

孙铭阳, 韦鲁滨, 李阳, 等. 液固流化床分选机理研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(2): 179-186. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.02.011
Sun Mingyang, Wei Lubin, Li Yang, et al. Research on separation mechanism of liquid-solid fluidized bed separator[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(2): 179-186. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.02.011

液固流化床分选机理研究

孙铭阳^{1,2}, 韦鲁滨², 李阳³, 薛宏超², 于传兵¹

1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083;
3. 金川集团股份有限公司, 甘肃金昌 737100

摘要:本文采用理论结合试验的方法探究了液固流化床分选机理。得到了液固流化床分选机内自生介质流化床层性质。以不同粒度石英砂为自生介质颗粒,研究了自生介质粒度对分选效果的影响。研究发现,自生介质粒度越细,能实现的分选效果越好。其中,0.15~0.20 mm 石英砂床层的最小 E_p 值为 0.053;0.25~0.45 mm 石英砂床层能达到的最小 E_p 值增大到 0.095。通过分析入料粒度分布和操作条件对分选效率的影响,认为控制入料粒度应从入料粒度范围和入料粒度下限两方面考虑。在某一床层压力设定值下,保持较小的上升水流速率,可减小粒度和形状对颗粒运动的影响,有利于床层维持较高的颗粒体积分数和有效密度,可提高分选效果。

关键词:液固流化床分选机;自生介质;干扰沉降;分选机理;颗粒运动方程

中图分类号:TD 91

文献标志码:A

文章编号:2096-2193-(2019)02-0179-08

Research on separation mechanism of liquid-solid fluidized bed separator

Sun Mingyang^{1,2}, Wei Lubin², Li Yang³, Xue Hongchao², Yu Chuanbing¹

1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
3. Jinchuan Group Company Limited, Jinchang Gansu 737100, China

Abstract: Separation mechanism of liquid-solid fluidized bed separator (LSFBS) was studied by using theoretical analysis and experimental researches. Characteristics of autogenous medium fluidized bed in LSFBS were analyzed and the influence of autogenous medium size on the separation performance of LSFBS was studied, taking quartz particles of various sizes as autogenous medium. According to the separation results, a better segregation could be achieved by using finer autogenous medium. Particularly, the optimum of E_p value of 0.15~0.2 mm quartz was 0.053 while that of 0.25~0.45 mm quartz increased to 0.095. Finally, the influence of size distribution of feed and operating conditions on the separation efficiency was analyzed. Reducing feed size range and enlarging lower-size limit of feed could improve the device performance. Under a certain bed pressure, a smaller upward current velocity could generate a

收稿日期:2018-03-18

基金项目:国家自然科学基金(51574252)

作者简介:孙铭阳(1987—),男,山东潍坊人,博士,主要从事流态化分选技术、磨矿设备与工艺的研究工作。Tel: 18813151339, E-mail: mingyang_sun@yahoo.com

通信作者:韦鲁滨(1962—),男,江苏扬州人,教授,主要从事矿物加工理论、工艺与设备的教学与研究。Tel: 18611083652, E-mail: wlb@cumtb.edu.cn

higher solid volume fraction and bed effective density. A smaller upward current velocity could also decrease the influence of size and shape on the movement of particles. All of these changes could induce a better separation performance for LSFBS.

Key words: liquid-solid fluidized bed; autogenous medium; hindered settling; separation mechanism; particles' motion equation

流态化技术广泛应用于化工、选矿、冶金和环境工程等行业^[1-4]。在选矿领域,学者们对气固和液固流化床分选技术原理与设备进行了大量研究^[5-6]。其中,液固流化床分选机(liquid-solid fluidized bed separator, LSFBS)内形成的是自生介质液固流化床层,最早用于分级作业,在20世纪80年代开始用于粗煤泥分选。目前,液固流化床分选机已在粗煤泥分选^[7-8]、废旧电路板回收^[9-10]以及金属矿粗选、分级和尾矿回收^[11-12]等作业中得到大量应用。近年来,LSFBS还在废旧锂电池电极材料回收领域得到了应用^[13]。

本研究对LSFBS内自生介质床层性质进行分析,并通过试验和理论来探究自生介质粒度、入料粒度分布特性和操作条件对分选效果的影响。研

究结果可为实际生产中的LSFBS操作参数优化提供思路,同时本试验方法可为相关流化床层性质及其分选特性研究提供参考。

1 床层性质及其内部颗粒干扰沉降运动分析

LSFBS内形成的是自生密相液固流化床层,床层内部入料颗粒在上升水流作用下做干扰沉降运动。因此,了解自生介质床层特点和颗粒干扰沉降运动规律,对于理解液固流化床分选原理至关重要。

