



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

细粒煤磁稳定气固流化床流化特性及分选提质

张 博^{1,2}, 宋树磊^{1,2}, 张亚东^{1,2}, 赵鹏飞^{1,2}, 高天洋^{1,2}, 赵跃民^{1,2}

(1. 中国矿业大学 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. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 细粒煤在普通气固流化床中无法实现有效分选, 为强化细粒煤按密度分层离析趋势, 将外加磁场引入气固分选流化床形成磁稳定分选流化床, 采用 0.074~0.045 mm 粒级的磁铁矿粉作为加重质, 通过对流化床内床层磁场分布及轴向压力梯度的测量, 研究了磁稳定分选流化床内的磁场分布特征及床层流化特性, 并利用磁稳定分选流化床对细粒煤进行了分选试验。试验结果表明, 在磁稳定分选流化床内, 线圈中心位置磁场呈圆柱状均匀分布, 且随着线圈间距的增加, 磁场强度与磁场梯度逐渐减小, 且床层磁场强度与线圈外加电压呈线性关系。磁稳定分选流化床的压力波动幅度随着气速与磁场强度的增加, 均呈现先降后升的趋势, 并在流化气速 $v = 19.2 \text{ cm/s}$, 磁场强度 $H = 9\,200 \text{ A/m}$ 时达到最低, 此时床层压力波动最小, 流化效果最稳定。随着磁场强度的增加, 床层膨胀率减小, 起始鼓泡流化气速及颗粒带出气速增大, 床层密度增大但适合煤炭分选的调控范围减小, 床层表面弧度增大; 随着气速的增加, 床层稳定性逐渐提升。此外, 由分选试验结果表明, 在一定范围内, 磁稳定流化床的分选效果随着磁场强度的增高而增高, 在磁场强度为 $9\,200 \text{ A/m}$, 流化气速 $v = 15.4 \text{ cm/s}$ 条件下, 磁稳定分选流化床对细粒煤具有最佳分选效果, 其两段分选的可能性偏差 E 分别为 0.136 g/cm^3 和 0.156 g/cm^3 。

关键词: 细粒煤分选; 磁场; 分选流化床; 干法分选; 表观黏度

中图分类号: TD94

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)09-2755-12

Fluidization characteristics and separation and quality improvement of low-quality fine coal in a magnetically stabilized gas-solid fluidized bed

ZHANG Bo^{1,2}, SONG Shulei^{1,2}, ZHANG Yadong^{1,2}, ZHAO Pengfei^{1,2}, GAO Tianyang^{1,2}, ZHAO Yuemin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coal Processing & Efficient Utilization, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Low-quality fine-grained coal cannot be effectively separated in ordinary gas-solid fluidized beds. In order to strengthen the tendency of low-quality fine-grained coals to be separated according to density, an external magnetic field is applied to the gas-solid separation fluidized bed to form a magnetically stable separation. In the fluidized bed, the electromagnetic ore powder with a particle size of 0.074–0.045 mm is used as the weighting material. The magnetic field distribution in the magnetically stable separation fluidized bed and the bed fluidization characteristics are stud-

收稿日期: 2021-04-20 修回日期: 2021-07-01 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.FX21.0689

基金项目: 国家自然科学基金联合基金培育资助项目(U2003126); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52004282)

作者简介: 张 博(1989—), 男, 辽宁新民人, 副教授, 博士。Tel: 0561-83591102, E-mail: zhangbocumt@126.com

通讯作者: 宋树磊(1973—), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士。Tel: 0516-83591011, E-mail: shulei_song@163.com

引用格式: 张博, 宋树磊, 张亚东, 等. 细粒煤磁稳定气固流化床流化特性及分选提质[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2755–2766.

ZHANG Bo, SONG Shulei, ZHANG Yadong, et al. Fluidization characteristics and separation and quality improvement of low-quality fine coal in a magnetically stabilized gas-solid fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2755–2766.



移动阅读

ied by measuring the magnetic field distribution and axial pressure gradient in the fluidized bed. The magnetically stabilized separation fluidized bed is used to carry out a sorting test of low-quality fine-grained coal. The test results show that in the magnetically stabilized separation fluidized bed, the magnetic field at the center of the coil is uniformly distributed in a cylindrical shape, and with the increase of the coil spacing, the magnetic field intensity and magnetic field gradient gradually decrease, and the magnetic field intensity of the bed layer and the applied voltage of the coil show a linear relationship. With the increase of gas velocity and magnetic field intensity, the pressure fluctuation range of the magnetically stabilized separation fluidized bed shows a trend of first decreasing and then increasing, and reaches the lowest when $v = 19.2 \text{ cm/s}$ and $H = 9\ 200 \text{ A/m}$. When the bed pressure fluctuates the least, the fluidization effect is the most stable. With the increase of the magnetic field intensity, the bed expansion rate decreases, the initial bubbling fluidization gas velocity and the particle carrying out gas velocity increase, the bed density increases, but the adjustment range suitable for coal sorting decreases, and the radian of bed surface increases. As the gas velocity increases, the bed stability gradually improves. In addition, the sorting test results show that within a certain range, the sorting effect of the magnetically stabilized fluidized bed increases with the increase of the magnetic field intensity. When the magnetic field intensity is $9\ 200 \text{ A/m}$, the fluidizing gas velocity $v = 15.4 \text{ cm/s}$, the magnetically stabilized separation fluidized bed has the best separation effect on low-quality fine-grained coal, and the two-stage separation accuracy E values are 0.136 g/cm^3 and 0.156 g/cm^3 respectively.

Key words: low-quality fine coal separation; magnetic field; separation fluidized bed; dry separation; apparent viscosity

煤炭在世界能源消费结构中占有重要地位,我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国。选煤是提高煤炭利用效率、降低煤炭污染的最有效途径,2020 年我国原煤入选率为 74.1%。传统选煤方法以湿法为主,而我国 2/3 以上煤炭分布在西部干旱缺水的地区,湿法选煤需消耗大量的水资源,与我国煤炭资源分布现状相矛盾,因此亟需煤炭的干法高效分选理论与技术研究^[1-3]。

空气重介质流化床干法选煤技术是将气固两相流态化技术应用于选煤领域的一种高效分选方法,其特点是以气固两相悬浮体作为分选介质,入选物料在流化床中按密度分层,低密度颗粒上浮,高密度颗粒下沉,实现了不同密度和粒度颗粒的分离^[4-5]。基于此原理,赵跃民等^[6-7]研发了首套模块式空气重介质流化床干法选煤示范系统,实现了 50~6 mm 级煤炭的高效干法分选。虽然块煤分选工艺已实现工业化,但细粒煤粒度较小,分选过程中其受到的床层浮力效应较弱,单纯依靠重力场进行分选精度较低,尚处于实验室研究阶段^[8-9],因此,为强化细粒煤按密度分层离析趋势,学者们提出引入外加能量使普通气固流化床形成外加力场气固流化床,增强气固接触效率,改善床层流态化质量,提高细粒煤在床层中的分选精度,将磁场引入气固流化床,形成磁场控制下的气固颗粒系统,即磁场流化床^[10-12]。

国内外学者针对磁场流化床的颗粒运动规律、分选特性及流化床内部运动规律进行了系统的研究,揭示了磁场流化床的操作区域及流化特性,构建了流态

化相图用以描述磁场流化床的流化状态^[13];并通过对磁稳定流化床的机理研究,提出了磁场流化床稳定流化的判定准则并借助动力学模拟构建了磁场流化床的气固两相流模型^[14],近年来对于磁场流化床的研究多集中于不同条件下磁场流化床的流体动力学分析,通过对不同颗粒条件^[15-17]、不同磁场条件^[18]、不同操作参数^[19-20]下磁场流化床内部颗粒受力和运动的分析,对磁稳定流化床进行了研究^[21-22],对复杂条件下的磁场流化床的气固两相流模型进行了完善^[23-25]。在前期研究基础上对磁场流化床煤炭分选效果进行了探究,结果表明磁场流化床可对细粒煤粉进行有效的分选^[26],但对细粒煤磁场流化床分选过程中的磁场分布特性和流化特性研究仍有所欠缺,难以做到细粒煤磁场流化床分选过程中的精准调控。

