

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.036

脉动气流辅助流化下双组分颗粒的混合特性研究*

李占勇 潘波 高新源 胡娅君
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 脉动流化对气固接触和热质传递有一定的优势。分别以相同密度不同粒径以及不同密度相同粒径两类颗粒体系为研究对象,以 Ashton 混合指数和沉积组分分布为评定依据,实验研究了不同脉宽比下脉动气流辅助流化对颗粒混合程度的影响,并与普通流化床进行了比较。结果表明:在平均气速较低的情况下,添加辅助脉动气流有助于促进颗粒混合,同时得出颗粒密度差别对双组分颗粒混合的影响大于颗粒直径差别对其的影响。
关键词: 脉动流化床 混合特性 脉宽比
中图分类号: TQ051.1⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0247-07

Particle Mixing and Segregation of Binary Mixtures in Fluidized Beds with Additional Pulsating Air Flow

Li Zhanyong Pan Bo Gao Xinyuan Hu Yajun
(College of Mechanism Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Pulsating fluidization has the advantages of high level contact of gas-solid and good mass and heat transfer. This paper presents the studies on two types of binary particles: identical sizes but different densities, and identical densities but different sizes. The experiments were carried out in a two-dimensional fluidized bed which was made of plexiglas with the size of 200 mm (length) × 20 mm (width) × 1 000 mm (height). Two air streams, steady flow and pulsating flow, were introduced into the fluidized bed to compare their effects on the mixing of particles. Experiments also investigated the mixing characteristics in different pulse intermittencies in terms of Ashton mixing index and the distribution of jetsam concentration. The results show that pulsating flows imposed on conventional fluidization can improve particle mixing at a lower average gas velocity. It is also found that the Ashton mixing index of equal densities binary mixtures is about 18% bigger than that of unequal densities binary mixtures. Thus the effect of density difference on particle mixing is more significant than the influence of size difference for binary particles.
Key words: Pulsating fluidized bed Mixing characteristic Pulse intermittency

引言

流化床因其具有良好的气固接触条件,且传质传热效率高等优点,被广泛应用于化工、能源、食品加工和药品生产等领域^[1-4]。在流化床操作过程中,通常会处理一定粒径范围的物料,有时为了改善大颗粒物料的流化性能,会加入一定量易于流化的

小颗粒(如生物质燃烧^[5-6]或气化^[7]过程中加入石英砂为底料),而有时会添加具有吸附性的颗粒(如硅胶^[8])来加快传质传热速率,提高效率。这些不同粒径或种类的颗粒物料会增加流化床操作的复杂性。故研究颗粒体系的混合与分离对流化床操作具有重要的意义。在过去的几十年里,有不少关于颗粒混合/分离特性实验和模拟的研究。

收稿日期: 2014-07-11 修回日期: 2014-09-03
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA021303)
作者简介: 李占勇,教授,博士生导师,主要从事节能干燥、流化床以及废弃物处理研究,E-mail: zyli@tust.edu.cn

Rowe 等^[9]引入浮升组分(Flotsam)和沉积组分(Jetsam)的概念来分别描述流化过程中上升到床层顶部和沉积到床层底部的颗粒。Cooper 等^[10]采用非稳态三流体模型模拟了二维流化床中焦炭和金红石颗粒的混合/分离机理,该研究能观察到气泡从产生到破裂的全过程。Lu 等^[11]采用基于颗粒流动力学理论,以欧拉-欧拉方法、欧拉-拉格朗日硬球模型的多流体模型来模拟流化床中颗粒的分离现象,得出增加流化速度会提高颗粒的混合效果。李斌等^[12]将离散单元法与计算流体力学相结合,模拟了床内颗粒的轴向混合与径向混合过程,发现增大流化气速有助于加速颗粒的混合,且颗粒轴向混合对流化气速的敏感性低于径向混合。江茂强等^[13]采用 CFD-DEM 的方法对非等密度颗粒流化床内的气固运动进行了数值模拟研究,并采用 Lacey 混合指数分析流化床内颗粒之间的混合状况。

在流化床的操作过程中,分离现象是多组分流化床的固有特性。为了达到更好的颗粒混合效果,研究者们采用了各种方法。Nienow 等^[14]发现在相同的表观气速下,穿孔板或立管式分布器比密孔板分布器更有利于提高混合的效果。Toyohara 等^[15]采用锥形流化床来促进不同粒径颗粒的混合,发现随着表观气速的增加,分离核心区逐渐消失,使得整个床层混合良好。Tian 等^[16]研究了气体分布板对流化床微混合过程的影响,得出在不均匀供气条件下,采用倾斜分布板能使流化床出现快速的对流混合。研究者们也在其他改进的流化床中开展了颗粒的混合和分离过程的研究,如振动流化床^[17]、喷动床或喷动流化床^[18-19]。