1.1 自生介质流化床层特点

LSFBS流化床层由部分入料颗粒组成。根据Geldart分类法^[14],LSFBS入料粒度范围内的矿物颗粒分类见表1。

表1 根据Geldart分类法对0.10~2.00 mm矿物颗粒分类
Tab.1 Classification of mineral particles of 0.10~2.00 mm by using Geldart method

密度/(g·cm ⁻³)	粒度/mm					
	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00
1.25	A	A	A	A	B	B
1.50	A	A	B	B	B	D
2.00	A	B	B	B	D	D
2.50	A	B	B	B	D	D
3.00	A	B	B	B	D	D
3.50	B	B	B	D	D	D
4.00	B	B	B	D	D	D
4.50	B	B	B	D	D	D
5.00	B	B	D	D	D	D
6.00	B	B	D	D	D	D

由表1可知,LSFBS内颗粒以B类和D类颗粒为主。在气固流化床内,该类颗粒主要形成聚式流化床,床层受到气泡显著的扰动影响。对于液固分选流化床,颗粒密度与水介质密度属于相同量级,与气固流化床相比,流化床层分布比较均匀,形成的为散式流化床。但是,由于入料颗粒粒度和密度分布较宽,因此液固分选流化床不是经典意义上的散式流化床。其中,干扰沉降末速与 D_{50} 或 δ_{50} 相近的流化颗粒进入底流或溢流的概率相近;轻细颗粒随溢流排出,粗重颗粒在排矿口附近聚集并由底

流口排出;床层内减少的颗粒不断由入料补充。如图1所示。

颗粒进入液固分选流化床后,在上升水流作用下做变加速运动,自始至终颗粒所受惯性力、质量力和流体作用力平衡。假设流体对颗粒的作用力只有流体阻力 F_D 、浮力 F_B 、附加质量力 F_V ,则有

$$m_p a = G - (F_D + F_B + F_V) \quad (1)$$

在颗粒逐渐达到沉降末速的过程中,惯性力逐渐减小,所受重力和浮力不变,附加质量力逐渐减小,因而式(1)中颗粒所受流体阻力逐渐增大。流

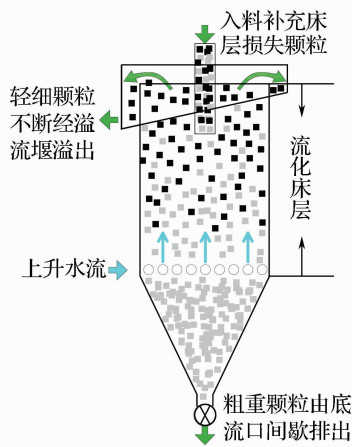


图1 液固化床分选原理示意图

Fig. 1 Schematic of separation process in LSFBS

体对颗粒施加了作用力后,颗粒对周围流体微元存在反作用力。由式(1)可知,此过程中流体作用力之和增大,意味着颗粒对流体的作用力也呈增大趋势。入选颗粒一般在主分选区内可达到干扰沉降末速,根据颗粒受力平衡,此时有

$$\frac{1}{2}C_D A \rho_F (u_F - u_p)^2 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 (\rho_p - \rho_F) g \quad (2)$$

式中, ρ_p 、 ρ_F 分别为颗粒和流体的密度, kg/m^3 ; C_D 为阻力系数,是颗粒雷诺数 Re_p 的函数; u_F 和 u_p 分别为流体和颗粒的速率, m/s 。

颗粒通过与流体作用,将自身有效重力 G_{eff} “转移”到流体相,导致相应位置的床层压力增大,这种现象表现为床层有效密度增大。假设密度 ρ_p 、粒径 d_p 颗粒的体积分数为 φ ,圆柱体容器的半径为 R 、高度为 H (H 足够大,保证所有颗粒能达到沉降末速),则该组分颗粒“转移”到流体相的有效重力为

$$G_{\text{eff}}^{\text{total}} = \pi R^2 H \varphi (\rho_p - \rho_F) g \quad (3)$$

