88%,如表1所示。

表1 矿物元素分析结果

Table 1 Results of mineral element analysis

| 矿物元素组成                                   | W      | Cu    | $\text{SiO}_2$ |
|--|--------|-------|----------------|
| 矿物含量/%                                   | 4      | 8     | 88             |
| 矿物颗粒粒径/mm                                | 0.074  | 0.074 | 0.074          |
| 矿物密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 19 350 | 8 960 | 2 200          |

## 3 结果讨论

### 3.1 多密度颗粒分布特性

多密度矿粒在康达效应作用下待分选多密度颗粒必须要减少粒径、形状、特性等的影响,使颗粒的

密度在分选过程中起主导作用,因此在模拟分选中采用同种粒径颗粒。图3是不同参数下三种矿粒的分选效果,横坐标是矿粒收集装置的距离。在气流稳定运行后选矿装置内颗粒分布,图3(a)和图3(b)是颗粒在气流速度 2 m/s 时的分布情况,蓝色颗粒为  $\text{SiO}_2$ ,绿色颗粒为 Cu,红色颗粒为 W,图3(a)在康达效应下呈现出颗粒分离,而图3(b)无康达壁在整个装置矿粒绝大多数混合,分选效果较差。图3(c)是气流速度 3 m/s 时分布情况,矿物分选较图3(a)效果更好,铜的富集效果较好,钨的分布相对发散,与铜的混合度降低。图3(d)是颗粒在气流速度 4 m/s 时的分布情况,当气流速度过高,颗粒的混合度较高,矿物分选效果欠佳。由此可知,不同性质的矿物在康达效应下呈现不同的分布状况,重颗粒距离进料口最远,从左到右颗粒密度逐渐升高。

### 3.2 基于康达效应气流速度对矿粒分选规律影响研究

选矿装置操作参数对矿物颗粒分选效果有着重要影响,因此通过设置不同气流速度对多密度颗粒在康达效应下分选效果进行仿真,颗粒进口质量流量为 10 g/s,康达壁的曲率半径选用 150 mm,设定气流速度分别为 2.0、2.2、2.4、2.6、2.8、3.0 m/s,在装置中设置 5 个出口收集矿粒,分析矿物的回收率和品位,距离进口的距离分别是 170~420、420~480、480~540、540~600、600~620 mm,依次为 5 个出口,颗粒钨和铜在不同气流速度下不同收集口的品位和回收率如图4所示。

由图4(a)可知,不同气流下矿粒钨的品位随着气流速度的增大,品位不断升高,回收率是随着气流速度增大呈现下降的变化规律;同时表明,随气流流动中的钨不断地在发散。由图4(b)、4(d)可看出,当气流速度为 2 m/s 时,钨和铜大部分在 1 收集口(即分布距离为 170~420 mm)富集,和二氧化硅完全混合,铜品位仅为 7%,钨品位仅为 3.9%,分选效果较差,随着气流速度的增加,矿粒钨和铜逐渐向距离进料口远的收集口处富集。为了得到最佳的分选效果,将矿粒铜和钨分离,由图4可知,当气流速度达到 2.8 m/s 时,矿粒钨主要富集在 480~540 mm,回收率达 59.50%,品位达 72%,富集比为 18,矿粒铜主要富集在 420~480 mm,回收率达 65%,品位达 78%,富集比为 9.75,且二氧化硅与钨、铜分离效果最佳。随着气流速度进一步增加,矿粒二氧化硅和铜混合度增加,品位呈现下降趋势。

