文章编号: 1000-1964(2001)06-0573-05

# 深床型流化床块煤选矸的试验研究

陶秀祥, 陈增强, 杨 毅, 吴立新
(中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要**: 在深床型高密度浓相流化床特性参数研究的基础上, 分析了床层高度对气泡、密度的均匀稳定性、功率消耗的影响, 对 50～300 mm 粒级的大块煤进行了实验室分选试验. 结果表明: 分选精度是令人满意的, 可能偏差值为 0.02～0.03; 随着床层高度的增加, 所需风压及功率增大, 膨胀率有所降低, 而床层密度的稳定性和起始流化气速几乎不变. 深床型空气重介流化床分选方法为块煤排矸提供了一条新途径

**关键词**: 块煤分选; 深床流化床; 干法选煤
**中图分类号**: TD 942 **文献标识码**: A

目前, 大块煤(50～300 mm)中矸石的排除方法主要有人工拣矸和机械排矸. 其中, 机械排矸包括湿法重介排矸、动筛跳汰机排矸、选择性破碎机选矸等. 由于人工选矸劳动强度大, 往往不易拣净, 所以很少被采用, 一般只是作为检查性手选. 虽然湿法重介和跳汰排矸方法是目前效率较高的排矸方法, 但生产过程需用水, 对于缺水地区的块煤排矸问题则无法采用该工艺, 而用碎选机排矸则必需满足煤与矸石硬度差异的要求. 空气重介流化床选煤技术为 50～300 mm 大块煤的排矸开辟了一条新路. 实验研究表明, 用这种方法排矸的分选精度高, 效果好, 对煤种的适应性强, 因此, 对实现我国煤炭战略西移和西部大开发, 具有十分重要的意义

## 1 实验研究系统与方法

### 1.1 实验系统和装置

实验系统主要由 3 部分组成: 供气部分、流化床装置及参数测量(见图 1).

供气部分由鼓风机、风包及流量计组成. 空气经过滤器过滤后, 由鼓风机送入风包, 经稳压后进入分布板. 调节风包上的排气阀可以改变进入流化装置的风量和风压. 气体流量由转子流量计测定

流化床分选装置的床面面积为 1.0 m × 1.0 m, 床高为 1.440 m, 四周侧壁由有机玻璃板组成. 该装置可用于大于 50 mm 煤炭的静态分选. 流化床主要由风室、气体予分布器和气体分布器组成

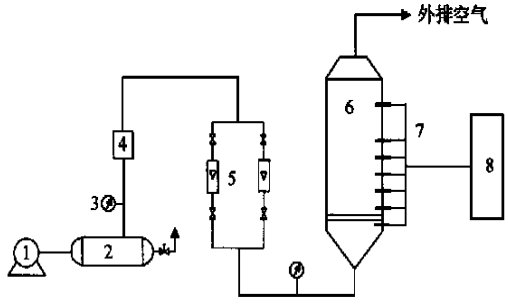



图 1 流化床实验系统
Fig. 1 Experiment system of fluidized bed
1. 鼓风机; 2. 风包; 3. 压力表; 4. 过滤器; 5. 流量计; 6. 流化床; 7. 压力探头; 8. U 型压差计

测量系统: 微压差传感器及变送显示装置用于测量床层压降和床层密度

### 1.2 试验研究方法

在 1.0 m × 1.0 m 流化床模型装置上, 首先进行深床型加重质流化特性的研究, 探讨影响流化床密度均匀稳定性的各种因素和参数. 这些影响因素和参数主要有:

1) 加重质的粒度组成与级配;
2) 布风装置的特性;
3) 流化床层的高度;
4) 流化气体的流量或气流速率;
5) 鼓风机的工作风压及分布板的阻降

收稿日期: 2001-04-19
作者简介: 陶秀祥(1957-), 男, 江苏省盐城市人, 中国矿业大学教授, 从事矿物加工工程方面的研究.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据以上因素和参数, 研究确定在不同床层高度时流化床的最佳工艺参数和操作条件. 实验中, 测量流化床的压降, 绘制实验流化曲线并观察其变化, 据此判断操作是否正常, 同时考察在床层高度变化时流化床密度分布均匀及稳定性. 床层高度分别调到 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 m 时, 进行流化实验, 观察其流化性能、气泡大小及流化床床面波动情况.

在流化床的有关工艺和操作参数确定后, 进行煤的静态分选试验. 为了测定煤炭的实际静态分选效果, 在流化床达到正常分选条件并且处于稳定状态下, 突然切断电源, 停止鼓风, 然后进行分层采样和化验分析.