针对细粒煤磁场流化床分选过程的分选特性问题,笔者采用磁稳定流化床对 6~3 mm 细粒级煤炭进行了试验研究。采用 Geldart C 类磁铁矿粉加重质替代常规 Geldart B 类磁铁矿粉加重质(在流化过程中, C 类加重质可产生较小的气泡,流化效果更好),研究了细粒煤磁场流化床分选过程中的磁场分布特性和流化特性,并进行了的分选试验,确定了细粒煤磁稳定流化床分选的最佳操作参数范围。

1 试验系统与材料

1.1 试验系统

本研究采用的磁稳定分选流化床试验系统如图 1 所示,系统由供风装置、分选流化床和除尘装置组

成。其中供风系统包括罗茨鼓风机和稳压风包,能够为磁稳定流化床提供压力稳定的压缩空气。试验时,通过调节气速 v 和电压 U 使得流化床床层在气流和磁场能量的综合作用下流化,当流化稳定时,利用 U 型测压管

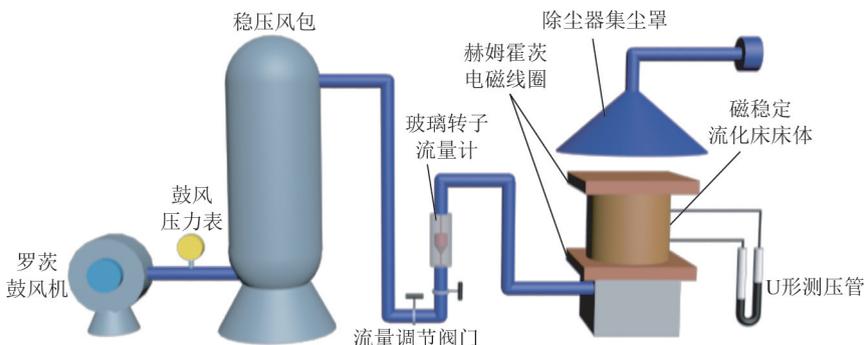


图1 试验系统组成示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiments system

图2为分选试验使用的环形错流(床层中介质受到的气流作用并非垂直向上的)磁稳定流化床,床体呈椭圆形,能够保证床体流化区域中磁场强度的均匀分布。布风板采用倾斜孔设计,孔轴线与水平面夹角为 45° ,能够使进入流化床内的气流具有水平和竖直方向上的分量,使得床层中的磁铁矿粉在气流曳力作用下能够较好流化。

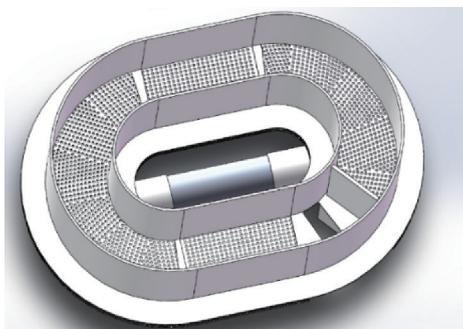


图2 环形错流磁稳定流化床结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of annular crossflow magnetically stabilized fluidized bed structure

1.2 试验材料

本试验采用磁铁矿粉的磁性物质量分数为95.72%,磁铁矿粉的粒度组成如图3所示,磁铁矿粉中 $0.100 \sim 0.040$ mm粒级的质量分数为71%, $0.130 \sim 0.100$ mm粒级占磁铁矿粉总质量的23%, $0.145 \sim 0.130$ mm粒级为6%。细粒级磁铁矿粉含量较大,在本试验中选用 $0.074 \sim 0.045$ mm粒级磁铁矿粉作为加重质,用以达成细粒煤的分选条件。

本试验采用华兴矿 $6 \sim 3$ mm粒级原煤作为分选入料,表1为原煤浮沉试验数据。由原煤浮沉试验可知,原煤中 <1.5 g/cm^3 密度级原煤占52.17%,灰分为11.01%, >1.8 g/cm^3 密度级原煤占29.89%,灰分

型压力计与流化床边壁等间距设置的单向开口连接测量床层轴向不同高度压降,研究床层流化特性。在最佳操作条件下对 $6 \sim 3$ mm原煤进行分选试验,采用可能偏差 E 值对分选效果进行分析和评定。

为73.57%,煤泥质量分数为7.64%,原煤整体灰分水平较高,矸石含量较大但不易泥化,适于利用磁稳定流化床进行干法分选。图4为原煤灰分可选性曲线,由图4可知,当理论精煤灰分为10.0%时,理论精煤产率为43.8%,理论分选密度为 1.45 g/cm^3 ,对应的 ± 0.1 质量分数为35.6%,属于难选煤。

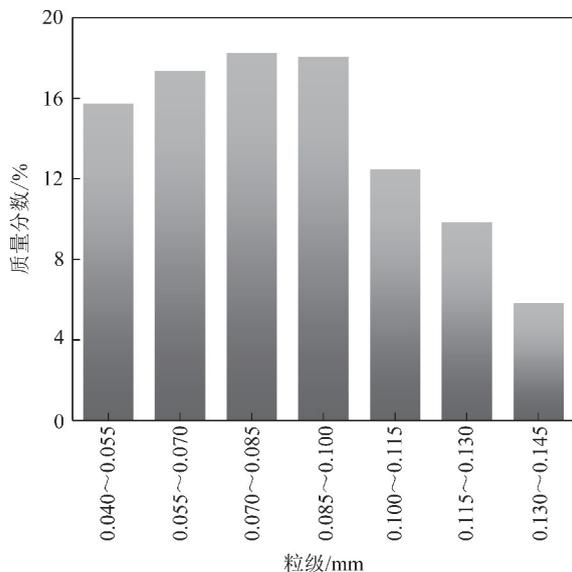


图3 试验用磁铁矿粉粒度分布

Fig. 3 Particle size distribution diagram of magnetite powder for test

2 试验结果与分析

2.1 磁稳定流化床磁场分布特性

磁稳定流化床床层的流化是依靠外加赫姆霍兹电磁线圈产生磁场,介质颗粒在磁力和气流曳力共同作用下均匀松散流化。图5为赫姆霍兹电磁线圈的结构示意,由上下2个部分的线圈组成,线圈结构为类螺线管结构,以确保线圈内部均匀稳定磁场的形

成。为便于分析,选取 3 个代表性较强的平面作为辅助分析,分别为上层线圈与下层线圈的中心平面,以及 2 层线圈的中间平面。如图 5 所示,竖直方向上,由线圈外向上层或下层平面靠近时,磁感线密度增大,对应磁感强度增大,随后当磁场进一步向中层平面靠拢时,磁场方向发生改变,而由于 2 层线圈磁感

线的交叉,磁感线密度并未发生较大变化,磁场较为均匀。水平方向上,在上层与下层平面上,远离线圈中心区域的磁感线分布较为稀疏,磁场强度较低,而在中层平面上则相反,磁感线分布更加密集,磁场强度更高。这种磁场分布特征会使线圈中心区域的磁感线分布较为均匀,形成稳定的均匀磁场。

表 1 6~3 mm 粒级原煤浮沉试验数据

Table 1 Size of 6~3 mm coal float test data sheet

密度级/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	占本级百 分比/%	占全样百 分比/%	灰分/ %	硫分/ %	浮物累计,沉物累计		
					产率/%	灰分/%	硫分/%
<1.3	0.63	0.58	5.97	1.26	0.63,100	5.97,33.03	1.26,4.90
1.3~1.4	34.14	31.53	8.90	1.28	34.77,99.37	8.84,33.21	1.28,4.93
1.4~1.5	17.40	16.07	15.33	1.88	52.17,65.23	11.01,45.93	1.48,6.83
1.5~1.6	9.13	8.43	24.66	1.90	61.30,47.83	13.04,57.06	1.54,8.64
1.6~1.7	6.01	5.55	32.17	3.13	67.31,38.70	14.75,64.71	1.68,10.23
1.7~1.8	2.81	2.60	40.02	2.89	70.12,32.69	15.76,70.69	1.73,11.53
1.8~2.0	3.57	3.29	50.42	5.87	73.68,29.88	17.44,73.57	1.93,12.34
>2.0	26.32	24.31	76.71	13.22	100,26.32	33.03,76.71	4.90,13.22
小计	100	92.36	33.03	4.90			
煤泥	7.64	7.64					
总计	100	100					

