

研究简报

磁流化床磁稳流化区域的确定及影响因素

王迎慧¹, 归柯庭², 施明恒²

(¹ 江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 东南大学动力工程系, 江苏 南京 210096)

关键词: 磁流化床; 磁稳流化区域; 实验关联式; 显著性检验

中图分类号: TK 121

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 01-0075-05

Determination of stable zone and related factors in magnetically fluidized bed

WANG Yinghui¹, GUI Keting², SHI Mingheng²

(¹ School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

² Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: Experimental research on the fluidized characteristics of four magnetic particles with different average diameters (from 213 μm to 512 μm) was carried out in this study. The effects of such factors as intensity of the magnetic field and diameter of the particles, on the stable zone in the magnetically fluidized bed were investigated and discussed. Based on the experiments, by using the dimensionless analysis method, an experimental correlation to calculate the stable zone with three dimensionless numbers, *i. e.* the ratio of magnetic potential to gravity potential E_r , Archimedes number Ar and Reynolds number Re , was proposed. In addition, the level of significance of the correlation was tested, and the results showed that the most significant factor to influence the stable fluidization zone was E_r , and Ar was the second, while Re was the least significant factor.

Key words: magnetically fluidized bed; stable fluidization zone; experimental correlation; significance test

引 言

磁场流态化技术具有良好的调节与控制特点, 可以弥补常规流化技术的不足。研究发现, 外加磁场能有效地改善磁流化床的流化特性, 获得预期的流化效果。当处于磁稳流化状态时, 磁流化床兼有固定床与流化床的优点, 具有耐高温、耐高压、无气体短路、气固接触好、床层压降小、流通截面大等特点^[1], 在高温烟尘处理方面有较大的应用前景^[2-4]。Burns 等^[5]用可吸附蛋白质、碳氢化合物

等有机物的磁性颗粒作为固相, 成功地从溶液中分离出这些有机物, 达到提纯的目的; 而磁流化床反应器也有明显的优势, 如 Bahar 等^[6-9]把反应酶固定在磁性颗粒上, 不仅利于提高反应物之间的传质系数, 而且能提高酶的热稳定性和半衰期, 既改善了床内反应物的活性, 又对反应起到催化作用, 大大提高了反应物间的反应速率和反应效率。磁流化床可以满足工业应用的特定要求, 在化工、环境保护、分离技术和生物催化等领域具有广阔的应用前景。

2006-03-12 收到初稿, 2006-05-19 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王迎慧 (1968—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50576013)。

Received date: 2006-03-12.

Corresponding author: Dr. WANG Yinghui. E-mail: wyh@ujs.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50576013).

然而,目前制约磁流化床应用的关键是缺乏有效的方法来确定磁流化床的磁稳操作区域(即确定最小鼓泡流化速度 U_{mb}),从而准确、方便地给出合适的磁流化床运行参数。为此,本文基于对磁流化床流化特性的实验研究,引入量纲 1 数,如磁重势能比 E_r 、Archimedes 数 Ar 、Reynolds 数 Re 等,运用多元线性回归的方法得出磁稳流化区域与这些量纲 1 数之间的实验关联式,并进一步分析得出各量纲 1 数对磁稳流化区域影响的显著性,为确定磁流化床的运行参数提供依据。

1 磁流化床流化特性的实验研究

1.1 实验设备与实验过程

实验系统如图 1 所示,包括流化床、磁场发生器、测量仪表及动力装置等部分。床体为内径 $\phi 100\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 的有机玻璃筒,下端设有气流缓冲段,以保证气流流经床层的稳定性和均匀性,布风板的开孔率取 10%。轴向磁场由改进的 Helmholtz 线圈通以直流电(WYK-1005 型直流稳压电源提供 0~5A 的电流)获得。为避免骨架对均匀磁场的不良影响,绕制线圈的骨架也用有机玻璃制成,线圈内径 262 mm、外径 312 mm、宽 70 mm。实验中磁颗粒相关的物性参数见表 1。测量仪器包括高斯计、转子流量计、压差传感器等。引风机额定功率为 5 kW,流量约为 $0.016\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