相比于一般流化床,脉动流化床能促进颗粒的混合^[20],使气体的供应时间延长约 51%^[21],且在传热、传质方面也具有优势,其在干燥领域得到了广泛的应用^[22-23]。然而,在有关脉动流化床床层动力学研究中^[24-25],对于不同颗粒混合的研究比较少,且大多数实验都是在单股流化气体下进行的。

本文采用连续流化气流中叠加脉动气流的方式来提高流化床中颗粒混合,研究脉动辅助气流对不同粒径或密度两种颗粒体系混合特性的影响。

表 1 物性参数和实验条件

Tab.1 Particle physical properties and experimental conditions

	颗粒	直径/mm	颗粒密度/(kg·m ⁻³)	连续流量/(m ³ ·h ⁻¹)	脉动流量/(m ³ ·h ⁻¹)
等密度体系	硅胶颗粒 1	0.90~1.25	1 350	22	7
	硅胶颗粒 2	2.00~2.80	1 350		
非等密度体系	玻璃珠	1.45~2.00	2 381	33	9
	小米	1.45~2.00	1 173		

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1,二维流化床主体由透明的有机玻璃制作,尺寸为 200 mm(长)×20 mm(宽)×1 000 mm(高),实际上是假设其为三维床模型过中心轴的垂直断面。床体底板为可拆卸的气体分布板(本次实验所采用的气体分布板开孔率为 7.6%),底板连接在锥形风室上,风室的上部为加长的气室,目的是支撑床体和保证气体分布均匀。另加装 100 目的筛网防止细颗粒由分布板开孔泄漏并对气流起到更好的均布作用。流化床的进气气流分为稳定气流和脉动气流,流量由带针阀的流量计控制,通过电磁阀的开闭实现气流脉动,并采用时间继电器来调整脉动气流的脉宽比。本实验在不同电磁阀的开时间($t_{on}=0.1\sim0.4\text{ s}$)下,采用 3 种不同的脉宽比($I=t_{off}/(t_{on}+t_{off})$, t_{off} 为电磁阀闭时间)来研究脉动气流对两相颗粒组分的混合和分离特性的影响。其中稳定气流流速设定为沉积组分最小流化速度计算值的约 1.5 倍,脉动气流约占稳定气流流量的 30%。在流化操作结束后,采用自制的活塞装置对混合的物料进行分段取样,分析不同床层高度的两相颗粒组分的质量分数。实验重复 3 次。

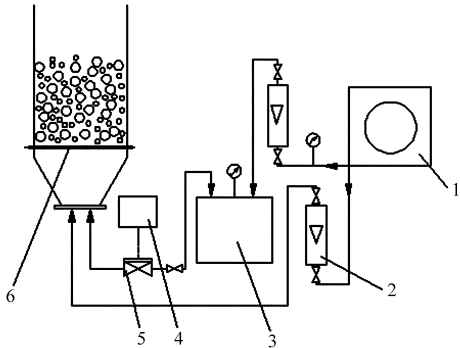


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

1. 空气压缩机 2. 转子流量计 3. 储气罐 4. 时间继电器
5. 电磁阀 6. 流化床

1.2 实验材料与方法

按照 Geldart^[26]分类方法,本实验所选颗粒均属于不易流化的 D 类颗粒。相应的颗粒物性参数和实验条件如表 1 所示。

其中,硅胶是一类具有良好吸附性的材料,在流化床中有时被用作添加剂,以改善颗粒物料的流化特性,加快传质传热速率,提高效率。采用玻璃珠与小米做非等密度体系的实验材料其意义在于,在农业生产中,收获的谷物中常会混入一定的沙子或小石粒,故需要对其进行有效的分离。

