

空气重介质脉动流化床流化特性研究

董 良¹, 赵跃民¹, 李晓明¹, 段晨龙¹, 邵 明²

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221008; 2. 大地工程开发(集团)有限公司, 天津 300211)

摘要: 为研究脉动流化床的流化效果, 对不同脉动气流参数条件下脉动流化床和传统流化床的流化特性进行了对比试验, 并分别对流化曲线、流化床床层压降以及床层中心点密度波动进行了分析。结果表明, 脉动流化床在临界流化状态时, 床层压降变化平稳, 流化曲线不会出现凸峰。脉动流化床中床层压降波动显著小于传统流化床, 其床层密度的稳定性更高, 相同流化数(流化床工作气流速度与起始流化速度的比值)时, 脉动流化床具有更低的床层密度。

关键词: 脉动流化床; 流化特性; 床层密度; 脉动气流; 强制振荡

中图分类号: TD94 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2011)12-0127-03

Study on Fluidization Characteristics of Air Heavy Medium Pulsed Fluidized Bed

DONG Liang¹, ZHAO Yue-min¹, LI Xiao-ming¹, DUAN Chen-long¹, SHAO Ming²

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Dadi Engineering Development Group Co., Ltd., Tianjin 300211, China)

Abstract: In order to study the fluidized effect of the pulsed fluidized bed, a comparison experiment was conducted on the fluidized characteristics of the pulsed fluidized bed and the conventional fluidized bed under the conditions of the different pulsed air parameters and the analysis was conducted on the fluidized curves, the bed layer pressure drop of the fluidized bed and the density fluctuations at the center of the fluidized bed individually. The results showed that when the pulsed fluidized bed was in critical fluidization status, the pressure drop variation of the fluidized bed was stable and the fluidized curve could not appear a raised peak. The middle bed layer pressure drop fluctuations of the pulsed fluidized bed was obviously lower than the conventional fluidized bed and the stability of the bed density would be high. At the same fluidized number, the pulsed fluidized bed would have much lower bed density.

Key words: pulsed fluidized bed; fluidization characteristics; bed density; pulse air flow; forced oscillation

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国, 产量占世界总产量的48.3%^[1], 2010年我国煤炭产量超过30亿t, 在我国一次能源消费结构中占70%, 但我国煤炭的入选比例仅为50.9%^[2]。由直接燃煤产生的烟煤型大气污染十分严重, 造成的SO₂和烟尘排放量分别占85%和70%^[3]。选煤作为煤炭清洁、高效利用的最有效途径, 应处于优先发展的地位。在我国煤炭资源丰富的西部地区, 由于水资源缺乏以及产煤自身性质(储量丰富的褐煤易泥化等)的影响, 现有的湿法选煤技术受到限制, 因此研究高效的干法选煤技术尤为重要。中国

矿业大学自20世纪80年代开始, 开展了流态化分选理论研究, 并在世界上首次进行了空气重介质流化床50~6mm煤炭分选工业性试验研究^[4]。但传统气固浓相流化床加重质粒度较大, 床层黏度较大, 且床层中由于气泡的产生、长大和破裂而存在严重的加重质返混现象, 易引起已分层物料的再混合, 一定程度上影响了流态化分选的效率, 也制约着空气重介质流化床有效分选粒度下限的降低。空气重介质脉动流化床是将传统流化床稳定气流的进气方式改为流量周期性波动的脉动气流。研究表明流化床引入脉动气流强制振荡, 可明显减少床层物

收稿日期: 2011-08-26; 责任编辑: 代艳玲

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(50921002); 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室开放基金资助项目(CPEU-KF08-08)

作者简介: 董 良(1987—), 男, 山东海阳人, 硕士研究生, 研究方向为煤炭干法分选。Tel: 18952232546, E-mail: 18952232546@189.cn

网络出版时间: 2011-12-19 16:39; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20111219.1639.001.html>

引用格式: 董 良, 赵跃民, 李晓明, 等. 空气重介质脉动流化床流化特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(12): 127-129.

料的沟流和短路情况，气泡变小，气体和固体颗粒及构件表面的传质、传热效率大为提高^[5-6]。通过合理调节脉动气流的脉动频率、脉动间隔以及脉动气流量等，达到振动流化床改善流化质量的类似效果^[7]。与传统流化床及振动流化床相比，关于脉动流化床的研究甚少，因此笔者对空气重介质脉动流化床的流化特性进行了研究。

