

# 非均匀和均匀布风流化床中 颗粒的运动分析

田文栋 魏小林 黎 军 吴东垠 盛宏至

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要** 通过实验得到了非均匀布风和均匀布风流化床内示踪颗粒在床层内的运动轨迹, 在此基础上, 分析了流化床中示踪颗粒的混合和扩散特性。结果表明配风方式对于示踪颗粒的扩散有很大影响, 内旋流流化床具有较好的横向和纵向扩散特性, 有利于使流化床内横向不均匀的状况得到改善。

**关键词** 非均匀布风; 内旋流; 流化床; 扩散

**中图分类号:** O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2001)Suppl.-0161-04

## AN INVESTIGATION OF PARTICLE MOVEMENT IN FLUIDIZED BED WITH UNEVEN AND EVEN ARRANGEMENTS OF DISTRIBUTION AIR

TIAN Wen-Dong WEI Xiao-Lin LI Jun WU Dong-Yin SHENG Hong-Zhi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The trajectories of trace particles in the fluidized bed with uneven or even arrangements of distribution air were obtained experimentally in this paper. The characteristics of diffusion of trace particles in fluidized bed were analyzed based on the experimental results. The arrangement patterns of air distribution had strong influences upon the diffusion of trace particles. The horizontal transportation processes of particles in the bed were improved by uneven arrangement of distribution air in internal circulating fluidized bed.

**Key words** uneven distribution air; internal circulating flow; fluidized bed; diffusion

## 1 前 言

气固流化床反应器在环境、能源、化工、石油等工业领域得到了广泛应用, 流化床反应器与固定床相比具有较好的混合特性, 在上述应用中大多都利用了这一特点。在固定床中, 床料轴向混合相对较小。而在流化床中, 由于其中的颗粒是流动的, 尤其对于气固流化床, 轴向混合非常突出, 正是颗粒及气泡的运动对气相-固相及固相-固相之间的传质传热有较大的影响, 从而可以改善系统混合效率<sup>[1]</sup>。在均匀布风流化床中, 由于气流和颗粒的运动方向与流化床的轴向大致相同, 导致轴向混合程度明显

高于径向<sup>[2,3]</sup>, 在气流运动方向上, 床内颗粒均匀性良好, 但在径向上却存在一定的差异, 造成了流化床内的不均匀性。

在小型流化床内, 通常可以看到在床中间上升在床周边下降的颗粒循环现象<sup>[1,4]</sup>, 即使均匀布风, 在布风设备上产生的气泡在上升过程中将发生合并等过程, 使气泡分布不均匀, 上升速度也存在差异: 中心速度高, 周边速度低, 固体颗粒在气泡的携带下产生从中部向上运动、沿床侧壁向下运动的内部旋流<sup>[5,6]</sup>。在大型流化床的内部, 即使布风均匀, 流动也是非均匀, 不仅在壁面处出现颗粒内部旋流, 而且在床内部也存在内部旋流<sup>[7,8]</sup>。内部旋流有助

收稿日期: 2001-02-26; 修订日期: 2001-05-15

基金项目: 国家重点基础研究发展项目 (No.G1999022101); 国家自然科学基金资助项目 (No.59776023); 中国科学院重点基金资助项目 (No.KY95T-03-02)

作者简介: 田文栋 (1969-), 男, 河北辛集人, 助理研究员, 硕士, 主要从事燃烧和流化床的研究。

于提高流化床径向的混合情况，但由于内部旋流的尺度一般在轴向大于径向，其径向混合程度仍大大低于轴向混合程度。

流化床内部气泡的速度差和压力差，可以造成流化床的内部旋流，提高混合强度。在浅层大型流化床中曾采用非均匀布风形成湾流，提高颗粒的混合扩散状况。同样，在一般气固流化床中人为的将流化气体分段非均匀布置，造成床内较大范围的速度差，可以形成大尺度内部旋流运动，该流动可以在很大范围内甚至整个床层内显著增强流化床横向扩散和输运，使得床内物质分布更加均匀，这种流化床被称为内旋流流化床<sup>[9,10]</sup>。目前，对于鼓泡型流化床内的颗粒横向扩散特性已有许多研究成果，但对于非均匀布风流化床的颗粒运动特性研究较少。我们曾定性验证了非均匀布风的内旋流流化床横向扩散特性明显高于均匀布风的鼓泡床<sup>[11,12]</sup>。

本文通过实验对比了示踪颗粒在均匀布风的鼓泡床和非均匀布风的内旋流流化床中的运动特性。

## 2 实验装置简介

如图 1 所示，实验装置由流化床冷态试验台、风量控制调节和图像的采集处理等几部分组成。

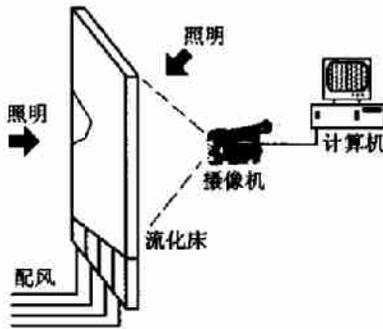


图 1 实验装置示意图

流化床试验台主体部分在布风板以上的尺寸为 600 mm(长)×80 mm(宽)×1200 mm(高)，布风板以下沿长度方向划分了四个风室分别控制配风量，可以选用非均匀布风或均匀布风。宽度方向为均匀布风，其尺寸与长度方向相比较小，因此该内旋流流化床为近似的二维床。实验装置的前后面为普通玻璃，便于光线透过和摄像机拍摄。布风板采用密孔板，倾斜角度为 12°，布置在流化床底部，布风板开孔率为 5%，开孔半径 2.5 mm。床料和示踪颗粒颜色不同，均选用平均粒径为 3.0 mm 的重质塑料颗粒，颗粒形状不规则，表面粗糙。流化床静止床高为 300 mm 左右，流化时高度约为 500 mm 左右。

