

大差异双组分混合颗粒的最小流化特性

刘伟伟, 范怡平, 卢春喜

[中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249]

摘要: 在一套 $\phi 260\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$ 的有机玻璃实验装置中, 对大差异双组分混合颗粒的最小流化特性进行了实验研究, 得到了混合颗粒的流化曲线, 由此给出了其起始流化速度、最小流化速度、临界分离速度、完全流化速度等特征速度. 实验结果表明, 流化过程可分为4个阶段, 即完全流化、大小颗粒分离、大颗粒静止小颗粒流化、固定床阶段, 对应混合颗粒的3个状态: 完全混合、部分混合部分分离、完全分离状态; 混合颗粒的特征速度随小颗粒质量分率的增加而减小, 且在小颗粒质量分率达到0.4~0.5后其减小的趋势减缓; 混合颗粒的固定床阶段和完全流化阶段的床层空隙率及混合颗粒的体积收缩比在小颗粒质量分率为0.4时达到极值.

关键词: 双组分混合颗粒; 最小流化特性; 体积收缩比; 床层空隙率; 特征速度

中图分类号: TQ028.9; TQ051.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2008)06-1070-05

1 前言

在流态化技术的实际应用中, 常涉及到宽筛分分布的单一组分及不同颗粒密度、粒度与形状的二组分混合颗粒的流化问题^[1]. 而最小流化速度不仅可定量地反映悬浮颗粒所需曳力大小, 而且可作为高速流化床流化强度的参考^[2], 因此, 双组分混合颗粒最小流化特性一直是关注的焦点^[3]. 许多研究者^[1,2,4,5]都曾对双组分混合颗粒的最小流化特性进行了研究, 但多集中于 A/A, D/B, D/D 类颗粒, 并通过取样方法得到双组分混合颗粒的分离速度. 而对 D/A 类双组分混合颗粒的最小流化特性的研究还未见报道, 且 D/A 类双组分混合颗粒由于粒径差别较大, 其最小流化曲线与其他类双组分混合颗粒应有所不同, 能否通过最小流化曲线获得大差异双组分混合颗粒的分离速度有待研究. 为此, 本工作在—套 $\phi 260\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$ 的有机玻璃实验装置中, 对大差异双组分混合颗粒的最小流化特性进行了实验研究, 考察了小颗粒质量分率对混合颗粒最小流化特性参数的影响, 以期为进一步的研究工作提供参考.

2 实验

2.1 实验装置

实验装置示意图见图1. 为便于观察, 流化床为有机玻璃制成, 床高2000 mm、筒径 $\phi 260\text{ mm}$, 壁厚5 mm, 底部是开孔率为2%、有200个孔径 $\phi 1\text{ mm}$ 孔的分布板, 分布板下装有70 mm高的黄豆, 起预分布的作用. 为防止催化剂泄露, 分布板上安装了100目(150 μm)的铁丝网, 使布气更加均匀.

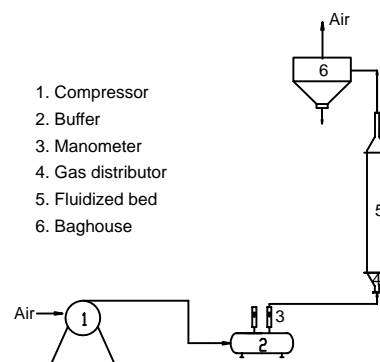


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

2.2 实验介质及方法

实验的流化介质为室温下空气, 小颗粒为 FCC 平衡剂, 模拟催化裂化再生剂, 大颗粒为小米, 模拟清洁汽油生产专用待生催化剂, 其物性参数见表1, 经筛分测定的大颗粒粒度分布如图2, 其中, E 分布是不同粒径区段的颗粒百分比, F 分布是小于所在粒径的所有颗粒的累积百分比. 实验的混合颗粒中, 小颗粒的质量分率分别为0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8. 床层压降采用 FXC-II/32 型压力巡检仪测定. 为测定床层不同轴向和周向位置的压降, 实验中沿床层轴向设4个测压截面, 每个截面上沿周向设3个测压点, 角度分别为 0° , 120° , 240° .