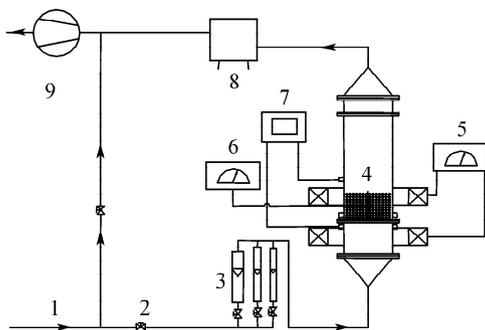


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

1—piping; 2—valves; 3—rotameters; 4—fluidized bed;
5—magnetic field generator; 6—Gaussmeter;
7—pressure-drop sensor; 8—fabric filter; 9—introduced fan

1.2 实验内容

实验首先测定磁场的均匀区域,并对磁场强度与供给电流之间的关系进行标定。接着测定空床的床层压降 Δp_d 与气体表观流速 U_g 的关系,然后对

表 1 所列出的 4 组不同粒径的铁磁颗粒做流态化实验。

表 1 磁性颗粒的特性参数

Table 1 Physical property of magnetic particles

d_p / μm	ρ_p / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ϵ	U_{mf} / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
231	5340	0.403	0.25
275	5420	0.410	0.29
362	5440	0.412	0.34
512	5620	0.416	0.62

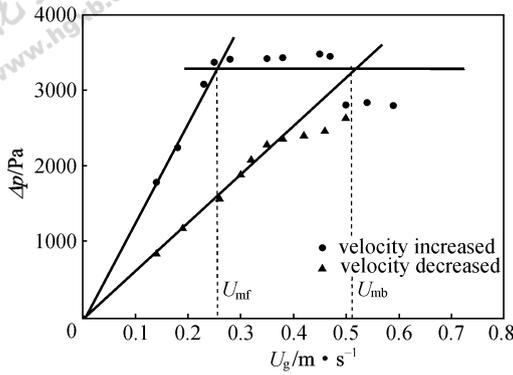
实验中对初始流化速度 U_{mf} 和临界鼓泡流化速度 U_{mb} 的测定主要依据床层压降的波动。床内颗粒流化时,床层压降 Δp 与床层空隙率 ϵ 的关系可用式 (1) 表示。当磁流化床处在散式流化状态(即磁稳流化状态)时,颗粒分布均匀, ϵ 基本相同,床层压降无明显波动;而一旦进入临界鼓泡流化状态,床层内会出现气泡而导致 ϵ 不断变化,床层压降波动明显。实验对所采用的压差传感器的测量精度与实时性要求较高,以便实时观察床层压降的变化,进而确定出 U_{mf} 和 U_{mb} 。本文中磁流化床的磁稳流化区域就是指气体表观流速介于 U_{mf} 与 U_{mb} 之间的范围。

$$\Delta p = \frac{G}{A} = L(1-\epsilon)[(\rho_p - \rho_g)g] \quad (1)$$

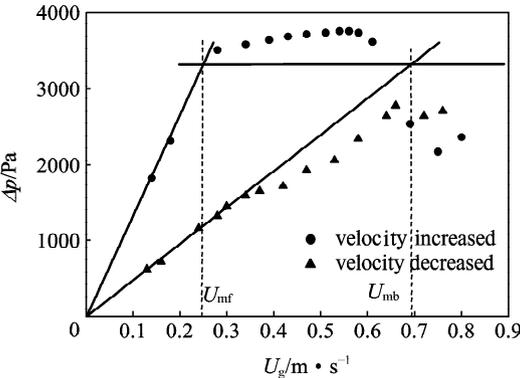
2 实验结果与讨论

本文对表 1 中所列的铁磁颗粒在 8 种磁场强度(0、1890、2955、3665、4370、5440、6500、7330 $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) 下分别进行了流化实验,得到颗粒在多种工况下的流化曲线图。限于篇幅,本文仅列出其中两种粒径的颗粒部分工况下的流化曲线图,如图 2、图 3 所示。

以图 2 为例,图中水平线为由式 (1) 计算得到的理论压降。增加气体表观流速 U_g ,床层压降 Δp 先是线性增加,当超过初始流化速度 U_{mf} 时, Δp 增幅明显减小,并呈弧形增长趋势,但 Δp 的波动很小,表明床层进入散式流化状态;继续增加 U_g 至一定值后, Δp 猛烈下跌,并出现明显波动,表明床层脱散式流化状态进入鼓泡流化状态。此时对应的流速被视为临界鼓泡流化速度 U_{mb} 。继续增加 U_g ,床层压降 Δp 仍呈明显波动状态,且大小变化不大。在这以后,逐渐减小 U_g ,可见 Δp 从 U_{mb} 开始又呈近似线性下降趋势,直至降为 0。



