

# 空气重介质流化床流化特性及密度梯度分布研究

张翠玉

(中国煤炭科工集团 北京华宇工程有限公司 河南 平顶山 467002)

**摘要:**为实现物料的有效分选,以磁铁矿粉和玻璃微粉为混合加重质,研究了混合加重质的流化特性及空气重介质流化床床层密度梯度分布情况。结果表明:空气重介质流化床形成了均匀稳定的流化状态,当流化气速大于 7.10 cm/s 后,床层压降基本维持在 510 Pa,床层密度基本不变,为 1.71 ~ 1.74 g/cm<sup>3</sup>。当流化气速为 7.95 cm/s 时,流化床内气泡直径为 15 ~ 25 mm,且分布均匀,流化床各层平均密度从上至下依次为 1.72、1.74、1.74、1.74、1.73 g/cm<sup>3</sup>。流化床上部区域,超微细玻璃微粉被气流带到床层表面,使表面床层密度较小;流化床底部区域,气体分布相对均匀,并未形成大气泡,使该区域流化床床层平均密度偏小;而床层大部分区域床层平均密度均为 1.74 g/cm<sup>3</sup>,比较稳定。因此,当流化气速为 7.95 cm/s 时,流化床内并未形成明显的分层和分级现象,说明加重质混合比较均匀,为空气重介质流化床分选物料创造良好条件。

**关键词:**空气重介质流化床;混合加重质;流化气速;密度梯度

中图分类号:TD94 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2014)03-0012-04

## Fluidizing characteristics and density gradient distribution of air dense medium fluidized bed

ZHANG Cuiyu

(Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Pingdingshan 467002, China)

**Abstract:** To separate material effectively, investigate the fluidization characteristics of mixed mediums and density gradient distribution of air dense medium fluidized bed using mixed medium of magnetite powder and glass spheric particles. The experimental results show that air dense medium fluidized bed can form a uniform and stable fluidization state. When the fluidizing air velocity is above 7.10 cm/s, the pressure drop of bed can hold around 510 Pa, the bed density stabilize between 1.71 g/cm<sup>3</sup> and 1.74 g/cm<sup>3</sup>. When the fluidizing air velocity is 7.95 cm/s, the bubble distributed evenly in the bed with the diameter of 15 mm to 25 mm. The average density of each floor of fluidized bed is 1.72, 1.74, 1.74, 1.74, 1.73 g/cm<sup>3</sup> from top to bottom. On the top area of fluidized bed, the micro-fine glass spheric particles can be carried up to the surface of bed by flowing vapor and decrease the density of top area. The gas is evenly distributed on the bottom of bed and decrease the density of the bottom area. The average density of most area is 1.74 g/cm<sup>3</sup>. So when the fluidizing air velocity is 7.95 cm/s, there is no obvious stratification and classification phenomenon. The results show that the mixed medium with evenly density create good conditions for material separation of air dense medium fluidized bed.

**Key words:** air dense medium fluidized bed; mixed medium; fluidization velocity; density gradient

## 0 引 言

“十二五”规划提出,发展安全高效煤矿,推进煤炭资源整合和煤矿企业兼并重组,发展大型煤炭企业集团,统筹规划全国能源开发布局和建设重点,

建设山西、鄂尔多斯盆地、内蒙古东部地区、西南地区和新疆五大国家综合能源基地,对煤炭的开发趋势逐渐向干旱地区发展。在这种形势下,推广干法选煤<sup>[1-4]</sup>对当地环境特别是水资源的保护意义重大。近年来,空气重介质流化床干法分选技术的大

收稿日期:2013-12-26;责任编辑:白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.03.004

作者简介:张翠玉(1983—),女,山东巨野人,助理工程师,从事选煤厂设计工作。E-mail: zcyhuayu@163.com

引用格式:张翠玉.空气重介质流化床流化特性及密度梯度分布研究[J].洁净煤技术,2014,20(3):12-15.

ZHANG Cuiyu. Fluidizing characteristics and density gradient distribution of air dense medium fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(3): 12-15.