## 2 深床的介质流化特性

### 2.1 不同床高时的流化特性

流化床床层高度是流态化技术的一个重要参数, 直接影响着床层的流化行为, 对于空气重介质流化床选煤技术来说, 床层太浅, 分选空间不够, 分层不好, 影响分选效果; 床层太高, 易产生大气泡和腾涌现象, 影响流化床稳定[1]. 对于不同的分选上限, 所需的床层高度也不同.

对于露天矿原煤排矸, 床层高度在 1 m 以上比较好, 在这样的分选空间里, 分选粒度上限可达 300 mm. 但床层高度又不能超过发生腾涌的最低床高, 根据前人的经验, 发生腾涌的最低床层高径比为

$$(H_0/D_t)_C = 0.82 d_p^{-0.365}, \qquad (1)$$

式中: $d_p$ 为颗粒的平均直径, m; $H_0$ 为床层高度, m; $D_t$ 为床层直径, m.

根据公式(1)可以得出, 床层的高度最多不超过 1.5 m.

以一定粒度组成的磁铁矿粉作流化介质, 将床层高度由 355 mm 逐渐增加到 705 mm, 分别做流化特性实验. 不同床层高度时磁铁矿粉的流化曲线见图 2.

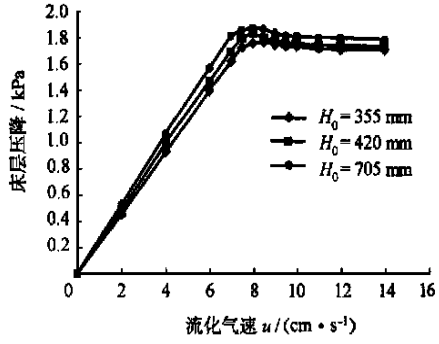



图 2 不同床层高度时的流化曲线

Fig. 2 Fluidization curve in different height of bed

### 2.2 不同床高时流化床的密度稳定性

床层密度的均匀稳定性, 是指气、固两相悬浮体在床层各点的密度值基本相同, 并且在一定时间内保持不变. 均匀稳定性好, 则在流化床内气-固悬浮体不产生明显的分层分级现象, 在高度上没有明显的密度梯度[2,3].

用床层各分层密度、标准方差 $S_t$ 及加重质颗粒各粒级在不同分层中占全样的重量百分数的偏差程度, 来表征床层密度的均匀稳定性. 测量与取样结果分别见表 1(当 $u$ = 10.35 cm/s)时)和图 3.

表 1 流化床密度测量结果

Table 1 Measuring results of density of fluidized bed

| $H_0$/cm | 不同高度上测点密度/(g·cm⁻³) | | | | | | 平均密度/(g·cm⁻³) | $S_t/10^{-4}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | | |
| 35.5 | 1.83 | 1.83 | 1.80 | | | | 1.82 | 2 |
| 42.0 | 1.98 | 1.92 | 1.89 | 1.86 | | | 1.91 | 19 |
| 51.8 | 1.99 | 1.98 | 1.96 | 1.91 | 1.89 | | 1.95 | 15 |
| 60.5 | 2.02 | 2.01 | 2.00 | 1.98 | 1.96 | 1.87 | 1.97 | 25 |
| 70.5 | 2.06 | 2.04 | 2.02 | 2.00 | 2.00 | 1.99 | 2.02 | 6 |

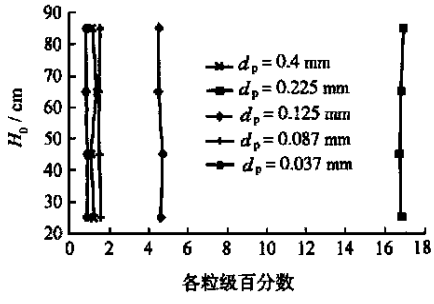



图 3 不同粒级加重质沿床高的分布

Fig. 3 Distribution of different size mediums along the fluidized bed height

从表 1 可以看出, 当床层静高度增加时, 整个床层的 $S_t$ 值变化不大, $S_t$ 值均较小, 说明床层密度比较均匀、稳定, 所以增加流化床的床层高度, 密度的均匀稳定性不会降低, 对于煤的分选影响不大.