在流化床主体中,首先放入浮升组分颗粒(硅胶颗粒 1 或小米),再放入沉积组分颗粒(硅胶颗粒 2 或玻璃珠),然后调整床层表面使其高度平缓。开启空气压缩机,气体首先储存在稳压罐中,气体达到一定量时,即可开启稳压罐,输出气流。调节时间继电器使其控制电磁阀产生不同开、闭时间的脉动气流。床层内的物料在连续通入气体 5 min 后,达到稳定的混合状态,这时将进气阀门关闭,切断通入的气流,待流化床恢复到静止状态后(一般为 5 s),拆卸流化床主体,在拆卸的过程中,保持物料原有的混合状态,将流化床床体从实验台上取走后水平放置,用活塞装置将床层物料沿床层高度按 6 等分逐一推出。然后分离双组分,并称量沉积组分的质量(m_j)以及总质量(m_t),由公式 $C_j = m_j/m_t$ 计算出在各个床层高度范围内的平均沉积组分质量分数。

本文采用 Ashton 指数^[27]定量分析双组分颗粒从完全分离到完全混合的程度

$$M^2 = \frac{\lg S_0^2 - \lg S^2}{\lg S_0^2 - \lg S_R^2} \tag{1}$$

未混合时, $M = 0$; 达到完全混合状态时, $M = 1$;

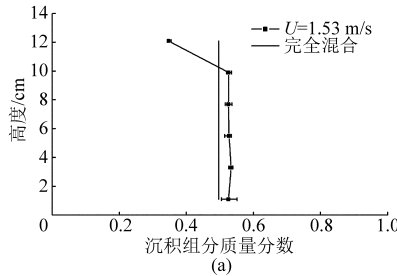


图 2 等密度体系普通流化床中沉积组分质量分数沿床层高度的分布

Fig.2 Distribution of jetsam concentration at different bed heights in binary particles of equal densities for conventional fluidized bed

在普通流化床中,在气速 $U = 1.53 \text{ m/s}$ 时(图 2a),颗粒沿床层的分布偏差很小,这意味着在较低气速下(但高于沉积颗粒的最小流化速度)床层中颗粒的混合状态没有变化。然而,当气速增加到 2.01 m/s 时(图 2b),颗粒质量分数的偏差相对较大,在床层的顶部尤为明显,即实验结果有一定的随机性。

图 3 表示脉动流化床中($t_{on} = 0.3 \text{ s}$),等密度体系的沉积组分质量分数沿床层高度的分布。从图中可以看出,在脉动气流下,流化床顶部的质量分数变化也很明显,且不同脉宽比下(闭时间 t_{off} 不同)的实

际混合时, $0 < M < 1$ 。式中的 S_0 、 S 、 S_R 分别表示当颗粒完全未混合状态、实际混合状态、完全混合状态下某一组分的标准偏差,计算式为

$$S_0^2 = xy \tag{2}$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - C)^2 \tag{3}$$

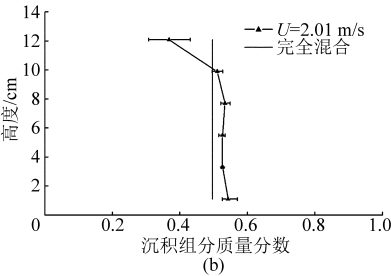
$$S_R^2 = \frac{xy}{\frac{W}{yw_x + xw_y}} \tag{4}$$

- 式中 C_i ——第 i 等分中沉积组分的质量分数
 C ——所有等分 C_i 的平均值
 x ——双组分混合物中沉积组分的质量分数
 y ——双组分混合物中浮升组分的质量分数
 W ——双组分混合物总质量, kg
 w_x ——双组分混合物中沉积组分的质量, kg
 w_y ——双组分混合物中浮升组分的质量, kg
 n ——所取样本数,取 $n = 6$

2 实验结果与讨论

2.1 等密度体系

图 2 表示在普通流化床中,等密度体系(颗粒直径比约为 2)的沉积组分质量分数沿床层高度的分布。从图中可以看出,在床层顶部和底部均出现了颗粒的分离,相比之下床层顶部浮升颗粒组分的富集比较严重。而在床层的中部区域,颗粒的浓度基本保持一致。



验结果不同。当脉宽比 $I = 0.5$ 时(图 3b),实验结果的偏差较小,在床层的顶部,沉积组分质量分数(C_j)为 $0.40 \sim 0.45$,这比其他几种情况下的混合效果好。当增加电磁阀的闭时间(t_{off})时(图 3c),床层顶部沉积组分的质量分数会增加,出现颗粒的分离。脉宽比不同时,相应时间的平均气速也不同。当脉宽比 $I = 0.33$ 时(图 3a),相应时间的平均气速最高($U_{av} = 1.85 \text{ m/s}$),床层顶部的沉积组分质量分数为 $0.34 \sim 0.43$,这表明,该条件下脉动对颗粒的促进作用不明显。