力开发使世界干旱缺水地区的煤炭洁净加工<sup>[5-9]</sup>成为可能。空气重介质流化床是利用微粒固相加重质与空气充分接触形成的似流体的均匀气固两相流, 大于床层密度的物料下沉至床层底部成为重产物, 小于床层密度的物料则上浮成为轻产物。因此, 空气重介质流化床要实现物料的有效分选, 就需要在床体内形成一个床层密度均匀、稳定的环境, 包括有效分选时间和有效分选空间的均匀稳定。目前, 空气重介质流化床分选过程中, 所用微粒固相加重质为磁铁矿粉, 由于原煤分选过程中会产生一定量的次生煤泥, 再加上原煤自身带有的细颗粒煤粉, 最终的微粒固相加重质是由磁铁矿粉和煤粉组成的固相混合加重质。由于磁铁矿粉和煤粉的堆密度有较大差异, 有必要对空气重介质流化床床层流化的均匀稳定性进行细致研究。

## 1 试验条件

### 1.1 试验装置

试验装置主要分为 3 个系统: 流化床系统、供风系统和数据输出系统。流化床床体尺寸为 278 mm × 176 mm × 450 mm。供风系统主要由压力表、流量调节阀、风包、罗茨鼓风机等组成。试验过程中通过压力表、玻璃转子流量计及流量调节阀控制风压和风量, 风包的作用是稳压。数据输出系统主要包括压差传感器、U 型管压差计。床层的密度梯度及流化特性通过 U 型管压差计所测压差换算得到; 流化风速由玻璃转子流量计测得流量除以流化床横截面积得到。空气重介质流化床试验装置如图 1 所示。

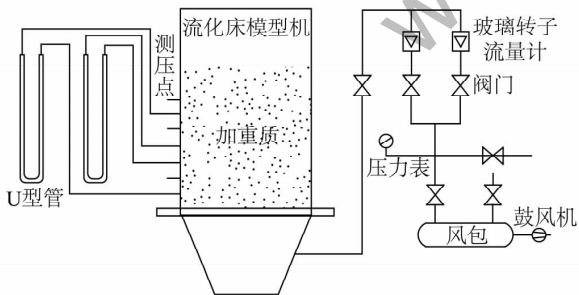


图 1 空气重介质流化床试验装置

### 1.2 加重质性质

由于玻璃微粉和煤粉的密度非常接近, 试验中采用玻璃微粉和磁铁矿粉作为混合加重质, 近似模拟实际生产中的煤粉和磁铁矿粉。玻璃微粉为白色, 且自身密度均匀, 与磁铁矿粉混合后形成黑白加重质, 在流化过程中易于观察床层表面和边壁现象。

磁铁矿粉和玻璃微粉堆密度分别为 2.36、1.14 g/cm<sup>3</sup>, 玻璃微粉占混合加重质的 32.40%, 测得混合加重质的堆密度为 1.93 g/cm<sup>3</sup>, 平均粒度为 0.18 mm。混合加重质粒度组成见表 1。

表 1 混合加重质粒度组成

粒级/mm	产率/%
+0.300	0.73
0.300~0.250	7.43
0.250~0.200	34.75
0.200~0.150	20.84
0.150~0.105	32.56
0.105~0.074	2.10
-0.074	1.59
合计	100.00

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混合加重质流化特性

空气重介质流态化是一种使微粒固相加重质通过与气体充分接触而变成类似流体状态的过程, 称为似流体。当气流通过床层时, 随着气流速度的增加, 床层逐渐被流化, 当风速大于最小流化风速且在一定范围时, 床层能维持一定程度的稳定流化状态。流化床技术应用于干法分选, 主要是利用了其达到稳定流化状态时类似于流体<sup>[10-11]</sup>的两点性质: ①床层中任意两点压强差等于此两点的床层静压差; ②在充分流化且稳定的气固流化床中, 物料所受浮力基本遵守阿基米德原理, 即小于床层平均密度的物料浮于床面, 大于床层平均密度的物料沉于床底。

