

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2023.02.011

# 逆流分选柱的应用现状及理论分析

赵炎, 刘振强, 胡志成, 王毓华, 卢东方, 谢顺平

(中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘要:**逆流分选柱是近20年来国内外普遍用于煤炭分选的液固流化床设备,主要由流化床和斜板区域两部分组成。逆流分选柱适用范围广,能有效分离具有一定密度差异的两种矿物,能应用于细粒物料的分选。因此,逆流分选柱不仅局限于煤炭的分选,对于铁矿或有色金属矿也有一定的分选效果。在绿色矿山政策的倡导下,重选这类污染小、成本低的选别方法更加不可或缺,而在矿石性质愈发复杂的情况下,传统重选设备越来越难以高效便捷地处理物料。对此,本文就几类主要的逆流分选柱进行详细阐述,并解释其对应的分选理论,为此类新型重选设备的应用提供参考。

**关键词:**重选;逆流分选柱;液固流化床;斜板沉降

**中图分类号:**TD 455 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2023)02-0090-10

## Application Status and Theoretical Analysis of Reflux Classifier

ZHAO Yan, LIU Zhenqiang, HU Zhicheng, WANG Yuhua, LU Dongfang, XIE Shunping

(School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Reflux classifier is a liquid-solid fluidized bed equipment widely used in coal separation at home and abroad in recent 20 years. It is mainly composed of fluidized bed and inclined plate area. Reflux classifier has a wide range of application, can effectively separate two kinds of minerals with a certain density difference, and can be used in the separation of fine grained materials. Therefore, it is not only limited to coal separation, but also has certain sorting effect on iron ore or non-ferrous metal ore. Under the advocacy of today's green mine policy, sorting methods with low pollution and low cost such as gravity separation are more indispensable. In the case of increasingly complex ore properties, traditional gravity separation equipment is becoming more and more difficult to be efficient and convenient processing ore. In this regard, several main types of reflux classifier are expounded, and their separation theory is explained to provide reference for the application of this new type of gravity separation equipment.

**Key words:** gravity separation; reflux classifier; liquid-solid fluidized bed; inclined plate settling

液固流化床是一类主要应用于粗煤泥分选的重选设备<sup>[1]</sup>,近年来也逐渐应用于金属矿分选<sup>[2-3]</sup>。

目前应用较为广泛的液固流化床设备分别为 Teetered-Bed Separator<sup>[4-6]</sup>、CrossFlow Separator<sup>[7-8]</sup>以

收稿日期:2022-09-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC2903202);国家自然科学基金资助项目(52174270,52174267,51974366,51674290);钒钛资源综合利用国家重点实验室资助项目(2021P4FZG05A)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China(2021YFC2903202); the National Natural Science Foundation of China(52174270, 52174267, 51974366, 51674290); the State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources(2021P4FZG05A)

作者简介:赵炎(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为细颗粒难选矿物物理分选。

通讯作者:卢东方(1982—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要从事复杂难选矿产方向的研究。

引用格式:赵炎,刘振强,胡志成,等.逆流分选柱的应用现状及理论分析[J].有色金属工程,2023,13(2):90-99.

ZHAO Yan, LIU Zhenqiang, HU Zhicheng, et al. Application Status and Theoretical Analysis of Reflux Classifier[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(2): 90-99.

及 Floatex density separator<sup>[9-11]</sup>, 此类液固流化床设备由于其流体分布及给料形式及位置的不同, 适用于分选不同物理性质的物料。液固流化床设备改善了重介质处理细粒物料时介质难回收以及分选密度不可调节的问题, 而且设备稳定性好。然而, 液固流化床设备对于入料中的细颗粒分选效果较差、分选精度较低, 影响精矿品位。21 世纪初期, 澳大利亚 GALVIN 教授研发了一种新型流化床设备——逆流分选柱 (Reflux classifier, 简称 RC)<sup>[12]</sup>, 该设备是将传统的液固流化床设备与斜板沉降相结合, 在入料口上方和下方设置了多组斜板, 既提高了物料的沉降面积, 使设备的处理能力大幅增加, 也让沉降在斜板上的物料落回流化床区域形成二次分选<sup>[13]</sup>, 提高了分选精度, 进一步改善了分选效果。

国外研究者对逆流分选柱作了一系列的研究与改进, 不仅应用于粗颗粒的分选, 对 0.038~0.25 mm 的细颗粒也有一定的分选效果<sup>[14]</sup>。RC 用于回收螺旋分选机尾矿中的氧化铁颗粒时, 可得到品位为 67.1% 的铁精矿, 铁回收率为 87.3%<sup>[15]</sup>。近年来, 国内学者对逆流分选柱也有一定的研究。贺长营等对逆流分选柱中斜板沉降的机理作出了全面分析<sup>[16-17]</sup>。褚浩然等<sup>[18]</sup>利用逆流分选柱良好的分选精度预富集氧化锑尾矿。本文介绍了逆流分选柱中的分选理论, 针对国内外关于逆流分选柱的研究现状进行深入地讨论与分析。

## 1 逆流分选柱的分选原理

### 1.1 干涉沉降理论

在重力选矿中, 将颗粒在流体中不受周围颗粒或容器壁干扰的沉降运动称为自由沉降, 自由沉降状态下的颗粒只受到自身重力和流体阻力的作用。相反, 在有限空间内的沉降运动称为干涉沉降, 在实际选矿过程中, 颗粒几乎都是以干涉沉降的形式运动<sup>[19]</sup>。相比于自由沉降, 干涉沉降的颗粒受到介质阻力等一些附加因素的影响使得干涉沉降末速小于自由沉降末速。干涉沉降并非定值, 不同设备和物料组成有不同的表现形式, 逆流分选柱中主要在流化床区域会存在干涉沉降。GALVIN 等<sup>[20]</sup>提出一种更通用的方程, 它适用于计算所有粒群的沉降末速, 无论它们是由单一物种、不同大小和相同密度的物种形成的, 还是由不同物种形成的不同大小和密度, 均如式(1)所示, 干涉沉降末速  $V_i$  为:

$$V_i = U_{fi} \left( \frac{\rho_i - \rho_{sus}}{\rho_i - \rho} \right)^{n_i - 1} \quad (1)$$

