

介质密度对液固流化床粗煤泥分选效果的影响

张旭波 郭永华 张文军 胡卫新 史冰森 王见明

(中国矿业大学 化工学院 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对工业上液固流化床粗煤泥分选机有效分选粒级窄,对难选煤分选效率低的缺点,开展了介质密度对液固流化床分选效果的影响研究,提出将液固流化床上升清水流改为重介质流。分别在2种上升流流量条件下对3~0.25 mm粗煤泥进行不同上升流流速的液固流化床粗煤泥分选试验。结果表明,液固流化床分选机采用重介质流分选时可将粗煤泥有效分选粒度范围拓宽至3~0.25 mm,可能偏差控制在0.05~0.10 g/cm³,在较高上升流流速下精煤灰分可降至9.85%,当要求精煤灰分不大于11%时,精煤产率提高10.21%。

关键词: 粗煤泥分选;液固流化床;介质密度;干扰沉降等沉比

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2014)08-0117-04

Study on Medium Density Affected to Coarse Slime Separation Effect of Liquid - Solid Fluidized Bed

ZHANG Xu-bo, GUO Yong-hua, ZHANG Wen-jun, HU Wei-xin, SHI Bing-sen, WANG Jian-ming

(School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to a narrow effective separation particle size of a coarse slime separator in the industrial liquid - solid fluidized bed and a low separation efficiency to difficult washed coal, a theoretical study on the medium density affected to the separation effect of liquid - solid fluidized bed was conducted and upflow clean water flow in the liquid - solid fluidized bed was replaced with heavy medium flow. Under the two upflow conditions individually, the coarse slime separation experiments of the liquid - solid fluidized bed with different flow rate were conducted on the coarse slime with particle size of 3 ~ 0.25 mm. The results showed when heavy medium flow was applied to the separation, the separator would effectively have an effective separated particle size scope of the coarse slime expand to 3 ~ 0.25 mm and a deviation value possibly would be 0.05 ~ 0.10 g/cm³. Under a high flow rate, the ash content of the clean coal could be reduced to 9.85%. When the ash contents of the clean coal was required not over 11%, the clean coal production rate would be improved by 10.21%.

Key words: coarse slime separation; liquid - solid fluidized bed; medium density; equal settlement ratio of interference settling

0 引言

近年来,液固流化床粗煤泥分选机由于其低密度分选效率高、分选密度可控可调、无运动部件、可实现完全自动控制、单台处理能力大等优点在粗煤泥分选领域获得广泛应用^[1],有效降低了粗煤泥灰分,提高了总精煤产率,但是在液固流化床粗煤泥分选机的长期工业应用中也逐渐暴露出了一些缺点和不足,如可调参数少,分选粒级窄,对难选煤种的分

选效率不高等^[2]。虽然理论上液固流化床粗煤泥分选的有效分选粒度为2~0.25 mm,但是经过大量的工业实践,目前公认的有效分选粒度为1~0.5 mm。研究粗煤泥液固流化床宽粒级入料分选对保持重介旋流器分选系统稳定性,提高分选精度,降低精煤灰分具有重要意义。液固流化床对宽粒级入料分选时,由于其等沉比较小,颗粒干扰沉降末速受粒度影响较大,低密度粗颗粒和高密度细颗粒易产生错配,在流化床分选时高灰细泥污染溢流精煤和部

收稿日期:2014-03-05;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2014.08.029

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174204,50904069);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011QNA08)

作者简介:张旭波(1988—),男,河南洛阳人,硕士研究生。Tel:15005215223, E-mail: zxbcumt@sina.cn

引用格式:张旭波,郭永华,张文军,等.介质密度对液固流化床粗煤泥分选效果的影响[J].煤炭科学技术,2014,42(8):117-120,112.

ZHANG Xu-bo, GUO Yong-hua, ZHANG Wen-jun, et al. Study on Medium Density Affected to Coarse Slime Separation Effect of Liquid - Solid Fluidized Bed[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 117 - 120, 112.