此时,流体相底部压强增加了 $H \varphi (\rho_p - \rho_F) g$,根据压强 $p = \rho_{\text{eff}} H g$,得到流体相有效密度为

$$\rho_{\text{eff}} H g = \rho_F H g + H \varphi (\rho_p - \rho_F) g \quad (4)$$

整理得

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_F (1 - \varphi) + \varphi \rho_p \quad (5)$$

对于入选的粗煤泥物料,其粒度和密度范围较宽。将其粒度和密度分别近似为 m 和 n 个组分,待所有颗粒达到沉降末速后,液固悬浮液的平均有效密度为

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_F \left(1 - \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \right) + \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \rho_{p_{ij}} \quad (6)$$

将 $p = \rho_{\text{eff}} H g$ 代入式(6),得

$$p = H g \left[\rho_F \left(1 - \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \right) + \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \rho_{p_{ij}} \right] \quad (7)$$

由式(6)、式(7)可以看出,液固化床层密度与该位置床层压力具有对应关系。假设压力测量点以上位置液固悬浮液均一,对式(7)两侧求 H 的偏微分,得

$$\frac{\partial p}{\partial H} = g \left[\rho_F \left(1 - \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \right) + \sum_{ij}^{mn} \varphi_{ij} \rho_{p_{ij}} \right] \quad (8)$$

由式(8)可知,液固化床内某一位置的压强,是该位置以上区域内各组分颗粒体积分数和颗粒密度的函数。

令 φ_s 为固体颗粒的总体积分数, ρ_s 为所有颗粒的平均密度,则有

$$\begin{aligned} \varphi_s &= \sum_j^n \varphi_j \\ \rho_s &= \frac{\sum_j^n \varphi_j \rho_j}{\sum_j^n \varphi_j} \end{aligned} \quad (9)$$

将其代入式(6),整理得

$$\varphi_s = \frac{\rho_{\text{eff}} - \rho_F}{\rho_s - \rho_F} \quad (10)$$

则液固化床层平均孔隙率可表示为

$$\varepsilon_{\text{avg}} = \frac{\rho_s - \rho_{\text{eff}}}{\rho_s - \rho_F} \quad (11)$$

1.2 床层内颗粒干扰沉降运动

由于物料连续给入,流体分布器以上区域集聚的颗粒逐渐增多。在上升水流流化作用下,这些颗粒形成自生密相液固化床层。由于干扰沉降速度差异,颗粒在自生介质床层内沿轴向分层。粗重颗粒由于干扰沉降末速大,趋于低轴向位置;轻细颗粒则趋于高轴向位置。通过调节床层压力或上升水流速率来控制不同粒度、密度颗粒所形成床层的厚度和轴向位置,可实现对溢流产品密度或粒度组成的控制。

图2给出了干扰沉降和自由沉降条件下(颗粒体积分数为20%,干扰沉降末速按 Galvin 公式^[15]求得),粗煤泥颗粒达到沉降末速时的特征雷诺数分布情况。

由图2看出,自由沉降和干扰沉降末速条件下,颗粒雷诺数范围都处于过渡区;干扰沉降时,由于流体有效密度和表观黏度发生了明显变化,颗粒干扰沉降末速大大降低而导致相应颗粒雷诺数小于自由沉降。

根据颗粒自由沉降末速公式^[16],可求得三种颗粒流态下(斯托克斯区、阿连区和牛顿区)P1、P2两个等沉颗粒的等沉比。

(1) 斯托克斯区:

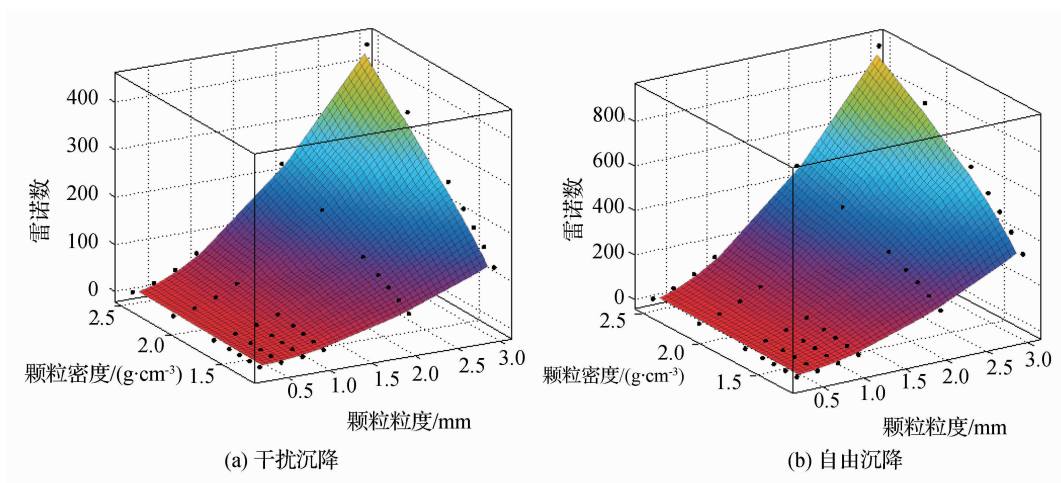


图2 干扰沉降和自由沉降末速下颗粒雷诺数比较

Fig. 2 Comparison of particles Reynolds number between hindered and free settling

$$e_0 = \frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \left(\frac{\rho_{p2} - \rho_F}{\rho_{p1} - \rho_F} \right)^{1/2} \quad (12)$$

(2) 阿连区:

$$e_0 = \frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \left(\frac{\rho_{p2} - \rho_F}{\rho_{p1} - \rho_F} \right)^{2/3} \quad (13)$$

(3) 牛顿区:

$$e_0 = \frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \frac{\rho_{p2} - \rho_F}{\rho_{p1} - \rho_F} \quad (14)$$

将自生介质流化床层看作一种准流体,用其有效密度替换以上三式中水介质密度,则以上三式可近似描述自生介质流化床层内颗粒干扰沉降时的等沉现象。

令 $\frac{\rho_{p2} - \rho_F}{\rho_{p1} - \rho_F} = \varepsilon$, ε 在重力选矿中是一个重要的参数。当液固流化床层有效密度一定时,令 $\rho_{p2} = \rho_{p1} + x$, $a = \rho_{p1} - \rho_F$, 得 $\varepsilon = (x + a) / a$, 则等沉比可以简化为以下函数形式:

$$e_0 = \left(\frac{x + a}{a} \right)^c \quad (c > 0, a > 0, x > 0) \quad (15)$$

式中, c 为颗粒雷诺数的函数,与颗粒和流体间相对速率大小有关。

图3(a)给出了等沉比 e_0 与颗粒密度差 x 和不同分选介质密度的函数关系。容易看出,当分选介质一定时,等沉比为两颗粒密度差的增函数,即两颗粒密度相差越大,允许入料粒级范围越宽;当两颗粒密度一定时,等沉比随分选介质密度增大亦逐渐增大,两个已知密度颗粒越容易分离。这也是重介分选比水介分选效率高的原因。LSFBS 内形成的是自生介质液固流化床,分选效果好坏很大程度上取决于自生介质质量(粒度和密度)。

当分选介质一定且两颗粒密度一定时(即 ε 一定),等沉比 e_0 与 c 的函数关系为

$$e_0 = \varepsilon^c \quad (\varepsilon > 1) \quad (16)$$

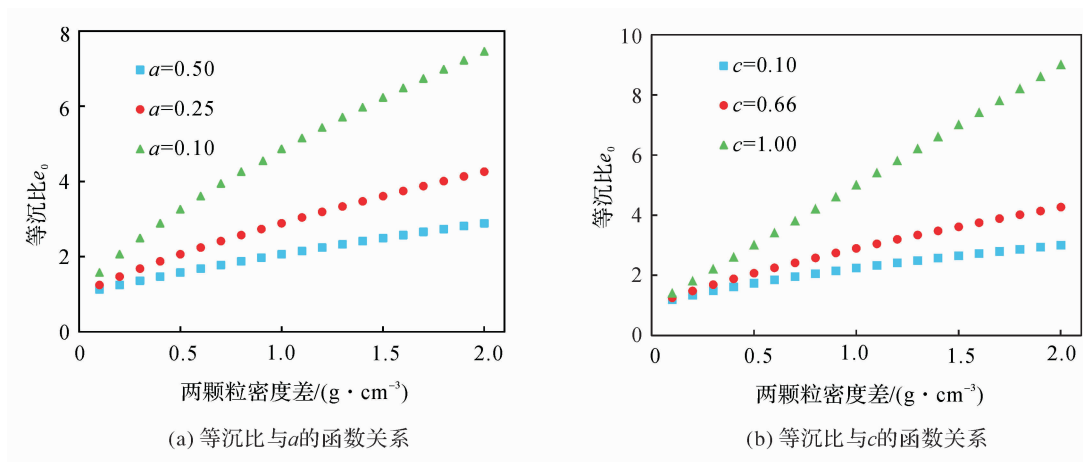


图3 等沉比随两颗粒密度差、介质密度及流态变化规律

Fig. 3 Influence of density difference between two particles, medium density and flow regime on equal settling factor