根据静力学原理, 床层中任意两点压强差等于此两点的床层静压差, 床层密度可表示为

$$\rho_b = \frac{\Delta P}{g\Delta h} \quad (1)$$

式中  $\rho_b$  为以床层压差定义的床层密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\Delta h$  为流化床中两点高度差, mm;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

根据密度的物理定义, 床层密度可表示为

$$\rho_b' = \frac{M}{10SH} \quad (2)$$

式中  $\rho_b'$  为以密度定义的床层密度, g/cm<sup>3</sup>;  $M$  为混合加重质质量, g;  $S$  为流化床的横截面积, cm<sup>2</sup>;  $H$  为不同流化风速下流化的加重质高度(床高), mm。

试验过程中, 逐渐增大流化风速, 分别记录床层

高度和床层压降,观察床内现象。罗茨鼓风机经稳压风包提供压缩空气,经流化床下部布风板进入床体,在流化床侧壁上装有压差传感器,并由U型管压差计读出示数,换算即得床层密度;流化床床层高度由床体标尺读取。混合加重质流化特性试验结果见表2。

表2 混合加重质流化特性试验

流化气速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	床层压 降/Pa	床高/ mm	床层密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	
			$\rho_b$	$\rho_b'$
0	0	265.00	1.90	1.90
1.42	125.00	265.00	1.90	1.90
1.99	175.00	265.00	1.90	1.90
2.84	255.00	265.00	1.90	1.90
3.41	295.00	265.00	1.90	1.90
3.97	345.00	265.00	1.90	1.90
4.54	390.00	265.00	1.90	1.90
5.11	440.00	265.50	1.90	1.90
5.68	495.00	267.00	1.89	1.89
5.96	490.00	276.00	1.83	1.83
6.25	525.00	280.50	1.79	1.80
6.53	500.00	283.00	1.73	1.78
6.81	510.00	287.00	1.73	1.76
7.10	510.00	289.00	1.73	1.74
7.38	510.00	290.00	1.73	1.74
7.66	510.00	291.00	1.73	1.73
7.95	510.00	292.00	1.73	1.73
8.23	510.00	293.00	1.73	1.72
8.52	510.00	294.00	1.73	1.71
9.08	510.00	294.50	1.73	1.71
9.65	505.00	295.00	1.72	1.71

由表2可知,当流化气速大于 $7.10 \text{ cm/s}$ 后,床层压降基本维持在 $510 \text{ Pa}$ ,床层密度也基本不变,为 $1.71 \sim 1.74 \text{ g/cm}^3$ ,说明流化状态非常稳定。同时随着流化气速的增加,床高逐渐增大,这是由于混合加重质质量不变(忽略试验中由气流带走的粉尘质量)根据密度的物理定义可知 $\rho_b$ 应随着床高的增大而减小。其实,上述现象并不矛盾,根据似流体的两相理论,在鼓泡流化床中,存在两相,即气泡相和密相, $\rho_b$ 表现的是密相, $\rho_b'$ 表现的是气泡相和密相两相。随着流化气速的增大,气泡相在流化床中所占体积增大,导致床高增大,而实际密相并没有太大变化,因此 $\rho_b$ 基本保持不变,为 $1.73 \text{ g/cm}^3$ ,而 $\rho_b'$ 随着流化气速的增加而减小。分选时,密相对物料起到有效分选作用;稀相所带来的加重质返混虽然能在一定程度上改善床层稳定性,但流化气速增大

所造成产品错配效应却不能忽视<sup>[12-13]</sup>。

## 2.2 床层密度梯度

通过对混合加重质流化特性的研究可知,稳定流化气速为 $7.10 \sim 9.08 \text{ cm/s}$ 时,随着操作时间的增加,床层压降均为 $510 \text{ Pa}$ ,说明床层内某一点在一定时间内可实现稳定流化。但了解床层密度在空间上的分布还需对床层密度梯度(即同一时间点上,床层内不同点的床层密度分布)进行研究。