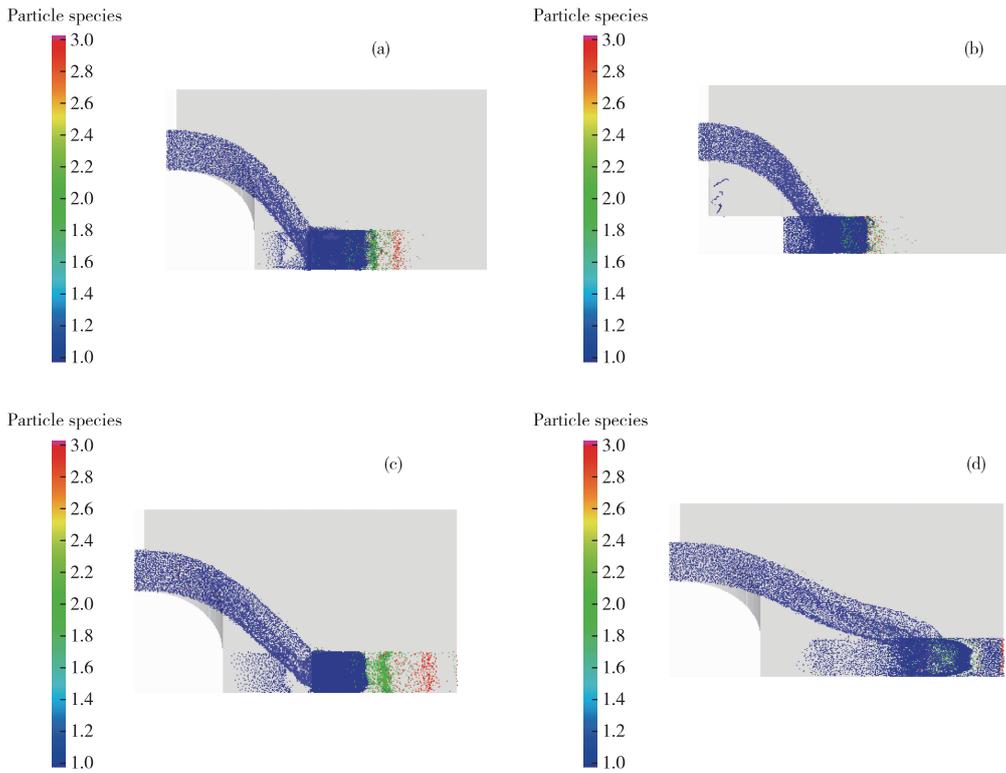


图3 多密度颗粒分布规律

Fig. 3 Distribution of multi-density particles

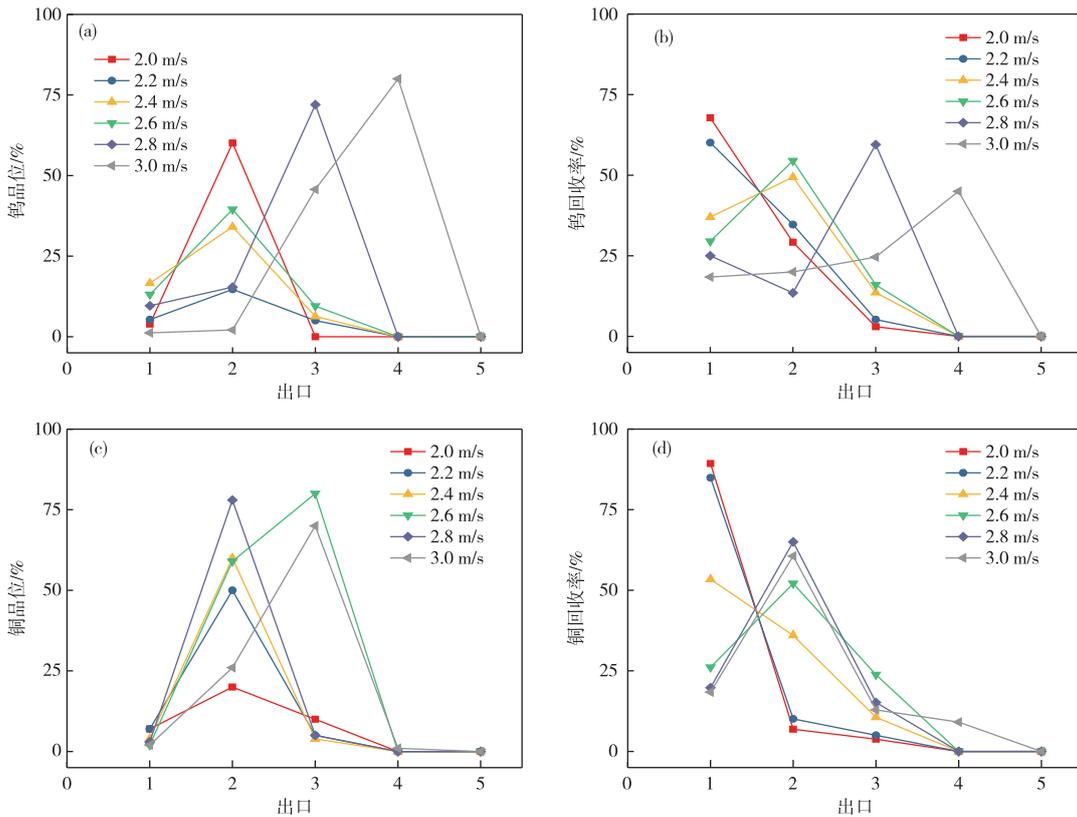


图4 多密度矿粒在不同气流速度下分布距离上品位变化

Fig. 4 Variation in the distribution distance of multi-density ore grains at different air velocities