等密度体系不同开时间与脉宽比条件下的

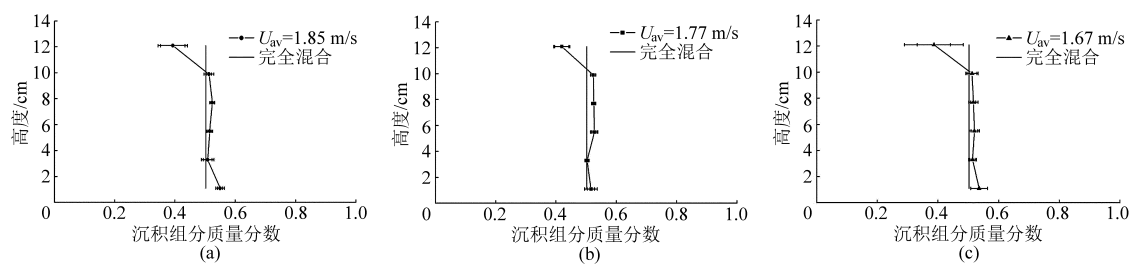


图3 等密度体系脉动流化床中沉积组分质量分数沿床层高度的分布 ($t_{on} = 0.3\text{ s}$)

Fig. 3 Distribution of jetsam concentration at different bed heights in binary particles of equal densities for pulsed fluidized bed ($t_{on} = 0.3\text{ s}$)

Ashton 混合指数如图 4 所示。总体上,二者对混合指数影响不明显。当脉宽比 I 分别选为 0.33 ($f = 1.67 \sim 12.5\text{ Hz}$)、0.50 ($f = 1.25 \sim 10\text{ Hz}$)、0.70 ($f = 0.71 \sim 5.56\text{ Hz}$),对应的混合指数的平均值标准差分别为 0.678 ± 0.062 、 0.700 ± 0.036 、 0.652 ± 0.051 。另外,相比于气速为 1.53 m/s、2.01 m/s 的普通流化床,对应的 Ashton 混合指数的平均值分别为 0.630 ± 0.005 、 0.653 ± 0.066 ,表明脉动流化下混合指数稍有增加。即在普通流化的基础上添加脉动辅助气流对等密度双组分颗粒的混合状况稍有改善。

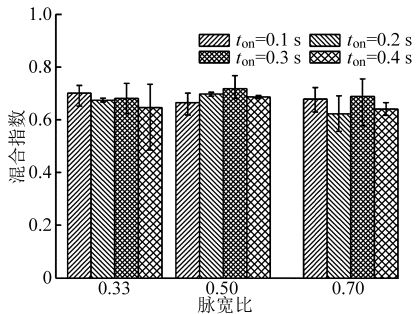


图4 等密度体系不同开时间(t_{on})与脉宽比(t_{on}/t_{off})条件下的混合指数

Fig. 4 Mixing index of different on-period times and pulse intermencies in binary particles of equal densities

2.2 非等密度体系

图 5、6 分别为非等密度体系下(颗粒密度比约为 2)普通流化床以及脉动流化床中沉积组分质量分数沿床层高度的分布情况。从图中可以看出,对

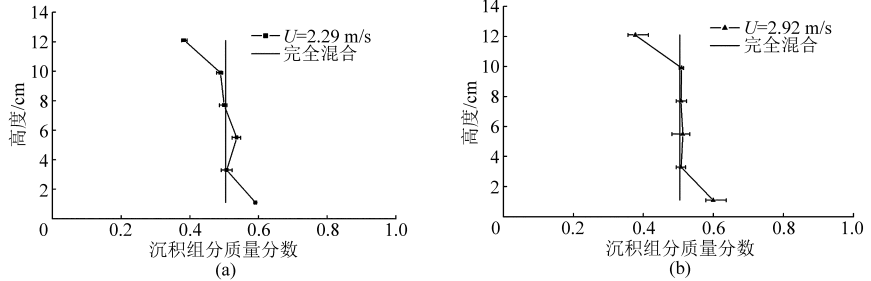


图5 非等密度体系普通流化床中沉积组分质量分数沿床层高度的分布 ($t_{on} = 0.3\text{ s}$)

Fig. 5 Distribution of jetsam concentration at different bed heights in binary particles of unequal densities for conventional fluidized bed

