

文章编号:0253-9993(2012)09-1586-05

气固磁场流态化分选细粒煤

宋树磊¹,赵跃民¹,骆振福¹,唐利刚²,杨旭亮¹

(1. 中国矿业大学 化工学院 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

摘要:利用研制的横流式气固磁稳定流化床,以0.074~0.045 mm粒级磁铁矿粉和磁珠作为高密度和低密度分选介质,对6.0~0.5 mm细粒煤进行连续分选试验。结果表明:当处于稳定流化时,磁场气固流化床比普通气固流化床具有更宽的稳定操作气速范围;外加磁场使磁性颗粒沿磁力线形成平行磁链,增大了床层空隙率,形成了分布均匀的通道,气体通过时不会产生气泡,由此形成了稳定的散式气固磁场流化床;高密度分选和低密度分选的可能偏差分别为0.085,0.075 g/cm³。

关键词:磁场流化床;细粒煤分选;流化特性;磁链

中图分类号:TD924 **文献标志码:**A

Fine coal particles separation by air-solid magnetic fluidization

SONG Shu-lei¹, ZHAO Yue-min¹, LUO Zhen-fu¹, TANG Li-gang², YANG Xu-liang¹

(1. Key Laboratory of Coal Processing & Efficient Utilization of Ministry of Education, School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Continuous separation tests of fine coal particles of 6.0–0.5 mm were done by a crossflow air-solid magnetically stabilized fluidized bed (MSFB), which used 0.074–0.045 mm magnetite powder and magnetite beads as medium of high and low density separation respectively. The results show that the range of steadily operational air velocity in air-solid magnetically fluidized beds is broader than that in standard air-solid fluidized beds when they are at stable fluidization. External magnetic field compels the magnetic grains to form parallel magnetic chains following the magnetic induction lines, which enlarge the bed voidage and form the uniform air channels. Air bubbles cannot be produced when the air flows through the channels, thus stable and particulate air-solid magnetically fluidized beds coming into being. The possible deviation of high and low density separation are 0.085 and 0.075 g/cm³ respectively.

Key words: magnetically fluidized beds; fine coal separation; fluidization characteristics; magnetic chains

干法选煤技术对于解决干旱缺水、严寒地区煤炭以及遇水易泥化煤炭的分选具有重大意义,并得到世界各国的重视。国内外学者先后开展了风力跳汰、风力摇床、复合式风力分选、气固流化床分选等干法选煤技术。气固流化床干法选煤技术具有分选精度高、工艺系统简单等特点,是国际选煤界的研究热点之一^[1-4]。中国矿业大学在空气重介质流化床干法选煤领域进行了系统的研究,包括50~6 mm煤炭的普通空气重介质流化床分选^[5-8]以及小于6 mm煤炭的

振动流化床和磁稳定流化床的分选研究^[9-14]。

气固磁稳定流化床的特点是在磁场作用下,重介质在上升气流作用下流化,床层中没有气泡产生,消除了普通空气重介质流化床床层密度波动的不良情况,为固体颗粒的分离创造了良好条件,可用于分选粒度更小的物料。同时,消除了物料的返混,增强了分选效率。因此,国内外学者对磁稳定流化床分选细粒煤炭进行了研究。Rosensweig等^[15]最早利用气固磁稳定流化床对煤炭分选进行了研究,研究物料为

收稿日期:2012-04-13 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51134022);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214904);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QNB11)

作者简介:宋树磊(1973—),男,山东临沂人,讲师,博士。Tel:0516-83591101, E-mail: slsong@cumt.edu.cn

13~4 mm 的煤和石灰石的混合物;Fan M M 等^[12]以磁珠为分选介质,在静态气固磁稳定流化床中对6~1 mm 细粒煤进行了间歇分选试验;Luo Z F 等^[13-14]以磁铁矿粉为分选介质,进行了气固磁稳定流化床间歇分选小于6 mm 细粒煤的实验,研究表明,气固磁稳定流化床对小于6 mm 细粒煤炭有较好的分选效果。

