

不同参数对振动流化床分选细粒褐煤的影响

石丁丁,赵跃民,张振华,陈彩静,秦云飞

(中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

摘要: 阐述了振动流化床的结构及作用机理。对 6 ~ 3 和 3 ~ 1 mm 褐煤分别进行了浮沉实验,说明当分选密度为 1.7 kg/L 时,褐煤属中等可选煤。在振动强度大于 1 的情况下,利用振动流化床模型机对 6 ~ 3 mm 和 3 ~ 1 mm 褐煤分别进行分选实验,研究流化气速、振动强度、床层高度、煤炭水分等对褐煤分选效果的影响。结果表明:当流化数 N 为 0.3,振动强度为 1.5 时,褐煤分选效果最好。从上至下将床层按体积分数 7:3 的比例分为精煤和矸石时,可能偏差 E 值分别为 0.202 (6 ~ 3 mm) 和 0.225 (3 ~ 1 mm)。随着外水含量的增加,褐煤分选效果逐渐变差,当外水含量分别小于 4.5% (6 ~ 3 mm) 和 2.0% (3 ~ 1 mm) 时对褐煤分选几乎没有影响。当床层高度低于 70 mm 时,床层高度对褐煤分选影响甚微,当床层高度高于 70 mm 时,褐煤分选效果急剧变差,床层高度的选择应考虑分选效果与处理量 2 个因素。

关键词: 褐煤;分选;振动流化床;浮沉实验;振动强度;流化气速

中图分类号: TD94

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)03-0001-05

Influence of vibrated fluidized bed parameters on fine lignite separation

SHI Dingding, ZHAO Yuemin, ZHANG Zhenhua, CHEN Caijing, QIN Yunfei

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

Abstract: Introduce the structure and working principle of vibrated fluidized bed. The analysis of 6mm to 3 mm, 3 mm to 1mm lignite separation experiments show that, when the separation density is 1.7 kg/L, the washability of lignite is medium. Adjusting the vibration intensity greater than 1, separate above two kinds of lignite in vibrated fluidized bed. Investigate the influence of gas velocity, vibration intensity, bed height, lignite moisture on separation. The results show that, when the fluidized number is 0.3, the vibration intensity is 1.5, the separation effect is the best. From top to bottom, divide the bed according to the volume ratio of clean coal and gangue, which is 7 to 3, the error probable is 0.202 and 0.225. With the increase of surface moisture, the separation effect gradually become worse. For clean coal and gangue, when the surface moisture content is less than 4.5 percent and 2.0 percent respectively, its impact can be ignored. When the bed height is less than 70 mm, its influence on separation is little, while the height is more than 70 mm, the separation effect dramatically become worse. So the choice of bed height should take full account of separation effect and handing capacity.

Key words: lignite; separation; vibrated fluidized bed; float-and-sink analysis; vibration intensity; gas velocity

收稿日期: 2013-03-19 责任编辑: 白娅娜

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174203, 51134022); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214904); 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(50921002)

作者简介: 石丁丁(1989—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 从事矿物加工工程及煤炭加工利用研究。通讯作者: 赵跃民(1961—), 男, 河南漯河人, 博士, 博士生导师, 教授, 从事矿物加工工程及煤炭加工利用研究。E-mail: ymzhao@cumt.edu.cn。

引用格式: 石丁丁, 赵跃民, 张振华, 等. 不同参数对振动流化床分选细粒褐煤的影响[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(3): 1-5.

0 引言

褐煤储量约占世界煤炭资源总储量的 40% ,中国、澳大利亚、蒙古、印尼等国拥有丰富的褐煤等低阶煤资源,褐煤属低变质程度煤种,遇水易泥化,常规的湿法选煤难以分选,且成本过高^[1-7]。另外,由于采煤机械化程度的提高,产生了大量细粒煤(-6 mm),因此,研究-6 mm 褐煤的有效干法分选技术迫在眉睫。目前,干法分选技术主要有空气重介质流化床^[8-9]、风力跳汰^[10]、复合式干法分选机^[11]等。风力跳汰由于分选效率低已被淘汰。空气重介质流化床和复合式干法分选机只能实现 50 ~ 6 mm 煤炭的有效分选。为此,樊茂民等^[12-13]将 6 ~ 1 mm 煤在磁稳定流化床中进行分选;骆振福等^[14]将振动引入空气重介质流化床在 2000 mm × 80 mm × 200 mm 的振动流化床模型机上实现了 -6 mm 粉煤的有效分选。这 2 种方法都有很好的分选效果,但由于介质回收问题未能实现工业化。杨旭亮等^[15]在振动强度小于 1 的情况下对 6 ~ 1 mm 褐煤在振动流化床中进行分选,取得了良好的分选效果。但是在振动强度大于 1 的情况下对 6 ~ 1 mm 褐煤的干法分选目前还未研究。褐煤由于水分含量高,颗粒间容易黏结,小振动强度下颗粒不能很好地流化,因此,本文在振动强度大于 1 的情况下对 -6 mm 褐煤进行分选,研究流化风速、振动强度、床层高度、煤炭水分等因素对褐煤分选效果的影响。