从图 3 可以看出, 深床层流化床中加重质颗粒各粒级在床层高度上的分布基本相同, 没有明显的分层、分级, 各粒级在床层中的上、中、下层占全样的重量百分数基本一致.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 2.3 深床对流化气速的影响

流化气速是另一个重要参数, 流化床层的压降、膨胀比、床层孔隙率及颗粒的运动状态等都与流化气速有关, 因此, 流化气速必须控制在一定范围内, 才能保证良好的流化状态[4].

深床中不同的流化气速条件下的试验结果, 见表 2(当床层高度 $H_0$= 705 mm 时).

表 2　不同流化气速时床层密度测量结果

Table 2　Measuring results of bed density in different gas velosity

| $u$/(cm·s$^{-1}$) | 各分层床层密度(由下到上)/(g·cm$^{-3}$) | | | | | | 平均密度/(g·cm$^{-3}$) | $S_t$/10$^{-4}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | | |
| 8.97 | 2.11 | 2.07 | 2.06 | 2.06 | 2.02 | 1.98 | 2.05 | 30 |
| 10.35 | 2.06 | 2.04 | 2.02 | 2.00 | 1.99 | 1.92 | 2.01 | 17 |
| 13.80 | 2.00 | 1.98 | 1.98 | 1.92 | 1.87 | 1.72 | 1.91 | 88 |

由表 2 可知, 床层平均密度有下降趋势, 密度的标准方差 $S_t$ 的变化趋势是: 流化气速 $u$= 8.97 cm/s, $S_t$= 30×10$^{-4}$; $u$= 10.35 cm/s, $S_t$= 17×10$^{-4}$; $u$= 13.8 cm/s, $S_t$= 88×10$^{-4}$. 可见, 当流化气速较低时, 床层流化不好, 致使床层的密度均匀性差; 当流速过高时, 颗粒返混严重, 床层密度的稳定、均一性被破坏, 气泡增大, 床层剧烈波动. 在实际应用中应该加以注意.

## 3 分选试验结果

用单一磁铁矿粉作加重质流化时, 床层密度一般在 2.0 g/cm$^3$ 左右, 这样的流化床层可以用于排矸.

实验所用原煤为夹河煤矿 50～100 mm 级大块原煤, 浮沉资料见表 3. 分选试验分层取样做浮沉, 结果见表 4.

表 3　原煤浮沉综合分析

Table 3　Float-sink test results of raw coal

| 密度级/(g·cm$^{-3}$) | 原煤 | | 浮物累积 | | 沉物累积 | | ±0.1 含量 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma$/% | $w$(A)/% | $\gamma$/% | $w$(A)/% | $\gamma$/% | $w$(A)/% | 密度/(g·cm$^{-3}$) | 含量/% |
| < 1.5 | 38.97 | 9.61 | 38.97 | 9.61 | 100.00 | 51.29 | 1.5 | 42.53 |
| 1.5～1.6 | 3.56 | 30.44 | 42.53 | 11.35 | 61.03 | 77.91 | 1.6 | 5.18 |
| 1.6～1.7 | 1.62 | 38.41 | 44.15 | 12.35 | 57.47 | 80.35 | 1.7 | 3.50 |
| 1.7～1.8 | 1.88 | 40.48 | 46.03 | 13.50 | 55.85 | 82.08 | 1.9 | 1.63 |
| 1.8～2.0 | 1.63 | 57.16 | 47.66 | 14.99 | 53.97 | 83.53 | | |
| > 2.0 | 52.34 | 84.35 | 100.00 | 51.29 | 52.34 | 84.35 | | |
| 合计 | 100.00 | 51.29 | | | | | | |

表 4　各层分选试验结果

Table 4　Test results of coal separation in different height

$w_B$/%

| 密度级/(g·cm$^{-3}$) | 第 1 层 | | | 第 2 层 | | | 第 3 层 | | | 第 4 层 | | | 原煤 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 占本级 | 占全样 | 灰分 | 占本级 | 占全样 | 灰分 | 占本级 | 占全样 | 灰分 | 占本级 | 占全样 | 灰分 | 占全样 | 灰分 |
| < 1.5 | 90.27 | 37.68 | 9.76 | 4.30 | 0.08 | 9.91 | | | | | | | 37.76 | 9.76 |
| 1.5～1.6 | 7.14 | 2.98 | 28.93 | 24.19 | 0.45 | 30.46 | | | | | | | 3.43 | 29.13 |
| 1.6～1.7 | 2.54 | 1.06 | 37.98 | 26.88 | 0.50 | 38.36 | 2.80 | 0.09 | 38.98 | | | | 1.65 | 38.14 |
| 1.7～1.8 | 0.05 | 0.02 | 40.16 | 44.63 | 0.83 | 40.22 | 32.61 | 1.05 | 41.79 | 0.06 | 0.03 | 41.13 | 1.93 | 41.09 |
| 1.8～2.0 | | | | | | | 23.91 | 0.77 | 57.03 | 1.56 | 0.83 | 57.68 | 1.60 | 57.37 |
| > 2.0 | | | | | | | 40.68 | 1.31 | 83.01 | 98.38 | 52.32 | 84.51 | 53.63 | 84.47 |
| 合计 | 100.00 | 41.74 | 11.86 | 100.00 | 1.86 | 36.06 | 100.00 | 3.22 | 62.12 | 100.00 | 53.18 | 84.07 | 100.00 | 52.33 |