实验开始时, 将物料装入流化床时为2种颗粒完全分层, 即床层上部为小颗粒, 下部为大颗粒. 静止床层高0.7 m. 然后通入空气使床层逐渐流化, 并记录固定气

收稿日期: 2008-06-17, 修回日期: 2008-08-15

基金项目: 国家自然科学基金重大基金资助项目(编号: 20490200); 国家杰出青年科学基金资助项目(编号: 20525621)

作者简介: 刘伟伟(1981-), 男, 河南省济源市人, 博士研究生, 化学工程专业, E-mail: lwmd@yahoo.cn; 卢春喜, 通讯联系人, Tel: 010-89733803, E-mail: lcxing@cup.edu.cn.

表 1 物性参数

Table 1 Properties of experimental materials

| Particle | Diameter (μm) | Bulk density (kg/m^3) | Particle density (kg/m^3) | Bulk voidage | Minimum fluidized voidage | Minimum fluidized velocity (m/s) |
|------------------|----------------------------|---|---|--------------|---------------------------|----------------------------------|
| Coarse particles | 930 | 874.4 | 1402 | 0.3764 | 0.4006 | 0.33 |
| Fine particles | 60 | 883.2 | 1500 | 0.4112 | 0.4251 | 0.003 |

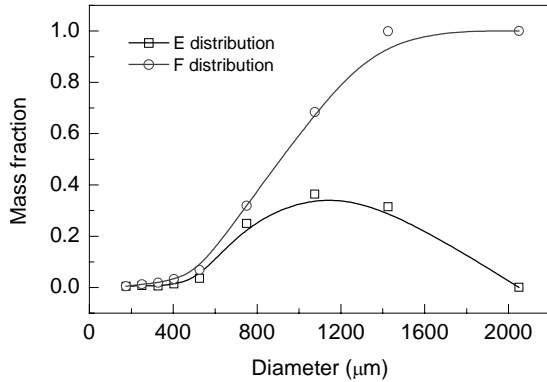


图 2 大颗粒粒度分布曲线
Fig.2 Size distributions of coarse particles

速时的流量和床层压降, 当床层总压降基本不变时, 可知床层已处于完全流化状态. 保持此流化状态 5 min 以上, 使床层内不同位置的物料混合均匀, 而后再逐渐降低风速, 同时记录不同风速时对应的流量和床层压降等参数, 直至风速为 0. 对每一比例的混合物均进行 3 次升速和降速测量, 给出平均值. 实验中, 对气体流量进行温度和压力校正.

3 结果与分析

双组分混合颗粒的流化特性参数主要有起始流化速度、完全流化速度、临界分离速度及最小流化速度. 混合颗粒流化特性参数的确定是进行颗粒的混合、分离及其他流态化研究的前提和基础.

3.1 混合颗粒的最小流化特性

将由降速法测得的混合颗粒床层压降与表观风速

作图, 可得混合颗粒的流化曲线图, 即 $\Delta p-u_g$ 曲线. 图 3(a)和 3(b)分别是小颗粒质量分率(x_{f0})为 0.4 和 0.5 时混合颗粒的流化曲线, 由图可得混合颗粒的起始流化速度 u_{if} 、临界分离速度 u_{bf} 、完全流化速度 u_{ff} 及最小流化速度 u_{mf} .