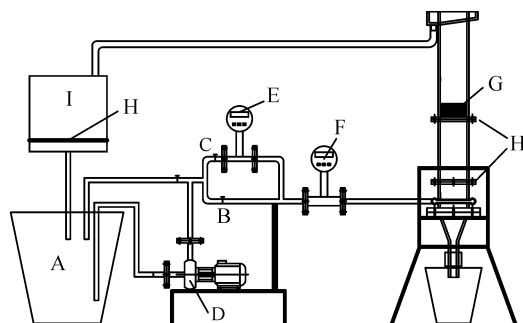
图3(b)给出了等沉比随 c 变化趋势。由图可以看出,颗粒雷诺数越大,即 c 越大,等沉比也越大。分选介质一定时,除颗粒密度外,决定颗粒雷诺数的因素有颗粒直径、颗粒与介质的相对运动速率。一般来说,在决定分选效果的主方向上(对于LSFBS,颗粒在轴向向上的运动直接决定颗粒进入溢流或底流,因此轴向为主分选方向),密度一定时,颗粒粒度越大,颗粒与流体介质的相对速率也越大,颗粒雷诺数也越大,进而导致等沉比也变大,不同密度颗粒就越易分离。因此,重选过程中,可选性或解离程度相同时,入料粒度越粗,分选精度一般越高。对于LSFBS,当操作条件控制不好时,例如颗粒体积分数和床层有效密度低时,虽然上升水流速率一般较大,但仍然会导致部分低密度粗粒错配到底流。

2 自生介质粒度对分选效果的影响

如上所述,LSFBS分选效果受自生介质性质影响很大。自生介质“质量”越好,待选颗粒进入自生介质流化床层后受到的按密度差异分离趋势越强,错配越少。

2.1 试验装置和材料

搭建如图4所示的颗粒流化试验系统,来探究自生介质粒度对分选结果的影响。上升水流由平行管流体分布器射出后,沿柱体向上流动并在径向逐渐均匀分布,经第一层0.045 mm筛网后,流体轴向速率基本实现均匀分布。流化颗粒置于第二层0.045 mm筛网上,筛网孔径远小于流化颗粒直径,可以保证底层颗粒受到均匀向上的流体曳力,且不会沿近壁面区漏下。流化床溢流给到过滤箱,过滤箱内亦布置一块0.045 mm筛网,溢流经筛网过滤后返回至清水池,从而实现带出颗粒的回收和



A—清水池;B—主上升水流阀;C—微调上升水流阀;
D—离心泵;E—小量程涡轮流量计;F—大量程涡轮流量计;
G—流化颗粒;H—0.045 mm筛网;I—过滤箱

图4 液固化床试验系统

Fig. 4 Experiment system for liquid-solid fluidization

流化水的循环利用。

分别选择0.15~0.20 mm、0.20~0.25 mm和0.25~0.45 mm石英砂颗粒作为自生介质。配置密度组成如表2所示的3种0.50~1.00 mm粗煤泥颗粒各80 g作为待选煤样,3种待选煤样的密度组成尽量一致,以消除入料可选性对分选结果可比性的影响。

表2 3种煤样密度组成

Tab. 2 Float-and-sink analysis of the three coal samples

密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	平均密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	煤样一/%	煤样二/%	煤样三/%
<1.3	1.25	43.69	43.02	42.56
1.3~1.4	1.35	13.54	13.87	13.77
1.4~1.5	1.45	10.64	11.31	11.71
1.5~1.6	1.55	5.20	5.29	4.92
1.6~1.8	1.70	5.27	5.51	6.37
>1.8	2.20	21.67	21.00	20.67
合计	—	100.00	100.00	100.00