于非等密度的双组分颗粒体系,在床层的顶部和底部均出现了颗粒分离,且在床层底部沉积颗粒的富集也很明显。但脉动流化条件下比普通连续流化时的颗粒分离更加严重。对于普通流化床(图 5),在床层顶部和底部的沉积组分质量分数约为 0.4 和 0.6,偏离其原料组成比约 0.1。与等密度体系一样,气速对混合效果的影响不是很明显,但气速增加,结果的偏差也增加。对于脉动流化床下(图 6),实验所得沉积或浮升组分分布具有明显随机性,在床层顶部和底部沉积组分质量分数出现最大偏差,分别为 0.25 和 0.17,而在普通流化床中要好很多。

图 7 为非等密度体系不同开时间与脉宽比条件下的混合指数,从图中可以看出,随开时间的减小,混合指数略有增加;当脉宽比增加时(闭时间增长),混合指数下降。在脉动流化条件下,不同脉宽比 I (0.33、0.5、0.7)下的混合指数分别为 0.592 ± 0.068 、 0.588 ± 0.087 、 0.592 ± 0.099 。而对于连续气速分别为 2.29 m/s、2.92 m/s 时的普通流化床,相应的 Ashton 混合指数分别为 0.655 ± 0.008 和 0.543 ± 0.008 ,这表明普通流化条件下混合程度高于脉动辅助流化。

采用统计学方法分析等密度体系与非等密度体系间的显著性差异,两种体系的 Ashton 混合指数服从正态分布,且方差不等,其 t 检验的结果如表 2,表明等密度体系与非等密度体系的混合指数有显著性

差异($p < 0.05$),等密度体系的混合指数比非等密度体系大 0.102 ± 0.031 (95% 的置信水平),即大 18%。可见密度差别比粒径差别对混合效果的影响更大。

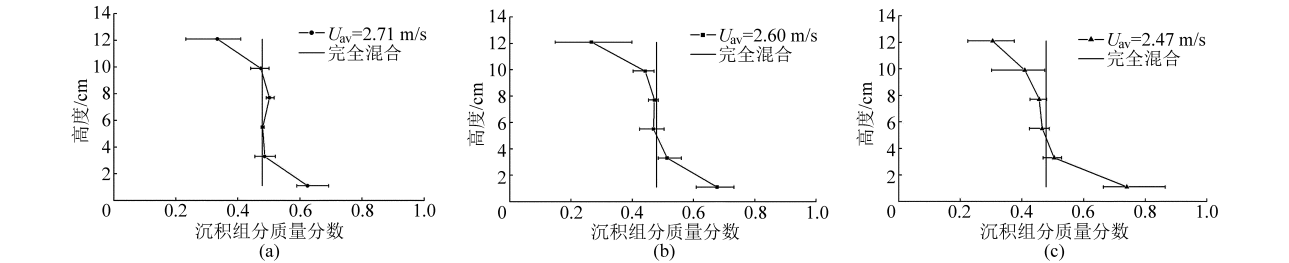


图 6 非等密度体系下脉动流化床中沉积组分质量分数沿床层高度的分布 ($t_{on} = 0.3$ s)

Fig. 6 Distribution of jetsam concentration at different bed heights in binary particles of unequal densities for pulsed fluidized bed ($t_{on} = 0.3$ s)

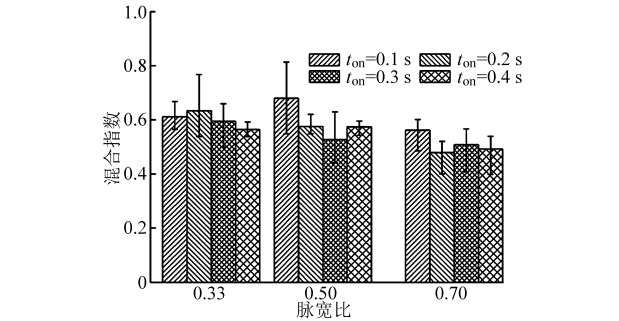


图 7 非等密度体系不同开时间(t_{on})与脉宽比 (t_{on}/t_{off})条件下的混合指数

Fig. 7 Mixing index of different on-period times and pulse intermittencies in binary particles of unequal densities

表 2 等密度体系与非等密度体系的统计学显著差异性分析

Tab. 2 Statistical analysis of significant difference between equal and unequal densities