### 3.3 进口质量流率对矿粒品位分布影响

矿物颗粒进口质量流率直接影响分选品位的高低,通过研究多密度颗粒进口质量流率对金属钨和铜分选效果的影响,分别设定4组不同进口流量5、7.5、10、12.5 g/s,作用于矿粒的气流速度为2.8 m/s,康达块曲率半径为150 mm,分别得到矿粒铜在420~480 mm 矿粒钨在480~540 mm 的品位。

由图5可知,随着进口质量流率的增加,矿粒铜在420~480 mm 和矿粒钨在480~540 mm 的回收

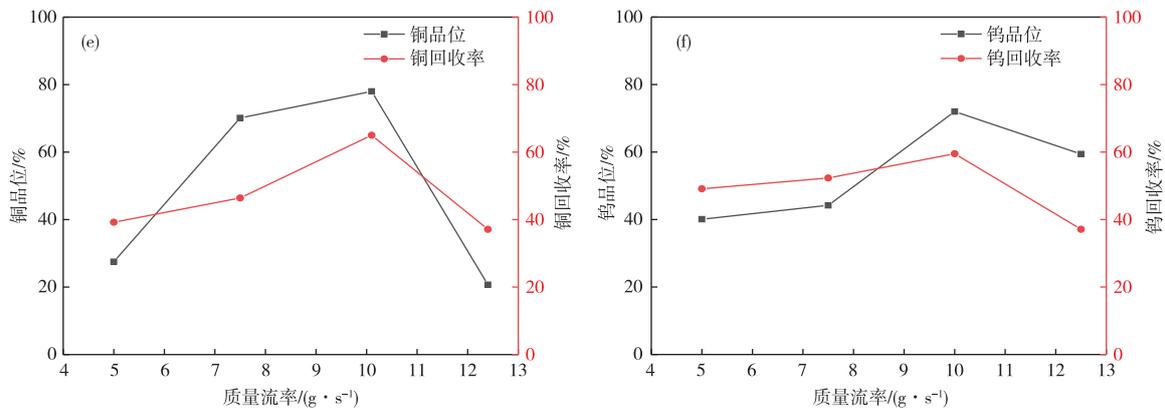


图5 多密度矿粒质量流率对分选效果的影响

Fig. 5 Influence of mass flow rate of multi-density ore on separation effect

## 4 结论

1)通过多密度颗粒分布规律可知,不同进气速度对矿粒的回收率和品位影响较大,在气流为2.8 m/s时,康达壁曲率为150 mm时,矿粒铜和钨的回收率和品位较佳,可以实现对多密度矿物颗粒的有效分离,达到回收有用矿物(Cu、W)的效果。

2)气流速度为2.8 m/s,颗粒进口质量流率为10 g/s,区间为420~480 mm时,矿粒铜的回收率可达65%,品位达到78%,区间为480~520 mm时,矿粒钨回收率可达59.50%,品位最高达72%,不同进口质量流率对矿物的分选具有显著的影响。

3)通过采用CPFD方法对多密度矿粒在康达效应下的分选效果进行研究,可以为矿物分选装置结构设计和参数优化等方面提供相应的理论依据,同时为我国西北水资源贫乏地区金属矿的分选提供指导。

### 参考文献

[1] 刘立顺,余斌,吴春平,等.我国绿色矿山建设现状及案例分析[J].有色金属工程,2020,10(9):98-103.  
LIU Lishun, YU Bin, WU Chunping, et al. Current situation and case analysis of green mine construction in China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(9): 98-103.