分粗颗粒精煤损失在底流中的现象时有发生^[3-4]。在块煤分选领域,由于重介质分选是按照物料的密度差异实现对入料的分选,有效避免了跳汰分选受颗粒粒度的影响,因此具有分选效率高,分选密度低,对煤质适应性强等优点,尤其是三产品重介质旋流器的应用更加成为新建选煤厂的首选工艺^[5]。基于此,笔者进行了介质密度对液固流化床分选效果影响的理论分析,开展了重介质液固流化床分选试验研究,对拓展液固流化床宽粒级入料分选理论和提高分选效率具有一定的指导意义。

1 介质密度对液固流化床分选效果影响理论分析

1.1 颗粒等沉理论

传统液固流化床分选机中颗粒按其干扰沉降速度差实现分层,要使 2 种密度不同的混合粒群在与上升介质流相对运动过程中达到按密度分层,必须使给料中最大颗粒与最小颗粒的粒径比小于颗粒的干扰沉降等沉比。流化床入料粒级越宽,分选受颗粒粒度影响越大,分选效率越低。桂夏辉等^[6]由试验得出液固流化床粗煤泥分选机内颗粒自由沉降所处流态属于阿连区,所以颗粒的自由沉降末速 v_0 应按照阿连公式计算得:

$$v_0 = d_p [4(\rho_p - \rho_f)^2 g^2 / (225\rho_f\mu)]^{1/3} \quad (1)$$

其中: d_p 为颗粒直径; ρ_p 为颗粒密度; ρ_f 为介质密度; g 为重力加速度; μ 为介质流黏性系数。若两等沉颗粒的密度和粒度分别用 ρ_{p1} 、 d_{p1} 和 ρ_{p2} 、 d_{p2} 表示,球形系数为 χ_1 、 χ_2 ,假设 $\rho_{p2} > \rho_{p1}$,由于液固流化床内宽粒级粒群是在有限介质空间内处于干扰沉降状态,故等沉粒的干扰沉降末速相同,所以有:

$$v_{01}(1 - \lambda_1)^{n_1} = v_{02}(1 - \lambda_2)^{n_2} \quad (2)$$

其中: v_{01} 、 v_{02} 为两等沉粒群的自由沉降末速; λ_1 、 λ_2 为两等沉粒群的固体容积浓度; n_1 、 n_2 为与雷诺数有关的试验指数。

因两等沉颗粒的自由沉降都处于阿连区,属同一阻力范围^[7-9],则 $n_1 = n_2 = n$ 。得出不规则形状颗粒的干扰沉降等沉比 e_g 为

$$e_g = e_0 \left(\frac{1 - \lambda_2}{1 - \lambda_1} \right)^n = \left(\frac{\chi_2}{\chi_1} \right) \left(\frac{\rho_{p2} - \rho_f}{\rho_{p1} - \rho_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1 - \lambda_2}{1 - \lambda_1} \right)^n \quad (3)$$

其中 e_0 为自由沉降等沉比。

从式(3)可知:①在颗粒间隙相同条件下,总有 $(1 - \lambda_2) > (1 - \lambda_1)$,故 $e_g > e_0$ 。且随固体容积浓度

的增大而增大。在保证粒群处于流化状态的前提下,尽可能降低上升流流速,可提高颗粒的干扰沉降等沉比,对液固流化床分选宽级别入料时按密度分选有利。②随着介质密度 ρ_f 增大, e_g 逐渐递增,在流化床入料粒度不变的情况下,颗粒密度对干扰沉降末速的影响,高密度介质比低密度介质更加明显,按密度分选的效果更加理想^[10-11]。随着介质密度的增大,允许物料的有效分选粒度范围也越宽。