式中,  $\rho_i$  为颗粒的密度;  $\rho$  为流体介质的密度;  $\rho_{sus}$  是悬浮液的密度;  $U_{fi}$  为颗粒的自由沉降末速。这种形式的方程表明无量纲密度参数可用于描述颗粒的干涉沉降。该方程还表明, 当存在不同密度的颗粒时, 悬浮液会产生强烈的偏析效应; 当颗粒的密度小于悬浮液的密度时, 这个方程是无效的。

### 1.2 斜面沉降理论

逆流分选柱 (RC) 上半部分是由多组斜板排列组成平行的狭窄通道构成。“Boycott 效应”表明红细胞在斜管中的沉降速度比竖直管中的沉降速度要快。同样地, 类比于红细胞, 矿物颗粒在倾斜通道中的沉降速度要大于在竖直通道中的沉降速度。固体颗粒在斜板的运动过程如图 1 所示, 颗粒随悬浮液进入倾斜通道后, 一部分沉降在斜板上形成致密的沉积层 (图 1(c)), 并回落到流化床区域再混合后重新随悬浮液进入倾斜通道 (图 1(d, e)); 另一部分随悬浮液经溢流排出 (图 1(b))。

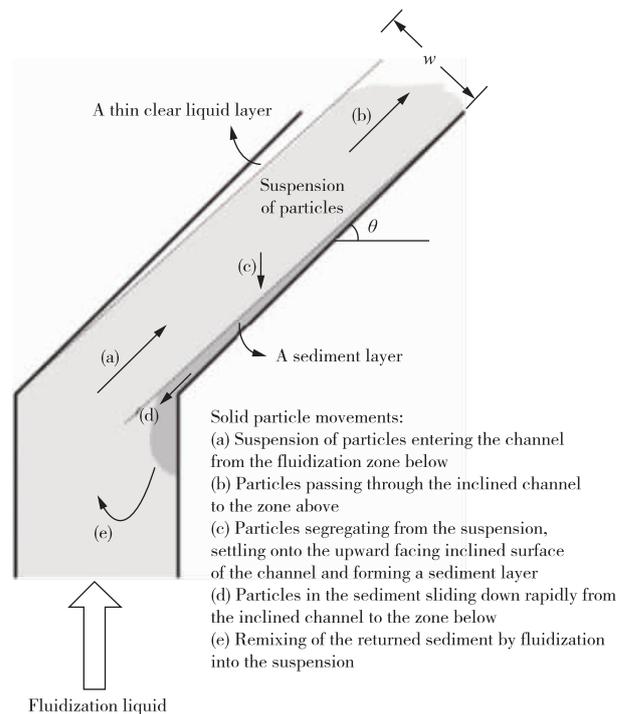


图 1 两个斜板之间的倾斜通道内的流体状态<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Fluid state in inclined channel between two inclined plates<sup>[12]</sup>

GALVIN 等<sup>[12]</sup>通过在竖直的流化床装置中不同高度处设置斜板来体现颗粒的回流作用, 如图 2 所示, 对比于不加斜板的流化床装置, 在保证相同的流化速度下, 斜板位置越低, 斜板下方流化床部分中颗粒在悬浮液中的体积分数越高, 这也说明了流经斜板部分的颗粒有回流作用的存在。

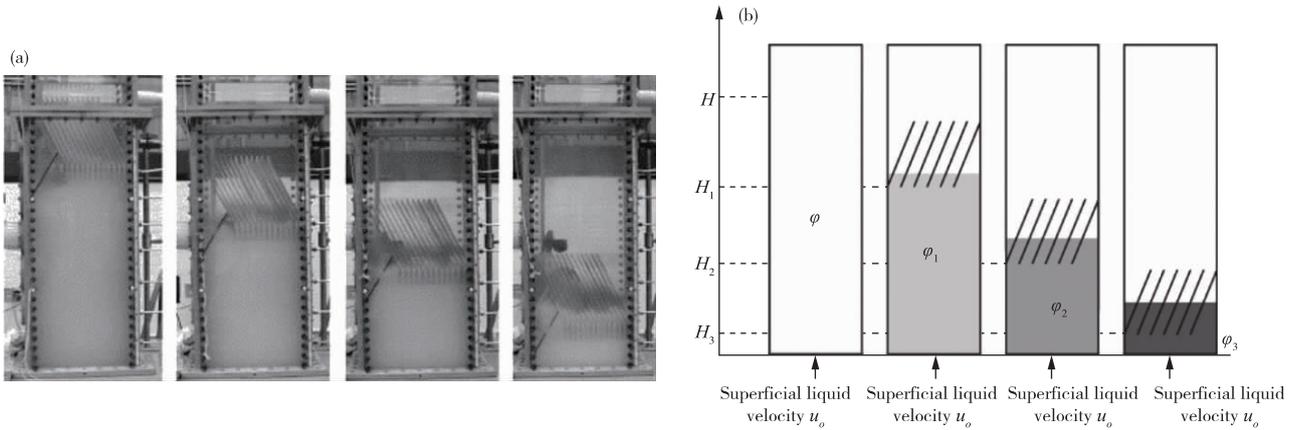


图 2 竖直流化床装置中斜板位置对比图(a)和流化悬浮液和一组平行斜板之间相互作用的实验(b)<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Comparison of the position of the inclined plates in a vertical fluidized bed unit(a) and the experiment of the interaction between a fluidized suspension and a set of parallel inclined plates(b)<sup>[12]</sup>