1 装置及分选机理

图 1 为振动流化床系统示意,系统主要由供风系统、振动系统、流化床和测量装置四部分组成。流化床为直径 100 mm、高 400 mm 的有机玻璃筒体。过滤气体通入气室后经气体分布器进入流化床将颗粒流化。振动台安装在流化床底部,其振

幅、频率和振动方向可通过与其连接的数字控制器调节。

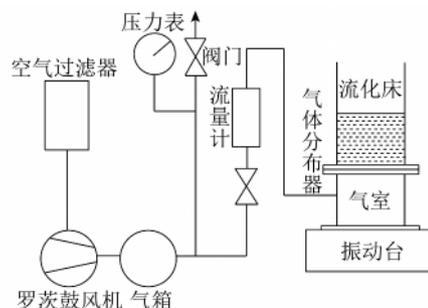


图 1 振动流化床系统示意

流化床中的颗粒被流化后,由于密度和粒度的差异,颗粒按照干扰沉降末速由高到低的顺序依次降落,从而达到分选的目的。然而,对于 6 ~ 1 mm 大颗粒,仅通入空气很难形成稳定流化床。为了加强气固之间的相互作用以形成良好的流化,在普通气固流化床中加入了振动。在适当的操作条件下,分选一段时间后,突然关闭流化床,待床层静止后在轴向方向上将其等分为 5 份,测定每层煤样的灰分。分选效果通过分选度 S 来评价, S 的表达式如下:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i/A_0 - 1)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

式中 A_0 为入料灰分,%; A_i 为分选后第 i 层煤样的灰分,%; n 为煤层数。

由式(1)可以看出,未分选前 $A_i = A_0$, $S = 0$, S 值越大,表示煤样分选效果越好。

2 浮沉实验

实验所用褐煤为大雁褐煤,6 ~ 3, 3 ~ 1 mm 煤炭浮沉实验结果见表 1、表 2。由表 1、表 2 可知,当分选密度为 1.7 kg/L 时,褐煤属中等可选煤。

表 1 6 ~ 3 mm 原煤浮沉实验结果

密度级/(kg·L ⁻¹)	产率/%	灰分/%	浮物累计		沉物累计		分选密度 ± 0.1	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	密度/(kg·L ⁻¹)	产率/%
-1.4	28.81	11.41	28.81	11.41	100.00	42.80	1.4	45.58
1.4~1.5	16.77	21.72	45.58	15.20	71.19	55.50	1.5	25.68
1.5~1.6	8.91	36.42	54.49	18.67	54.42	65.91	1.6	16.62
1.6~1.7	7.71	43.84	62.20	21.79	45.51	71.69	1.7	15.69
1.7~1.8	7.98	65.88	70.18	26.81	37.80	77.37		
+1.8	29.82	80.44	100.00	42.80	29.82	80.44		
合计	100.00	42.90						

表2 3~1 mm 原煤浮沉实验结果

密度级/($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率/%	灰分/%	浮物累计		沉物累计		分选密度 ± 0.1	
			产率/%	灰分/%	产率/%	灰分/%	密度/($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	产率/%
-1.4	28.76	12.14	28.76	12.14	100.00	42.22	1.4	45.55
1.4~1.5	16.79	22.32	45.55	15.89	71.24	54.36	1.5	25.81
1.5~1.6	9.12	35.42	54.67	19.15	54.45	64.24	1.6	17.82
1.6~1.7	8.70	44.21	63.37	22.59	45.33	70.03	1.7	17.69
1.7~1.8	8.99	65.73	72.36	27.95	36.63	76.17		
+1.8	27.64	79.56	100.00	42.22	27.64	79.56		
合计	100.00	42.22						