2.2 不同粒度自生介质的分选结果

首先利用上升水流将一定粒度石英砂颗粒流化,使床层内石英砂颗粒分布均匀,停止上升水流;然后加入待选煤样,并使其均匀摊平在石英砂料层上,如图5的初始料层所示。

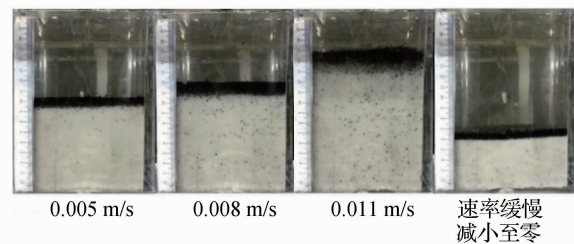


图5 入料颗粒在石英砂-水流化床层内分离过程

Fig. 5 Segregation behavior of feed particles in the quartz-water fluidized bed

试验过程中逐渐增大上升水流速率,上升水流最大至石英砂床层高度为初始时刻的2.5倍,然后缓慢减小上升水流速率至床层固定;停止离心泵,吸出固定床层上部绝大部分清液;打开底流阀,使床层内其余水分透过筛网渗出;取出固定床层上部1 cm床层,其中的煤粒作为精煤,剩余床层内煤粒作为尾煤。图5为0.20~0.25 mm石英砂颗粒作为自生介质时床层随上升水流变化情况。可以看出,随上升水流增大,浮物(低密度颗粒)床层与石英砂床层界面越来越模糊。上升水流缓慢减小过程中,石英砂床层与浮物料层界面逐渐清晰,入料

颗粒按密度差异的分层趋势增强。

用 0.5 mm 的筛子将产品和介质颗粒分离,产品烘干后进行小浮沉试验,获得产品密度组成,相应分配曲线如图 6 所示。由图 6 发现,随着自生介质粒度增大,流化床层所能达到的最小 E_p 值也逐渐增大,其中 0.15~0.20 mm 和 0.25~0.45 mm 石英砂床层能达到的最小 E_p 值分别为 0.053 g/cm^3 和 0.095 g/cm^3 。还可发现,分选密度随介质粒度增大也呈增大趋势;0.25~0.45 mm 石英砂床层对应的分选密度达到 1.97 g/cm^3 ,如此高的分选密度已不适于粗煤泥分选(溢流中将含有大量细粒矸石)。

通过以上分析可知,密度相同时,自生介质粒度越小,流化床层能达到的最佳分选效果越好。这意味着增加流化床层内高密度细粒介质(不可过细)含量,一定程度上可提高分选效果^[17]。

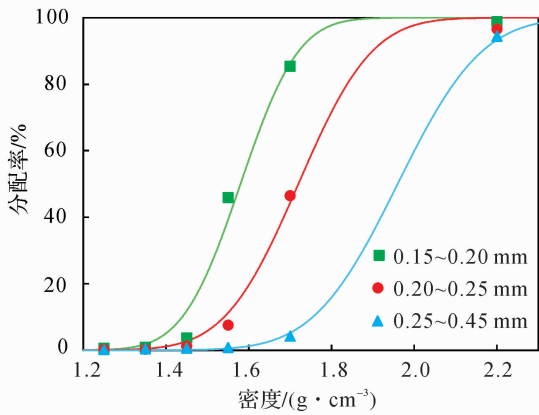


图 6 三种粒度石英砂对应分配曲线

Fig. 6 Partition curves corresponding to three quartz particles of different size

3 入料特性和操作条件对分选效果的影响

3.1 控制入料粒度分布的必要性

LSFBS 借助颗粒在自生密相液固流化床层内干扰沉降速率实现矿粒按密度分离。影响颗粒干扰沉降速率的因素较多,包括颗粒密度、粒度和形状、介质密度、黏度和流场特点等^[16,18-19]。为提高 LSFBS 分选效果,物料进入分选机之前往往要进行分级处理。

由以上分析可知,LSFBS 内颗粒雷诺数主要位于过渡区,由阿连区计算公式得过渡区两等沉颗粒等沉比如式(13)所示。

入料颗粒粒度分布越集中,两颗粒直径之比接近 1 的概率就越大,即式(13)左端小于右端的可能性就越大,也即颗粒间粒度差异对整个分选过程

的影响越小,不同密度颗粒的错配率就越低,体现在分配曲线上即分配曲线越陡峭, E_p 值越小。

当颗粒只受流体阻力、附加质量和有效重力作用时,其动力学方程如式(1)所示。用床层表观黏度和有效密度表示式(1)中的相应物理量;假设颗粒为球形,则颗粒所受虚拟质量力可近似为其排开的流体以相同加速度运动时惯性力的一半。LSFBS 表观上升水流速率为 u_F ,则颗粒间隙的平均上升水流速率为 $u_F/(1-\varphi)$ 。将式(1)表示成单位质量颗粒运动方程,并整理得

