



空气重介质流化床的床层黏度研究

籍永华¹, 秦丙克¹, 赵跃民², 骆振福²

(1. 六盘水师范学院 化学与化学工程系, 贵州 六盘水 553004; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 利用旋转法对空气重介质流化床的床层黏度进行研究, 分析影响流化床床层黏度的因素, 建立床层黏度与影响因素的数学模型。结果表明: 流化床床层黏度随着加重质磁铁矿粉平均粒度的增大而增大, 随着流化风速的增大而减小, 随着床层高度及重介质水分含量的增大而增大; 当煤粉质量分数大于12%时, 床层黏度明显增大, 煤粉质量分数为17%时, 气-固两相流的流动性变差。

关键词: 空气重介质流化床; 床层黏度; 磁铁矿粉

中图分类号: TQ021.1, TD91

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2014)05-0010-05

Research on Viscosity of Air Dense Medium Fluidized Bed

Ji Yonghua¹, Qin Bingke¹,
Zhao Yumin², Luo Zhenfu²

(1. Department of Chemistry and Chemical Engineering,

Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The viscosity of air dense medium fluidized bed was measured by the method of rotation. The factors influencing the viscosity of fluidized bed were analyzed. The mathematical model between those factors and the viscosity was proposed. The results indicate that the bed viscosity increases with an increase in mean particle size, decreases with an increase in gas velocity, and increases with the increase of bed height and moisture content. When the mass fraction of coal powders is larger than 12%, the bed viscosity significantly increases. When the mass fraction of coal powders is 17%, the bed fluidization becomes poor.

Key words: air dense medium fluidized bed; viscosity of fluidized bed; magnetite powder

空气重介质流化床干法选煤技术具有不用水、污染小、投资少、分选精度高、密度调节范围宽等特点,

受到广泛关注。在空气重介质流化床干法选煤分选过程中, 床层黏度的大小直接影响流化床的分选效果, 入选煤要得到有效分选, 必须在适宜的床层黏度下进行, 床层黏度大, 即颗粒间的粘附力强, 气流难以在颗粒上进行均匀作用, 容易导致异常流化现象, 如附壁、沟流、死区等, 加剧加重质的返湿, 使床层密度不均匀, 从而降低流化床的分选精度。床层黏度也不能太小, 否则介质对待分选物料的黏滞作用远小于它们受到的重力和浮力作用, 造成分离效果较差。韦鲁滨等^[1]针对物料在分选过程中产生错配的根源, 将错配效应分解成黏性错配效应和运动错配效应, 认为黏性错配效应是由床层黏度引起的。可见, 床层黏度对流化床的分选影响较大。本文中通过旋转法对空气重介质流化床的床层黏度进行研究, 分析各因素对流化床床层黏度的影响。

1 实验

1.1 实验设备

采用旋转法^[2-3]测量空气重介质流化床床层黏度, 主要设备是 NDJ-1 型旋转黏度计。

1.2 检测元件的标定

NDJ-1 型旋转黏度计配备有 1—4 号 4 种转子。1 号转子大, 测量时扰动大, 4 号转子量程相对本实验较大, 因此实验中使用 2、3 号标准转子。检测元件采用 3 段钢丝连接的加长杆与标准转子相连接, 转速为 6 r/min, 下端浸没于流化床中, 与黏度计相距 900 mm 以上。黏度计标定时按照国家计量标准 JJG 215—1981《旋转黏度计检定规程》的规定执行, 黏度计运转平稳后读取其指针刻度, 取 3 次相同条件下读数的平均值, 用 α 表示, 结果如表 1 所示。

各转子测量时的仪器常数 k 通过下式计算:

$$k = \frac{\eta}{\alpha},$$

式中 η 为采用标准毛细管黏度计用相对测量法测出的硅油黏度, Pa·s。350、500 号硅油的黏度分别为 0.348、0.546 Pa·s, 将得到的标定数据代入上式分别计算出 2、3 号转子的平均仪器系数为 49.82、199.07。流

收稿日期: 2014-03-15, 修回日期: 2014-05-09。

基金项目: 贵州省六盘水市科技计划项目, 编号: 52020-2012-01-09-08; 贵州省煤炭资源清洁高效利用科研实验平台项目, 编号: 黔科平台[2011]4003; 贵州省教育厅特色重点实验室项目, 编号: (2011):278。