1.2 介质密度对颗粒沉降速度差的影响

郭德^[12]从液固两相流的动量方程出发,推导出颗粒在介质流中的运动方程,进而得到两颗粒的速度平方差公式:

$$v_{p1}^2 - v_{p2}^2 = \rho_f (4gz + v_f^2) (1/\rho_{p1} - 1/\rho_{p2}) + \frac{720\mu jz(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{1}{d_{p1}^2 \rho_{p1}} - \frac{1}{d_{p2}^2 \rho_{p2}} \right) \quad (4)$$

其中: v_{p1} 、 v_{p2} 、 v_f 分别为两颗粒和介质流的流动速度; z 为在坐标中的位置; j 为介质流相对于颗粒的流率; ε 为空隙度。从式(4)可以看出: ρ_f 增大,两颗粒的速度差增大,有利于缩短颗粒的分层时间,提高颗粒按密度分层效果。

综上所述,可以将重介选煤厂普遍使用的磁铁矿粉作为重介质引入液固流化床粗煤泥分选机,从而提高液固流化床内上升流密度,在保证分选密度不变的情况下,适当降低上升流流速,有利于增大异类粒群的干扰沉降等沉比,提高颗粒的沉降速度差,弱化液固流化床粗煤泥分选受颗粒粒度的影响,改善按密度分选效果,同时也可以缩短颗粒在流化床内的分层时间,提高液固流化床的单位处理能力。

2 重介质液固流化床粗煤泥分选试验

2.1 试验煤样煤质分析

试验煤样采自开滦集团唐山选煤厂,用 3、2、1、0.5、0.25 mm 标准筛对所采煤样筛分得到 3~0.25 mm 粒级作为试验入料,入料粒度和密度组成分别见表 1、表 2。

表 1 入料粒度组成

粒级/ mm	产率/ %	灰分/ %	筛上物累计		筛下物累计	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%
3~2	7.44	34.90	7.44	34.90	100.00	23.33
2~1	19.61	28.70	27.05	30.41	92.56	22.40
1~0.5	37.53	21.80	64.58	25.40	72.95	20.71
0.5~0.25	35.42	19.55	100.00	23.33	35.42	19.55

表 2 入料密度组成

密度级/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	产率/%	灰分/%	浮物累计		沉物累计		$\delta \pm 0.1$ 含量	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	密度级/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	产率/%
-1.30	32.32	7.87	32.32	7.87	100.00	23.67	1.3	58.38
1.30~1.40	26.06	10.06	58.38	8.85	67.68	31.21	1.4	41.40
1.40~1.50	15.34	15.03	73.72	10.13	41.62	44.45	1.5	19.37
1.50~1.60	4.03	29.84	77.75	11.16	26.28	61.63	1.6	7.29
1.60~1.80	6.51	47.29	84.26	13.95	22.25	67.39	1.7	6.51
+1.80	15.74	75.70	100.00	23.67	15.74	75.70	1.8	19.00

从表 1 可知: 入料加权平均灰分为 23.33% ,属于中灰煤。主导粒级为 1~0.5 和 0.5~0.25 mm ,分别占全样产率 37.53% 和 35.42% ,各粒级灰分随粒度增大而增大 ,说明入料中含有大量细粒低灰煤泥。入料中各粒级产率相差不大 ,有利于研究重介质液固流化床对宽粒级物料的分选效果。从表 2 可看出: -1.50 g/cm^3 密度级累计产率为 73.72% ,灰分仅为 10.13% 。 +1.80 g/cm^3 密度级产率为 15.74% ,灰分高达 75.70% ,中间密度级含量很少 ,当分选密度 δ 处于 1.50~1.60 g/cm^3 时 ,可选性较好。精煤要求灰分越低 ,入料可选性越差 ,当 δ 为 1.40 g/cm^3 时 $\delta \pm 0.1$ 含量为 41.40% ,可选性为极难选。