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{\rho_p - \rho_{\text{eff}}}{\rho_p} g - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho_p d_p^2} \frac{3C_D Re_p}{4} \left(u_p - \frac{u_F}{1-\varphi} \right) - \frac{1}{2} \frac{\rho_{\text{eff}}}{\rho_p} \frac{du_p}{dt} \quad (17)$$

将过渡区阿连阻力系数代入式(17),附加质量力移到方程左侧,并表示成单位体积颗粒受力形式,得^[20]

$$(2\rho_p + \rho_{\text{eff}}) \frac{du_p}{dt} = 2(\rho_p - \rho_{\text{eff}}) g - \frac{39(\mu_{\text{eff}} \rho_{\text{eff}})^{1/2}}{2d_p^{3/2}} \left(u_p - \frac{u_F}{1-\varphi} \right)^{3/2} \quad (18)$$

式(18)右端第一项表示颗粒密度对其运动的影响,第二项表示颗粒粒度对其运动的影响。由第二项可知:在阿连区,随着颗粒粒度的减小,颗粒比表面积逐渐增大,流体阻力对颗粒运动的影响也越来越大,颗粒密度对其运动的影响越来越小,此时不同密度颗粒在产品中的错配将增大, E_p 值增大。因此,为在应用中维持较好的分选效果,要对 LSFBS 入料粒度范围(入料粒度上、下限之比)和入料粒度下限进行严格控制。

3.2 操作条件对分选效果的影响

当底流排放过频繁导致床层压力太小时,入料中大量颗粒进入到锥体段。此时分选密度偏低,当分选密度处于 1.3 g/cm^3 左右时,对于一般的粗煤泥入料, $\delta \pm 0.1$ 含量相当高。在该密度下分选必然导致错配颗粒数量较多,尤其一些低密度粗粒容易损失在底流中;维持給料速率和上升水流速率不变,逐渐减少底流排放频率,则床层压力提高,实际分选密度增大。对于一般粗煤泥入料,分选密度在由 1.3 g/cm^3 增大到 1.5 g/cm^3 过程中, $\delta \pm 0.1$ 含量迅速减少,错配颗粒的绝对量也减少;床层压力设定值继续增大,虽然可以进一步减少粗粒精煤的损失,但部分高灰细泥也会进入溢流而污染精煤。

维持給料速率和底流排放频率不变,上升水流在由小到大变化过程中,床层空隙率逐渐增大。该

过程中,虽然床层平均密度随床层空隙率的增大而降低,但分选密度却提高了,这是由颗粒所受流体曳力增大引起的。由于流体曳力与颗粒形状和大小相关,因此该力的增大间接降低了颗粒密度对颗粒群分层的影响,进而导致液固分选流化床按密度分离效率的降低。本文2.2节中试验结果以及对式(18)的分析也证明了上升水流增大会导致分选效果降低。

由以上分析可以得出,自生密相液固流化床层的分选作用是在流化床层压力梯度和上升水流曳力共同作用下形成的。上升水流增大在直接导致液固流化床层有效密度和固体物体积分数降低的同时,增大了颗粒粒度和形状对颗粒分离过程的影响。因此,在分选过程中,应根据床层压力设定值,将上升水流大小维持在较低范围内,有利于颗粒按密度差异分层。

需要注意的是,LSFBS自生介质床层有效密度不是实际分选密度。此外,本文在推导单位质量或单位体积颗粒受力时,用床层有效密度来计算颗粒在床层内所受浮力,是一种近似处理方式。原因如下:①分选是在上升水流和床层压力共同作用下实现的,不是在静止的重液内进行的,颗粒的上浮与下沉并不严格遵循阿基米德原理,因此床层有效密度不是实际分选密度。②LSFBS自生介质床层由部分入料颗粒组成,其粒度与待分选颗粒相差不大,因而LSFBS自生介质床层的分选作用不像重介悬浮液那样有效,这也是自生介质分选设备的通病。

4 结论

本文对LSFBS自生介质床层性质以及自生介质粒度对LSFBS分选效果的影响进行了研究。从入料粒度分布和操作条件(床层压力和上升水流速率)角度分析了优化LSFBS分选效果的方法。主要结论如下:

(1) LSFBS内颗粒沉降运动雷诺数主要处于阿连区。发现床层有效密度越大,等沉比也越大,两颗粒越易分离;颗粒密度一定时,粒度越粗,干扰沉降末速和颗粒雷诺数越大, c 值也越大,两颗粒越易分离。

(2) LSFBS分选效果受自生介质粒度影响较大。在本研究试验条件下,当密度相同时,自生介质粒度越细,流化床层所能达到的最佳分选效果越好。生产中应调节操作参数,使主分选区内高密度细粒自生介质含量尽可能增大,有利于维持较好的

分选效果。

(3) 当上升水流增大时,分选密度的提高是由颗粒所受流体阻力增大引起的,而流体阻力受颗粒粒度和形状影响显著,因此上升水流速率较大不利于分选按颗粒密度差异进行。在LSFBS床层压力设定值一定时,应将上升水流速率尽量维持在较小值。

(4) 入料粒度分布范围较宽时,颗粒等沉现象大量出现;颗粒粒度越细,单位体积颗粒所受流体阻力与其所受有效重力比值越大,这两种情况都不利于颗粒按密度差异分离。因此,应从入料粒度范围和入料粒度下限两方面控制入料粒度分布。

参考文献

- [1] Epstein N. Teetering[J]. Powder Technology, 2005, 151(1/3):2-14.
- [2] Yang W C. Handbook of fluidization and fluid-particle systems[J]. China Particuology, 2003, 1(3):137-137.
- [3] 骆振福. 流态化分选理论[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2002.
- [4] 任才富,王栋民,郑大鹏,等. 掺超细循环流化床粉煤灰的水泥性能试验研究[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(1):96-102.
Ren Caifu, Wang Dongmin, Zheng Dapeng, et al. Study on properties of cement mixed with ultrafine circulating fluidized bed fly ash[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(1):96-102.
- [5] 骆振福,陈清如. 气固流态化技术在矿物分选的应用[J]. 金属矿山, 1999(7):28-31.
Luo Zhenfu, Chen Qingru. Application of gas-solid fluidization technology in mineral processing [J]. Metal Mine, 1999(7):28-31.
- [6] Honaker R Q, Mondal K. Dynamic modeling of fine coal separations in a hindered-bed classifier[J]. Coal Preparation, 2000, 21(2):211-232.
- [7] Kim B H. Modeling of hindered-settling column separations [D]. Borough of State College: Department of Energy and Geo-Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, 2003.
- [8] Xia Y. Numerical simulation of fine particle separation in hindered-settling bed separators by computational fluid dynamics[D]. Morgantown: College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2004.
- [9] 舒长河,张小平,梁翊翊. 液-固流化床回收印刷线路板中金属的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(5):902-906.
Shu Changhe, Zhang Xiaoping, Liang Xuanxuan. Study

- on recovery of metals from printed circuit board using a solid-liquid fluidized bed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 902-906.
- [10] 段晨龙, 赵跃民, 伍玲玲, 等. 充气式液固流化床分选废弃电路板的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 915-919.
Duan Chenlong, Zhao Yuemin, Wu Lingling, et al. Research on separation of waste printed circuit boards by an inflatable liquid-solid fluidized bed[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(5): 915-919.
- [11] Kumar C R, Mohanan S, Tripathy S K, et al. Prediction of process input interactions of floatex density separator performance for separating medium density particles [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100(3/4): 136-141.
- [12] Tripathy S K, Murthy Y R, Singh V. Characterisation and separation studies of Indian chromite beneficiation plant tailing[J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 122: 47-53.
- [13] 王魁琰, 刘金山, 孙宁磊. 固固分离装置: 中国, CN101837318B[P]. 2010-04-23.
- [14] Geldart D. The effect of particle size and size distribution on the behavior of gas fluidized beds [J]. Powder Technology, 1972, 6(4): 201-215.
- [15] Galvin K P, Pratten S, Nguyen T L G. A generalized empirical description for particle slip velocities in liquid fluidized beds [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(8): 1045-1052.
- [16] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [17] Galvin K P, Pratten S J, Nicol S K. Dense medium separation using a teetered bed separator [J]. Minerals Engineering, 1999, 12(9): 1059-1081.
- [18] 卢寿慈. 矿物颗粒分选工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [19] 王淀佐. 资源加工学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] Wei L, Sun M. Numerical studies of the influence of particles' size distribution characteristics on the gravity separation performance of liquid-solid fluidized bed separator [J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157: 111-119.

(责任编辑: 李朝雯)