第一作者简介: 籍永华(1981—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为空气重介质流化床干法选煤。E-mail: haizhigong@126.com。

表 1 检测元件测得的硅油黏度 α
Tab. 1 Silicone oil viscosity α measured by detection device

硅油编号	硅油黏度 $\alpha/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	
	2 号转子	3 号转子
350	6.96	1.75
500	11.00	2.74

化床床层黏度的测量可由读取的黏度计指针对应值乘以仪器常数获得。

1.3 加重质的物化特性

实验中所用的加重质为磁铁矿粉, 取自四川攀枝花铁厂, 化学成分为 Fe_3O_4 , 铁黑色, 莫氏硬度为 5.5~6.0, 密度为 4.8~5.3 g/cm^3 , 磁性物质质量分数大于 99%, 磁性强, 氧化能力中等, 强度高, 耐磨性能较好。

1.4 测量系统

空气重介质流化床的床层黏度测量系统如图 1 所示。实验中所用的流化床为圆柱体结构, 由上部(直径为 170 mm, 高为 500 mm)、布风板和下室部组成。上部圆柱体分选室用有机玻璃制作而成, 圆柱体分选室下端带有钢基法兰, 用来固定、连接下部。下室部由钢板焊接而成, 布风板采用有机玻璃多孔型布风板, 它们之间采用橡胶垫和螺栓连接。

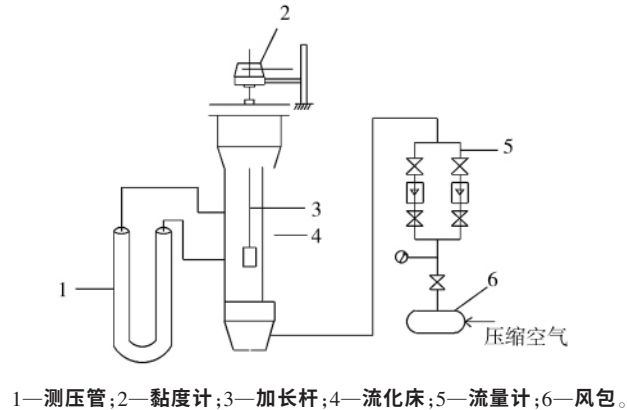


图 1 空气重介质流化床的床层黏度测量系统
Fig. 1 Measurement system of viscosity of air dense medium fluidized bed

2 结果与讨论

2.1 单粒级磁铁矿粉流化床床层黏度

将标定后的检测元件安装在流化床中, 安装时应与检测元件相连接的旋转轴保持垂直。调整黏度计上的升降夹头使检测元件沉入流化床中, 待运转平稳后读取数据, 计算流化床的床层黏度。

实验中, 鼓风机风压定为 0.02 MPa。固定流化床静床高为 120 mm, 在此条件下, 分别对 >0.150~0.300、>0.125~0.150、>0.074~0.125、0.045~0.074 mm 这 4 个粒级的磁铁矿粉进行流化实验和床层黏度测量。4 个

粒级的流化特性曲线见图 2, 流化时 4 个单粒级流化床床层黏度与流化风速的关系见图 3。由图 2 可知, >0.150~0.300 mm 粒级的流化状况最好; 0.045~0.074 mm 粒级的流化状况最差。主要原因是细颗粒磁铁矿粉的比表面积较大, 颗粒间的粘附力强, 颗粒越细表现越突出, 甚至形成颗粒团^[4]。由图 3 可知, 4 个粒级流化床的床层黏度均随着流化速度的增大而显著减小, 原因是随着流化风速的增大, 床层膨胀率也在不断增大, 床内颗粒间由紧密接触状态开始变得疏松, 床层活性增大, 说明流化速度对床层黏度的影响显著。>0.150~0.300、>0.125~0.150 mm 粒级的床层黏度分别在流化风速为 11.63、8.57 cm/s 时减小趋势变缓。由图 2 可知, 此时流化床正好处于稳定流化阶段, 流化床的活性较好。>0.074~0.125、0.045~0.074 mm 这 2 个粒级在相对稳定流化时床层黏度波动较大, 导致流化效果变差。说明随着磁铁矿粉平均粒度的减小, 床层黏度对流化床的稳定性的影响逐渐增大。