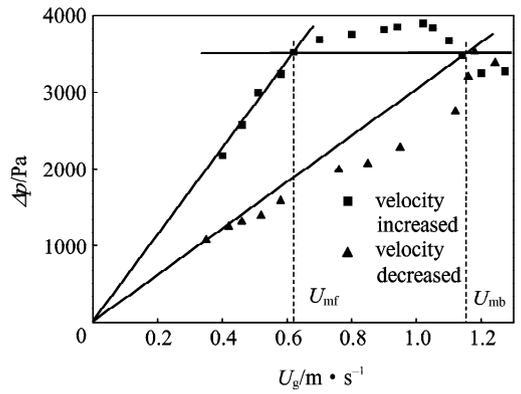
(a) $H=3665 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



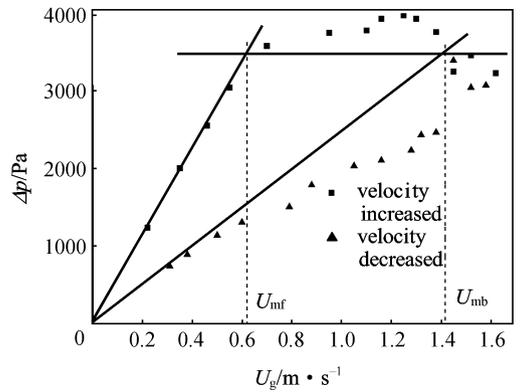
(b) $H=5440 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

图 2 不同磁场强度下的颗粒的流化曲线 ($d_p=231 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Fluidized curves of particles for various intensity of magnetic field ($d_p=231 \mu\text{m}$)



(a) $H=3665 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$



(b) $H=5440 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

图 3 不同磁场强度下的颗粒的流化曲线 ($d_p=512 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Fluidized curves of particles for various intensity of magnetic field ($d_p=512 \mu\text{m}$)

于是，流化曲线图中出现一段 U_{mf} 至 U_{mb} 的磁稳流化区域，如图中两虚线之间的范围。

比较图 2、图 3 可见，改变流化条件，特别是改变磁场强度、颗粒粒径，都会使磁稳流化区域发生较大变化。

为更好地反映磁场强度 H 、颗粒粒径 d_p 对磁稳区域的影响，以磁稳区域的相对值 U_{mb}/U_{mf} 为纵坐标，颗粒粒径 d_p 、磁场强度 H 为横坐标分别重新整理实验数据，结果见图 4、图 5。由图 4 可见， U_{mb}/U_{mf} 与 d_p 、 H 之间基本呈线性关系。在同一磁场强度下，随着 d_p 的增大， U_{mb}/U_{mf} 呈递减趋势，且对应于较高的磁场强度， U_{mb}/U_{mf} 的递减幅度有所提高，即图 4 中对应 $H=2955 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $H=5440 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 以及 $H=7330 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 的变化曲线递减的斜率依次增大。图 5 则表示随着 H 的增加， U_{mb}/U_{mf} 也增加。这主要是因为，增大磁场强度，颗粒所受磁场力以及颗粒间的相互作用力增强，颗粒沿磁力线排布形成的链状结构^[1-2] 扼制气泡的能力增强，磁稳区相应增大。从图中还可以得出，粒