为保证每次测量点在每个流化气速下的位置相对固定,试验前对流化床做了以下设定:根据床层充分流化后的床高( $280 \text{ mm}$ ),将床层分为5层,从床层表面到布风板依次为a、b、c、d、e层,离布风板的距离依次为 $280、220、160、90、30 \text{ mm}$ 。在每一层上,均匀分布15个测量点,分别测量不同流化气速下床层中75点的压差。设定稳定流化气速为 $7.95 \text{ cm/s}$ ,各层和测量点的分布如图2所示,各床层密度梯度分布见表3,流化床中a、b、c、d、e各床层密度的空间分布如图3所示。

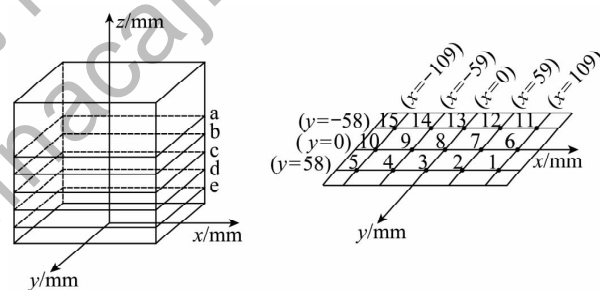


图2 流化床三维坐标及测量点的设定

表3 床层密度梯度分布

x轴/ mm	y轴/ mm	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )				
		a层	b层	c层	d层	e层
109	58	1.72	1.75	1.75	1.72	1.72
59	58	1.73	1.75	1.75	1.72	1.75
0	58	1.73	1.75	1.75	1.75	1.72
-59	58	1.73	1.73	1.73	1.73	1.75
-109	58	1.70	1.75	1.77	1.77	1.77
109	0	1.72	1.73	1.73	1.75	1.75
59	0	1.73	1.75	1.75	1.75	1.72
0	0	1.73	1.73	1.75	1.73	1.72
-59	0	1.73	1.75	1.75	1.75	1.75
-109	0	1.72	1.75	1.72	1.75	1.72
109	-58	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
59	-58	1.73	1.75	1.75	1.77	1.73
0	-58	1.70	1.73	1.75	1.75	1.72
-59	-58	1.72	1.73	1.75	1.75	1.72
-109	-58	1.72	1.73	1.73	1.75	1.72
平均值		1.72	1.74	1.74	1.74	1.73