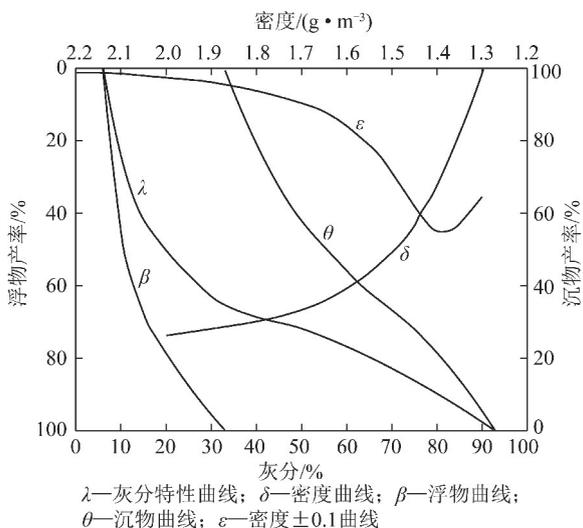


图 4 6~3 mm 粒级原煤浮沉灰分可选性曲线

Fig. 4 Size of 6~3 mm and raw coal wash ability curve of ash

磁稳定流化床内的磁场分布情况决定了磁稳定流化床床层流化质量,因此,研究床层磁场分布特性,有利于揭示磁稳定流化床散式流化特性。利用磁场探针在离线圈中心半径为 5,10,15,20,25 cm 处环绕一周,期间以一定频率对磁感应强度进行测量,得到磁稳定流化床磁场分布,结果如图 6 所示,图 6 中测量点序列指在当前环绕半径下,磁场探针对磁感应强度进行测量的序号。在平面磁场的探测中,上层与下层平面上的磁场强度分布特征较周边强中心弱,在半

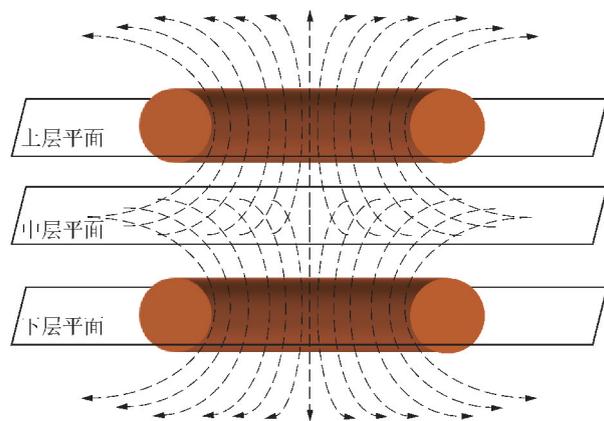


图 5 赫姆霍兹电磁线圈磁感线分布示意

Fig. 5 Helmholtz coil magnetic line distribution

径为 150 mm 范围磁场分布稳定,磁感应强度稳定在 9 mT 左右。中层平面上的磁感应强度分布特征趋势相反,为中间强周边弱,但在半径为 150 mm 范围内磁感应强度同样稳定在 9 mT 左右。由此可见在线圈中心 150 mm 范围内,床层磁场呈圆柱状均匀分布,利于床层的均匀稳定流化和煤炭的分层离析。

线圈内磁场强度的精确控制是实现磁稳定流化床床层均匀流化,改善床层密度分布的关键。因此,为探究外加电压与磁场强度间的数值关系,分别在不同电压下用探针探测环绕线圈中心 150 mm 范围内的磁场强度。在此范围内磁场强度分布较为均匀,选

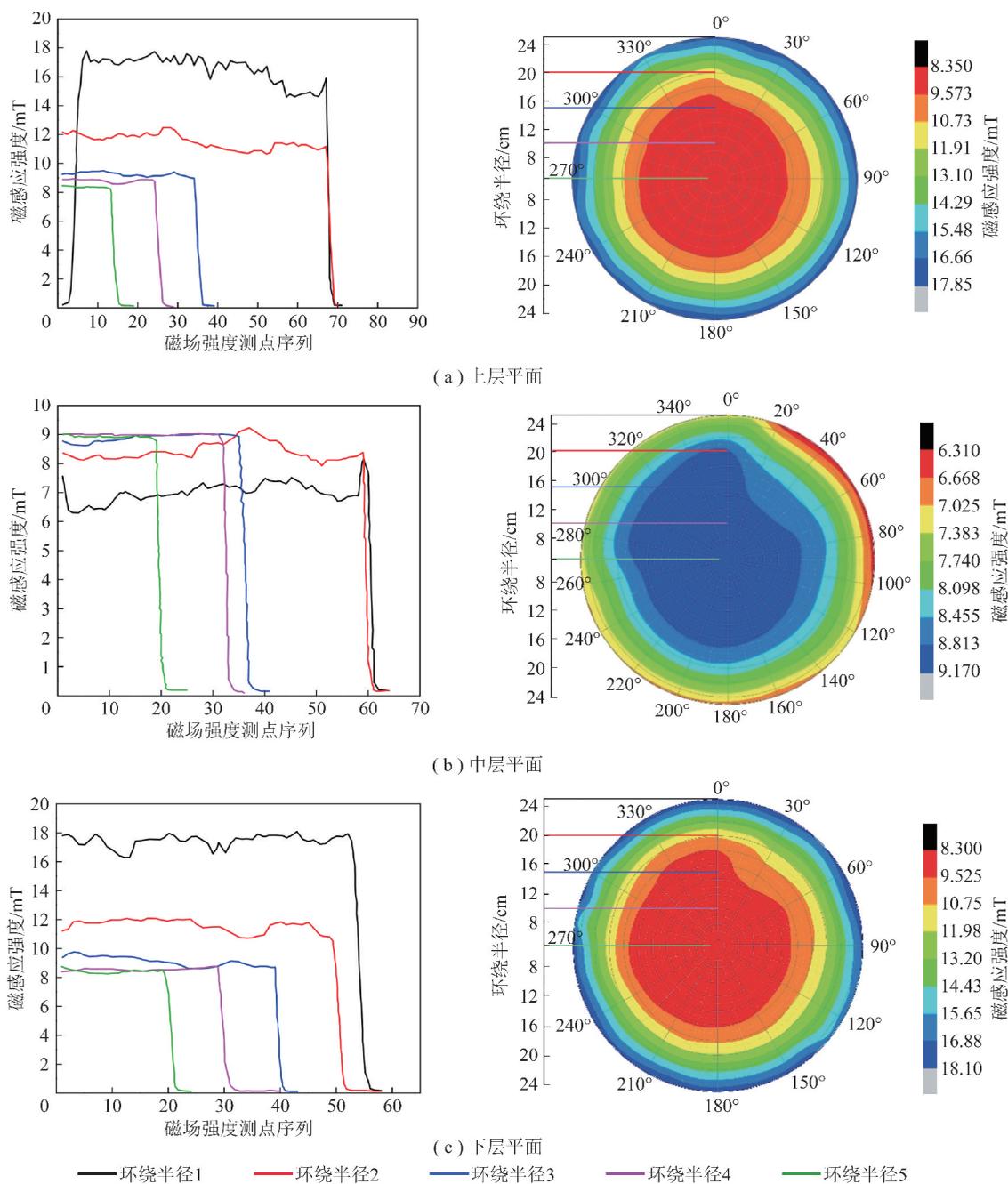


图6 电磁线圈水平方向磁场分布

Fig. 6 Horizontal magnetic field distribution diagram of electromagnetic coil

取该范围内磁场强度的平均值作为试验中的各电压下磁场强度代表值,图7为线圈外加电压与磁场强度的数值关系,可看出磁场强度及磁感应强度与外加电压呈线性相关,对三者进行线性拟合,得到磁场强度 H 与电压之间的线性方程(1)及磁感应强度 B 与电压的线性方程(2):

$$H = 122.60561U \quad (1)$$

$$B = 0.15702U \quad (2)$$

方程表明通过控制外加电压能够实现磁稳定流化床内磁场强度的调控,进而改善床层流化质量,调控细粒煤分选效果。

2.2 磁稳定分选流化床流化特性

磁场作用下流化床的流化特性是决定流化床分选效果的关键,压力波动信号是气泡特性和颗粒特性等多种因素综合动态的反映,气泡运动行为是造成压力波动的主要原因。通过测量床层压力波动信号,对其进行功率谱分析,以获得床层频域流化信息。图8为磁稳定流化床不同流化状态的压力信号及其功率谱图。如图8所示,在磁场强度为定值时,随着气速的增加,压力信号随时间的波动幅度先降后升,床层压降 P_m 幅值可达 600 Pa。当 $v = 15.4 \text{ cm/s}$,床层压降在 $P_m = 300 \text{ Pa}$ 处波动,且幅值波动较小。表明当