在实验室流化装置静态分选试验中, 床层沿纵向分成 4 层, 可以得到 3 种产品方案:

1) 将第 1 层(上层)作为精煤, 其余各层作为尾煤产品;

2) 将第 1, 2 层作为精煤, 其余各层作为尾煤产品;

3) 将第 1, 2, 3 层作精煤, 其余作尾煤产品.

3 种方案的分配曲线见图 4.

3 种方案的数质量和分选实验指标见表 5.

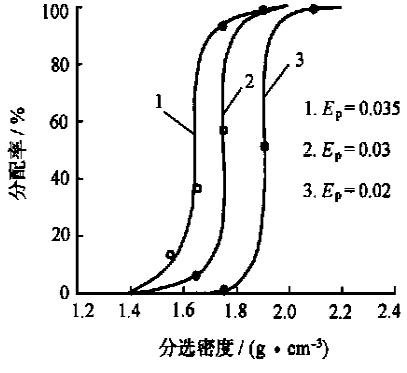



图 4　产品分配曲线

Fig. 4　Distribution curve of products

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 不同产品方案的分选指标

Table 5 Separation indexes of different schemes of products

| 产品方案 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| 实际精煤产率/% | 41.74 | 43.63 | 46.85 |
| 理论精煤产率/% | 43.10 | 44.50 | 49.20 |
| 数量效率/% | 96.84 | 98.04 | 95.22 |
| 实际分选密度/(g·cm$^{-3}$) | 1.675 | 1.745 | 1.95 |
| $E_p$ 值 | 0.035 | 0.03 | 0.02 |

由表 5 中可以看出: 1) 随切割位置的降低, 实际分选密度增大, 精煤产率增加, 灰分也随之增高; 2) 随实际分选密度下降, ±0.1 含量增加, 可能偏差 $E_p$ 值增大, 分选精度降低[5].

## 4 讨论与分析

### 4.1 深床气泡的影响

在流化床中, 气泡在分布板上形成后, 通过床层向上运动, 在运动过程中, 相邻的气泡会相互合并, 生成较大的气泡, 分布板的结构对生成的原始气泡尺寸影响较大, 而气泡直径是床径 $D_t$, 离分布板的距离 $h$ 及原始气泡直径的函数. 当分布板阻降和床层直径 $D_t$ 一定时, 气泡的直径随床层高度的增加而增加, 床层越高, 气泡合并越严重, 当气泡直径增加到与被分选的物料颗粒直径相同时, 分选就很难进行, 容易造成分选过程短路, 此时, 就无法按阿基米德定律分选.

在床高为 840 mm 的流化床中, 流化气速控制在 10.35 cm/s, 观察气泡的大小, 从床的侧面看, 随床层高度的增加, 气泡逐渐增大, 最小的气泡大约 2～3 mm, 到达床层上部时最大气泡大约 50 mm, 但量很小, 只是偶尔出现. 而在有效的分选段, 气泡直径大多小于 20 mm, 实验时, 这种气泡能够满足分选要求. 在实际生产应用中, 由于刮板内部构件的作用, 能破碎大气泡, 减少床层返混, 可提高床层的稳定性和流化效果.

### 4.2 深床的功率消耗

功率消耗在深床操作中是一个重要因素. 所以, 在供风系统的设计时, 应对鼓风机所需功率进行计算. 流化床供风系统气体压力的变化情况如图 5 所示.

图 5 表明: 为提供具有一定压力 ($p_3$) 的流化气体, 所需的功率即为将这些气体由压力 $p_1$ 压缩到 $p_2$ 的数值. 可以通过对鼓风机作一机械衡算求得, 每克分子气体所需的轴功, 为[6]

$$-W_s = \int_1^2 \frac{\mathrm{d}p}{\rho} = \int_1^2 v\,\mathrm{d}p \ , \qquad (2)$$

式中: $\rho$ 为介质的密度; $v$ 为介质的质量体积.