由图 3 可以看出, 随着表观风速 u_g 的降低, 混合颗粒流化曲线可分为 4 个区, 即流化过程分为 4 个阶段. 在 D 区, $u_g > u_{ff}$, 床层压降基本不随表观风速的变化而变化, 整个床层已处于完全流化状态; 当 $u_g < u_{ff}$ 后, 即进入 C 区, 由于大颗粒粒径较大, 部分大颗粒受到的气体曳力不足以保证其流动, 大颗粒逐渐沉积到床层底部, 而小颗粒受到的气体曳力使其继续向上流动, 故小颗粒经由大颗粒间隙向上运动, 浮升于床层顶部. 实验过程中亦可观察到小颗粒向上运动, 大颗粒和小颗粒逐渐分离, 此时床层压降梯度变化较大.

随着表观风速的进一步降低, 当 $u_g < u_{bf}$, 即至 B 区, 床层压降随表观风速的变化梯度减小. 区域内可观察到大颗粒和小颗粒发生明显的分层, 即大颗粒完全沉积在床层底部, 而小颗粒浮升于床层顶部. 此时, 大颗粒沉积于床层底部处于固定床状态起分布器的作用, 而小颗粒在床层顶部继续处于流化状态. 在 B 区未观察到小颗粒向上运动, 说明此时大、小颗粒达到最大分离程度. 将刚进入 C 区时的表观风速定义为临界分离速度即 u_{bf} , 此时处于固定床的大颗粒压降变化很小, 而浮升于床层顶部的小颗粒在 B 区的表观风速范围内完全流化, 故其压降变化亦较小, 这也是 B 区内床层压降变化梯度减小的原因.

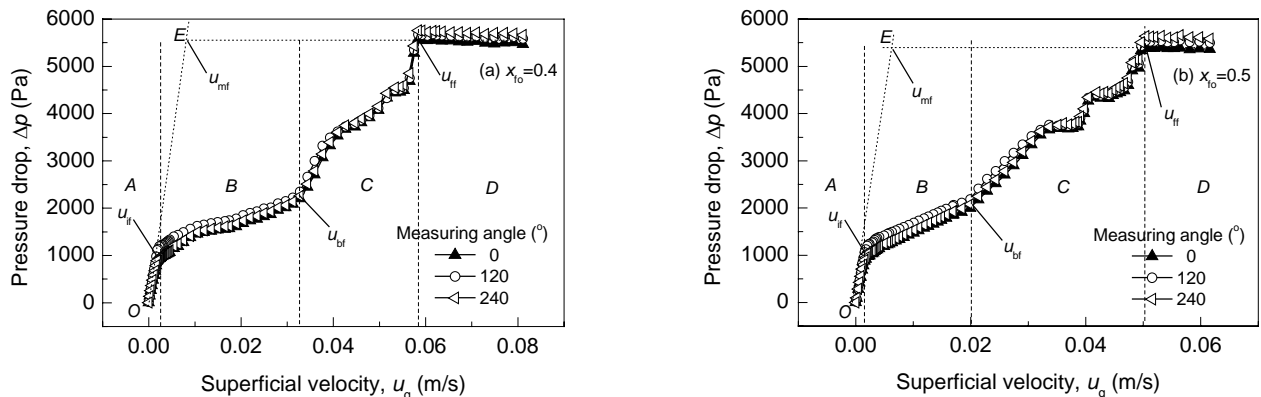
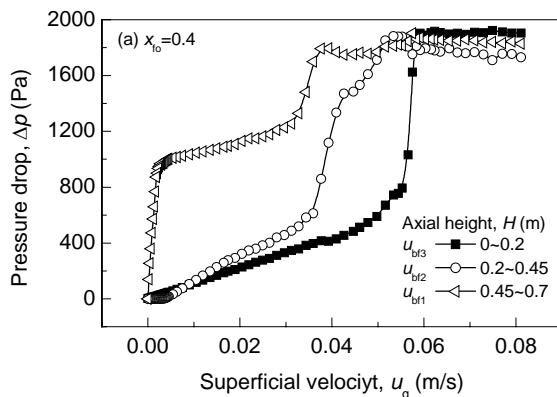