LASKOVSKI 等<sup>[21]</sup>使用 PNK 模型开发了一个经验关系,用于预测分离效率及实际处理量优势。将处理量优势因子定义为斜板的水平投影面积与垂直的流化床区域截面积之比。RC 中倾斜通道的水平投影面积之比为:

$$A_h = wD + DL \cos \theta \quad (2)$$

式中,  $D$  为 RC 横截面的宽度,  $w$  为斜板间距的水平距离,  $L$  为斜板的长度,  $\theta$  为斜板与水平面的倾角, 如图 3 所示。所以处理量优势因子  $F$  为:

$$F = \frac{w + L \cos \theta}{w} \quad (3)$$

由于  $z = w \sin \theta$ , 上式可化为:

$$F = 1 + \left( \frac{L}{z} \right) \cos \theta \sin \theta \quad (4)$$

当 RC 中倾斜通道内悬浮液浓度较低时, 可近似认为颗粒的沉降末速为自由沉降末速。流化床区域的流化速度为  $U$ , 倾斜通道内的流化速度为  $U'$ , 则颗粒沿斜板方向的速度为  $U' - U_i \sin \theta$ , 颗粒沿斜板法向的速度为  $U_i \cos \theta$ 。假设颗粒在倾斜通道内没有再悬浮, 即分离效率为 1.0, 此时可以进入溢流的最大粒度的颗粒具有一条最远的运动轨迹。则此颗粒沿斜板运动的总距离为  $L + z / \tan \theta$ , 该颗粒在斜板的切向和法向上的沉降时间相同, 因此,

$$t = \frac{L + z / \tan \theta}{U' - U_i \sin \theta} = \frac{z}{U_i \cos \theta} \quad (5)$$

整理上式可得:

$$\frac{U}{U_i} = 1 + \left( \frac{L}{z} \right) \cos \theta \sin \theta \quad (6)$$

由上式可知, 当分离效率为 1.0 时,  $F = U / U_i$ , 则分离效率可定义为:

$$\eta = \frac{U / U_i}{F} \quad (7)$$

LASKOVSKI 等<sup>[21]</sup>通过实验总结了分离效率的经验公式:

$$\eta = \frac{1}{1 + 0.133 \cos \theta \text{Re}^{\frac{1}{3}} \left( \frac{L}{z} \right)} \quad (8)$$

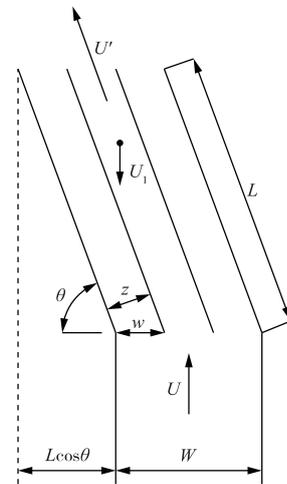


图 3 倾斜通道二维示意图

Fig. 3 2D schematic diagram of inclined channel

ZHOU 等<sup>[22]</sup>对上式作了进一步探究, 认为倾角  $\theta$  的最佳角度在  $68^\circ \sim 72^\circ$ , 在后续研究中, 逆流分选柱斜板部分的倾角基本上都设置为  $70^\circ$ 。因此, 分离效率主要取决于斜板长度与斜板间距之比(纵横比)的大小。

## 2 几类主要逆流分选柱的应用现状

### 2.1 常规的逆流分选柱

DOROODCHI 等<sup>[23]</sup>在 RC 原设备的基础上, 从

设备侧面给入一部分的流化水来增强高固体通量下的分选性能,这是因为 RC 的斜板部分有利于细颗粒沉降并落回流化床区域。GALVIN 最初所研制的 RC 包含三组不同板间距的倾斜板,由于三组斜板的 RC 结构复杂,不利于设备的维修与维护。LASKOVSKI 等<sup>[21]</sup>改变了设备构造,只保留一组倾斜板(图 4),并根据实验数据开发了一种经验关系,用于预测分离效率,从而预测处理能力,实验结果表明,分离效率与颗粒雷诺数和倾斜通道纵横比( $L/z$ )的乘积有关,而雷诺数较高时,分离效率仅与颗粒密度有关。在 LASKOVSKI 的研究基础上,ZHOU 等<sup>[22]</sup>使用 RC 回收矿砂中的重矿物,当  $L/z$  大于 200 时,分离效率趋于一个定值,倾斜板的  $L/z$  为 200 时能够增强颗粒按密度分离的能力,相比于  $L/z$  等于 100 时促进了高密度颗粒的沉降及低密度颗粒的悬浮,在较高的固体通量下重矿物回收率也能达到 90% 以上,并且能完全将粒级为 90~180  $\mu\text{m}$  的重矿物与矿砂分离。

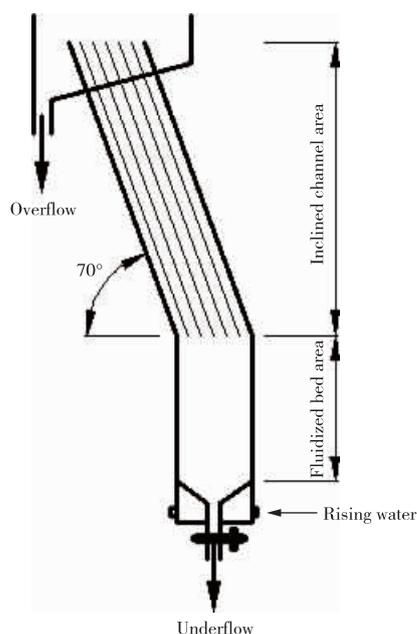


图 4 逆流分选柱 (RC) 工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of reflux classifier (RC)

GALVIN 等<sup>[24]</sup>在研究 RC 中煤的重选分离受粒度影响的机制时发现,斜板间距应该设定为最大粒度的三倍。在后续研究中,GALVIN<sup>[25]</sup>说明了要实现 8 mm 粗煤的分选,必须保证足够的流化水。WALTON 等<sup>[14]</sup>对比了几种不同的板间距,得出了 7 mm 的斜板间距适用于 0.25~2 mm 物料的分选,1.77 mm 的斜板间距适用于 0.038~0.25 mm 的细颗粒的分选。