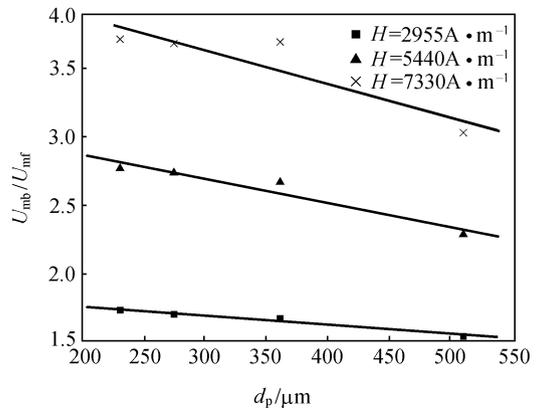


图 4 颗粒粒径与磁稳区域 U_{mb}/U_{mf} 的关系

Fig. 4 Relation between U_{mb}/U_{mf} and d_p

径较小的颗粒增幅较为明显。

3 影响磁稳区域的主要因素

为了研究影响磁稳区域的主要因素，可以合理地选择量纲 1 数进行分析、关联。一般，气固流化床中颗粒刚开始流化时，床层压降既符合固定床的

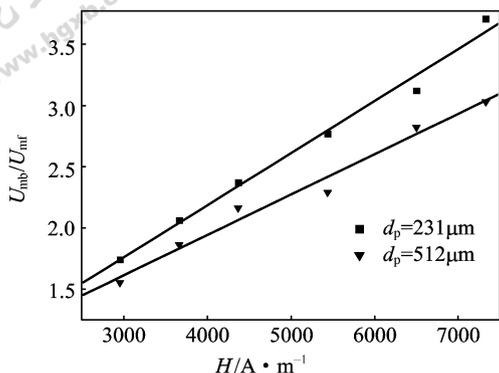


图 5 磁场强度与磁稳区域 U_{mb}/U_{mf} 的关系

Fig. 5 Relation between U_{mb}/U_{mf} and H

规律, 同时又符合流化床的规律, 结合 Ergun 公式与式 (1), 对于球形颗粒, 引入 Re 、 Ar , 有

$$1.75 \frac{1}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf}^2 + 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} Re_{mf} = Ar \quad (2)$$

其中

$$Re_{mf} = U_{mf} d_p / \nu_g$$

$$Ar = gd_p^3 (\rho_p - \rho_g) / \rho_g \nu_g^2$$

式 (2) 为计算颗粒起始流化速度 U_{mf} 的方程。式中的量纲 1 数 Re_{mf} 、 Ar 实际反映出颗粒流化时的受力状况, 如 Ar 表示颗粒所受浮力、重力与黏性力的相对比值。但在外加磁场的情况下, 床内颗粒流化时, 还必须考虑颗粒所受磁场力和颗粒间相互作用力, 为反映磁场的作用, 引入量纲 1 数 $E_r = 3 \mu_0 M_p H / 2gd_p \rho_p^{[10-11]}$, 它表示单位体积内磁势能与重力势能之比。

下面对上述 3 个量纲 1 数与磁稳区域之间的关系进行关联, 它们之间的变化关系如图 6 所示。由图中可以发现, E_r 与 $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ 之间存在近似幂次方的函数关系。在此基础上, 可以假定, 磁稳区域与各量纲 1 数之间的关系表达式为

$$\frac{U_{mb} - U_{mf}}{U_{mf}} = C Re_{mf}^m Ar^n E_r^t \quad (3)$$

通过多元线性回归, 式 (3) 可具体表示为式 (4)

$$\frac{U_{mb} - U_{mf}}{U_{mf}} = 0.0012 Re_{mf}^{-0.9678} Ar^{0.9237} E_r^{0.7011} \quad (4)$$

从式 (4) 中可发现, 磁稳区域的大小随颗粒起始流化的 Reynolds 数增大而减小, 随颗粒的 Archimedes 数及磁势能比的增大而增加。

为确认式 (4) 能否真实反映磁稳区域与量纲 1 数之间的变化规律, 需对式 (4) 进行显著性检验, 为此, 用残差平方和对回归平方和构建统计变量作 F 检验。经计算分析可以得出式 (4) 在 $\alpha =$

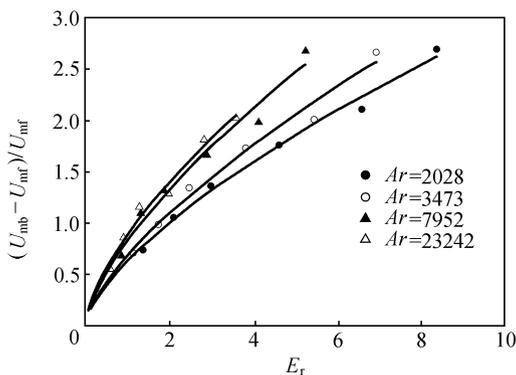


图 6 不同 Ar 下的磁稳区域 $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ 与 E_r 的关系

Fig. 6 Variation of $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ as a function of E_r for different values of Ar