图 3 混合颗粒的流化曲线
Fig.3 Fluidization curves of binary mixture

当 $u_g < u_{if}$ 后, 即至 A 区, 床层压降曲线出现转折, 此转折即为混合颗粒的起始流化速度 u_{if} . 此时小颗粒受到的气体曳力也小于自身重力, 亦开始沉积, 整个床层处于固定床状态. 床层压降随表观气速变化的梯度增大. 至表观气速降低为 0, 整个床层完全静止. 混合颗粒的流化曲线对应双组分混合颗粒的 3 个不同状态, 即混合状态、部分混合部分分离状态及完全分离状态. 由图 3 还可以看出, 在不同周向位置, 混合颗粒的流化曲线相差不大, 说明 2 种颗粒在床内的各位置混合均一. 实验过程中没有观察到气泡的产生, 说明 2 种颗粒分离仅靠重力和曳力的平衡完成.

事实上, 对等密度体系, 张济宇等^[6]曾引用 Shannon 的观点, 即若 2 种不同粒径球形颗粒的最小流化速度比 ($R_{mf} = u_{mf,j} / u_{mf,f}$) 大于 2, 则处于层流区域的气固流化体系会发生明显的分层, 于是可取该比值作为混合/分离状态的判据. 本工作中的 $R_{mf} = 0.33 / 0.003 = 110$ 远大于 2, 说明大差异双组分混合颗粒可以发生明显分层.



为考察在临界分离速度 u_{bf} 时 2 种颗粒是否已完全分离, 在此气速时突然切断气源, 可观察到 2 种颗粒明显分层, 此种方法被许多研究者采用^[7-9]. 以分层线为界, 分别对分层线的上、下两层取样筛分分析可知, 下层的大颗粒质量分率大于 0.98, 而上层的小颗粒质量分率也趋于 1, 可认为此时 2 种颗粒已完全分离.

图 4 为混合颗粒在 3 个轴向位置的床层压降与表观气速的关系曲线. 由图可以更直观地看出混合颗粒在不同气速下的混合分离状态. 在每一轴向位置, 混合颗粒的床层压降在表观气速低于完全流化速度后变化不规则, 这是由于在降速过程中伴随着 2 种颗粒的分离, 而当表观气速达到某一气速后, 混合颗粒的床层压降开始随气速呈线性变化, 说明此时分离过程已经完成. 由图还可以看出, 不同轴向高度完成分离过程时的表观气速不同, 说明了小颗粒逐渐向上的运动轨迹, 从而达到 2 种颗粒的分离.

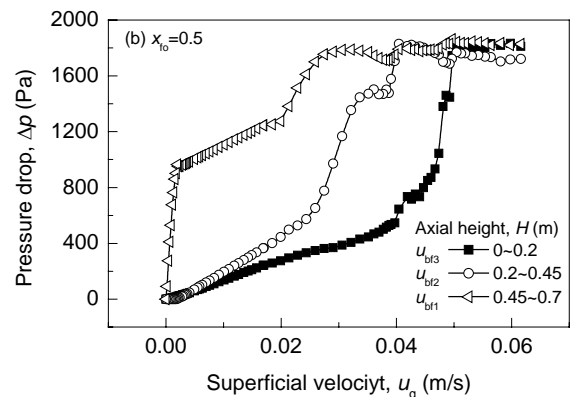


图 4 混合颗粒不同轴向位置的流化曲线

Fig.4 Fluidization curves of binary mixture at different axial positions

3.2 小颗粒质量分率对混合颗粒体系特征速度的影响

对于完全分离的大差异双组分混合颗粒体系, 可由 Chiba 等^[10]推荐的公式计算大差异双组分混合颗粒的最小流化速度:

$$u_{mf,m} = \frac{u_{mf,i} u_{mf,j}}{u_{mf,j} x_{f_0} + u_{mf,i} (1 - x_{f_0})} \quad (1)$$

图 5 为双组分混合颗粒最小流化速度计算值与实验值的比较. 由图可以看出, 最小流化速度的实验值与计算值吻合较好. 且当小颗粒质量分率 $x_{f_0} < 0.4$ 时, 最小流化速度随小颗粒质量分率增大而减小的趋势最为明显; 而当 $x_{f_0} > 0.4$ 时, 最小流化速度随小颗粒质量分率增大而减小的趋势很小. 这是由于混合颗粒间的相互作用减弱, 使混合颗粒的流化性能提高.