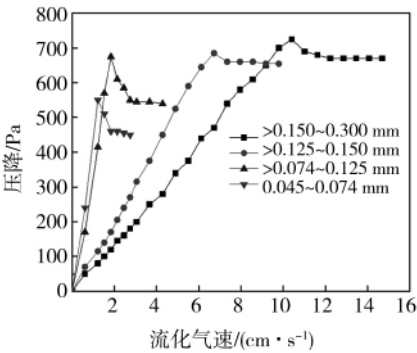


图 2 单粒级磁铁矿粉流化曲线比较
Fig. 2 Fluidized curves of individual magnetite powders

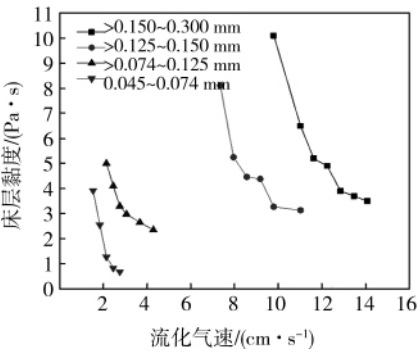
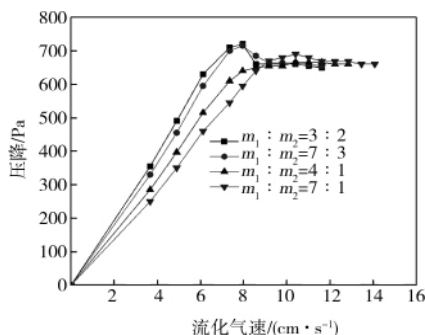


图 3 单粒级不同粒度磁铁矿粉的床层黏度与流化风速的关系
Fig. 3 Relationship between fluidized bed viscosity and velocity

2.2 多粒级磁铁矿粉流化床床层黏度

由单粒级流化曲线可以看出, 当粒度范围为 >0.150~0.300 mm 时, 床层流化后各方面性能良好。由于实际生产中制备这种窄粒级介质有困难, 并且研究^[5]发现, 只要流化性能最佳的 >0.150~0.300 mm 粒级的磁铁矿粉占主导地位, 适当放宽粒级范围也能取得较好的流化性能, 因此本文中研究 >0.150~0.300、

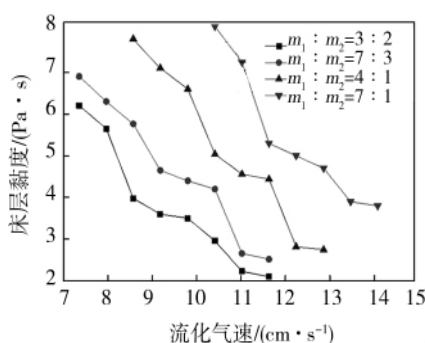
>0.074~0.150 mm 混合粒级流化床的床层黏度。这 2 个粒级磁铁矿粉不同配比下流化床的流化曲线见图 4, 流化时床层黏度与流化风速的关系见图 5。由图 4 可知, 当粒级为 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 的磁铁矿粉的质量比小于 7:3 时, 床层波动相对较大, 主要原因是此时细粒级含量过大, 而细颗粒受黏性力的影响较大; 当粒级为 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 的磁铁矿粉的质量比等于 7:1 时床层流化最稳定, 并且此时床面上均匀地鼓起小泡, 无返混和腾涌现象出现。由图 5 可知, 4 个不同配比的流化床床层黏度均随着流化速度的减小而急剧减小; 在起始流化风速时, 床层黏度较大; 当流化床进入鼓泡流化床后, 床层黏度虽然减小, 但是基本趋于稳定。还可以看出, 随着 >0.074~0.150 mm 细粒级磁铁矿粉含量的减小, 床层黏度逐渐增大, 原因是细粒级含量减小相当于磁铁矿粉平均粒度增大, 床层黏度随着粒度的增大而增大。



m_1, m_2 分别为 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 粒级磁铁矿粉的质量。

图 4 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 混合粒级磁铁矿粉的流化曲线

Fig. 4 Fluidized curves of mixture of magnetite powders with different ratios of >0.150 to 0.300 and >0.074 to 0.150 mm



m_1, m_2 分别为 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 粒级磁铁矿粉的质量。

图 5 >0.150~0.300、>0.074~0.150 mm 混粒级磁铁矿粉的流化床床层黏度与流化风速的关系

Fig. 5 Relationship between fluidized bed viscosity and velocity of magnetite powder with different ratios of >0.150 to 0.300 and >0.074 to 0.150 mm