上述研究工作主要集中在磁稳定流化床的间歇分选,未能实现煤炭的连续分选。横流式气固磁稳定流化床是指其中的气体向上流动而重介质相对于气体做横向流动。这种流化床可以实现煤炭的连续分选。本文利用研制的横流式气固磁稳定流化床,以0.074~0.045 mm 粒级磁铁矿粉和磁珠作为高密度和低密度分选介质,对小于6 mm 细粒煤进行连续分选试验。

1 试验装置

1.1 电磁线圈组及磁场的空间分布

电磁线圈组如图1所示。线圈内径310 mm,高200 mm,2 500匝,线圈间距160 mm,横流式气固磁稳定流化床的工作区域就在此空间内。可调式直流稳压电源产生直流电,在线圈内形成近似均匀稳定的磁场,磁场强度在0~25 000 A/m 可调。利用毫特斯

拉计测量磁场的空间分布,结果如图2所示。

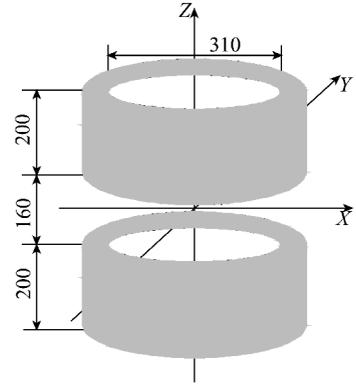


图1 电磁线圈组

Fig. 1 Electromagnetic loops

从图2可以看到,对于X,Y轴方向的磁场,当外加磁场强度较低时,产生的磁场较均匀;当外加磁场强度较高时,产生的磁场均匀性变差,中心点处的磁场强度最大,远离坐标点处的磁场强度依次减小。Z轴上的磁场较均匀,中心点磁场强度最小,远离坐标点的磁场强度逐渐增大。而且X,Y,Z轴方向的测量值均小于对应的外加磁场强度,这是因为电磁线圈存在漏磁现象。本文所用的细粒煤分选介质为磁铁矿粉和磁珠,均为强磁性物质,当外加磁场强度较低时就可以形成磁稳定流化床。

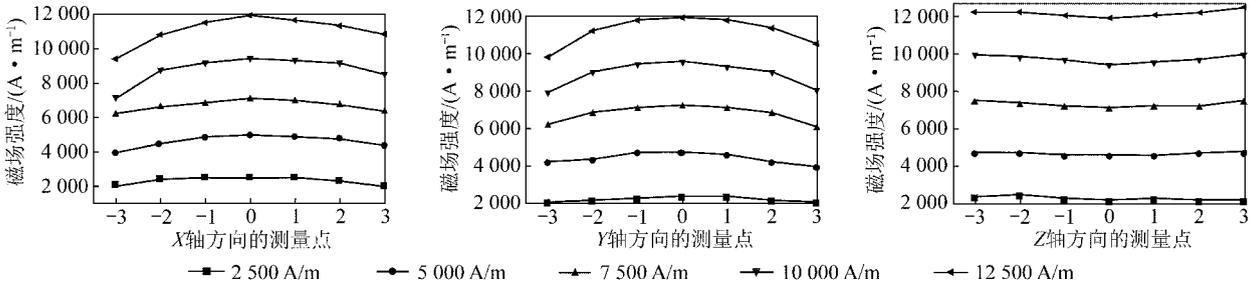


图2 磁场强度的空间分布

Fig. 2 Dimensional distributions of magnetic field intensity

1.2 横流式流化床的结构

横流式流化床为长方体结构,由下室部、布风板和上室部组成。为避免流化床对磁场干扰,流化床采用非导磁的有机玻璃制作。布风板为有机玻璃孔板,孔径3 mm,开孔率22.5%,两层孔板中间加两层工业滤布。下室部、布风板和上室部采用橡胶垫和不锈钢螺栓联接。横流式流化床长250 mm,宽40 mm,高200 mm。为便于介质流动,床体倾角在0°~5°可调。

2 磁稳定流化床的流化特性

气固磁稳定流化床分选性能的好坏很大程度上取决于加重质的流化特性,均匀、稳定的散式流化床

是细粒煤有效分选的先决条件。分别进行了0.074~0.045 mm 粒级磁铁矿粉和磁珠的流化试验,考察两种分选介质的流化特性。

2.1 磁铁矿粉的流化特性

图3为利用气速-压降法得到的不同磁场强度时0.074~0.045 mm 磁铁矿粉的流化特性曲线,图中, U_{mf} 为起始流化速度; U_{mb} 为起始鼓泡速度。