图 6 为混合颗粒特征速度与小颗粒质量分率的关系曲线. 由图可以看出, 每一混合颗粒的起始流化速度均等于小颗粒的最小流化速度, 混合颗粒的其他特征速度均随小颗粒质量分率的增加而逐渐减小, 且当小颗粒质量分率达到 0.4~0.5 后减小趋势变得不明显, 表明流化性能较好的小颗粒加入后改善了双组分混合颗粒的流化性能, 而当加入的小颗粒质量分率达到某一值后, 小颗粒的加入对其流化性能的影响较小. 不同特征速度对应着不同流化阶段间的过渡. 鉴于 u_{bf} 在小颗粒质量分率为 0.4~0.5 之间也达到最小值, 本研究认为当混合颗粒中小颗粒的质量分率为 0.4~0.5 时, 在不影响 2 种颗粒流化的同时可能亦更有利于 2 种颗粒的分离.

图 7 为固定床和完全流化时床层的空隙率. 由图可以看出, 在固定床和完全流化状态下, 床层空隙率在小颗

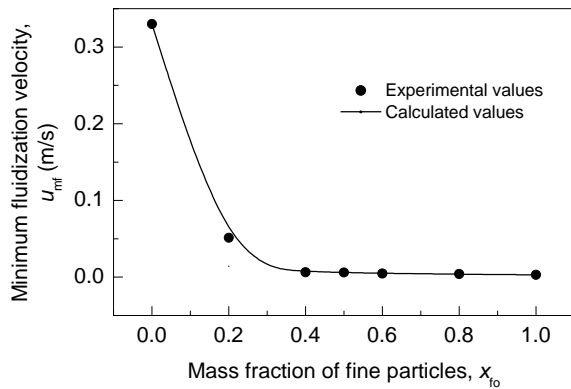


图 5 混合颗粒最小流化速度曲线
Fig.5 Profiles of minimum fluidization velocity of mixture solid