	平均值	标准偏差	标准误差	p 值	置信区间($\alpha = 0.05$)
等密度体系	0.665	0.058	0.003	< 0.001	0.102 ± 0.031
非等密度体系	0.563	0.084	0.007		

速度的 1.5 倍,这样,床层表观风速分别为浮升颗粒最小流化速度的 2.1~2.8 倍(等密度颗粒体系)和 2.7~3.5 倍(非等密度颗粒体系)。即所有颗粒都处于流化状态。虽然脉动气流对床层压力产生一定波动影响,但是较大的流化风速仍使得浮升颗粒组分在顶部富集。对于非等密度颗粒体系,在床层底部也出现沉积颗粒组分的富集,即较重的颗粒在底部易发生分离。这是由于气泡通过后,颗粒速度有差异,不同颗粒间存在滑移速度^[10]。另外,颗粒密度的差异对分离影响大^[28-29]。Tanimoto 等^[30]通过研究沉积颗粒相对于周围颗粒的分离距离,其结果也表明,增大双组分颗粒的密度比或粒径比均使得分离距离增大,且相比之下密度比的影响更大。

增大气速有助于促进颗粒混合^[11-12, 29]。在前面的讨论中,从沉积颗粒组分质量分数沿床层高度分布以及不同条件下的 Ashton 混合指数可以得知,高气速下连续气流提高了两类颗粒体系的混合程度。在脉动气流辅助下,虽然平均风速较低(最大

2.3 讨论

双组分颗粒(粒径或密度不同)流化床操作中会出现混合和分离过程。气泡是产生该现象的主要原因,这在 Li 等^[25]和 Cooper 等^[10]的数学模拟研究中也得到验证。一般认为,气泡上升过程中其尾窝夹带沉积颗粒,促进两种颗粒的混合,周围的沉积颗粒填补气泡留下的空间又导致颗粒分离^[28]。对于两种颗粒体系,床层上部均出现了浮升组分的富集。这是由于相比于沉积颗粒,浮升颗粒单位质量所受到的气体曳力大,导致其向床层表面移动。在本研究中,连续气流的速度约为沉积颗粒组分最小流化

连续气流量的 83%~93%),同样可以实现颗粒的较好混合。Li 等^[25]对均一颗粒的脉动流化模拟研究表明,在中等脉动频率(4 Hz)下,脉动气流使得床层发生较剧烈的鼓泡,床层压力和孔隙率变化较大且流型变得更复杂,这些因素都有利于促进颗粒混合。此外,Li 等^[25]和 Hadi 等^[31]的模拟研究均发现,与连续气流相比脉动气流对气泡尺寸的增長有影响。对于非等密度颗粒体系,脉动气流多次实验的沉积颗粒组分质量分布沿床层高度分布有一定的偏差,一方面说明脉动气流对颗粒混合有不确定性,另一方面也说明在实际操作中颗粒体系会瞬间混合良好或出现分离。而对于连续性气流,由于无另一股气流的脉动干扰,其颗粒混合/分离程度较稳定。这里需说明的是,切断气源后,床层中残余气流和颗粒的下落对实验所得沉积颗粒组分浓度分布也有一定影响,这会导致颗粒的分离^[10]。本研究基于流化床连续操作的考虑,选择较高流量的连续气流,如果适当降低连续流量,同时提高脉动流量,则可进一步

提高不同种类颗粒的混合程度。Mao 等^[32]在 T 型管内颗粒混合的模拟研究证实,与连续气流相比,脉动气流在低雷诺数条件下能显著地提高颗粒的混合程度。

3 结 论

本文通过实验研究相同密度不同粒径以及不同密度相同粒径的两种颗粒体系在脉动辅助流化床中的混合效果,并与普通流化床相比较。得到如下结论:

(1) 对于等密度双组分颗粒体系,采用脉动辅

助流化颗粒混合效果略优于普通流化。床层顶部存在浮升组分的富集,但除此之外床层整体混合较均匀。脉宽比对混合效果的影响不明显。

(2) 对于非等密度双组分颗粒体系,脉动辅助流化条件下的颗粒混合指数略低于普通流化。床层顶部和底部均发生颗粒分离。脉动气流对颗粒混合影响有不确定性,在实际操作中颗粒体系会瞬时混合良好或出现分离。