0.05 水平上是显著的, 说明式 (4) 预测的结果 99% 的误差不超出 0.18。

同时, 为研究 E_r 、 Ar 、 Re_{mf} 对 $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ 影响的大小, 还需用残差平方和对偏回归平方和进行 F 检验。同样, 经计算可得, F_{E_r} 、 F_{Ar} 、 F_{Re} 在 $\alpha = 0.01$ 的水平上显著, 其中 F_{E_r} 的偏回归平方和最大, 其值为 632.61, F_{Re} 的偏回归平方和最小, 其值为 19.04。这表明, E_r 是影响 $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ 的最重要因素, Ar 次之, Re_{mf} 的影响最小。由于 E_r 实际上反映外加磁场的强弱程度, 这表明, 调节磁场强度对改变磁稳流化区域的大小最为有效。

4 结 论

(1) 磁场强度、颗粒粒径对磁稳流化区域有较大影响。磁稳流化区域 U_{mb}/U_{mf} 随 d_p 增大而减小, 且磁场强度 H 越大, 减小的幅度越大。 U_{mb}/U_{mf} 随 H 的增加而增强, 且随颗粒粒径越小, 增加的幅度越大。

(2) 磁稳流化区域 $(U_{mb} - U_{mf}) / U_{mf}$ 与量纲 1 数 E_r 、 Ar 、 Re_{mf} 有关。按实验数据整理得到的准则关联式表明, 磁稳区域的大小随 Re_{mf} 的增加而减小, 随 E_r 、 Ar 的增加而增大, 依据此式, 可以准确地给出磁流化床处于磁稳流化状态的运行参数。

(3) 对所得到的准则关联式进行显著性检验, 证明该式具有较好的适用性, 且 E_r 对磁稳流化区域的影响最为显著, Ar 次之, Re_{mf} 则最不显著。

符 号 说 明

A ——床层横截面积, m^2

Ar ——Archimedes 数
 d_p ——平均颗粒粒径, μm
 E_r ——磁重势能比
 G ——床料重量, N
 g ——重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 H ——磁场强度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
 L ——床层高度, m
 M ——磁化强度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
 Δp ——床层压降, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
 Re ——Reynolds 数
 U ——气体表面观流速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 ϵ ——床层空隙率
 μ_0 ——真空磁导率, $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
 ν ——动力黏度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

下角标

g ——气体
 p ——磁性颗粒
 mf ——初始流化状态
 mb ——临界鼓泡流化状态

References

- [1] Rosensweig R E. Magnetic stabilization of the states of uniform fluidization. *Science*, 1979, **204** (1): 57-59
- [2] Liu Y A, Hamby R K, Colberg R D. Fundamental and practical developments of magnetofluidized beds: a review. *Powder Technology*, 1991, **64** (1): 3-56
- [3] Cohen A H, Tien Chi. Aerosol filtration in a magnetically stabilized fluidized bed. *Powder Technology*, 1991, **64** (2): 147-158
- [4] Rincon J. Removal of fine particles in a magnetically stabilized fluidized filter. *Separation Science and Technology*, 1993, **28** (6): 1241-1252
- [5] Burns M A, Graves D J. Application of magnetically stabilized beds to bioseparations. *Reactive Polymers*, 1987, **6** (1): 45-50
- [6] Webb C, Kang H K, Mofft G, *et al.* The magnetically stabilized fluidized bed bioreactor: a tool for improved mass transfer in immobilized enzyme systems. *The Chemical Engineering Journal*, 1996, **61** (3): 241-246
- [7] Bahar Tashin, Celebi Serdar S. Performance of immobilized glucoamylase in a magnetically stabilized fluidized bed reactor (MSFBR). *Enzyme and Microbial Technology*, 2000, **26** (1): 28-33
- [8] Ding Yong, Sun Yan. Small-sized dense magnetic pellicular support for magnetically stabilized fluidized bed absorption of protein. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60** (4): 917-924
- [9] Wang Zhixiao (王之肖), Zhang Yunfeng (张云峰), Gui Keting (归柯庭). Study on the mechanics of enhancement of flue gas desulfurization in magnetically fluidized bed. *Proceedings of the CSEE (China)* (中国电机工程学报), 2005, **25** (14): 68-72
- [10] Ganzha V L, Saxena S C. Hydrodynamic behavior of magnetically stabilized fluidized beds of magnetic particles. *Powder Technology*, 2000, **107** (1): 31-35
- [11] Wang Yinghui (王迎慧), Gui Keting (归柯庭), Shi Mingheng (施明恒). Analysis and experiment of determining the stable zone in magnetically fluidized bed. *Journal of Applied Science (China)* (应用科学学报), 2005, **23** (1): 82-85