试验所需磁铁矿粉中粒度 -0.045 mm 的磁铁矿粉含量为 85.86% 符合 GB/T 18711—2002 《选煤用磁铁矿粉试验方法》要求。

2.2 试验装置系统及方法

重介质液固流化床分选试验系统如图 1 所示。将 3~0.25 mm 煤样分别在清水流和重介质流 2 种上升流条件下与水一起进入搅拌桶 ,充分搅拌均匀后匀速给入液固流化床分选机内 ,同时从床体下部给入连续的上升流(清水流和重介质流 2 种情况) ,在不同上升流流量情况下 ,通过 PID 自动控制系统

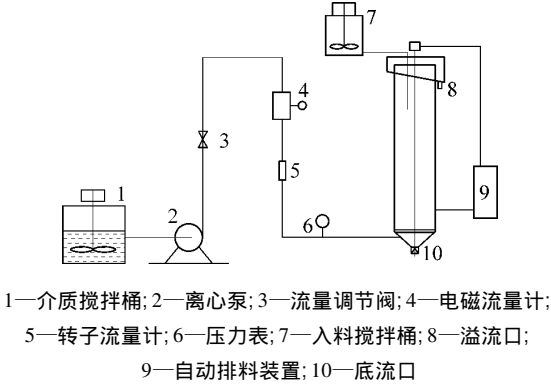


图 1 重介质液固流化床分选试验系统

调节床层稳定和控制尾矿排放^[13] ,待床层稳定运行 0.5 h 后 ,对溢流和底流取样化验并分析。经过前期的单因素试验探索 ,在重介质液固流化床分选时给入的重介质流密度以 1.30 g/cm^3 为宜 ,上升流流量分别设定为 0.05、0.10、0.16、0.27 m^3/h 。

3 试验结果分析

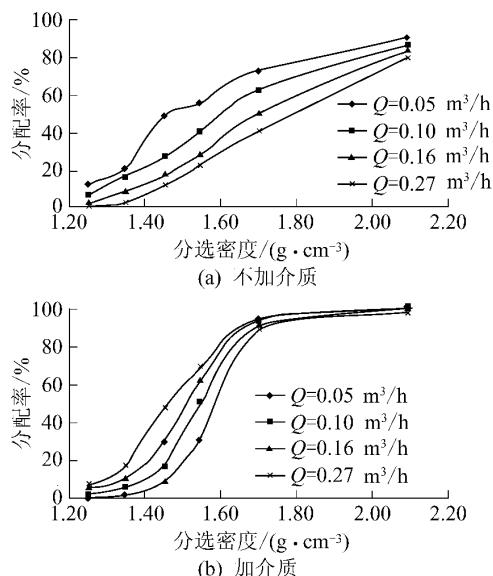
在不同介质流和不同上升流流量条件下 ,液固流化床分选结果见表 3。由表 3 可知 ,在不加介质条件下 ,随着上升流流速的增大 ,精煤产率和灰分都逐渐增大 ,尾煤产率下降 ,灰分提高 ,精煤可燃体回收率逐渐提高。在上升流流量 $Q=0.05 \text{ m}^3/\text{h}$ 时 ,精煤灰分最低 ,达 10.93% ;在加介质时 ,随着上升流流速的增大 ,精煤产率和灰分都逐渐降低 ,尾煤产率上升 ,灰分降低。精煤可燃体回收率逐渐减小。在 $Q=0.27 \text{ m}^3/\text{h}$ 时 ,精煤灰分最低 ,达 9.85% 。

表 3 煤样液固流化床分选结果

试验 编号	上升流流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	产率/%		灰分/%		精煤可燃体 回收率/%
		精煤	尾煤	精煤	尾煤	
1	0.05	61.27	38.73	10.93	43.82	71.50
2	0.10	70.48	29.52	11.87	51.84	81.38
3	0.16	77.85	22.15	12.51	62.89	89.23
4	0.27	79.76	20.24	13.58	63.43	90.30
5	0.05	76.51	23.49	11.23	64.19	88.98
6	0.10	71.48	28.52	10.96	55.53	83.38
7	0.16	65.85	34.15	10.48	49.10	77.23
8	0.27	62.72	37.28	9.85	46.92	74.08