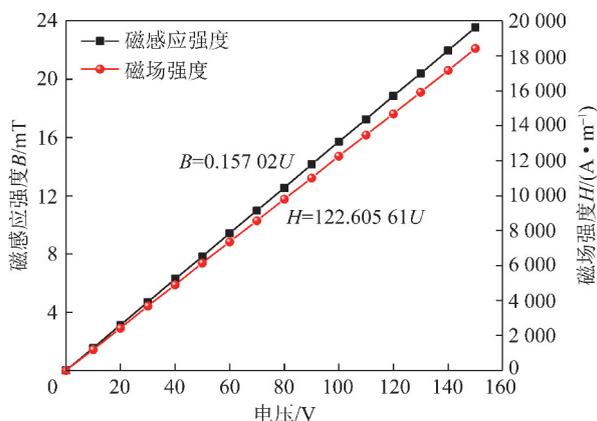


图7 赫姆霍兹电磁线圈外加电压与磁场强度的数值关系

Fig. 7 Relationship between the applied voltage of the Helmholtz electromagnetic coil and the magnetic field strength

气速超过起始鼓泡速度时,床层内多余的气体以气泡的形式进入气泡相,并在上升的过程中,不断靠近聚并,形成大气泡,床层压力波动程度增加,在外加磁场作用下,磁铁矿粉在床层中形成磁力链,当气泡上升

致使磁力链产生偏离,在磁场力作用下磁力链具有恢复原来形态的趋势,因此会对气泡产生向内的挤压力,当磁场强度达到临界值时,气泡就会破裂,大气泡被破裂成数量较多的小气泡,生长和运动行为受到抑制。当气速增大到 $v=19.2\text{ cm/s}$ 时,床层压力信号波动剧烈,此时外加磁场对床层气泡的抑制作用降低。当气速为定值时,随着磁场强度的增加,压力信号随时间的波动幅度先降后升,当 $H=9\ 200\text{ A/m}$ 时,压力信号幅值波动较小。结果表明在低磁场强度下,磁场力并不足以抑制气泡的生长,而高磁场强度下,床层内部形成了多条密集的直径较大的“磁力链”,致使整个床层近乎于固定,磁力链间空隙增大,通入床体内的过量气体从磁力链间的空隙中大量穿过,作用于磁铁矿粉上的气流较少,从而致使床层的流化效果随着气速的增大逐渐恶化,压力波动较大。图8(d),(h)为不同操作条件下,床层压力波动信号的功率谱图。如图8(d)所示,随着气速的逐渐增大,压

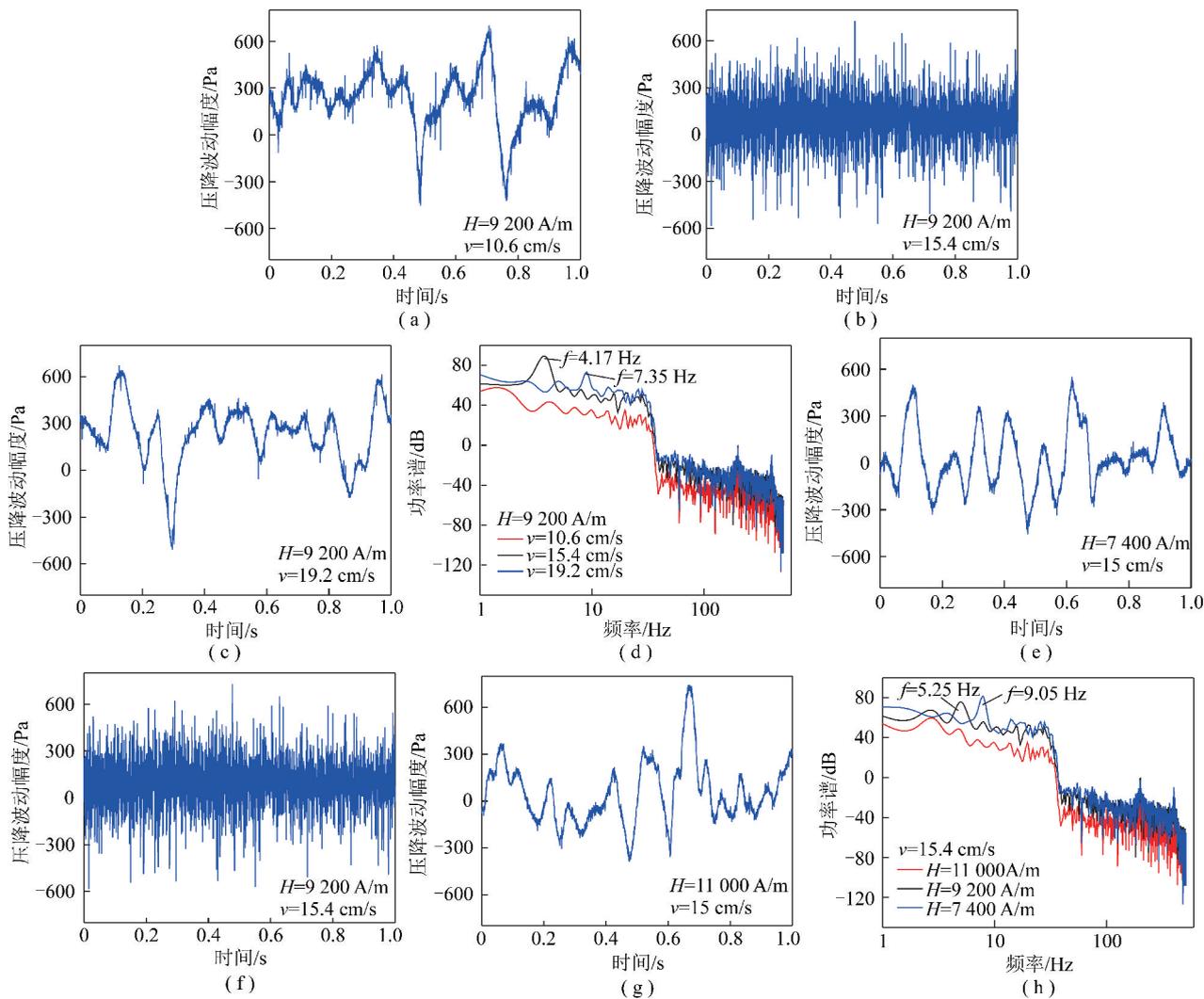


图8 磁稳定流化床不同流化状态下的压力信号及其功率图谱

Fig. 8 Pressure signals and power spectra of magnetically stabilized fluidized beds in different fluidization states

力波动信号的功率谱幅值逐渐增大,表明随着气速的增大,气泡的尺寸越大,引起的床层压力波动也越剧烈,床层流化效果变差。同时气泡产生频率随着气速的增加也呈增大趋势,当 $v = 15.4 \text{ cm/s}$ 和 19.2 cm/s 时,气泡的产生频率分别为 4.17 Hz 和 7.35 Hz 。随着磁场强度的逐渐增大,压力波动信号的功率谱幅值呈降低趋势,而气泡产生的频率呈增大趋势,气泡产生频率分别为 5.25 Hz 和 9.05 Hz 。结果表明,随着磁场强度的逐渐增大,床体对气泡的抑制作用逐渐增强,磁场对大气泡产生机率的抑制能力增大,因此过剩气体以产生频率较高的微泡形式通过床层。