1 空气重介质脉动流化床试验系统

该试验系统由供风系统、脉动气流发生装置、流量调节装置、流化床模型机、压力检测系统等组成（图1）。其中，流化床模型机为直径170 mm、高500 mm的圆柱体，并带有气体分布器；脉动气流发生装置由脉冲控制仪和电磁脉冲阀组成，脉冲控制仪的脉冲宽度（脉冲时间），即脉动气流打开时间 t_{on} ；脉冲间隔，即脉动气流关闭时间 t_{off} ，其在0.1~1.0 s可调。脉冲宽度和脉冲间隔是脉动气流的主要参数，其大小和比值影响脉动气流的振荡强度以及气泡在床层中的分布，因此要求脉冲控制仪具有较高的稳定性；压力检测系统由微差压传感器、A/D转换模块以及上位机组态软件组成，可动态连续地采集数据，试验中设定采样频率为1 Hz。试验中采用的风压为0.02 MPa，所用加重质为粒度范围0.300~0.074 mm，堆密度2.65 g/cm³的磁铁矿粉，流化床静床层高度取200 mm。

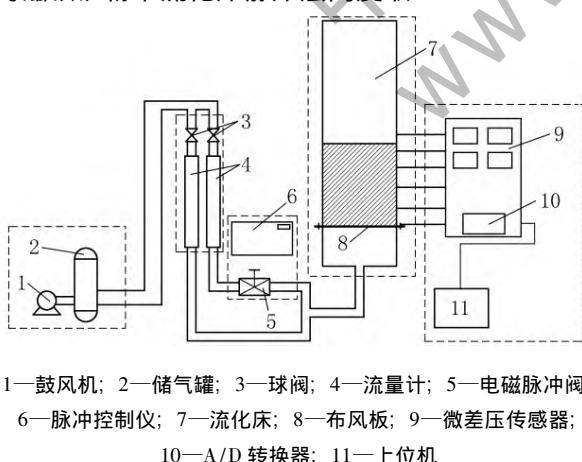


图1 试验系统

气固流化床在流化时，床层颗粒自身存在固有的脉动频率，当引入的脉动气流频率与床层颗粒固有频率接近，即达到共振频率时，床层颗粒能够表现出较佳的流化状态^[8]。试验用床层颗粒固有脉动频率^[9] $f_0 = (1/\pi) \sqrt{g/H_{mf}} = 2.23$ Hz，其中：

H_{mf} 为床层高度，m； g 为重力加速度，m/s²。试验中脉动气流频率在 f_0 附近调节。

2 试验结果与分析

1) 脉动气流对流化特性的影响。传统气固流化床和脉动流化床流化特性如图2所示，在临界流化时，传统流化床床层压降出现一个峰值，随气流速度的继续增加床层很快进入流化状态。峰值的出现主要是由于加重质颗粒表面不光滑，形状各异，在临界流化状态时固体颗粒间存在相互咬合、嵌顿、搭桥及颗粒与床壁间的摩擦作用，导致床层对气流的阻力增大^[10]。但在脉动流化床中（ $t_{on} = 150$ ms， $t_{off} = 150$ ms），临界流化状态时床层压降的峰值得到有效降低甚至消除。这是由于在床层中引入了脉动气流的强制振荡，导致床层中颗粒间不断发生摩擦与碰撞，使振荡能量在床层中得到传递，从而引起松散效应，为气流克服颗粒间阻力并均匀穿过颗粒间缝隙创造了条件，在脉动气流与持续气流的交互作用下，床层进一步松散直至完全流化。

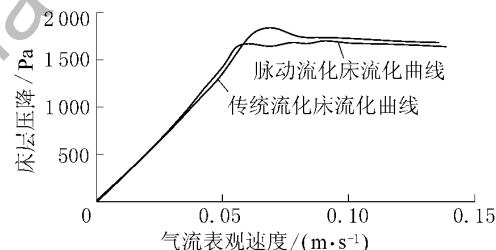


图2 传统流化床和脉动流化床流化特性曲线

脉冲间隔为200 ms时，不同脉冲宽度100、200、250 ms条件下脉动流化床的流化特性曲线如图3所示。由图3可知，临界流化状态的压降峰值均得到降低或消除。

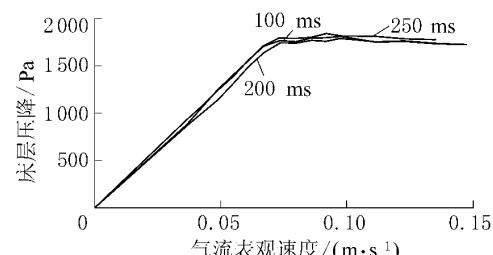


图3 脉冲间隔200 ms时脉动流化床流化特性曲线

2) 脉动气流对压降的影响。通过分析床层压降的波动信号，可了解床层内气泡运动规律、空隙率变化及床层密度的稳定性，床层压降是评价流化质量的重要指标。采用流化数（流化床工作气流