GALVIN 等<sup>[26-27]</sup>分两个阶段探究了 RC 中斜板间距对细粒级高密度矿物分选的影响。第一阶段所选原料为粒度在 38~300  $\mu\text{m}$  的宽粒级范围的铬铁矿,其中有一些中等密度(相对密度 3.2)的辉石难以剔除,在 6 mm 的斜板间距下,高密度颗粒需要更大上升水流量来运输;3 mm 的斜板间距能产生更高的剪切诱导升力,促进高密度颗粒的分离,同时斜板数量增加意味着沉降面积的增加,有利于高密度颗粒的回流。实验结果显示,3 mm 间距的 RC 获得的底流产品的品位和回收率更高。第二阶段对 3 mm 和 6 mm 两种配置下 RC 的给矿、溢流、底流分别进行水基分离以获得每种物料的密度分配曲线。该研究进一步说明了 3 mm 间距改善分离性能的原因,即使用 3 mm 倾斜通道分选高密度的细颗粒时, $E_p$  值相对恒定,而对于 6 mm 的间距, $E_p$  值随着颗粒粒度的减小而迅速增加。在此基础上,GALVIN 等<sup>[28]</sup>利用 3 mm 间距的倾斜通道从细粒砂矿中回收锆石,锆石回收率在固体通量为 27.0  $\text{t}/(\text{m}^2\text{h})$  时达到了 99%。IVESON 等<sup>[29]</sup>使用两个顺序排列的中试规模的逆流分选柱用于分选 -2 mm 的细煤,利用不同斜板间距对该物料分别进行脱泥和分选。第一台 RC 按密度分离分选出被细粒高灰分的煤泥污染的精煤,第二台起到洗煤的作用,去除细黏土和其他矿物,第一台 RC 的精煤产品从溢流排出并作为第二台 RC 的给料,第一台 RC 为窄级别倾斜板通道 (6 mm),促进颗粒按密度分离,第二台 RC 的板间距较宽 (12 mm),目的是按颗粒粒度分级,限制精煤产品的惯性升力。

HUNTER 等<sup>[30]</sup>用 RC 分选超细铁矿时,经一次分选可得到品位 66.1%、综合回收率 80% 的良好指标,对于 -0.02 mm 的铁矿,回收率也能达到 57%。曾繁森等<sup>[3]</sup>利用自制的逆流分选柱来预富集红土镍矿(图 5),设备结构与 GALVIN 研发的传统 RC 一致,控制给矿矿浆浓度为 10%,给矿流量为 200 mL/min,上升水流量为 250 mL/min,底流与溢流流量之比为 1:8 时,底流中 Cr 的品位 2.5%、回收率 26.7%,起到了预富集的作用。褚浩然等<sup>[18]</sup>使用自制的逆流分选柱预富集粒度为 0.038~0.074 mm 的细粒氧化锆尾矿,底流产品再进行摇床分选,控制最优的操作条件可得到品位为 2.54%、回收率为 73.91% 的锆精矿,并且抛除了近 80% 的尾矿,这种预富集后再摇床的方法要明显优于单独摇床分选指标。

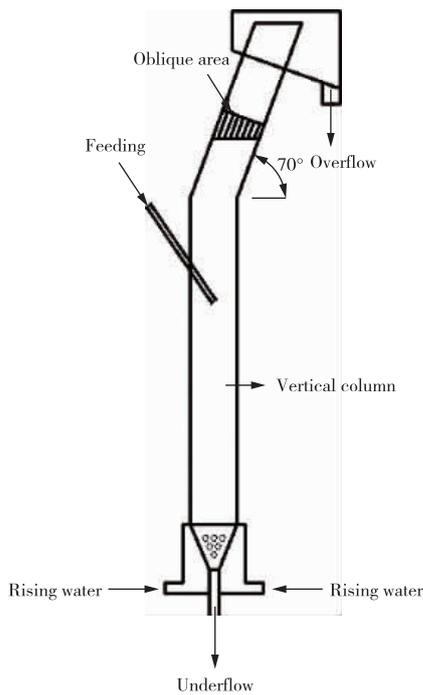


图 5 自制的逆流分选柱工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of self-made reflux classifier

## 2.2 反向逆流分选柱(IRC)

燃煤电厂的烟道气体中有大量的飞灰,也称作粉煤灰,从粉煤灰中分离出空心球颗粒能够创造可观的经济效益。由于空心球颗粒的比重小于 1.0,使用水力沉降的方法就能分离出空心球颗粒,但这种方法需要大面积的沉降池,而且在捕捞水面上的空心球时会携带着其他污染物。

由于 RC 有着很高的分离精度,LI 等<sup>[31]</sup>设想用 RC 从粉煤灰中分离出空心微珠,但空心球在常规的流化床设备分离时会夹带致密的硅泥进入溢流产品中,于是研究者将整个设备颠倒过来,流化床在上方,倾斜沉降板在下方,流化水从顶端给入,如图 6 所示。上方冲洗水能够防止夹带致密硅泥,下方斜板增加沉降面积,避免了空心球颗粒进入沉砂产品中。实验原料使用的是空心球和二氧化硅的混合物,分别进行了实验室规模和半工业试验规模的实验研究,两种规模都实现了相似的分离性能,大多数实验中空心球的品位在 84% 以上,回收率超过了 90%,说明了 IRC 应用于回收空心球颗粒具有较大的潜力。

KIANI 等<sup>[32]</sup>通过试验证实了 IRC 提取空心球的优势:空心球颗粒的富集比将近 149。大量的冲洗水能够冲洗掉致密的二氧化硅,但也会使一部分