图9为床层起始流化气速、起始鼓泡气速和颗粒带出气速的变化规律。由图9可知,在一定的磁场强度下,床层的起始流化气速<起始鼓泡气速<颗粒带出速度。在磁场上升的过程中起始流化气速波动较小,起始流化气速与磁场强度的变化并无特别明显的相关性,而随着磁场强度的增强,床层的起始鼓泡流化气速逐渐从 3.25 cm/s 增加到 10.63 cm/s ,磁场强度与起始鼓泡流化气速呈现正相关,同时颗粒带出速度随着磁场强度的增大逐渐由 9.13 cm/s 增大到 17.60 cm/s 。在散式流态化过程中,颗粒均匀地分布于床内并伴随无序运动,气流以微泡的形式存在,床层只形成乳化相。随着表观气速的逐渐增大,乳化相持续膨胀,床内颗粒间空隙率均匀增大,乳化相间的微泡互相兼并产生大气泡,致使床层进入鼓泡流态化阶段,而随着磁场强度的增大,床层所受磁场力增强,床层中的磁力链对气泡的切削作用增强,气泡的兼并为受到抑制,颗粒同时在磁力和气流曳力的协同作用下,保持均匀的散式流化状态,增强了床层流化的均匀稳定性。但随着磁场强度的进一步增大,致使床层的起始鼓泡流化气速增大,且在磁场力的作用下,大量被吹起的细粒铁矿粉附着在已经形成的磁力链上,增加了颗粒带出气速。

流化床床层膨胀率随着气速和磁场强度变化的规律如图10所示。随着气速的增加,床层膨胀率逐渐增大,该结果表明,当过量气体进入到床层时,介质颗粒在气流曳力的作用下开始逐渐松散、移位、流化,进而床层逐渐膨胀。随着磁场强度的升高,流化床的床层膨胀率随之减小,从0磁场强度下的 36.36% 减小到 16400 A/m 磁场强度下的 17.62% 。磁力链数量增大,在高磁场力的作用下床层逐渐压实,进入床层中的气体无法有效破坏磁力链体系,因此,随着磁场强度的增大,进入床层的气体越难以克服磁力链作用下床层介质颗粒形成的阻力,导致床层膨胀率随磁场强度的增大逐渐减小。

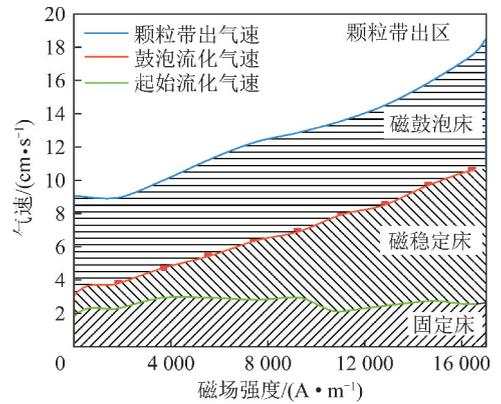


图9 不同磁场强度下各流化速度特征值曲线

Fig. 9 Curves of characteristic values of fluidization velocities under different magnetic field strengths

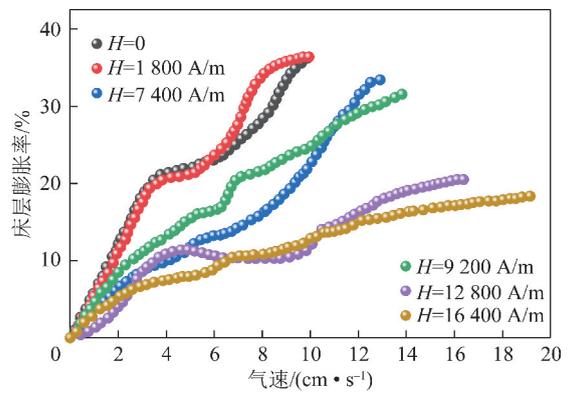


图10 不同磁场强度下床层膨胀率曲线

Fig. 10 Curves of bed expansion rate under different magnetic field strengths

流化床从流化状态回归到自然状态时,床层表面会出现轻微的弧度。图11为不同磁场强度下磁铁矿粉表面弧度曲线,图11中黑色曲线是床层表面轮廓曲线,红色曲线是根据床层轮廓曲线拟合的多项式函数曲线。从图11中可看出,随着磁场强度的增加,床层表面的轮廓曲线的弧度也随之增大,从最低点(0,0)点到最高两点水平连线间的距离从0磁场强度下的 3 mm 增大到 16400 A/m 下的 43 mm 。由床层轮廓的拟合曲线可看出,随着磁场强度的增大,床层轮廓的曲率随之增大,曲率半径随之减小。曲线的弯曲程度越来越大。该结果表明,当床层流化时,由于床层内的磁铁矿粉形成了磁力链,其本身的位置被固定,由于边壁效应,靠近边壁的磁铁矿粉首先被吹起,持续增大磁场强度会强化边壁效应,使边壁的磁铁矿粉形成更高的磁力链,因此床层表面的弧度会随着磁场强度的增大而增加。

流化床床层密度分布的均匀稳定性是评价床层流化效果的重要指标,图12为不同磁场强度下床层密度变化曲线,由图12可知,在一定磁场强度下,随

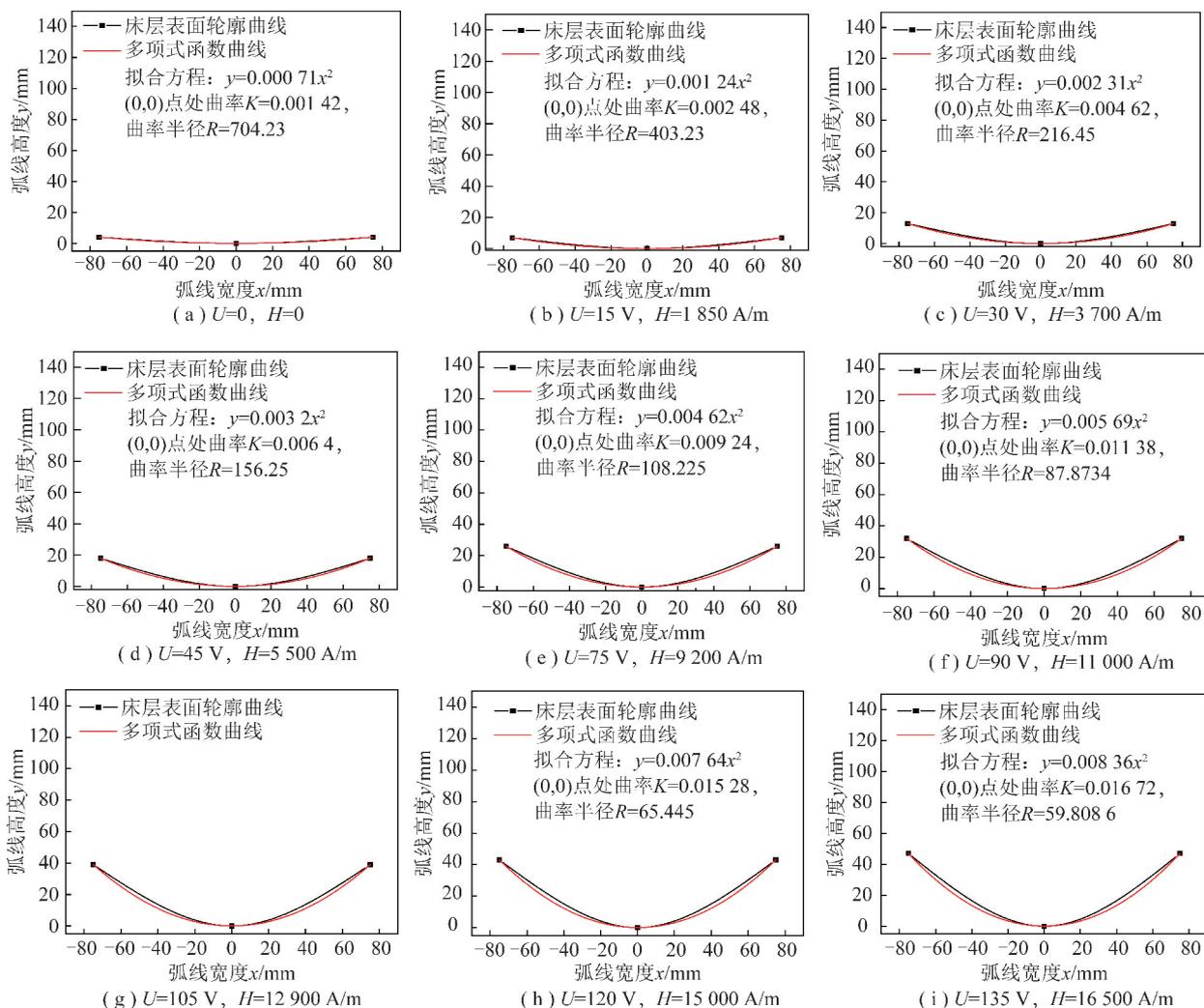


图 11 不同磁场强度下磁铁矿粉表面弧度曲线

Fig. 11 Curve of the surface of magnetite powder under different magnetic field intensity