注: 试验编号 1—4 为上升流不加介质;5—8 为上升流加介质。

不加介质和加介质时不同上升流流量条件下粗煤泥的分配曲线如图 2 所示。根据图 2 计算出粗煤泥在不同上升流流量条件下的实际分选密度及可能偏差 E_p ,见表 4。对比图 2a 和图 2b ,结合表 4 可知 ,在不加介质时 ,随上升流流速的增大 ,实际分选密度 δ_p 逐渐增大 ,曲线偏离正态分布程度越大 , E_p

图 2 不同上升流量 Q 条件下粗煤泥的分配曲线

越大,分选效果越差。将上升水流变成重介质流后,粗煤泥分配曲线整体较陡,误差面积变小,说明分选效果整体较好。随着上升流流量的增大,实际分选密度 δ_p 变小,且变化梯度也变小,但 E_p 变大,分选效果逐渐变差。这与不加介质时实际分选密度随上升流流速的变化趋势截然相反,但与文献[14~15]的试验研究结果基本一致。吴朝龙^[16]对液固流化床在不同上升流流速下的重介质(所用磁铁矿粉中-0.045 mm 粒级含量为 35.24%)分布特性进行了研究,得到了上升流流速在 0.15~0.35 cm/s 时床层密度波动小,分布均匀。因此对这一现象可以解释为在较低上升流流速下,由于粗粒级磁铁矿粉沉降速度大,有集中在床层底部的趋势,导致分选区的悬浮液密度变大,使实际分选密度提高,但同时也进一步加强了按密度分层的作用, E_p 较小。随着上升流流速逐渐增大,床层密度愈加均匀,上升流流速为 0.96 cm/s 时,床内入料的固体容积溶度迅速减小,颗粒的干扰沉降速度显著增大,底流中粗颗粒精煤含量逐渐增加,导致实际分选密度变小, E_p 值增大。

表 4 不同上升流流量条件下的实际分选密度及可能偏差

上升流流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$\delta_p / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$E_p / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	
	不加介质	加介质	不加介质	加介质
0.05	1.44	1.58	0.18	0.05
0.10	1.61	1.54	0.22	0.07
0.16	1.70	1.50	0.23	0.08
0.27	1.81	1.46	0.25	0.10

不同上升流流速条件下的精煤产率和灰分与原

煤浮物累计曲线如图 3 所示,从图 3 可知,加入介质后,精煤产率与灰分更加逼近原煤浮物累计曲线,在获得相同灰分的低灰精煤时,采用重介质流后精煤产率明显高于不加介质的情况。例如当要求精煤灰分不大于 11% 时,精煤产率相差将近 10%。

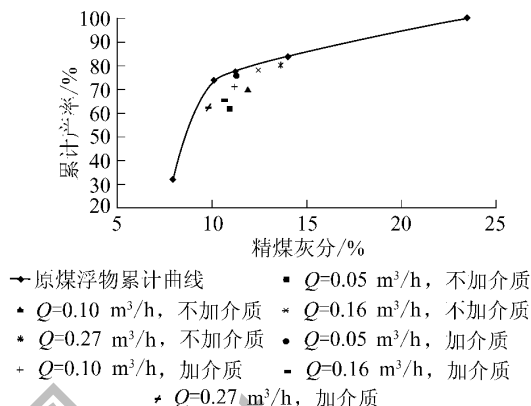


图 3 不同上升流流速下精煤产率和灰分与原煤浮物累计曲线对比

4 结 论

1) 将上升水流改为重介质流后,在较高上升流流速下,粗煤泥实际分选密度较低,能够获得低灰精煤,可能偏差较大,底流跑粗现象明显。降低上升流流速后,悬浮液密度增大,粗煤泥实际分选密度逐渐变大,可能偏差较小,分选效果变好。