从图3和表1可看出,0.074~0.045 mm 磁铁矿粉的起始流化速度在磁场强度变化时基本恒定,约为1.0 cm/s;起始鼓泡速度随磁场强度的增大而增大,由1.2 cm/s增大到2.0 cm/s;稳定操作气速随磁场强度的增大而增大,由0.1 cm/s增大到1.0 cm/s。

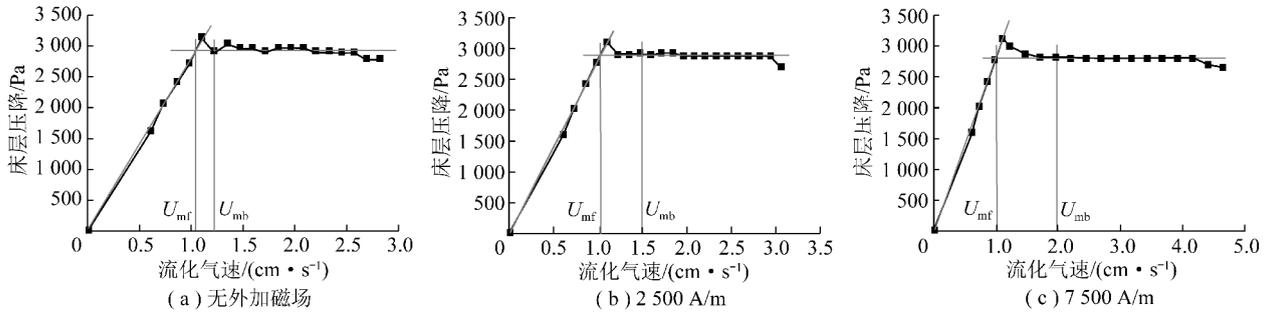


图3 不同磁场强度的磁铁矿粉流化特性曲线

Fig. 3 Fluidization characteristic curves of magnetite powder at different magnetic intensities

表1 磁铁矿粉流化特征值

Table 1 Fluidization eigenvalues of magnetite powder

磁场强度/ ($A \cdot m^{-1}$)	起始流化速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)	起始鼓泡速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)	稳定操作速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)
0	1.1	1.2	0.1
2 500	1.0	1.5	0.5
7 500	1.0	2.0	1.0

时0.074~0.045 mm磁珠流化特性曲线,表2为磁珠流化特征值。

表2 磁珠流化特征值

Table 2 Fluidization eigenvalues of magnetic beads

磁场强度/ ($A \cdot m^{-1}$)	起始流化速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)	起始鼓泡速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)	稳定操作速度/ ($cm \cdot s^{-1}$)
0	0.5	0.7	0.2
2 500	0.5	1.0	0.5
7 500	0.5	1.5	1.0

2.2 磁珠的流化特性

图4为利用流速-压降法得到的不同磁场强度

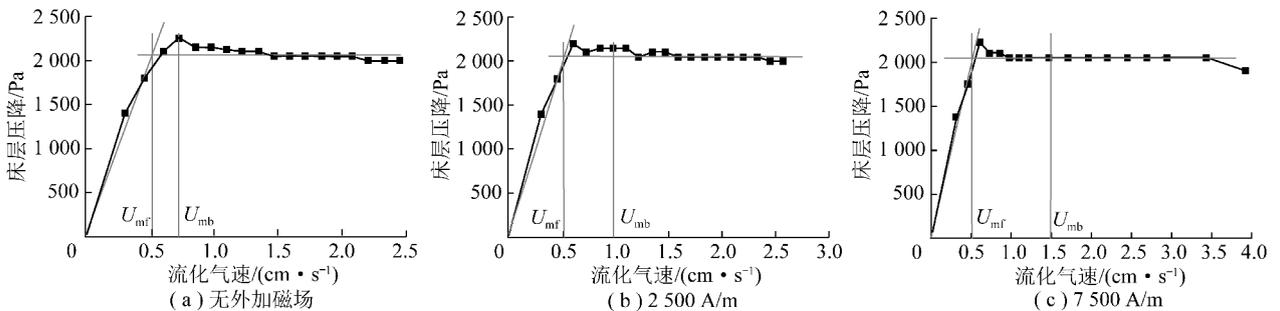


图4 不同磁场强度的磁珠流化特性曲线

Fig. 4 Fluidization characteristics curves of magnetite beads at different magnetic intensities