着流化气速的增加,床层密度波动趋于平稳。结果表明,Geldart C类磁铁矿粉具有较高的表面能和较大的黏性力,颗粒间的接触更为紧密,颗粒间作用力强,当气速较低时,颗粒受气流曳力的作用悬浮,但由于颗粒间作用力的影响,颗粒被束缚在一定空间内,导致低气速下的流化稳定性较差,当气速继续升高,气流曳力冲破颗粒间作用力的封锁,流化效果逐渐改善,故为保证流化效果应尽量选择较高的操作气速,而过高的气速会导致气泡相的增加,降低床层密度的稳定性,经过试验在操作气速 $v=15.4\text{ cm/s}$ 时床层流化效果最稳定。保持操作气速恒定,随着磁场强度的增大,床层密度增大且波动减缓,压降曲线更加平稳。

2.3 磁稳定分选流化床表观黏度

在分选过程中床层表观黏度的大小是决定流化床中物料运动规律及沉降、上升速度的重要参数,直接影响矿粒在流化床中的分选时间。采用小球降落法对床层黏度变化规律进行测量。

在无限空间的流体中,如果流体黏度较大而球的

直径较小,小球下落速度较慢,运动过程中不产生漩涡,此时雷诺数 $Re < 1$,根据斯托克斯定律,小球受到黏性摩擦阻力。为简化计算,将磁稳定流化床中的介质看作均匀的黏性流体。小球在磁稳定流化床中沉降主要受到的力有重力、浮力和黏性摩擦阻力,当小球达到匀速沉降阶段时,3者受力平衡:

$$\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p g = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_b g + 3\pi \mu_e d_p v' \quad (3)$$

式中, d_p 为小球直径; ρ_p 为小球密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度; ρ_b 为磁稳定流化床床层密度, kg/m^3 ; μ_e 为磁稳定流化床表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v' 为小球下落的速度, m/s 。

表观黏度计算式为

$$\mu_e = \frac{(\rho_p - \rho_b)gd_p^2}{18v'} \quad (4)$$

由于小球在磁场流化床中的沉降并非是在无限体积的均匀介质中的自由沉降,因此对式(4)进行修正以后可得

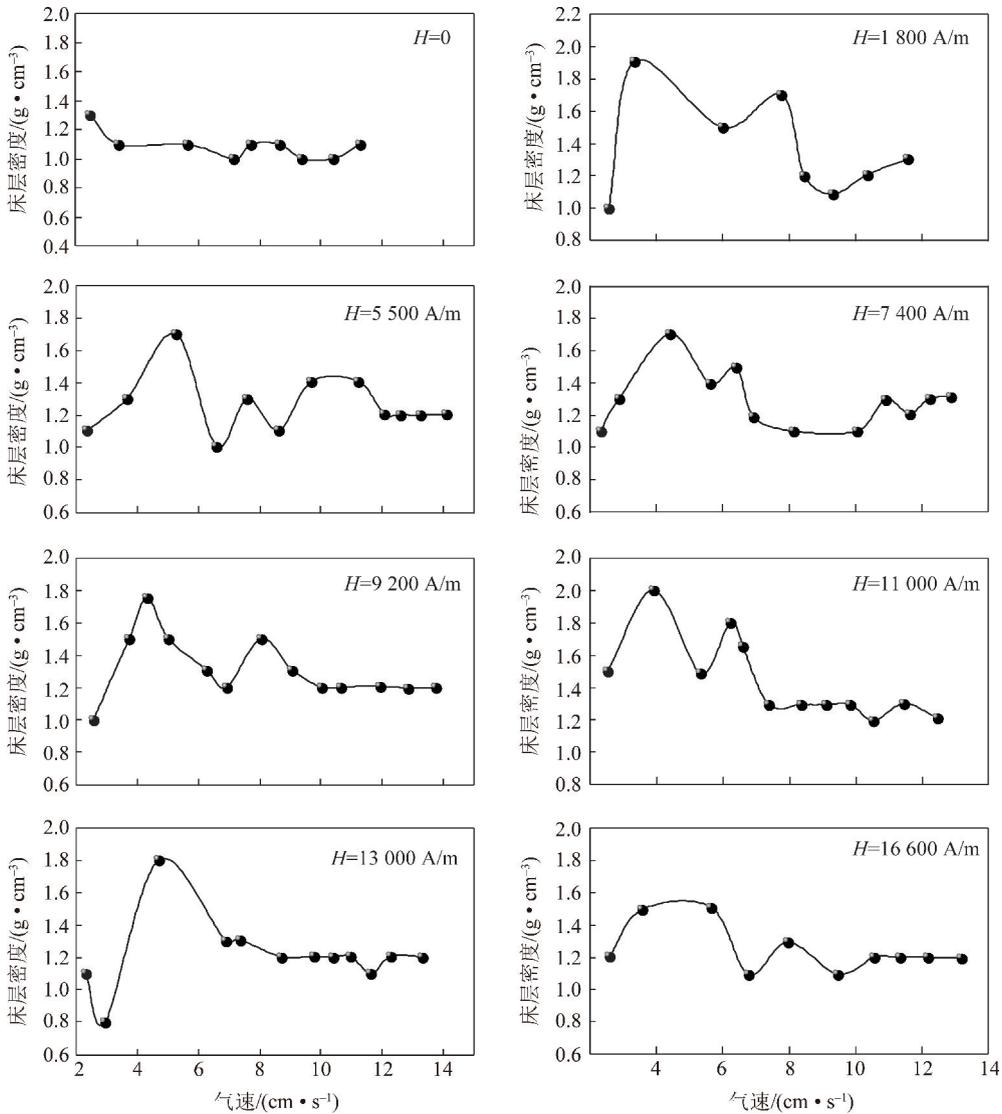


图 12 不同磁场强度下床层密度变化曲线

Fig. 12 Bed density change curves under different magnetic field strengths

$$\mu_e = \frac{(\rho_p - \rho_b)gd_p^2}{18v'(1 + 2.4d_p/D)} \quad (5)$$

式中, D 为流化床床体直径。

根据式(5)测得不同状态下床层的表观黏度, 图 13 为一定气速下的床层表观黏度和磁场强度的关系, 随着磁场强度的升高, 床层表观黏度呈波动上升趋势。当气速为 8.81 cm/s 时, 床层的表观黏度在不同磁场强度下的变化规律最为稳定, 呈现出稳定的上升态势, 在此气速下, 流化颗粒的孔隙率适中, 在不同性质的颗粒产生定向运动时, 由于颗粒间距适中, 颗粒间阻力较小, 在受到颗粒间阻力作用后, 容易完成重新排序, 使得床层保持稳定, 若气速过大, 颗粒间距过大, 气泡互相兼并, 使床层产生过多大气泡, 进而影响床层的均为稳定。该结果表明, 随着磁场强度的升高, 在磁场力的作用下, 床层内部形成的磁力链更加