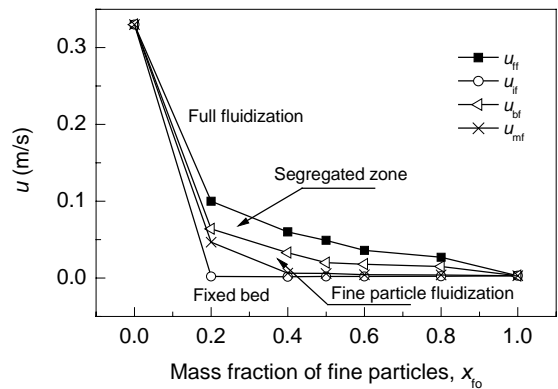


图 6 特征速度曲线
Fig.6 Profiles of characteristic velocities

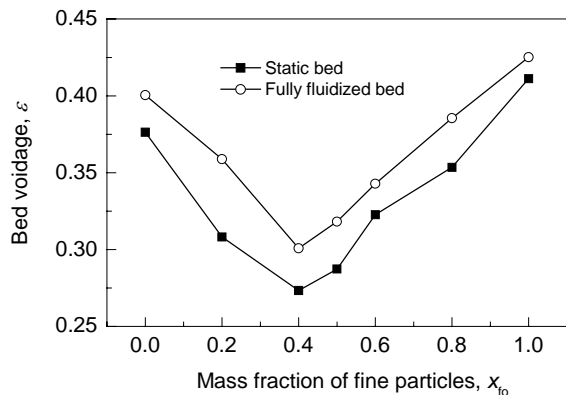


图 7 床层空隙率
Fig.7 Bed voidage

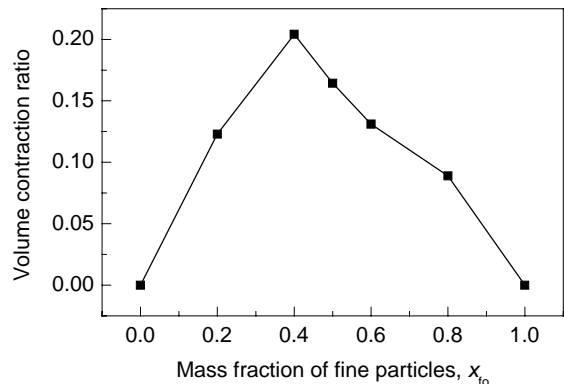


图 8 体积收缩比与小颗粒质量分数的关系
Fig.8 Volume contraction ratio with mass fraction of fine particles

粒质量分率为某一值时最小, 说明床层空隙率与床层组成相关. 这是由于 2 种颗粒粒径差别较大, 小颗粒会填充于大颗粒的间隙, 而当小颗粒质量分率达到某一值时, 小颗粒完全充满大颗粒间隙, 空隙率达到最小值, 随小颗粒质量分率进一步增加, 空隙率主要由细颗粒组分决定, 空隙率持续增加. 许多研究者^[4,11-13]也发现这一现象. Asif^[14]提到了体积收缩(Volume contraction)的概念, 用 $(V_{SM}-V)/V$ 计算. 图 8 给出了体积收缩比随小颗粒质量分数的变化规律, 可以看出, 在小颗粒质量分率为 0.4 时体积收缩比最大. 而由图 7 看出, 床层空隙率在小颗粒质量分率为 0.4 时最小, 两者完全一致.

4 结论

在一套 $\phi 260 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 的有机玻璃实验装置中, 通过对大差异双组分混合颗粒最小流化特性的实验研究, 得到了如下结论:

(1) 大差异混合颗粒的流化过程可以分为 4 个阶段, 即完全流化阶段、大小颗粒分离阶段、大颗粒静止小颗粒流化阶段、固定床阶段, 分别对应着大差异双组

分混合颗粒的 3 个状态: 混合状态、部分混合部分分离状态、完全分离状态.

(2) 由流化曲线不仅可得到大差异双组分混合颗粒的起始流化速度、最小流化速度、完全流化速度, 而且可以得到临界分离速度等特征速度.

(3) 大差异混合颗粒的起始流化速度不随小颗粒质量分数变化, 基本等于小颗粒的最小流化速度; 其他特征速度随小颗粒质量分数的增加而减小, 当小颗粒质量分数达到 0.4~0.5 左右后, 特征速度随小颗粒质量分数变小的趋势不明显.

(4) 大差异混合颗粒的固定床阶段和完全流化阶段的床层空隙率及体积收缩比在小颗粒质量分率为 0.4 时达到极值.

符号表:

| | |
|------------|------------------|
| Δp | 床层压降 (Pa) |
| R_{mf} | 最小流化速度比 |
| u_{br} | 临界分离速度 (m/s) |
| u_{fr} | 混合颗粒完全流化速度 (m/s) |
| u_g | 表观气速 (m/s) |
| u_{tr} | 混合颗粒起始流化速度 (m/s) |
| $u_{mf,f}$ | 小颗粒最小流化速度 (m/s) |

| | |
|---------------|------------------------|
| u_{mfj} | 大颗粒最小流化速度 (m/s) |
| $u_{mf,m}$ | 混合颗粒最小流化速度 (m/s) |
| V | 混合状态的混合颗粒体积 (m^3) |
| V_{SM} | 完全分层时的混合颗粒体积 (m^3) |
| x_{f0} | 小颗粒质量分率 |
| ε | 空隙率 |