细颗粒的空心球向下进入沉砂中,从而导致回收率的降低。KIANI 等<sup>[33]</sup>研究了在不同给料浓度下正方向浮力空心球颗粒的分离性能,给料矿浆浓度在 10%~46% 的范围内时,回收率呈现先上升后下降的趋势,给料浓度 38.1% 时达到峰值,此时回收率为 89.9%,处理能力也比传统流化床要大。在实验室规模的研究基础上,KIANI 等<sup>[34]</sup>使用了横截面积为 0.3 m×0.3 m 的 IRC 进行了半工业试验,结果与实验室实验相符合,得到了良好的分离性能。KIANI 等<sup>[35]</sup>分别使用了三种不同浓度的空心球进行给料,实验发现增加粉煤灰进料中的空心球浓度,正方向浮力颗粒更有可能形成流动结构,并且可以更有效地与负方向浮力粉煤灰颗粒分离。浓度为 1.14% 的空心球颗粒有较高的回收率归因其较大的空心球粒径。GALVIN 等<sup>[36]</sup>用磁铁矿作为重介质,在 IRC 中实现细煤粉与重介质的分离,磁铁矿随流化水和给矿两部分给入 IRC 中,该设备对于较粗的煤颗粒(+0.355 mm)才有良好的分离性能。而粒径小于 0.3 mm 时,由于介质黏度增加,颗粒的分离变慢了,在处理量和分离性能上不如传统的逆流分选柱。

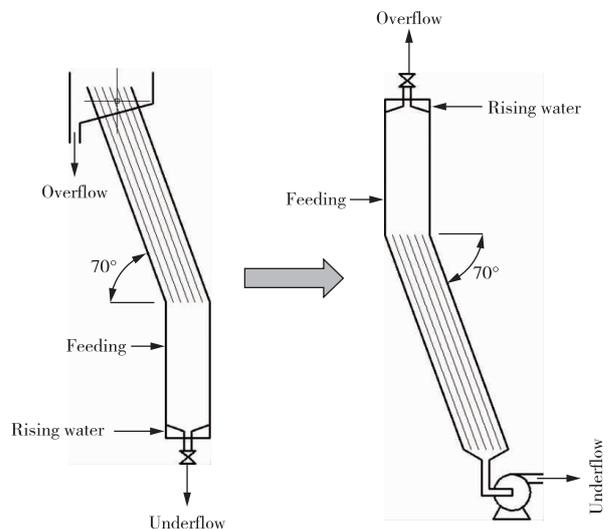


图 6 逆流分选柱和倒置的逆流分选柱

Fig. 6 Working principle diagram of reflux classifier and inverted reflux classifier

## 2.3 搅拌式逆流分选柱(ARC)

CHU 等<sup>[37]</sup>为了进一步提升 RC 的分离性能,对 RC 进行改造,在分选床层底部设置了一个搅拌装置,由于设备结构的限制,整个斜板数量也相应减少,如图 7 所示。搅拌装置能够改变床层特性,促进粗粒的石英颗粒与细粒氧化锆矿的分离,搅拌转速对各项分选指标的影响是显著的,当搅拌转速为

0~200 r/min时, 锑品位缓慢上升, 回收率略微下降, 当转速为 200~350 r/min 时, 品位迅速上升, 回收率会大幅度地下降, 并且抛尾率也随之增大, 分选效率变动不大。低速搅拌下, 床层受到扰动, 粗粒石英进入底流产品中, 分选效果变差。使用该设备在搅拌和无搅拌两种情况下预富集氧化锑矿再进行摇床分选与单独进行摇床分选相比, 搅拌式逆流分选柱能有效提高最终所得精矿的品位及回收率。

褚浩然使用 ARC 对 -0.15+0.023 mm 的氧化锑尾矿矿样做了更加系统的试验研究, 使用响应面法分析各参数的交互作用并进行优化。结果表明给矿浓度显著影响 Sb 的品位, 给矿浓度和上升水流量显著影响回收率, 搅拌转速为 300 r/min、给矿浓度 30%、上升水流量为 12 L/h 时, Sb 精矿品位为 2.29%、回收率 80.73%, 同时抛除了 71.31% 的尾矿。与无机械搅拌作用相比, 分选效率和抛尾率均有所提升。

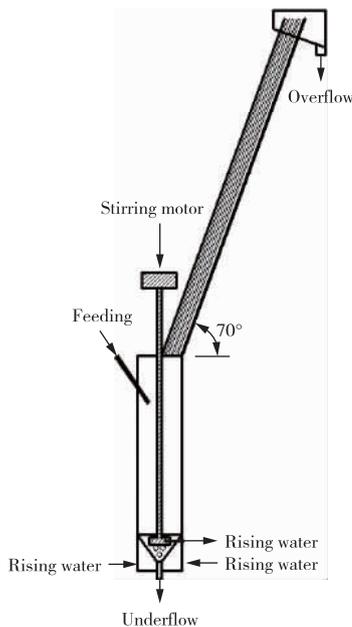


图 7 搅拌式逆流分选柱结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of agitated reflux classifier

### 2.4 用于脱泥的逆流分选柱

以液固化床为基础的分级设备存在流化水将部分细粒有用矿物带入溢流的弊端。于是 GALVIN 等<sup>[38]</sup>使用 RC 对 -0.5 mm 的细铁矿石进行脱泥作业, 结果表明在约 20 t/(m<sup>2</sup>·h) 的固体通量下产生了明显的分离, 而在 40 t/(m<sup>2</sup>·h) 的较高固体通量下, 净液体通量下降, 会产生矿泥夹带进入底流的现象, 因此要在较高的位置通入分流流化水。CARPENTER 等<sup>[39]</sup>用 3D 打印制作了一组间隔为

1 mm 的斜板, 连接到流化床外壳上, 放置在一个 55 倍重力的旋转体系中, 如图 8 所示。并将此设备用于超细粒石英(0~100 μm)的脱泥。实验结果表明, 当给矿体积 36~115 L/min、给矿质量浓度 2%~30% 时, 分离粒度的范围在 5~20 μm, E<sub>p</sub> 值低至 4 μm。