密集且紧固, 床层堆积更加密实, 床层的流动性降低, 表观黏度随着磁场强度的升高而持续增大。

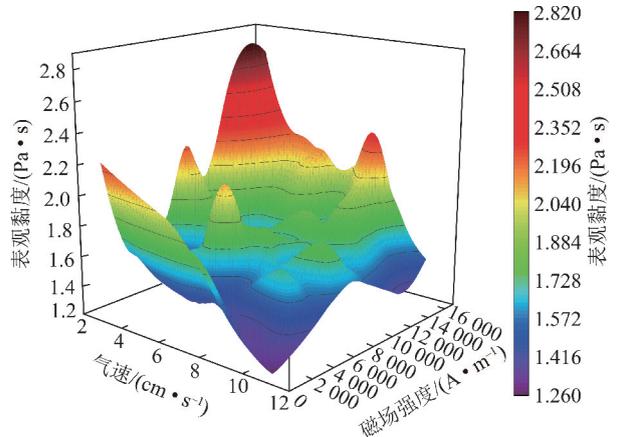


图 13 不同磁场强度下磁稳定流化床床层表观黏度
Fig. 13 Apparent viscosity curve of magnetically stabilized fluidized bed under a certain gas velocity

图14为床层表观黏度随流化气速变化规律。随着流化气速的升高,床层的表观黏度逐渐降低,由 $2.18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 持续下降至 $1.58 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,且在 $9\,200 \text{ A/m}$ 磁场强度下,床层表观黏度的变化最为稳定。该结果表明,随着流化气速的增大,床层内的细粒铁矿粉床层会在气流的作用下分散,床层内部孔隙率增大,床层密度降低,床层迅速松散,流化,床层表观黏度降低。

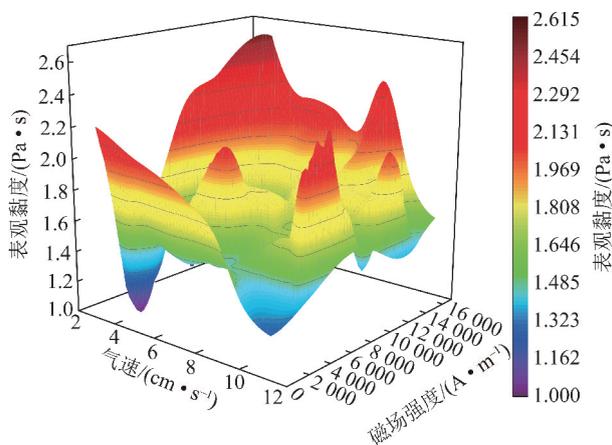


图14 不同气速条件下磁稳定流化床床层表观黏度曲线

Fig. 14 Apparent viscosity curve of a magnetically stabilized fluidized bed under a certain magnetic field strength

2.4 磁稳定分选流化床分选试验

在最佳操作气速 $v = 15.54 \text{ cm/s}$ 的条件下对 $6\sim$

3 mm 细粒煤进行分选试验研究,采用可能偏差 E 值作为煤炭分选效果的评价指标。无磁场和不同磁场强度下 $6\sim 3 \text{ mm}$ 细粒煤的产品分配曲线及可能偏差值曲线如图15,16所示,图15中, E_1 为1段分选可能性偏差; E_2 为2段分选可能性偏差; δ_{p1} 为1段选的分选密度, δ_{p2} 为2段分选的分选密度,随着磁场强度的增高,重产物在中煤和矸石中的分配率增加,轻产物在精煤中的分配率增加,磁稳定流化床的可能偏差值逐渐降低,在无磁场时,2段可能偏差值分别为 $E_1 = 0.381 \text{ g/cm}^3$, $E_2 = 0.429 \text{ g/cm}^3$ 。在电压为 75 V , 磁场强度为 $9\,200 \text{ A/m}$ 时分选的可能偏差达到最低,此时2段可能偏差值分别为 $E_1 = 0.136 \text{ g/cm}^3$, $E_2 = 0.156 \text{ g/cm}^3$ 。随着磁场强度的进一步增大,分选的可能偏差开始小幅回升,该结果表明,在低磁场强度下,随着磁场强度的增大,床层内部形成的磁力链更加坚固,气泡受磁力链挤压难以生成和变大,床层密度更为稳定,分选精度上升;随着磁场强度的进一步增大,床层内部形成的磁力链直径变大,高度上升,磁力链间的空隙急剧增大,气流从空隙中流出,床层密度发生波动,分选精度下降,故在磁场强度为 $9\,200 \text{ A/m}$,流化气速 $v = 15.4 \text{ cm/s}$ 条件下,磁稳定流化床对 $6\sim 3 \text{ mm}$ 细粒煤具有最佳分选效果,其2段分选精度 E 值分别为 0.136 g/cm^3 和 0.156 g/cm^3 。

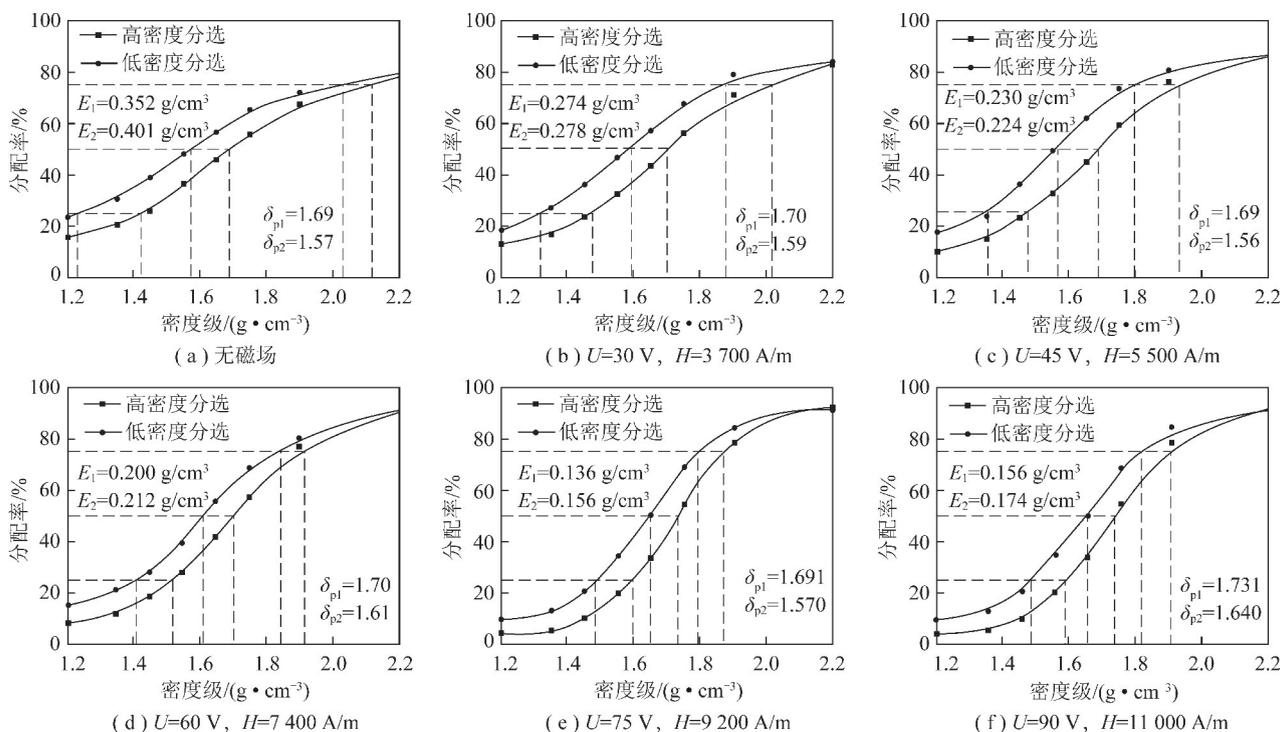


图15 不同磁场强度下 $6\sim 3 \text{ mm}$ 细粒煤的产品分配曲线

Fig. 15 Product distribution curves of $6\sim 3 \text{ mm}$ low-quality fine-grained coal under different magnetic field strengths

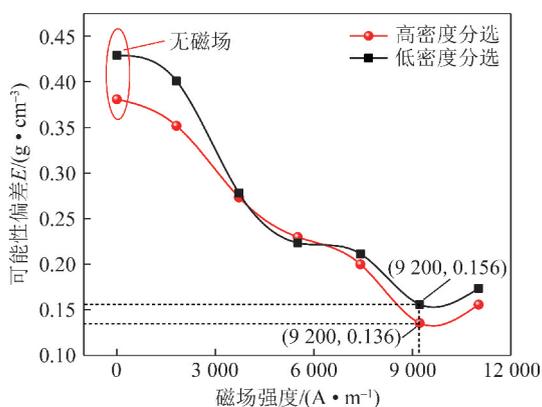


图 16 不同磁场强度下磁稳定流化床的可能偏差值曲线

Fig. 16 Curves of potential deviations of magnetically stabilized fluidized beds under different magnetic field strengths