(3) 在本实验条件下,虽然脉动辅助流化的平均气速低于普通流化床最大操作气速,但仍能够达到相近的混合指数。

参 考 文 献

1 范晓旭,贤建伟,初雷哲,等. 生物质鼓泡流化床和循环流化床气化对比试验[J]. 农业机械学报,2011,42(4):96-99.
Fan Xiaoxu,Xian Jianwei,Chu Leizhe, et al. Comparison of bubbling fluidized bed and circulating fluidized bed in gasification of biomass[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):96-99. (in Chinese)

2 潘贤齐,苏德仁,周肇秋,等. 生物质流化床气化中试实验研究[J]. 农业机械学报,2014,45(10):175-179.
Pan Xianqi, Su Deren, Zhou Zhaoqiu, et al. Experimental investigation of biomass gasification in a pilot-scale fluidized bed gasifier[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):175-179. (in Chinese)

3 刘相东,杨德勇. 生物物料颗粒空隙率对其干燥质量的影响[J]. 农业机械学报,1999,30(6):56-63.
Liu Xiangdong,Yang Deyong. Effect of bio-material structure on quality retention during thermal drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1999,30(6):56-63. (in Chinese)

4 肖志锋,吴南星,刘相东. 过热蒸汽流化床干燥流动特性实验[J]. 农业机械学报, 2013,44(7):183-186.
Xiao Zhifeng, Wu Nanxing, Liu Xiangdong. Experiment on flow characteristics of fluidized bed drying with superheated steam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 183-186. (in Chinese)

5 李志合,易维明,高巧春,等. 固体热载体加热生物质的闪速热解特性[J]. 农业机械学报,2012,43(8):116-120.
Li Zhihe,Yi Weiming,Gao Qiaochun,et al. Flash devolatilization characteristics of biomass particles heated by solid heat carriers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):116-120. (in Chinese)

6 伍昌鸿,马晓茜,董志强,等. 循环流化床中塑料粉与稻壳共燃生成 NO 的研究[J]. 农业机械学报,2007,38(1):92-95.
Wu Changhong, Ma Xiaoqian, Dong Zhiqiang, et al. Study on NO emissions from co-combustion of plastic powder and rice hull in CFB[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(1):92-95. (in Chinese)

7 高宁博,李爱民,曲毅. 生物质气化及其影响因素研究进展[J]. 化工进展,2010,29(增刊1):52-57.

8 Ye Jingsheng, Luo Qiaojun, Li Xiaolan, et al. Sorption drying of soybean seeds with silica gel in a fluidized bed dryer[J]. International Journal of Food Engineering,2008,4(6):DOI:10.2202/1556-3758.1484.

9 Rowe P N,Nienow A W,Agbim A J. The mechanism by which particles segregate in gas fluidized beds: binary system of near-spherical particles[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers,1972,50(3):310-323.

10 Cooper S,Coronella C J. CFD simulations of particle mixing in a binary fluidized bed[J]. Powder Technology,2005,151(1-3):27-36.

11 Lu H L,Zhao Y H, Ding J M, et al. Investigation of mixing/segregation of mixture particles in gas-solid fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science,2007,62(1-2):301-317.

12 李斌,宋小龙. 循环流化床内颗粒混合特性的数值模拟[J]. 动力工程学报,2013,33(10):759-764.
Li Bin, Song Xiaolong. Numerical simulation on mixing characteristics of particles in circulating fluidized bed[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2013,33(10):759-764. (in Chinese)

13 江茂强,赵永志,郑津洋. 非等密度颗粒气固流化床的微观尺度模拟与分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(9):1703-1708.
Jiang Maoqiang,Zhao Yongzhi,Zheng Jinyang. Micro-scale simulation and analysis of gas-solid fluidized bed with multi-density distribution of particles[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2009,43(9):1703-1708. (in Chinese)

14 Nienow A W, Naimer N S, Chiba T. Study of segregation/mixing in fluidised beds of different size particles [J]. Chemical Engineering Communications,1987,62(1):53-56.

15 Toyohara H, Kawamura Y. Fluidization of a tapered fluidized-bed of a binary particle-mixture [J]. International Chemical Engineering,1992,32(1):164-171.

16 Tian F G,Zhang M C,Fan H J,et al. Numerical study on microscopic mixing characteristics in fluidized beds via DEM[J]. Fuel Processing Technology,2007,88(2):187-198.

17 Yang S C. Density effect on mixing and segregation processes in a vibrated binary granular mixture[J]. Powder Technology,2006,164(2):65-74.