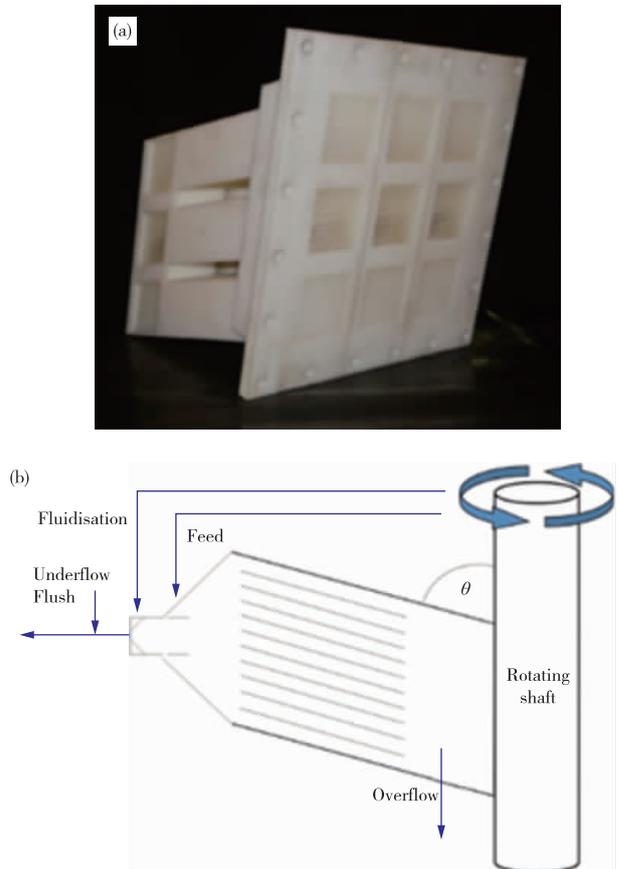


图 8 3D 打印倾斜通道模块(a)和离心逆流分选柱示意图(b)<sup>[40]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of 3D printed inclined channel module(a)and centrifugal reflux classifier(b)<sup>[40]</sup>

综上所述, 常规的逆流分选柱的设备主体都是由流化床区域及斜板区域组成, 具有传统液固化床按颗粒密度差异分选的能力, 主要用途是粒度为 0.25~2 mm 的粗煤泥的分选, 也可以通过调整斜板间距分选较粗或较细的物料。可以看出 RC 在细颗粒及超细颗粒分选中的应用有较大的潜力, 能有效解决包括金属矿在内的难选细颗粒物料的分选, 另一方面也说明了 RC 具有脱泥的能力, 起到了洗矿的作用。IRC 主要适用于分选比重小于 1.0 的物料, 具有较高的分选精度, 轻产物产品的回收率高, 但分选效果受颗粒粒度影响较大。搅拌式逆流分选柱是通过搅拌装置来改善流化床床层, 以提高设备的分选性能。各类逆流分选柱虽然占地面积小、处

理能力大,但因其斜板部分结构复杂,使设备检修步骤繁杂、冲洗不便,导致逆流分选柱工业化进程推进较慢,设备结构的进一步优化亟待解决。

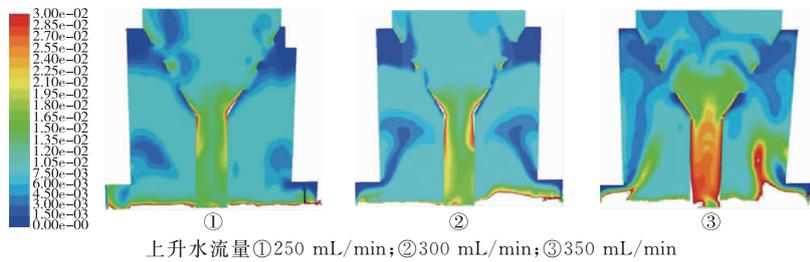
### 3 逆流分选柱的数值模拟

KENNEDY 等<sup>[40]</sup>于 1966 年首次提出了一个分离-分散模型来表征流化床分选机的流体力学,根据他们的观点,流化床中的固体颗粒输送具有两种抵消机制的综合作用,即分离和分散通量。分散是指固体颗粒在液体流化床中的混合趋势,并倾向于在流化过程中均匀分散固体颗粒。如果没有分散,固体颗粒完全分离是可能的。分离-分散模型能够准确预测流化床分选腔内颗粒的运动和分离,该模型已开发用于研究在连续工艺条件下具有不同密度和大小多组分物质的分离。颗粒在容器中的净通量包括分散通量和分离通量,利用相关经验公式可求出颗粒在各个方向上的滑移速度,从而求出其分离通量和分散通量。

SYED 等<sup>[41-43]</sup>使用分离-分散模型进行一系列的研究来模拟逆流分选柱中的分离和分散的行为。数值模拟结果与 GALVIN 等的实验结果相当吻合,

对于粒度为  $-2.0+0.25$  mm 的颗粒,模拟显示  $D_{50}$  和  $E_p$  随尺寸单调递减。该模型还说明了颗粒在 RC 中的分布状况,由于密度较大的组分的存在,RC 底部的悬浮液密度更高,但固体体积分数几乎保持恒定。相反,在进料点以上,固体体积分数随高度增加而降低,而悬浮液密度变得恒定,RC 流化床部分主要由密度接近  $D_{50}$  的颗粒组成。在不同流化速度下,RC 内部的净通量运动表明,颗粒的沉降速度随水力载荷的增加而增加。此外,净通量的抛物线轮廓表明,固体颗粒的速度在中间区域较高,而在斜板通道壁附近,颗粒的速度为负值,这也说明了固体颗粒在斜板内存在回落的现象。