2.3 床层黏度与影响因素的数学模型

流化床结构与磁铁矿粉粒度组成确定后, 影响床层黏度的主要因素有流化风速、水分含量及床层高

度。此外, 空气重介质流化床干法分选过程中, 通常采用向磁性介质中加入适量煤粉来改变分选密度, 加入煤粉后也将影响流化床的床层黏度, 因此也需要研究煤粉含量对流化床床层黏度的影响。

运用美国 State-Ease 软件公司开发的 Design-Expert 软件进行多因素交互作用设计, 建立床层黏度与其影响因素间的数学模型, 并对结果进行分析。实验中磁铁矿粉的粒度组成为 0.150~0.300 mm。表 2 所示为设计方案, 表 3 所示为推荐二次方模型的置信度分析。

通过运用 Design-Expert 软件进行的多因素交互作用设计分析, 得到以下描述床层黏度与各参数之间关系的数学模型:

$$\eta = 7.15 + 0.80A + 1.16B + 0.077C - 2.48D - 0.84A^2 + 0.23B^2 - 0.10C^2 + 1.57D^2 + 0.12AB - 0.023AC - 0.015AD + 0.010BC - 0.32BD - 0.049CD.$$

图 6 所示为实验值与预测值的对比。可以看出, 实验值与预测值有较好的一致性。图 7 所示为床层黏度与各因素间的关系。可以看出, 在水分质量分数对应的坐标轴方向, 随着水分含量的增大, 曲面倾斜着向上, 说明随着水分含量的增大, 床层黏度急剧增大, 水分质量分数为 0.4% 时床层黏度较大, 床层几乎不能流化。由此可知, 水分含量是床层黏度的显著影响因素。在煤粉质量分数对应的坐标轴方向, 当煤粉含量较小时, 对床层黏度影响并不大, 但是当煤粉质量分数大于 12% 时; 随着煤粉含量的继续增大, 床层黏度明显增大, 煤粉质量分数为 17% 时, 气-固两相流的流动性变差。这是因为, 一方面煤粉含量增大相当于混合加重质平均粒度增大, 另一方面, 当煤粉含量较大时, 流化床中的部分煤粉也处于被分选状态, 以致出现分层, 煤粉含量越大, 分层越严重, 所以当煤粉含量较大时对流化床床层黏度影响较显著。在床层高度对应的坐标轴方向, 曲面倾斜度不大, 随着床层高度的增加, 床层黏度逐渐增大, 原因是随着床层高度的增加, 床层整体受到下室部布风作用减弱, 床层活性变差。总体看来, 床层高度对床层黏度的影响并不十分显著。另外, 还可以看到各因素间的交互作用, 如在图 7(e) 中, 随着流化风速的增大, 床层黏度减小的趋势较缓和; 而在图 7(f) 中, 这一趋势较明显, 说明流化风速与水分含量的交互作用大于流化风速与床层高度的交互作用, 原因是水分含量相对于床层高度对流化床床层黏度的影响较显著。