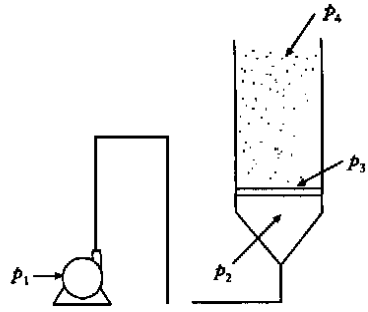



图 5 系统气体压力的变化

Fig. 5 Variations of system gas pressure

$p_1$. 进气压力; $p_2$. 风室压力; $p_3$. 床层压力; $p_4$. 出口压力

假定为理想状态, $pv = RT$, 对于绝热可逆操作条件下的轴功可用下列公式表示

$$-W_s = \frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1} RT_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma_c - 1)/\gamma_c} \right] = \frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1} p_2 v_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma_c - 1)/\gamma_c} \right] , \qquad (3)$$

式中: $\gamma_c$ 为质量热容比, 对空气 $\gamma_c = 1.4$; $p_2$, $v_2$, $T_2$ 分别为气体的压力、质量体积和温度; $R$ 为气体常数.

对具有摩擦损失和热效应的实际操作, 对气体所做的实际功为: $W_s' = \frac{W_s}{\eta}$, 其中用于 $W_s$ 的 $p_1$, $p_2$ 为测定压力值, $\eta$ 为鼓风机效率, 对于罗茨鼓风机, $\eta = 0.6 \sim 0.8$.

通过测定与计算: 当 $H_0 = 800$ mm 时, $p_2 = 133.06$ kPa, $p_3 = 118.35$ kPa, 风机的轴功率为 5.35 kW; 当 $H_0 = 120$ cm 时, $p_2 = 141.55$ kPa, $p_3 = 126.86$ kPa, 风机的轴功率为 6.98 kW.

以上分析可知, 当流化床的其它条件相同, 而床层高度不同时, 其功率消耗随床高增加而增加, 并与流量成线性变化. 与此同时, 随床高的增加, 所需风压逐渐增大, 由于在流化实验中风压是一个重要值, 太小就不能提供足够的流化风量, 所以选择风机时一定要考虑风压的大小.

## 5 结 论

1) 初步分选试验研究表明: 空气重介流化床分选 50～300 mm 煤炭时, 可能偏差 $E_p$ 值为 0.02～0.035, 可以用于块煤排矸.

2) 在一定的流化气速下, 深床层的密度稳定性与浅床层相差不大, 不因床层的高度增加而破坏稳定性.

3) 随床层静高度 $H_0$ 增加, 所需风压及功率增大, 床层密度增加, 膨胀率降低, 而起始流化速度和正常流化速度不变.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4) 空气重介流化床中, 气泡尺寸必须比所分选的煤炭粒级小, 气泡与煤的粒度相等或大于时, 则难以进行分选, 所以气泡在分选中的影响因素不容忽视

**参考文献:**

[1] 张蕴壁. 流态化选论[M]. 西安: 西北大学出版社, 1989. 90-102.
[2] 骆振福. 煤炭分选的气固两相特性分析[J]. 选煤技术, 1994(4): 3-7.
[3] 张远君. 两相流体动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1987. 221-230, 276-283.
[4] 韦鲁宾. 双密度层空气重介流化床形成特性的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学煤综合利用系, 1995.
[5] 吴立新. 空气重介流化床干法选煤提高分选上限的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学煤综合利用系, 1995.
[6] 张克危. 流体机械原理(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 12-18.

# Test Research of Lump Coal Separation by Deep Fluidized Bed of Air Dense Medium

TAO Xiu-xiang, CHEN Zeng-qiang, YANG Yi, WU Li-xin

(School of Chemical Engineering and Technology, CUMT, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract**: On the basis of research of fluidization characteristic parameters of deep beds, the effects of fluidized bed height on gas bubble and power consumption were analyzed. Separating tests of 50 to 300 mm lump coal were carried out. Results show that the separation precision is satisfied, the ecart probable moyen value is equal to 0.02 to 0.03. With increase of bed height, air pressure and power consumption rise, expansion ratio of the bed decreases, but the density stability and critical fluidized velocity of the bed are hardly changed. This method of coal preparation with air-dense medium of deep fluidized bed provides a new way for lump coal separation.

**Key words**: lump coal separation; deep fluidized bed; dry coal preparation

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net