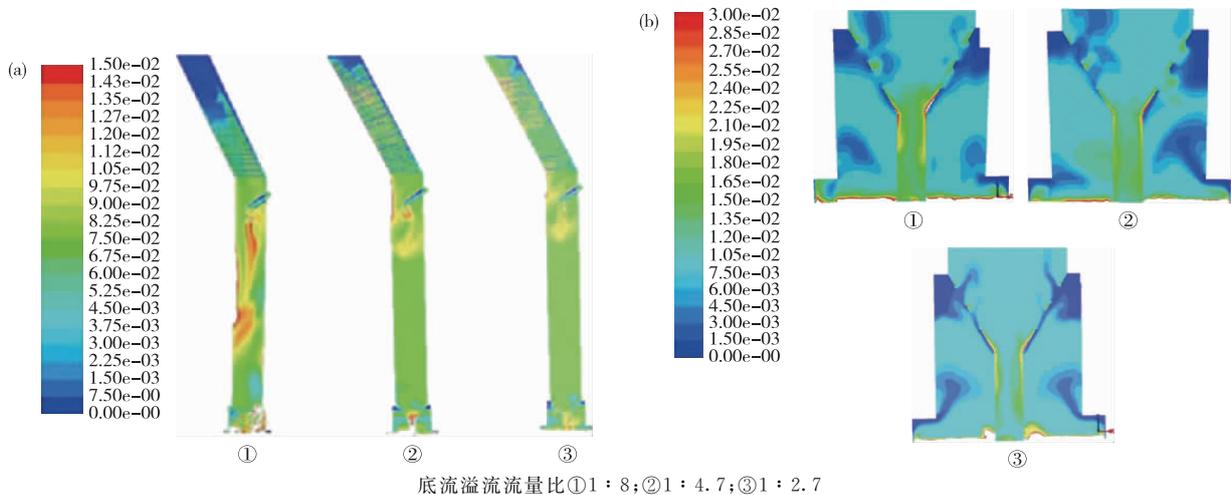
曾繁森等<sup>[3]</sup>在实验基础上对分选柱内部铬铁矿相的分布进行模拟,验证了上升水流量及底流溢流流量比对分选效果的影响。由图 9 可知,当上升水流量为 350 mL/min 时,铬铁矿相在逆流腔内的分布最高,增大上升水流量有利于底流产品中铬铁矿的富集。由图 10 可知,当底流溢流流量比为 1:8,铬铁矿相在底流口处的分布相对较多,底流流量增大会导致柱体内分散程度加,减弱了斜板沉降作用,恶化分选效果。



上升水流量①250 mL/min;②300 mL/min;③350 mL/min

图 9 上升水流量对逆流腔内铬铁矿相分布的影响<sup>[3]</sup>

Fig. 9 Influence of rising water flow on chromite phase distribution in countercurrent cavity<sup>[3]</sup>



底流溢流流量比①1:8;②1:4.7;③1:2.7

图 10 底流溢流流量比对柱体内(a)和逆流腔内(b)铬铁矿相分布的影响<sup>[3]</sup>

Fig. 10 Influence of the ratio of underflow to overflow on chromite phase distribution in the cylinder(a) and countercurrent cavity(b)<sup>[3]</sup>

## 4 结论与展望

1)逆流分选柱的优势在于结合了斜板沉降的优点,通过实验与数值模拟证明了一部分颗粒沉降在斜板上会回流到流化床区域形成二次分选,减少有用矿物的损失。

2)逆流分选柱所适用的粒度范围广泛,斜板间距对不同粒度的物料分选效果的影响较大。RC用于窄粒级物料有较好的分选精度,若分选宽粒级物料可能会损失部分超细粒有用矿物,宽粒级物料应利用RC采取多段分选的方法。

3)液固流化床较为关键的影响因素就是流化床床层的分层效果,搅拌式逆流分选柱就是通过改善流化床床层特性来提高精矿品位,从而提高分选效率。

随着国内有色金属矿原矿性质愈发复杂,若尝试使用RC代替一些传统重选设备,处理某些细粒难选金属矿,或许能够获得良好的分选效果,而且更加经济环保。结合逆流分选柱较高的分选精度与处理细粒物料的优势,可应用于流态化浮选技术,提高对细颗粒的选择性。未来逆流分选柱的研究方向应以斜板区域的优化及流化床床层的改善为主,进一步提升分选效率,使逆流分选柱成为主流的分选设备。

### 参考文献:

- [1] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2014.  
XIE Guangyuan. Mineral processing science [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2014.
- [2] 张宁宁,周长春,刘小凯,等. 干扰床分选机分选低品位铝土矿的可行性研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 82-85.  
ZHANG Ningning, ZHOU Changchun, LIU Xiaokai, et al. Feasibility research on separation of low-grade bauxite with TBS[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(4): 82-85.
- [3] 曾繁森,王毓华,卢东方等. 自制逆流分选柱重选预富集红土镍矿的试验研究及流场模拟[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1): 52-56, 59.  
ZENG Fansen, WANG Yuhua, LU Dongfang, et al. Application of self-made reflux classifier in gravity preconcentration of lateritic nickel and flow field simulation thereof [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(1): 52-56, 59.
- [4] DRUMMOND R, NICOL S, SWANSON A. Teetered bed separator: the Australian experience[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2002, 102(7): 385-392.
- [5] OZCAN O, ERGUN S L. Performance of teetered bed separator for non-coal applications [J]. Separation Science and Technology, 2017, 52(8): 1486-1495.
- [6] 王建斌. 粗煤泥分选机 TBS 在官地矿选煤厂的应用[J]. 水力采煤与管道运输, 2018(3): 102-103, 106.  
WANG Jianbin. Application of the coarse slime teetered-bed separator (TBS) at Guandi Mine's coal preparation plant [J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation, 2018(3): 102-103, 106.
- [7] KOHMUENCH J N, MANKOSA M J, HONAKER R Q, et al. Applications of the CrossFlow teeter-bed separator in the US coal industry[J]. Minerals and Metallurgical processing, 2006, 23(4): 187-195
- [8] 马军二. CFS分选机在磷矿选别中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2016, 45(7): 66-67, 70.  
MA Juner. Application of CrossFlow separator in beneficiation of phosphate ore[J]. Industrial Minerals & Processing, 2016, 45(7): 66-67, 70.
- [9] KUMAR C R, TRIPATHY S K, RAO D S. Characterisation and pre-concentration of chromite values from plant tailings using floatex density separator [J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2009, 8(5): 367-378.
- [10] AVIMANYU D, BISWAJIT S, SURYA P M. Prediction of separation performance of Floatex Density Separator for processing of fine coal particles[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 91(1-2): 41-49.
- [11] BAZIN C, PAYENZO G M, DESNOYERS M, et al. The use of simulation for process diagnosis: application to a gravity separator [J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 104: 11-16.
- [12] GALVIN K P, DOEODCHI E, CALLEN A M, et al. Pilot plant trial of the reflux classifier [J]. Minerals Engineering, 2002, 15(1/2): 19-25.
- [13] NGUYENTRANLAM G, GALVIN K P. Applications of the reflux classifier in solid-liquid operations [J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 73(2/3/4): 83-89.
- [14] WALTON K, ZHOU J, GALVIN K P. Processing of fine particles using closely spaced inclined channels[J]. Advanced Powder Technology, 2010, 21(4): 386-391.