2) 目前工业应用的传统液固流化床粗煤泥分选机是按颗粒的干扰沉降原理实现对物料的分选,在分选宽粒级物料时,受颗粒粒度影响较大,分选精度较低。采用重介质流后强化了颗粒密度对分选的影响,可能偏差明显降低,分选精度显著提高。

3) 采用重介质流对 3~0.25 mm 粗煤泥进行液固流化床分选,可能偏差最小为 0.05 g/cm³,分选效果良好,在获得相同灰分精煤时,其精煤产率显著提高。研究结果为提高传统流化床分选效果、拓宽有效分选粒度范围提供了一种高效的分选技术,为重介质液固流化床分选技术研究提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 李延锋. 液固流化床粗煤泥分选机理与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 29~31.
- [2] 徐世辉, 李延锋, 陈文刊, 等. 新型液固流化床粗煤泥分选机的应用研究[J]. 煤炭工程, 2011(5): 14~16.
- [3] 陈子彤, 刘文礼, 赵宏霞, 等. 干扰床分选机分选粗煤泥的试验研究[J]. 煤炭工程, 2006(5): 69~70.
- [4] 唐利刚. 宽粒级加重质液固流化床的数值模拟及分选特性[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 45~58.

是上组煤还是下组煤采空区积水引起的低阻异常,因此综合推断该异常区由采空区积水引起,富水性较强。采用瞬变电磁法探测的采空区积水位置经矿方确认,探测的异常所处位置小煤矿已淹井,瞬变电磁法测试结果与实际情况吻合,应用效果明显,该探测结果为矿方提供了矿井防治水依据。

3 结 论

TEM 法对积水采空区反映明显,对高阻采空区反映相对较弱;垂向上有多层积水采空区时,瞬变电磁的延迟效应会导致瞬变电磁法纵向分辨率降低,在一定深度范围内难以分辨具体哪个层位引起了电磁异常。在理论指导下,应用瞬变电磁法在韩城矿务局下属某矿进行的积水采空区范围探测工程中,成果与实际情况吻合较好,应用效果明显,该探测结果为矿方提供了矿井防治水参考资料。鉴于理论的复杂性,瞬变电磁在应用方面还有以下 3 个方面需进一步深入研究:①矿区人为设施干扰、高压线干扰的压制方法与技术;②瞬变电磁地形的影响及其校正方法与技术;③倾斜地层的瞬变电磁响应特征及倾斜地层下异常体响应特征研究。

参考文献:

- [1] 王华军,罗延钟. 中心回线瞬变电磁法 2.5 维有限单元算法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 855-862.
- [2] 熊 彬,罗延钟. 电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 590-597.
- [3] 程建远,孙洪星,赵庆彪,等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 251-255.
- [4] 王信文,冯 宏,解海军,等. TEM 技术地形校正初探[C]//陕西省地球物理文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 127-131.
- [5] 解海军. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [6] 解海军,孟小红,王信文,等. 煤矿积水采空区瞬变电磁法探测的附加效应[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(2): 71-74.
- [7] 刘树才,刘志新,姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414-417.
- [8] 李文,牟 义,张俊英,等. 煤矿采空区地面探测技术与方法优化[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 102-106.
- [9] 吴超凡,刘盛东,邱占林,等. 矿井采空区积水网络并行电法探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(4): 93-95, 67.
- [10] 刘菁华,王祝文,朱 士,等. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 715-719.
- [11] 张开元,韩自豪,周 韬. 瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(4): 341-344.
- [12] 安润莲,姚精选,杨引串. 瞬变电磁勘探技术在探测采空区中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 116-122.
- [13] 薛国强,宋建平,闫 述,等. 瞬变电磁探测地下洞体的可行性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(5): 135-138.
- [14] 陈明生,闫 述,解海军,等. 二维地质体的瞬变电磁响应特征研究[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 252-256.
- [15] 殷长春,刘 斌. 瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J]. 地球物理学报, 1994, 37(S0): 486-492.
- [5] 张悦秋,谢广元,俞和胜. 煤泥重介旋流器选煤技术现状及发展[J]. 煤炭工程, 2005(12): 14-16.
- [6] 桂夏辉,李延锋,刘炯天,等. 液固流化床内颗粒沉降特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1376-1378.
- [7] Li Yan-feng, ZHAO Wen-da, XU Shi-hui, et al. Changes of Size, Ash and Density of Coal particles on the Column Axis of a Liquid-Solid Fluidized Bed[J]. Powder Technology, 2013, 245(9): 251-254.
- [8] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 103-117.
- [9] 楚振峰,解京选,李延锋. 液固流化床中物料属性对固体混合物分布的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 620-623.
- [10] Galvin K P, Pratten S, Nguyen Tran Lam G. A Generalized Empirical Description for Particle Slip Velocities in Liquid Fluidized Beds[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 19(11): 1045-1052.
- [11] Galvin K P, Pratten S, Nguyen-Tran-lam G, et al. Dynamics of a Teetered Bed Separator[C]//International Coal Preparation Congress: Australian Coal Preparation Society, 1998: 225-235.
- [12] 郭 德. 下降介质流影响下颗粒的分层机理[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 325-327.
- [13] 陈文刊,李延锋,徐世辉,等. 液固流化床粗煤泥分选机自动控制研究[J]. 煤炭工程, 2011(8): 84-86.
- [14] Galvin K P, Pratten S J, Nicol S K. Dense Medium Separation Using a Teetered-Bed Separator[J]. Minerals Engineering, 1999(12): 1059-1087.
- [15] Avimanyu Das, Biswajit Sarkar, Surya Pratap Mehrotra. Prediction of Separation Performance of Floatex Density for Processing of Fine Coal Particles[J]. Int J Miner Process, 2009, 41: 41-49.
- [16] 吴朝龙. 加重质液固流化床流化特性及分选研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 24-41.

(上接第 120 页)

- [5] 张悦秋,谢广元,俞和胜. 煤泥重介旋流器选煤技术现状及发展[J]. 煤炭工程, 2005(12): 14-16.
- [6] 桂夏辉,李延锋,刘炯天,等. 液固流化床内颗粒沉降特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1376-1378.
- [7] Li Yan-feng, ZHAO Wen-da, XU Shi-hui, et al. Changes of Size, Ash and Density of Coal particles on the Column Axis of a Liquid-Solid Fluidized Bed[J]. Powder Technology, 2013, 245(9): 251-254.
- [8] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 103-117.
- [9] 楚振峰,解京选,李延锋. 液固流化床中物料属性对固体混合物分布的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 620-623.
- [10] Galvin K P, Pratten S, Nguyen Tran Lam G. A Generalized Empirical Description for Particle Slip Velocities in Liquid Fluidized Beds[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 19(11): 1045-1052.
- [11] Galvin K P, Pratten S, Nguyen-Tran-lam G, et al. Dynamics of a Teetered Bed Separator[C]//International Coal Preparation Congress: Australian Coal Preparation Society, 1998: 225-235.
- [12] 郭 德. 下降介质流影响下颗粒的分层机理[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 325-327.
- [13] 陈文刊,李延锋,徐世辉,等. 液固流化床粗煤泥分选机自动控制研究[J]. 煤炭工程, 2011(8): 84-86.
- [14] Galvin K P, Pratten S J, Nicol S K. Dense Medium Separation Using a Teetered-Bed Separator[J]. Minerals Engineering, 1999(12): 1059-1087.
- [15] Avimanyu Das, Biswajit Sarkar, Surya Pratap Mehrotra. Prediction of Separation Performance of Floatex Density for Processing of Fine Coal Particles[J]. Int J Miner Process, 2009, 41: 41-49.
- [16] 吴朝龙. 加重质液固流化床流化特性及分选研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 24-41.