3 结 论

(1) 当磁场强度在 $9\ 200\sim 7\ 400\ \text{A/m}$ 时,床层流化效果较为稳定,并在两端达到峰值;当磁场强度高于 $9\ 200\ \text{A/m}$ 或低于 $7\ 400\ \text{A/m}$ 时,床层膨胀率减小,起始鼓泡流化风速及颗粒带出风速增大,床层密度可调性减弱,可调范围大为降低,床层流化效果较差。

(2) 随着操作风速的升高,床层密度波动逐渐趋于平稳,床层稳定性提升。随着磁场强度的增大,床层密度增大且波动减缓,压降曲线更加平稳,床层表面弧度随之增大。磁稳定流化床床层的表观黏度随着磁场强度的升高和流化风速的降低而持续增大。

(3) 磁稳定流化床的分选效果随着磁场强度的增高先增加后减小,因此,在磁场强度为 $9\ 200\ \text{A/m}$,流化风速 $v=15.4\ \text{cm/s}$ 条件下,磁稳定流化床对 $6\sim 3\ \text{mm}$ 细粒煤具有最佳分选效果,其两段分选精度 E 值分别为 $0.136\ \text{g/cm}^3$ 和 $0.156\ \text{g/cm}^3$ 。

参考文献 (References):

[1] 董良,张亚东,赵跃民,等. 振动流化床流化特性与细粒煤干法分选研究[J/OL]. 煤炭学报:1-11[2021-04-14]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0594>.
DONG Liang, ZHANG Yadong, ZHAO Yuemin, et al. Study on fluidized characteristics of vibrating fluidized bed and dry separation of fine coal[J/OL]. Journal of China Coal Society:1-11[2021-04-14].

[2] DONG L, WANG Z, ZHOU E, et al. A novel dry beneficiation process for coal[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2019(1):1-21.

[3] 周晨阳,樊旭晨,段晨龙,等. 基于流化床布风板压降调节的细粒煤分选[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(1):1-6.
ZHOU Chenyang, FAN Xuchen, DUAN Chenlong, et al. Fine coal separation based on pressure drop adjustment of fluidized bed

air distribution plate[J]. China Powder Technology, 2018, 24(1):1-6.

[4] 李海宾,于晓东,骆振福. 不同煤粉含量对气固流化床流化性能的影响研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6):168-170.
LI Haibin, YU Xiaodong, LUO Zhenfu. Research on the influence of different pulverized coal content on fluidized bed gas solid fluidization performance[J]. Coal Technology, 2020, 39(6):168-170.

[5] 乔丽娜. 干法选煤技术的发展研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(7):247-248.
QIAO Lina. Research on the development of dry coal preparation technology[J]. China Petroleum & Chemical Standards and Quality, 2019, 39(7):247-248.

[6] 赵跃民,李功民,骆振福,等. 模块式干法重介质流化床选煤理论与工业应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8):1566-1571.
ZHAO Yuemin, LI Gongmin, LUO Zhenfu, et al. Theory and industrial application of modular dry fluidized bed coal preparation with heavy media[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1566-1571.

[7] 陈增强,赵跃民,陶秀祥,等. 空气重介质流化床干法选煤加重质的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(6):585-589.
CHEN Zengqiang, ZHAO Yuemin, TAO Xiuxiang, et al. Study on the weighting quality of coal preparation by dry fluidized bed with air heavy media[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(6):585-589.

[8] 朱冉,赵跃民,赵鹏飞,等. 空气重介质流化床中细粒煤的流化与分选特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3):727-734.
ZHU Ran, ZHAO Yuemin, ZHAO Pengfei, et al. Fluidized and separation characteristics of fine coal in an air heavy medium fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):727-734.

[9] 樊茂明,陈清如,赵跃民,等. 磁稳定流化床干法选煤试验研究[J]. 选煤技术, 2002(3):6-8.
FAN Maoming, CHEN Qingru, ZHAO Yuemin, et al. Experimental study on magnetic stabilized fluidized bed dry coal preparation[J]. Coal Preparation Technology, 2002(3):6-8.

[10] LUO Z, FAN M, ZHAO Y, et al. Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed[J]. Powder Technology, 2008, 187:119-123.

[11] FAN M, CHEN Q, ZHAO Y, et al. Fine coal (6-1 mm) separation in magnetically stabilized fluidized beds[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 63:225-232.

[12] 骆振福. <6 mm 级煤炭振动流化床分选机理及分选效果的研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 1996.
LUO Zhenfu. Study on separation mechanism and separation effect of <6 mm coal in vibrating fluidized bed[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1996.

[13] ROSENSWEIG R E. Fluidization; Hydrodynamic stabilization with a magnetic field[J]. Science, 1979, 204(6):57-60.

[14] SERGEEV Y A, MUROMSKY M Y. On propagation of concentration disturbances in a magnetically stabilized fluidized bed[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(5):927-938.

[15] ZHU Q, LI H, ZHU Q, et al. Hydrodynamic behavior of magnetized fluidized beds with admixtures of Geldart-B magnetizable and non-magnetizable particles[J]. Particuology, 2016, 29(6):86-94.

- [16] TAO J,HAO W,ZHU Q. Segregation in magnetized fluidized bed with Geldart-B magnetizable and nonmagnetizable particles [J]. Chemical Engineering and Processing,2021,164:108421.
- [17] ZHU Q,LI H,HUANG Q. Magnetized fluidized bed with binary admixture of magnetizable and nonmagnetizable particles[J]. Reviews in Chemical Engineering,2021,37:305-338.
- [18] WANG S Y,SUN Z,LI X,et al. Simulation of flow behavior of particles in liquid-solid fluidized bed with uniform magnetic field[J]. Powder Technology,2013,237:314-325.
- [19] ZHU Q,HAO W,TAO J,et al. State dependence of magnetized fluidized bed reactor on operation mode [J]. Chemical Engineering Journal,2020,407:127211.
- [20] ZHU Q,LI H,HUANG Q. Comparing flow regime transition of magnetized fluidized bed with Geldart-B particles between magnetization-FIRST and-LAST operation modes[J]. Chemical Engineering Journal,2019,360:686-700.
- [21] 王迎慧,归柯庭,刘利,等. 磁流化床气固两相流动的数值模拟及试验验证[J]. 东南大学学报(自然科学版),2002,32(6):936-940.
WANG Yinghui, GUI Keting, LIU Li, et al. Numerical simulation and experimental verification of gas-solid two-phase flow in magnetic fluidized bed[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2002,32(6):936-940.
- [22] 林添明,荆国华. 磁稳定流化床研究与应用进展[J]. 化工进展,2012,31(9):1885-1890.
LIN Tianming, JING Guohua. Research progress and application of magnetic stabilized fluidized bed [J]. Chemical Industry Progress,2012,31(9):1885-1890.
- [23] ZHU Q,LI H,ZHU Q,et al. Hydrodynamic study on magnetized fluidized beds with Geldart-B magnetizable particles [J]. Powder Technology,2014,268:48-58.
- [24] WANG S,ZHAO Y,LI X,et al. Study of hydrodynamic characteristics of particles in liquid-solid fluidized bed with modified drag model based on EMMS [J]. Advanced Powder Technology,2014,25(3):1103-1110.
- [25] 朱全红. Geldart-B 类颗粒磁场流化床流体力学行为研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(过程工程研究所),2016.
ZHU Quanhong. Study on hydrodynamic behavior of GeldART-B particles in magnetic field Fluidized bed [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering),2016.
- [26] 宋树磊,赵跃民,骆振福,等. 气固磁场流态化分选细粒煤[J]. 煤炭学报,2012,37(9):1586-1590.
SONG Shulei,ZHAO Yuemin,LUO Zhenfu,et al. Fluidized separation of fine coal by gas-solid magnetic field [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(9):1586-1590.