从图4和表2可看出,0.074~0.045 mm磁珠的起始流化速度在磁场强度变化时基本恒定,约为0.5 cm/s;起始鼓泡速度随着磁场强度的增大而增大,由0.7 cm/s增大1.5 cm/s;稳定操作流速范围随着磁场强度的增大而增大,由0.2 cm/s增大到1.0 cm/s。

从磁铁矿粉和磁珠的流化特性研究可以发现,磁稳定气固流化床与普通气固流化床相比,处于稳定流化状态时的操作流速范围更宽,在进行细粒煤分选时具有更强的可调节性。

2.3 磁流化床的鼓泡特征

气泡对于流化床的稳定性具有至关重要的影响。普通气固流化床一般是鼓泡流化床,而磁稳定流化床则是微泡或无泡散式流化床。本文采用NAC高速摄

像机研究了磁场作用下流化床中气泡的生成、消失以及磁场流化床的稳定性机理。

图5为流化流速为4.90 cm/s,不同磁场强度时0.074~0.045 mm磁铁矿粉形成的磁场流化床的状态。由图5(a)可知,此时流化床是鼓泡流化床,床层中有明显的大气泡产生,流化床扰动剧烈,介质返混加剧,气泡到达床层表面时破裂,并携带大量的介质离开床面,床层稳定性差。由图5(b)可知,此时流化床处于磁控鼓泡床阶段。流化床中无明显大气泡,介质返混减缓,少量磁铁矿粉以磁链的形式被气流携带离开床面,床层稳定性增强。由图5(c)可知,此时流化床处于磁稳定床阶段,床层中无气泡产生,介质返混近乎停止,磁铁矿粉形成的磁链在原地轻微振动,偶尔有个别磁链被气流携带离开床面,床层处于稳定状态。

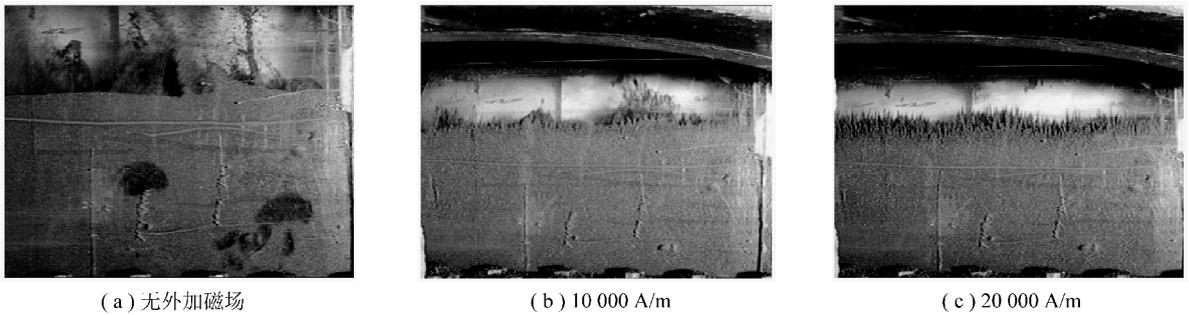


图5 不同磁场强度时的流化状态

Fig. 5 Fluidization states at different magnetic intensities

从上述研究可以看出,对普通鼓泡流化床施加磁场后,床层中气泡明显减少以至消失,流化床稳定性大大增强。结合前人的研究成果^[16-19]及本文的研究认为,气泡减少、消失的原因如下:

(1)外加磁场使磁性颗粒沿磁力线形成磁链,磁链在纵向长度和横向宽度上均由许多单颗粒相互吸引组成,其重力和体积远大于单颗粒的重力和体积。当气泡从磁链下方上升时,磁链很容易从气泡顶部进入气泡,并把气泡撑破。外加磁场强度越大,产生的磁场力越强,相互吸引连接在一起的磁性颗粒就越多,形成的磁链体积和重力就越大,而结合在一起的强度也越大,因此,气泡就无法在磁稳定流化床中生成、长大,流化床就更加稳定。