3 实验结果与分析

3.1 流化气速对分选效果的影响

流化气速对流化床的流化效果起着重要作用。逐渐增加流化气速,当气体对颗粒的曳力加上浮力与颗粒的重力相等时,颗粒开始悬浮,此时的流化速度即为最小流化速度。对于煤炭等 Geldart D 类颗粒,继续增加气速,多余的气体即形成气泡通过床层,形成鼓泡流化床。因此最小流化速度等于最小鼓泡速度^[15]。由于最小流化速度受振动等其他因素的影响,本文引入表观气速 $N = U / (U - U_{mb})$,其中 U 为流化气速, U_{mb} 为最小鼓泡速度。

流化气速对褐煤分选效果的影响如图 2 所示。由图 2 可知,当 N 小于 0.3 时,随着 N 的增大,褐煤分选效果逐渐变好,但 N 大于 0.3 后分选效果恶化。这是因为太小的流速不足以使颗粒流化,颗粒之间难以形成有效对流,影响褐煤分选;太大的流速使颗粒床上层出现返混,不利于颗粒的分选。

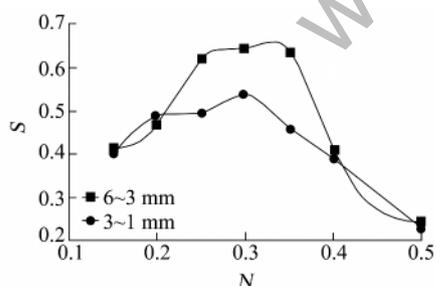


图2 流化气速对褐煤分选效果的影响

3.2 振动强度对分选效果的影响

普通流化床中引入振动主要是向床层中颗粒提供与其重力方向相反的外力,使粗重颗粒易于流化。振动强度 K 、振幅 A 、振动频率 f 为振动的基本参数,在垂直方向上满足 $K = A\omega^2/g$,其中 $\omega = 2\pi f$ 。将频率调为 10 Hz,不断增加振幅以改变振动强度

研究振动强度对褐煤分选效果的影响,具体如图 3 所示。由图 3 可知,随着振动强度的增大,分选效果达到最优值后开始变差,当振动强度为 1.5 时, S 最大,褐煤分选效果最好。这主要是因为适当的振动可以使团聚的尺寸减小,振动使床层内颗粒链断开的数量增加,降低了团聚的平均尺寸,有助于颗粒床层的流化;但当振动强度太大时,振动对颗粒的影响起主要作用,使颗粒按粒度分层,从而影响分选效果。

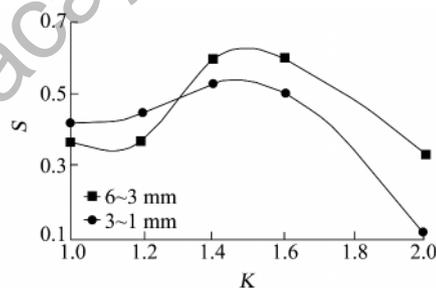


图3 振动强度对褐煤分选效果的影响

3.3 床层高度对分选效果的影响

床层高度对褐煤分选效果的影响如图 4 所示。

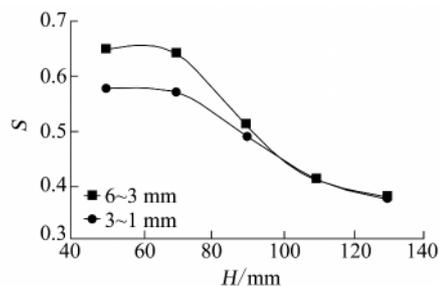


图4 床层高度对褐煤分选效果的影响

由图 4 可知,当床层高度低于 70 mm 时,床层高度对褐煤分选影响甚微。当床层高度高于 70 mm 时,褐煤分选效果急剧变差。这是因为振动台通过气体分布器传递给颗粒的振动波由于颗粒间的相

互作用而随床层高度不断衰减,同时通过气体分布器的气体对颗粒的曳力也由于颗粒的阻力而不断减少,使上层颗粒运动减弱并阻碍了下层颗粒的运动,流化性变差,从而恶化分选效果^[16-18]。

3.4 煤炭水分对分选效果的影响

在振动流化床分选过程中,由于传质过程,空气会带走一部分水分,但仍会有大部分水分留在煤炭中。煤炭中含有较多的水分,使得颗粒间由于液桥等作用而发生黏附和团聚。颗粒团聚导致床层中出现死区或腾涌喷射现象,影响褐煤分选效果^[15,19-20]。实验将收到基干燥不同时间得到不同水分的褐煤,研究水分对褐煤分选效果的影响,为褐煤分选前的干燥流程提供参考。