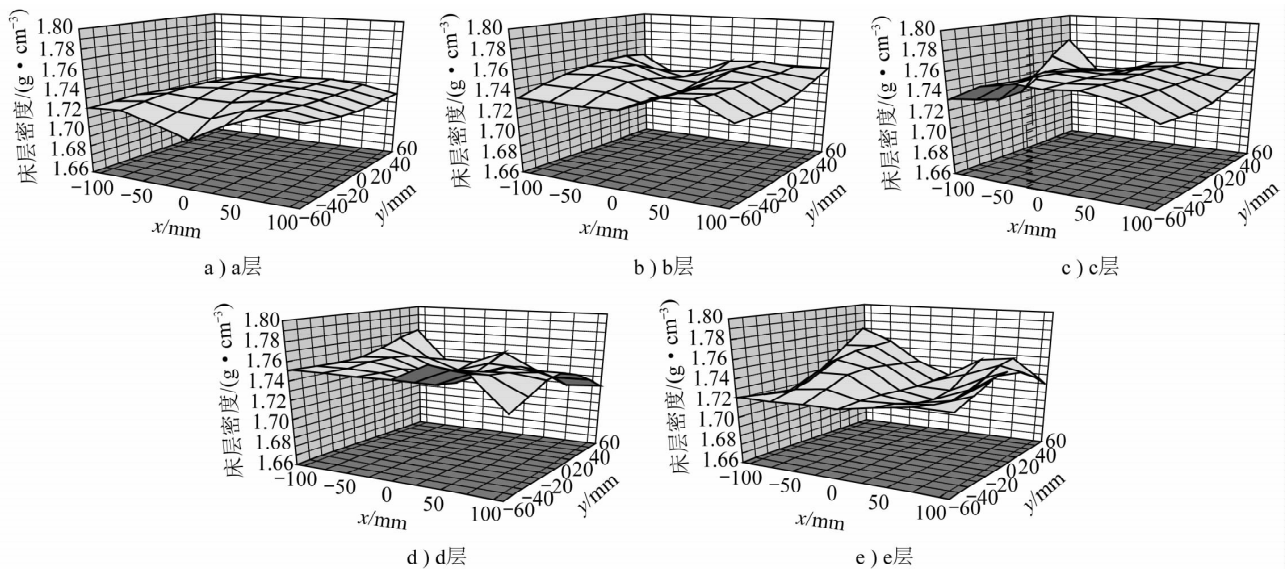


图3 床层密度在各层的空间分布

由图3可知,当流化气速为  $7.95 \text{ cm/s}$  时,流化床内气泡直径为  $15 \sim 25 \text{ mm}$ ,且分布均匀。床层平均密度基本为  $1.72 \sim 1.74 \text{ g/cm}^3$ ,只有床内个别点密度达到  $1.77 \text{ g/cm}^3$ 。流化床各层平均密度由上至下依次为  $1.72$ 、 $1.74$ 、 $1.74$ 、 $1.74$ 、 $1.73 \text{ g/cm}^3$ 。在流化床上部区域(a层),超微细玻璃微粉被气流带到床层表面,使表面床层密度较小;在流化床底部区域(e层),气体分布相对均匀,并未形成大气泡,使该区域流化床床层平均密度偏小,导致物料分选时由于气泡短路使误入床层底部的轻物料难以上浮,造成精煤损失;而床层大部分区域(b、c、d层)床层平均密度均为  $1.74 \text{ g/cm}^3$ ,比较稳定。

通过以上分析可知,当流化气速为  $7.95 \text{ cm/s}$  时,流化床各层并未形成明显的密度梯度,各层处于稳定的流化状态。

### 3 结 论

以磁铁矿粉(67.60%)和玻璃微粉(32.40%)为混合加重质,采用空气重介质流化床对混合加重质流化特性及床层密度梯度分布进行研究,得出以下结论:

- 1) 空气重介质流化床形成了均匀稳定的流化状态,稳定流化气速为  $7.10 \sim 9.08 \text{ cm/s}$ ,床层密度基本为  $1.71 \sim 1.74 \text{ g/cm}^3$ ;
- 2) 当流化气速为  $7.95 \text{ cm/s}$  时,a、b、c、d、e各床层平均密度分别为  $1.72$ 、 $1.74$ 、 $1.74$ 、 $1.74$ 、 $1.73$

$\text{g/cm}^3$ ,各床层没有明显的密度梯度,加重质混合比较均匀。

#### 参考文献:

- [1] 陈清如,杨玉芬. 21世纪高效干法选煤技术的发展[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(6): 527-530.
- [2] 陈清如,骆振福. 干法选煤评述[J]. 选煤技术, 2003(6): 34-40.
- [3] 杨玉芬,陈清如,黎强. 空气重介质流化床分选技术分析[J]. 淮南工业学院学报, 2002, 22(1): 36-39.
- [4] 石燕峰,卢连永,薛守军,等. 干法选煤技术的发展应用[J]. 选煤技术, 2006(5): 39-42.
- [5] 骆振福. 我国西部煤炭分选洁净的途径——流化床高效干法选煤技术[J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 12-14.
- [6] 邢玉梅. 对西部推广干法选煤技术的几点建议[J]. 中国煤炭, 2005, 31(9): 70.
- [7] 任尚锦,孙鹤,任彦东,等. 中国主要干法选煤机的研究与应用[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(5): 1-5.
- [8] Frankland S C. Dry beneficiation of coal[M]. Harwell Laboratory: Coal R & D Programme, 1996.
- [9] Sahu A K, Biswal S K, Parida A. Development of air dense medium fluidized bed technology for dry beneficiation of coal - a review [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2009, 29(4): 216-241.
- [10] 白丁荣,金涌. 垂直气固两相流动系统中颗粒群与气流之间的相互作用[J]. 化工学报, 1991(6): 697-703.
- [11] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 103-115.
- [12] 韦鲁滨,边炳鑫. 矿物分离过程动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002: 96-103.
- [13] 丁玉. 空气重介质流化床内气泡行为及颗粒运动规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.