3 结论

1) 空气重介质流化床床层黏度随着加重质平均粒

表 2 实验设计方案
Tab. 2 Design of experiment

标准顺序	实验顺序	区块	因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	床层黏度/ (Pa·s)
			A: 煤粉质量分数/%	B: 水分质量分数/%	C: 床层高度/mm	D: 流化气流/(cm·s ⁻¹)	
	1	1	12.50	0.10	160.00	13.17	6.1
15	2	1	5.00	0.30	80.00	14.08	5.3
16	3	1	12.50	0.10	120.00	14.08	5.7
29	4	1	5.00	0.20	160.00	16.53	4.5
4	5	1	12.50	0.20	120.00	14.69	6.0
21	6	1	5.00	0.10	160.00	12.24	5.3
2	7	1	5.00	0.40	160.00	16.53	5.4
28	8	1	12.50	0.20	160.00	14.08	6.3
30	9	1	12.50	0.30	120.00	14.08	6.9
8	10	1	20.00	0.20	80.00	16.53	5.8
5	11	1	20.00	0.10	80.00	12.24	6.7
7	12	1	12.50	0.30	120.00	14.69	6.7
26	13	1	5.00	0.10	80.00	12.24	5.2
1	14	1	20.00	0.20	160.00	16.63	5.6
20	15	1	12.50	0.30	80.00	14.69	6.6
13	16	1	5.00	0.40	80.00	16.53	5.2
17	17	1	20.00	0.10	160.00	12.24	6.8
3	18	1	20.00	0.40	80.00	16.53	7.4
27	19	1	5.00	0.20	80.00	16.53	4.3
10	20	1	12.50	0.10	120.00	13.17	6.0
12	21	1	12.50	0.20	120.00	14.08	6.2
23	22	1	20.00	0.30	160.00	14.08	6.6
18	23	1	12.50	0.40	120.00	14.69	7.7
19	24	1	17.50	0.10	160.00	13.17	6.5
22	25	1	20.00	0.30	80.00	14.08	6.5
25	26	1	17.50	0.20	120.00	14.08	6.6
6	27	1	20.00	0.40	160.00	16.53	7.5
14	28	1	5.00	0.30	160.00	14.08	5.4
11	29	1	17.50	0.30	120.00	14.08	7.3
24	30	1	17.50	0.40	160.00	16.53	7.4

表 3 推荐模型的置信度分析
Tab. 3 Analysis of degree of confidence of recommended model

因素	参数估计	自由度	标准偏差	置信度为 95%的 置信区间下限	置信度为 95%的 置信区间上限	显著因素
截距项	7.150	1	0.190	6.740	7.550	
A	0.800	1	0.081	0.630	0.970	2.55
B	1.160	1	0.240	0.640	1.670	20.10
C	0.077	1	0.079	-0.091	0.250	2.84
D	-2.480	1	0.660	-3.880	-1.080	54.12
A ²	-0.840	1	0.170	-1.190	-0.490	3.78
B ²	0.230	1	0.200	-0.200	0.670	5.40
C ²	-0.100	1	0.130	-0.380	0.170	2.37
D ²	1.570	1	0.610	0.280	2.870	43.44
AB	0.120	1	0.091	-0.074	0.310	1.81
AC	-0.023	1	0.052	-0.130	0.088	1.01
AD	-0.015	1	0.130	-0.290	0.260	3.31
BC	0.010	1	0.089	-0.180	0.200	2.11
BD	-0.320	1	0.380	-1.130	0.480	16.48
CD	-0.049	1	0.130	-0.320	0.230	3.61

注:A—煤粉质量分数,%;B—水分质量分数,%;C—床层高度,mm;D—流化气流,cm/s。

·
流
态
化
研
究
·

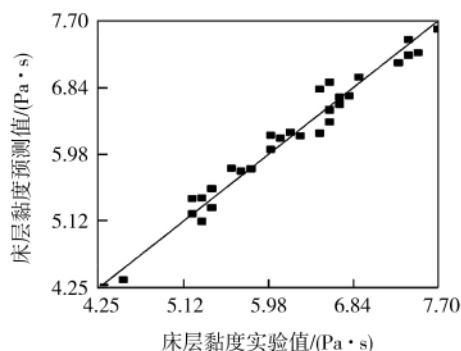
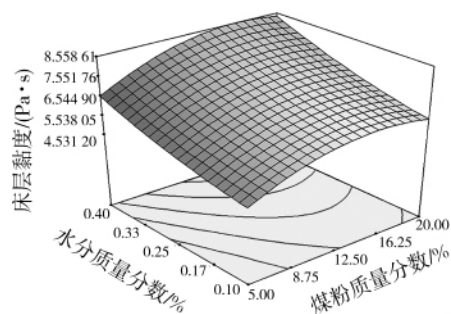
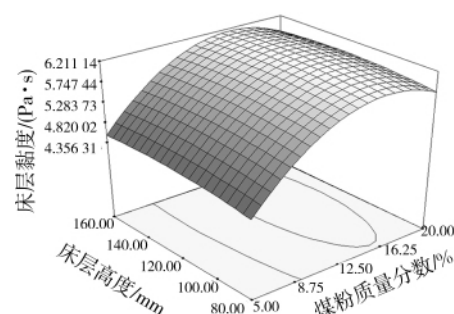