参考文献:

- [1] 张济宇, 彭辉. 二组分混合物的最小流化特性: II. 混合物平均物性与最小流化速度 [J]. 燃料化学学报, 1998, 26(1): 30-37.
- [2] Formisani B, De Cristofaro G, Girimonte R. A Fundamental Approach to the Phenomenology of Fluidization of Size Segregating Binary Mixtures of Solids [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(1): 109-119.
- [3] 张济宇, 彭辉, 罗国华, 等. 二组分颗粒系统的最小流化速度 [A]. 华中理工大学会议学术组. 第六届全国流态化会议论文集 [C]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. 140-145.
- [4] Lu L, He R, Gidaspow D, et al. Size Segregation of Binary Mixture of Solids in Bubbling Fluidized Beds [J]. Powder Technol., 2003, 134(1): 86-97.
- [5] 彭辉, 张济宇. 流化床二组分混合物的适宜分离气速 [J]. 化学反应工程与工艺, 1996, 12(3): 271-280.
- [6] 张济宇, 彭辉. 二组分混合物的最小流化特性: I. 混合/分离状态与最小流化空隙率 [J]. 燃料化学学报, 1997, 25(3): 199-206.
- [7] Nienow A W, Rowe P N, Cheung L Y. A Quantitative Analysis of the Mixing of Two Segregating Powders of Different Densities in a Gas-fluidised Bed [J]. Powder Technol., 1978, 20(1): 89-97.
- [8] Nienow A W, Naimer N S, Chiba T. Study of Segregation/Mixing in Fluidised Beds of Different Size Particles [J]. Chem. Eng. Commun., 1987, 62: 53-66.
- [9] Wu S Y, Baeyens J. Segregation by Size Difference in Gas Fluidized Beds [J]. Powder Technol., 1998, 98(2): 139-150.
- [10] Chiba S, Chiba T, Nienow A W, et al. The Minimum Fluidization Velocity, Bed Expansion and Pressure-drop Profile of Binary Particle Mixtures [J]. Powder Technol., 1979, 22(2): 255-269.
- [11] Formisani B, Girimonte R, Longo T. The Fluidization Process of Binary Mixtures of Solids: Development of the Approach Based on the Fluidization Velocity Interval [J]. Powder Technol., 2008, 185(2): 97-108.
- [12] Olivieri G, Marzocchella A, Salatino P. Segregation of Fluidized Binary Mixtures of Granular Solids [J]. AIChE J., 2004, 50(12): 3095-3106.
- [13] Marzocchella A, Salatino P. Transient Fluidization and Segregation of Binary Mixtures of Particles [J]. AIChE J., 2000, 46(11): 2175-2182.
- [14] Asif M. The Complete Segregation Model for a Liquid Fluidized Bed: Formulation and Related Issues [J]. Powder Technol., 2004, 140(1): 21-29.

Minimum Fluidization Characteristics of Binary Mixtures of Particles with Significant Size Difference

LIU Wei-wei, FAN Yi-ping, LU Chun-xi

[State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Minimum fluidization characteristics of binary mixture of particles with significant size difference are studied in cold model perspex experimental equipment with the dimensions of $\phi 260$ mm \times 2000 mm. The fluidization curves and characteristic velocities including initial velocity, minimum fluidization velocity, segregated velocity and full fluidization velocity are obtained. It is indicated that fluidization curves could be divided into four zones, corresponding to three states: mixing state, intermediate state and full segregated state. Characteristic velocities of binary mixtures decrease with increasing of mass fraction of fine particles, and the trend is not obvious when mass fraction of fine particles is about 0.4~0.5. Bed voidage of binary mixtures of particles in fixed bed and full fluidization states and volume contraction ratio of binary mixtures of particles arrived at extremum when the mass fraction of fine particles is equal to 0.4.

Key words: binary mixture particles; minimum fluidization characteristics; volume contraction; bed voidage; characteristic velocities