外水对褐煤分选效果的影响如图5所示。由图5可知,随着褐煤外水含量的增加,褐煤分选效果逐渐变差。这主要是因为随着褐煤外水含量的增加,颗粒之间发生团聚使得床层流动性变差。但外水含量分别小于4.5%(6~3 mm)和2.0%(3~1 mm)时对褐煤分选几乎没有影响,这是因为此时褐煤表面几乎干燥,水分对颗粒的影响消失。

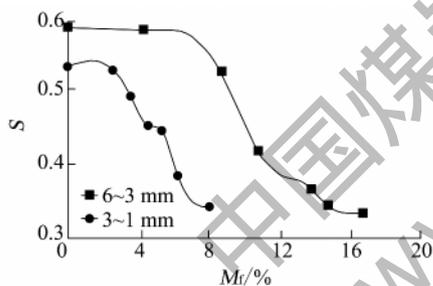


图5 外水对褐煤分选效果的影响

3~1 mm 颗粒休止角随褐煤外水的变化如图6所示。由图6可知,随着褐煤外水含量的增加,休止角逐渐变大,从而验证了上述解释的合理性。

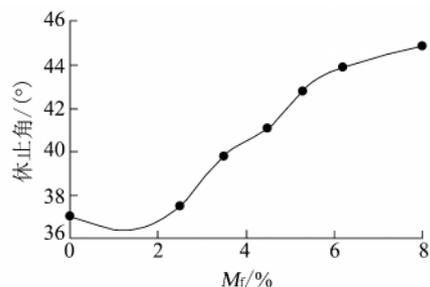


图6 3~1 mm 颗粒休止角随外水的变化

3.5 最优操作参数下分选效果

由以上单组实验得出,当流化数 N 为 0.3, 振动

强度为 1.5 时,褐煤分选效果最好。研究了最优操作参数下,不同床层高度时褐煤的灰分,具体如图7所示。其中,床层高度用分层数 M 表征,具体如式(2)所示

$$M = H/H_0 \quad (2)$$

式中 H 为将床层分层后每层的平均高度, mm; H_0 为床层总高度, mm。

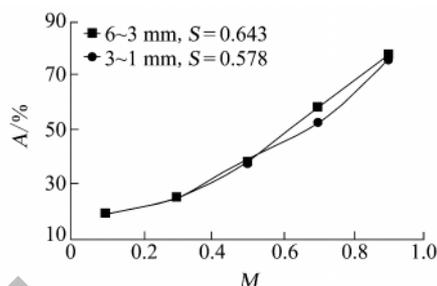


图7 最优分选效果时床层不同位置的褐煤灰分

将原煤空气干燥基在流化床 N 为 0.3, 振动强度为 1.5, 床层高度为 70 mm 分选后, 从上至下按照体积分数 7:3 的比例分为精煤和矸石, 可能偏差 E 值分别为 0.202(6~3 mm) 和 0.225(3~1 mm), 最优操作参数下的分配曲线如图8所示。

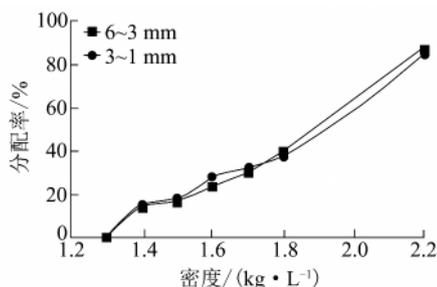


图8 最优分选效果时的分配曲线

4 结 论

1) 振动强度大于 1 的振动流化床可以实现 6~1 mm 褐煤的分选。当流化数 N 为 0.3, 振动强度为 1.5 时,褐煤分选效果最好。从上至下将床层按体积分数 7:3 的比例分为精煤和矸石时,可能偏差 E 值分别为 0.202(6~3 mm) 和 0.225(3~1 mm);

2) 外水含量是影响褐煤分选效果的重要因素,随着外水含量的增加,褐煤分选效果逐渐变差,当外水含量分别小于 4.5%(6~3 mm) 和 2.0%(3~1 mm) 时对褐煤分选几乎没有影响;

3) 适当的风速有利于颗粒的分选;床层越低越有利于颗粒的分选,但太低的床层势必影响处理

量 因此床层高度的选择应考虑分选效果与处理量 2 个因素。

参考文献:

[1] 白向飞. 中国褐煤及低阶烟煤利用与提质技术开发 [J]. 煤质技术, 2010(6): 9-11.