- [15] AMARIEI D, MICHAUD D, PAQUET G, et al. The use of a reflux classifier for iron ores; assessment of fine particles recovery at pilot scale [J]. *Minerals Engineering*, 2014, 62: 66-73.
- [16] 贺长营. 液固流化床中倾斜板的作用机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.  
HE Changying. Study on effect mechanism of parallel inclined plates in liquid-solid fluidized bed[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [17] 李东泽. 液固流化床中倾斜板弱化粒度影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
LI Dongze. Study on weakening size influence of inclined plates in liquid-solid fluidized bed[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [18] 褚浩然, 王毓华, 曾繁森, 等. 逆流分选柱预富集细粒氧化锑尾矿的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(2): 45-48, 52.  
CHU Haoran, WANG Yuhua, ZENG Fansen, et al. Experimental study of reflux classifier for pre-enrichment of fine antimony oxide tailings[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(2): 45-48, 52.
- [19] 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 资源加工学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 115-116.  
WANG Dianzuo, QIU Guanzhou, HU Yuehua. Resource processing science [M]. Beijing: Science Press, 2005: 115-116.
- [20] GALVIN K P, PRATTEN S, NGUYEN G T. A generalized empirical description for particle slip velocities in liquid fluidized beds [J]. *Chemical Engineering Science* 1999, 54(8): 1045-1052.
- [21] LASKOVSKI D, DUNCAN P, STEVENSON P, et al. Segregation of hydraulically suspended particles in inclined channels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(22): 7269-7278.
- [22] ZHOU J, WALTON K, LASKOVSKI D, et al. Enhanced separation of mineral sands using the reflux classifier [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(15): 1573-1579.
- [23] DOROODCHI E, ZHOU J, FLETCHER D F, et al. Particle size classification in a fluidized bed containing parallel inclined plates [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(2): 162-171.
- [24] GALVIN K P, CALLEN S, SPEAR S, et al. Gravity separation of coal in the reflux classifier; new mechanisms for suppressing the effects of particle Size [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2010, 30(2-5): 130-144.
- [25] GALVIN K P, CALLEN A M, SPEAR S. Gravity separation of coarse particles using the reflux classifier [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(4): 339-349.
- [26] GALVIN K P, IVESON S M, ZHOU J, et al. Influence of inclined channel spacing on dense mineral partition in a REFLUX (TM) Classifier. Part 1: continuous steady state [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 146: 106112. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106112.
- [27] GALVIN K P, IVESON S M, ZHOU J, et al. Influence of inclined channel spacing on dense mineral partition in a REFLUX (TM) classifier. Part 2: water based fractionation [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 155: 106442. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106442.
- [28] GALVIN K P, ZHOU J, SUTHERLAND J L, et al. Enhanced recovery of zircon using a REFLUX (TM) classifier with an inclined channel spacing of 3 mm [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 147: 106148. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106148.
- [29] IVESON S M, MASON M, GALVIN K P. Gravity separation and desliming of fine coal: pilot-plant study using reflux classifiers in series [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2014, 34(5): 239-259.
- [30] HUNTER D M, ZHOU J, IVESON S M, et al. Gravity separation of ultra-fine iron ore in the REFLUX (TM) Classifier [J]. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2016, 125(3): 126-131.
- [31] LI J, AGARWAL A, IVESON S M, et al. Recovery and concentration of buoyant cenospheres using an Inverted Reflux Classifier [J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 123: 127-139.
- [32] KIANI A, ZHOU J, GALVIN K P. Upgrading of positively buoyant particles using an Inverted Reflux Classifier [J]. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26(1): 119-125.
- [33] KIANI A, ZHOU J, GALVIN K P. Enhanced recovery and concentration of positively buoyant cenospheres from negatively buoyant fly ash particles using the Inverted Reflux Classifier [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 1-9.
- [34] KIANI A, ZHOU J, GALVIN K P. A pilot scale study of cenosphere recovery and concentration using the Inverted Reflux Classifier [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 79: 17-23.

- [35] KIANI A, ZHOU J, GALVIN K P. Detailed characterisation and separation of fly ash fed to the Inverted Reflux Classifier[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 155: 114-123.
- [36] GALVIN K P, ZHOU J, NETTEN K. Dense medium separation in an inverted fluidised bed system [J]. Minerals Engineering, 2018, 126: 101-104.
- [37] CHU H R, WANG Y H, LU D F, et al. Pre-concentration of fine antimony oxide tailings using an agitated reflux classifier [J]. Powder Technology, 2020, 376: 565-572.
- [38] GALVIN K P, ZHOU J, DICKINSON J E, et al. Desliming of dense minerals in fluidized beds [J]. Minerals Engineering, 2012, 39: 9-18.
- [39] CARPENTER J L, IVESON S M, GALVIN K P. Ultrafine desliming using a REFLUX (TM) classifier subjected to centrifugal G forces [J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 372-380.
- [40] KENNEDY S C, BRETTON R H. Axial dispersion of spheres fluidized with liquids [J]. AIChE J, 1966, 12(1): 24-30.
- [41] SYED N H, DICKINSON J E, CALVIN K P, et al. Continuous, dynamic and steady state simulation of the reflux classifier using a segregation-dispersion model [J]. Minerals Engineering, 2018, 115: 53-67.
- [42] SYED N H, KHAN N A. Simulations of mono-sized solid particles in the Reflux Classifier under continuous process conditions [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2019, 55(3): 631-642.
- [43] SYED N H, GALVIN K P, ATANASIO R M. Application of a 2D segregation-dispersion model to describe binary and multi-component size classification in a Reflux Classifier [J]. Minerals Engineering, 2019, 133: 80-90.

(编辑 汪东芳)