速度与起始流化速度的比值, 用于描述流化床工作状态) 1.2, 对传统流化床和脉动流化床进行床层压降方差分析, 见表 1。

表 1 流化床床层压降方差分析

脉冲间隔/ms	脉冲宽度/ms	采样个数	压降均值/Pa	方差	标准差
150	100	252	1 197.92	1 211.04	34.80
	150	252	1 203.69	1 186.80	34.45
	200	231	1 762.77	1 437.17	37.91
	250	99	1 802.35	1 562.62	39.53
	300	231	1 754.42	1 351.30	36.76
	350	88	1 802.21	693.27	26.33
200	100	189	1 774.31	728.46	26.99
	150	189	1 760.89	1 118.23	33.44
	200	189	1 764.64	377.52	19.43
	250	88	1 812.72	443.10	21.05
	300	88	1 816.83	529.46	23.01
	传统流化床	147	1 725.65	2 224.07	47.16

从表 1 可知, 脉动流化床床层压降标准差明显小于传统流化床的床层压降, 在 $t_{on} = 200 \text{ ms}$, $t_{off} = 200 \text{ ms}$ 时达最小。这说明引入的脉动气流强制振荡有助于提高床层稳定性。床层的压降波动主要由聚式鼓泡流化床中气泡的产生、长大和破碎引起。引入到流化床中的脉动气流会引起床层颗粒的强制振荡, 颗粒间相互摩擦碰撞有利于抑制气泡的二次兼并与长大, 并具有一定破碎气泡的作用^[11]。从而使床层压降波动减小, 床层鼓泡行为和颗粒返混行为减小, 空隙率和床层密度保持均匀稳定。

3) 脉动气流对床层密度稳定性的影响。空气重介质流化床是按密度对煤炭进行分选, 其床层密度稳定性是评价流化效果的重要参数。试验中对传统流化床和脉动流化床 ($t_{on} = 200 \text{ ms}$, $t_{off} = 200 \text{ ms}$) 在流化数为 1.2 时中心点的密度进行连续 1 min 采样, 其密度波动如图 4 所示。对密度数据进行方差分析求得传统流化床密度波动方差 $S_1 = 0.0007$, 脉动流化床的密度波动方差 $S_2 = 0.0003$ 。因此脉动流化床床层密度的稳定性更好,

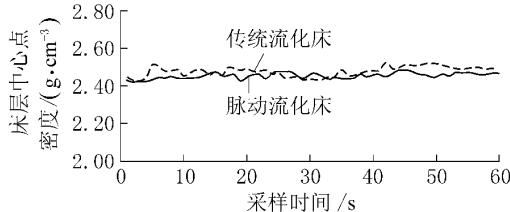


图 4 流化床中心点密度波动

这与脉动流化床床层压降波动小的结论相吻合。从图 4 中还可以看出, 脉动流化床的床层密度略低于传统流化床, 这对实现煤炭的低密度分选是有利的。

3 结 论

- 1) 在传统流化床中引入脉动气流强制振荡, 可以增强加重质颗粒间的碰撞和摩擦, 减弱颗粒间的相互咬合等作用, 降低甚至消除临界流化状态时床层压降的峰值, 有利于流化床流化质量的提高。
- 2) 试验过程中, 当脉动气流时间为 200 ms, 脉动气流间隔为 200 ms 时, 可获得较小的床层压降波动, 且与传统流化床相比, 床层压降稳定性得到显著的提高, 这对于获得密度均匀稳定的准散式流化床具有重要意义。
- 3) 试验条件下测得脉动流化床中心点密度稳定性明显高于传统流化床。并且在相同的流化数时, 脉动流化床可以获得密度更低的流化床层, 这对于实现煤炭的低密度分选十分有利。

参考文献:

- [1] 曹伟. 数据显示中国煤炭产销量占全球比重近一半 [EB/OL]. (2011-06-22) [2011-11-01]. <http://www.ce.cn/macro/more/201106/22/t20110622-22494539.shtml>.
- [2] 王文. “十一五”末我国原煤入选率达到 50.9% [EB/OL]. (2011-04-25) [2011-11-01]. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-MTJG201102001.htm>.
- [3] 唐立刚. 宽粒级加重质流化床的分选特性及数值模拟 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 1.
- [4] 邢洪波, 唐立刚, 赵跃民. 气固流态化技术在选煤领域的应用 [J]. 煤炭工程, 2009 (12): 27-29.
- [5] Kobayashi M, Ramaswami D, British W T. Heat Transfer from an Internal Surface to a Pulsed Bed [J]. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1970, 66 (105): 58.
- [6] 严建华, 岑可法, 康齐福. 脉动流化床的机理及燃烧试验研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 1986, 20 (6): 123.
- [7] 官国清, 吕岳琴, 余华瑞, 等. 气固脉冲流化床流体力学特性的研究 [J]. 化学反应工程与工艺, 1996, 12 (3): 294-300.
- [8] 苏伟光. 欧拉-欧拉法脉动流化床运动行为模拟 [D]. 天津: 天津科技大学, 2009: 23-25.
- [9] 胡娅君, 苏伟光, 李占勇, 等. 脉动流化床的数值模拟 [J]. 化工机械, 2009, 36 (3): 256-271.
- [10] 曾凡, 胡永平. 矿物加工颗粒学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 238-241.
- [11] 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: 103-106.