(2)磁场流化区域的磁力线可认为是平行的,沿磁力线形成的磁链也平行排列。平行磁链间的空隙大于随机分布的颗粒间空隙,因此,磁场使流化床空隙率增大,气体通过能力提高。此外,平行磁链间的空隙形成气体通道,通道数量多且分布均匀,气体通过时不会造成局部气体量过大而产生气泡,降低了对流化床的扰动。

3 细粒煤分选实验

3.1 分选原理

图6为横流式气固磁稳定流化床分选机的工作原理。进行分选实验时,磁性介质从流化床的介质溜槽进入模型机的分选槽中,在压缩气流的作用下流化;在线圈中通入直流电,在分选槽空间范围内产生纵向均匀磁场,磁性介质在磁场作用下沿磁力线排列,形成床层密度均匀和高度稳定的气固磁稳定流化床;小于6 mm细粒煤从流化床右端的原煤溜槽给入磁稳定流化床,在流化床中按阿基米德定律沉降分层,小于床层密度的轻产物浮在磁稳定流化床的表层,大于床层密度的重产物沉降到床层底部;分选时由于磁性介质和细粒煤从入料端给入而在流化床两端产生压差,并且流化床体具有一定的倾角,因此磁

性介质和细粒煤在流化床中横向流动,轻产物和重产物以及部分磁性介质分别从分选机左侧的溜槽流出,从而实现细粒煤的分选。

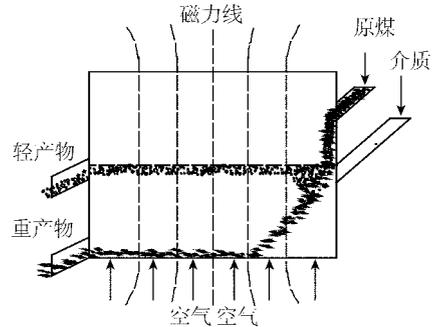


图6 横流式气固磁稳定流化床分选原理

Fig. 6 Separation principle of crossflow air-solid magnetically stabilized fluidized beds

3.2 分选性能

在研制的横流式气固磁稳定流化床中,分别以0.074~0.045 mm 磁铁矿粉和磁珠作为分选介质对细粒煤进行高密度分选和低密度分选,得到矸石、中煤、精煤3种产品。分选煤样为6.0~0.5 mm 的空气干燥煤样2 kg。高密度分选实验条件:磁场强度2 500 A/m,介质流量9.4 g/s,床体倾角1.30°,流化气速2.08 cm/s;低密度分选实验条件:磁场强度5 000 A/m,介质流量4.4 g/s,床体倾角1.30°,流化气速1.71 cm/s。图7为分选试验的产品分配曲线,其中 e_1 为高密度段矸石的分配率, e_2 为低密度段中煤的分配率。

从6.0~0.5 mm 细粒煤的分选实验结果可知,高密度实际分选密度 $\delta_{p1} = 1.860 \text{ g/cm}^3$,可能偏差为 0.085 g/cm^3 ,低密度实际分选密度 $\delta_{p2} = 1.605 \text{ g/cm}^3$,可能偏差为 0.075 g/cm^3 。试验结果表明所研制的横流式气固磁稳定流化床分选模型机对6.0~0.5 mm 细粒煤具有较好的分选效果。

4 结 论

(1)当处于稳定流化状态时,磁场气固流化床比

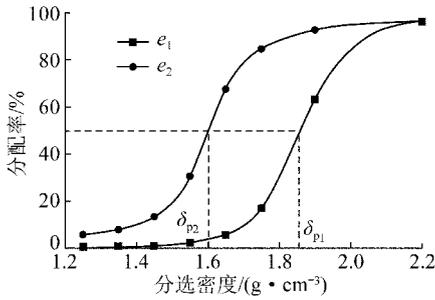


图7 产品的分配曲线

Fig. 7 Distribution curves of products

普通气固流化床具有更宽的稳定操作气速范围,在细粒煤分选时具有更强的可调节性。

(2) 外加磁场使磁性颗粒沿磁力线形成磁链。一方面,当气泡从磁链下方上升时,磁链因较大的重力和体积很容易从气泡顶部进入气泡,并将气泡撑破,气泡无法在磁稳定流化床中生成、长大,随着磁场强度的增大,这种作用效果更加显著;另一方面,平行磁链使流化床的床层空隙率增大,而且平行磁链间的空隙形成了分布均匀的气体通道,气体通过时不会造成局部气体量过大而产生气泡,由此形成稳定的磁场流化床。