- 18 Ren B, Shao Y J, Zhang W Q, et al. Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method[J]. *Powder Technology*, 2012, 222: 85–94.
- 19 张勇, 金保升, 钟文琪, 等. 喷动流化床颗粒混合特性的三维直接数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(2): 28–33.
Zhang Yong, Jin Baosheng, Zhong Wenqi, et al. Three-dimensional DEM simulation on particle mixing characteristics of spout-fluid bed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(2): 28–33. (in Chinese)
- 20 Kobayashi K, Ramaswami D, Brazelton W T. Heat transfer from an internal surface to a pulsed bed[J]. *AIChE Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1970, 66(105): 58–67.
- 21 Wong H W, Baird M H I. Fluidisation in a pulsed gas flow[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1971, 2: 104–113.
- 22 Nitz M, Taranto O P. Drying of a porous material in a pulsed fluid bed dryer: the influences of temperature, frequency of pulsation, and air flow rate[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(2): 212–219.
- 23 Li Z Y, Kobayashi N, Deguchi S, et al. Investigation on drying kinetics in a pulsed fluidized bed[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2004, 37(9): 1179–1182.
- 24 Godoi F C, Boin E A S F, Pereira N R, et al. Fluid dynamics and drying of cohesive particles of a biodegradable polymer (poly-hydroxybutyrate) in a rotating pulsed fluidized bed[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(11): 1297–1306.
- 25 Li Z Y, Su W G, Wu Z H, et al. Investigation of flow behaviors and bubble characteristics of a pulse fluidized bed via CFD modeling[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(1): 78–93.
- 26 Geldart D. Types of gas fluidization[J]. *Powder Technology*, 1973, 7(5): 285–292.
- 27 Ashton M D, Valentin F H H. The mixing of powders and particles in industrial mixers[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1966, 44: 166–188.
- 28 Nienow A W, Rowe P N, Chiba T. Mixing and segregation of a small proportion of large particles in gas fluidized beds of considerably smaller ones[J]. *AIChE Symposium Series*, 1978, 74(176): 45–53.
- 29 Kwant G, Prins W, van Swaaij W P M. Particle mixing and separation in a binary solids floating fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1995, 82(3): 279–291.
- 30 Tanimoto H, Chiba S, Chiba T, et al. Jetsam descent induced by a single bubble passage in three-dimensional gas-fluidized beds[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1981, 14(4): 273–276.
- 31 Hadi B, van Ommen J R, Coppens M O. Enhanced particle mixing in pulsed fluidized beds and the effect of internals[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2012, 51: 1713–1720.
- 32 Mao W B, Xu J L. Micromixing enhanced by pulsating flows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21–22): 5258–5261.

(上接第 185 页)

- 21 Wan S G, Sun L, Sun J, et al. Biogas production and microbial community change during the co-digestion of food waste with Chinese silver grass in a single-stage anaerobic reactor[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2013, 18(5): 1022–1030.
- 22 Leitão R C, Haandel A C V, Zeeman G, et al. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(9): 1105–1118.
- 23 Russo M A, O'Sullivan C, Rounsefell B, et al. The anaerobic degradability of thermoplastic starch: polyvinyl alcohol blends: potential biodegradable food packaging materials[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(5): 1705–1710.
- 24 徐金兰, 黄廷林, 王志盈. 聚乙烯醇(PVA)厌氧生物降解特性试验研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(10): 30–34.
Xu Jinlan, Huang Tinglin, Wang Zhiying. Pilot study on characteristics of anaerobic biodegradation of PVA[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(10): 30–34. (in Chinese)
- 25 Chiellini E, Corti A, Solaro R. Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based blown films under different environmental conditions[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1999, 64(2): 305–312.
- 26 Pseja J, Charvatova H, Hruzik P, et al. Anaerobic biodegradation of blends based on polyvinyl alcohol[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2006, 14(2): 185–190.
- 27 Zou W, Yu L, Liu X X, et al. Effects of amylose/amylopectin ratio on starch-based superabsorbent polymers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1583–1588.
- 28 Véchambre C, Buléon A, Chaunier L, et al. Macromolecular orientation in glassy starch materials that exhibit shape memory behavior[J]. *Macromolecules*, 2010, 43(23): 9854–9858.
- 29 Huang Z, Lu J, Li X, et al. Effect of mechanical activation on physico-chemical properties and structure of cassava starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 68(1): 128–135.
- 30 Zhang Z, Chen P R, Du X F, et al. Effects of amylose content on property and microstructure of starch-graft-sodium acrylate copolymers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 102: 453–459.