率呈现先增大后减小的变化规律,都呈现出一个倒“V”字型趋势,从进口质量流率为5 g/s,随着流量不断增加,在质量流率为10 g/s时,矿粒钨的品位达到72%,回收率达到59.50%,矿粒铜的品位达到78%,回收率为65%,继续增加进口质量流率,在12.5 g/s时,颗粒铜和钨品位都呈现下降趋势,较大的进口质量流率使二氧化硅与矿粒铜、钨相混合,降低了铜和钨的分选效果。因此,选择合适的分布距离与进口质量流率对提高矿物回收率和品位具有重要影响。

[2] 洪永华,兰希雄,何庆浪,等.都龙矿区废石资源综合回收有色金属研究实践[J].有色金属(选矿部分),2020(5):73-77.  
HONG Yonghua, LAN Xixiong, HE Qinglang, et al. Research and practice of comprehensive recovery of valuable metals from waste rock resources in Dulong mining area[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5):73-77.

[3] 王海军,薛亚洲.我国矿产资源节约与综合利用现状分析[J].矿产保护与利用,2017,37(2):1-5,12.  
WANG Haijun, XUE Yazhou. Situation analysis on conservation and comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017, 37(2):1-5,12.

[4] 李林涛.有色金属冶炼废渣中的有色金属可回收技术探讨[J].世界有色金属,2019(19):9,12.  
LI Lintao. Discussion on the recovery technology of valuable metals from smelting waste residue of nonferrous metals[J]. World Nonferrous Metals, 2019(19):9,12.

[5] 邓伟,王昌良,赵开乐,等.四川某铜多金属矿选矿综合回收研究[J].有色金属(选矿部分),2014(6):5-8.  
DENG Wei, WANG Changliang, ZHAO Kaile, et al. Study on comprehensive recovery of a copper polymetallic ore in Sichuan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014(6):5-8.

- [6] 谢君科,李玉如,柳忠彬. 基于 CPF D 多密度矿粒的流化与分选特性[J]. 有色金属工程,2018,8(4):79-84.  
XIE Junke, LI Yuru, LIU Zhongbin. Fluidization and separation characteristics of multi-density mineral particles based on CPF D[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018,8(4):79-84.
- [7] 梁世红,曾鸣,李凌月,等. 一种新型干法分选设备的研究[J]. 煤炭加工与综合利用,2011(4):15-17.  
LIANG Shihong, ZENG Ming, LI Lingyue, et al. Study on a new dry separation equipment[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization,2011(4):15-17.
- [8] 郑少华,陶珍东. 超细粉射流分级机的流场分析[J]. 山东建材学院学报,1999,13(3):189-192.  
ZHENG Shaohua, TAO Zhendong. Flow field analysis of jet classifier for superfine powder [J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials,1999,13(3):189-192.
- [9] ZHAO Y M, LI G M. Industrial application of a modularized dry-coal-beneficiation technique based on a novel air dense medium fluidized bed[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2017, 37(1):44-57.
- [10] 刘维生. 风力跳汰干法选煤系统的研究[J]. 矿山机械, 2010,38(11):95-98.  
LIU Weisheng. Study on dry coal preparation system with pneumatic jig [J]. Mining Machinery, 2010, 38(11):95-98.
- [11] 叶雅玲,彭小勇,胡畏,等. 基于科恩达效应通风装置气流特征研究[J]. 建筑热能通风空调,2017,36(11):23-27.  
YE Yaling, PENG Xiaoyong, HU Wei, et al. Study on airflow characteristics of ventilation device based on Coenda effect [J]. Building Energy & Environment, 2017,36(11):23-27.

(本文编辑 刘水红)

**(上接第 46 页)**

- [8] 王毓华,王化军. 矿物加工工程设计[M]. 长沙:中南大学出版社,2012.  
WANG Yuhua, WANG Huajun. Engineering Design of Mineral Processing [M]. Changsha: Central South University Press,2012.
- [9] LIU D Z, ZHANG G F, CHEN Y F, et al. Investigations on the utilization of konjac glucomannan in the flotation separation of chalcopyrite from pyrite[J]. Minerals Engineering, 2020, 145: 106098. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106098>.
- [10] SHENI N, CORIN K, WIESE J. Considering the effect of pulp chemistry during flotation on froth stability[J]. Minerals Engineering, 2018, 116(15): 15-23.

(本文编辑 刘水红)

**(上接第 61 页)**

- 分离中的研究进展[J]. 中国矿业, 2019, 28(增刊 2): 314-316, 321.  
AI Jing, LIU Chongjun, WU Guiye, et al. Research progress in flotation separation of feldspar with anionic and cationic collectors [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 314-316, 321.

(本文编辑 刘水红)