(3) 利用研制的横流式气固磁稳定流化床,对 6.0~0.5 mm 细粒煤进行分选,高密度分选可能偏差为 0.085 g/cm³,低密度分选可能偏差为 0.075 g/cm³。说明所研制的横流式气固磁稳定流化床分选模型机对 6.0~0.5 mm 细粒煤分选效果较好。

参考文献:

[1] Oshitani J, Tani K, Takase K, et al. Dry coal cleaning by utilizing fluidized bed medium separation (FBMS) [A]. Proceedings of the SCEJ Symposium on Fluidization[C]. Japan, 2003:425-430.

[2] Van Houwelingen J A, De Jong T P R. Dry cleaning of coal: review, fundamentals and opportunities [J]. Geologica Belgica, 2004, 7(3/4):335-343.

[3] Choung J, Mak C, Xu Z. Fine coal beneficiation using an air dense medium fluidized bed [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2006, 26(1):1-15.

[4] 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.

[5] Zhao Y M, Tang L G, Luo Z F, 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.

[6] Luo Z F, Zhu J F, Tang L G, et al. Fluidization characteristics of magnetite powder after hydrophobic surface modification [J].

International Journal of Mineral Processing, 2010, 94(3/4):166-171.

[7] 骆振福, 陈尚龙, 赵跃民, 等. 基于马尔可夫理论的气固分选流化床密度的预测 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(1):105-109.

Luo Zhenfu, Chen Shanglong, Zhao Yuemin, et al. Density prediction of gas-solid fluidized bed for separation base on Markov theory [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1):105-109.

[8] Yang Xuliang, Zhao Yuemin, Luo Zhenfu, et al. Effects of sintered metal distributor on fluidization quality of the air dense medium fluidized bed [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21:681-685.

[9] 骆振福, Fan Maoming, 陈清如, 等. 振动参数对流化床分选性能的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2):209-213.

Luo Zhenfu, Fan Maoming, Chen Qingru, et al. Effects of vibrating parameters on separation performance of fluidized beds [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2):209-213.

[10] 骆振福, Fan Maoming, 赵跃民, 等. 物料在振动力场流化床中的分离 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1):27-32.

Luo Zhenfu, Fan Maoming, Zhao Yuemin, et al. Separation of material in a vibration fluidized bed [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(1):27-32.

[11] Luo Z F, Fan M M, Zhao Y M, et al. Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed [J]. Powder Technology, 2008, 187(2):119-123.

[12] Fan M M, Chen Q R, Zhao Y M, 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] Luo Z F, Zhao Y M, Chen Q R, et al. Separation characteristics for fine coal of the magnetically fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2002, 79(1):63-69.

[14] Luo Z F, Zhao Y M, Chen Q R, et al. Separation lower limit in a magnetically gas-solid two-phase fluidized bed [J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(2/3):173-178.

[15] Rosensweig R E, Lee W K, Siegel J H. Magnetically stabilized fluidized beds for solids separation by density [J]. Separation Science and Technology, 1987, 22(1):25-45.

[16] 朱庆山, 李洪钟. C类物料磁场流态化 (I) 机理研究 [J]. 化工学报, 1996, 47(1):53-58.

Zhu Qingshan, Li Hongzhong. Magnetic fluidization of group C powder (I) mechanism [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1996, 47(1):53-58.

[17] 朱庆山, 李洪钟. C类物料磁场流态化 (II) 实验研究 [J]. 化工学报, 1996, 47(1):59-64.

Zhu Qingshan, Li Hongzhong. Magnetic fluidization of group C powder (II) experimental study [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1996, 47(1):59-64.

[18] Zhu Q, Li H. Study on magnetic fluidization of group C powders [J]. Powder Technology, 1996, 86:179-185.

[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, 2002:189-193.