图 6 床层黏度实验值与预测值的对比

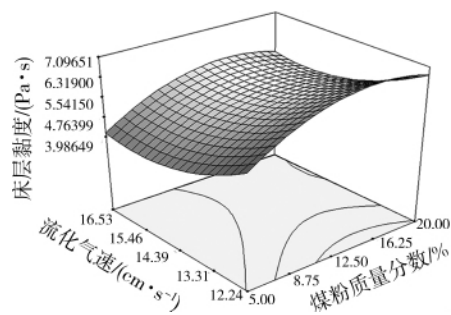
Fig. 6 Comparison of experiential value and predicted value of viscosity of fluidized bed



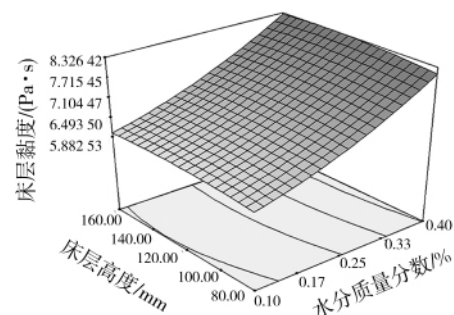
(a) 床层高度为 120 mm, 流化气速为 13.46 cm/s



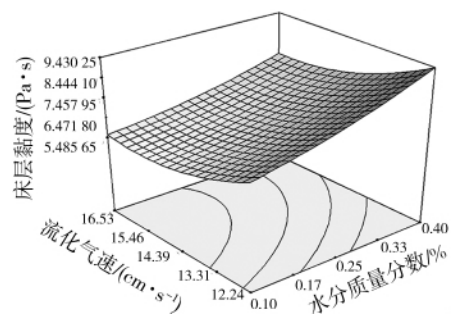
(b) 水分质量分数为 0.1%, 流化气速为 13.46 cm/s



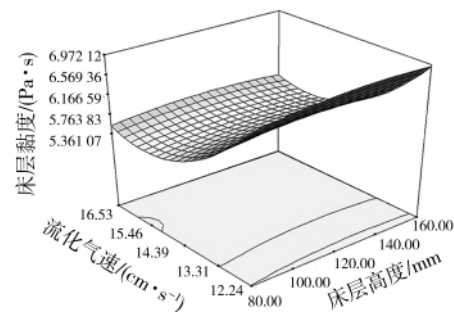
(c) 水分质量分数为 0.1%, 床层高度为 120 mm



(d) 煤粉质量分数为 12.50%, 流化气速为 13.46 cm/s



(e) 煤粉质量分数为 12.50%, 床层高度为 120 mm



(f) 煤粉质量分数为 12.50%, 水分质量分数为 0.1%

图 7 床层黏度与各因素的关系

Fig. 7 Relationship between fluidized bed viscosity and various factors

参考文献 (References):

- [1] 韦鲁滨, 陈清如, 梁春成. 空气重介流化床粗粒物料分选机理的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25 (1): 12-18.
- [2] GIBILAROLG, GALLUCCI, di FELICER, et al. On the apparent viscosity of a fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62 (1): 294-300.
- [3] COLAFIGLI A, MAZZEI L, LETTIERI P, et al. Apparent viscosity

度的增大而增大, 随着流化气速的增大而减小。

2) 煤粉含量较小时, 对床层黏度影响不大, 当煤粉质量分数大于 12% 时, 床层黏度明显增大; 煤粉质量分数为 17% 时, 气-固两相流的流动性变差。床层黏度随水分含量的增大而增大, 水分质量分数为 0.4% 时床层黏度较大, 床层几乎不能流化。床层黏度随着床层高度的增高而增大。

3) 在影响空气重介质流化床床层黏度的各因素中, 流化气速与水分含量的交互作用大于流化气速与床层高度的交互作用。

measurements in a homogeneous gas-fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (1): 144-152.

- [4] 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: 57-63.
- [5] 唐利刚, 赵跃民, 骆振福, 等. 宽粒级加重质的流化特性[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38 (4): 509-513.