[2] 段清兵, 梁兴, 张胜局, 等. 提高神华煤气化水煤浆浓度的可行性研究 [J]. 洁净煤技术, 2009, 15(2): 49-52.

[3] 熊楚安, 王永刚, 陈伟, 等. 依兰煤在液化溶剂中的溶胀动力学研究 [J]. 洁净煤技术, 2009, 15(2): 53-56.

[4] 陶建红. 褐煤干燥特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2010, 16(4): 67-69.

[5] 朱书全. 褐煤提质技术开发现状及分析 [J]. 洁净煤技术, 2011, 17(1): 1-4.

[6] 曾钦, 李军, 王慧香, 等. 内蒙古某褐煤干燥特性的实验研究 [J]. 洁净煤技术, 2011, 17(2): 57-59.

[7] 蒋斌, 李胜, 高俊荣, 等. 褐煤干燥技术发展及应用现状 [J]. 洁净煤技术, 2011, 17(6): 69-72.

[8] ZHAO Yue-min, TANG Li-gang, LUO Zhen-fu, et al. Experimental and numerical simulation studies of the fluidization characteristics of a separating gas-solid fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(12): 1819-1825.

[9] A K Sahu, A Tripathy, S K Biswal, et al. Stability study of an air dense medium fluidized bed separator for beneficiation of high-ash Indian coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011, 31(3/4): 127-148.

[10] C H Sampaio, W Aliaga, E T Pacheco, et al. Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging [J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(2): 198-202.

[11] B Zhang, H Akbari, F Yang, et al. Performance optimization of the FGX dry separator for cleaning high-sulfur coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011, 31(3/4): 161-186.

[12] M Fan, Q Chen, Y Zhao, et al. Fine coal (6-1 mm) separation in magnetically stabilized fluidized beds [J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63(4): 225-232.

[13] M Fan, Q Chen, Y Zhao, et al. Fundamentals of a magnetically stabilized fluidized bed for coal separation [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2003, 23(1/2): 47-55.

[14] LUO Zhen-fu, FAN Mao-min, ZHAO Yue-min, et al. Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed [J]. Powder Technology, 2008, 187(2): 119-123.

[15] YANG Xu-liang, ZHAO Yue-min, LUO Zhen-fu, et al. Fine coal dry cleaning using a vibrated gas-fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2012, 106(2): 338-343.

[16] 郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[17] 王亭杰, 汪展文. 振动波在流化床中的传播行为 [J]. 化工学报, 1996, 47(6): 718-726.

[18] Wang Ting-jie, JIN Yong, Atsushi Tsutsumi, et al. Energy transfer mechanism in a vibrating fluidized bed [J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 78(2/3): 115-123.

[19] 骆振福, 赵跃民. 流态化分选理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.

[20] LIANG Cai, CHEN Xiaoping, XU Pan, et al. Effect of moisture content on conveying characteristics of pulverized coal for pressurized entrained flow gasification [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(6): 1143-1150.

煤制天然气项目应关注碳排放

2013 年 5 月, 国家发改委发布《关于推动碳捕集、利用和封存 (CCUS) 试验示范的通知》。这是继国务院印发“十二五”控制温室气体排放工作方案后, 国家针对推动 CCUS 示范项目在国内发展的具体要求。通知指出, 鼓励在煤化工、油气等行业开展针对高纯度 CO₂ 排放源进行捕集的示范项目, 引导这些行业在中长期规划中充分考虑 CO₂ 捕集、利用和封存的要求和部署。

煤制合成天然气 (SNG) 是现代煤化工项目的重要内容之一。据公开信息, 截至目前已有 4 个 SNG 项目正式获得国家发改委的核准, 加上近期已确定获得核准的 4 个 SNG 项目, 这 8 个项目的产能将近 400 亿 m³/a。据估计, 这些项目如果全部建成投产, 每年 CO₂ 排放量将达 1.8 亿 t。巨大的 CO₂ 排放要求企业在发展 SNG 项目时须在中长期规划中考虑 CCUS, 否则一旦实施碳税, 极有可能增加额外成本, 甚至打破赢利平衡。

利用 CO₂ 驱油 (气) 增加采收率是实现 CCUS 的一个可行方向。美国大平原 SNG 项目已经成为利用 CO₂ 增加原油采收率 (EOR) 的典范。中石油和中石化也开展了 EOR 相关研究, 延长石油还在国内创新性地开展了页岩气井 CO₂ 压裂技术试验。