该颗粒流化时为聚式流化态。

采用普通工业 CCD 摄像机 (600 线) 记录颗粒的运动过程，拍摄的图像直接进入计算机 (图像分辨率为 768 × 576) 进行分析处理。

通过布风速度的不同分别模拟了均匀布风的鼓泡床和非均匀布风的内旋流流化床内颗粒的运动规律。均匀布风时，四个风室上部的风速相同，均为  $4.0u_{mf}$  ( $u_{mf}$  为床料颗粒初始流化速度)。非均匀布风时，布风板较低位置处的两个风室上部的风速较高，为  $6.0u_{mf}$ ，其上颗粒剧烈向上运动，为流动区，另两个风室上部的速度较低，为  $2.0u_{mf}$ ，其上为颗粒缓慢向下移动的区域，为移动区。这样形成床料颗粒的大尺度内旋流。

实验时首先将流化床启动，形成床料颗粒的内旋流，再一次性将示踪颗粒快速放置流化床边缘，同时开始计时，并利用 CCD 摄像机记录示踪颗粒和床料颗粒的混合运动过程。

## 3 结果分析及讨论

为了对比，图 2 给出了在散式流化态 (颗粒为轻质塑料珠，体积小，表面光滑，密度低，在流化时床内几乎不存在大的气泡) 状况下，示踪颗粒在内旋流流化床内与床料颗粒的混合扩散过程。实验中采用的流速稍低，流动区流速为  $5.4u_{mf}$ ，移动区流速为  $1.8u_{mf}$ 。图 2 各幅图的右下角为布风板顶端，图右侧为移动区，左侧为流动区。

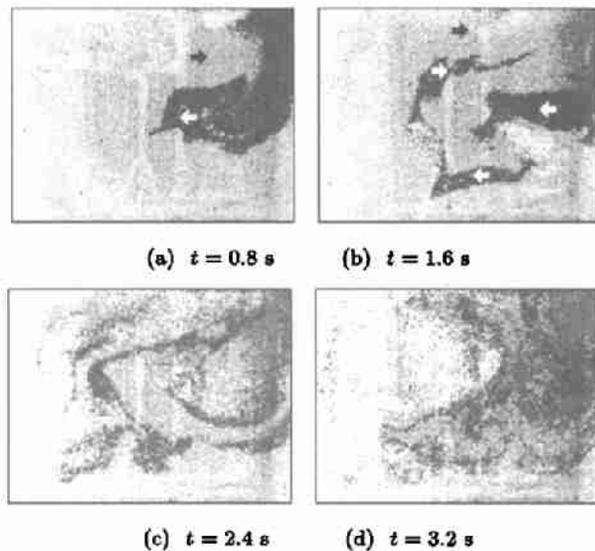


图 2 非均匀布风流化床 (散式流态化) 颗粒扩散过程

示踪颗粒 (黑色) 进入床层后，迅速向下并向流动区扩散，床料颗粒 (白色) 在流化床上层从流动区向移动区方向横向运动，并将示踪颗粒流压缩分割，

同时示踪颗粒流在流化床底层从移动区向流动区方向横向运动,如图 2(a)所示。随着时间的进一步推移,在流化床上部从流动区向移动区运动的床料颗粒流在移动区向下运动,继续推动示踪颗粒向下并向流动区方向移动,到达流动区的示踪颗粒被流动区床料颗粒携带向上运动,并再次被带回移动区,在这一过程中,示踪颗粒流被床料颗粒流压扁、拉长、卷折,并被分割成数段,如图 2(b)所示。示踪颗粒在床料颗粒的作用下,进行由移动区上部到下部,再到流动区下部,然后又从流动区上部返回到移动区上部的内旋流,在一个循环过程中,床料颗粒和示踪颗粒进行一次掺混,在图 2(c)中可以清晰的看到床中存在数层被床料颗粒分隔开的示踪颗粒。示踪颗粒和床料颗粒之间也在不断扩散混合。随着扩散的进行,示踪颗粒流和床料颗粒流之间的界限逐步模糊,此时床内已经不存在大面积的示踪颗粒。随着示踪颗粒层与床料颗粒不断卷起,层数变多,层厚变薄并逐步消失,如图 2(d)所示。最后,示踪颗粒和床料完全混合,达到一种比较均匀的状态。

图 3 给出了在聚式流化态(颗粒密度高,床内存在大量各类气泡)状况下,示踪颗粒在非均匀布风内旋流流化床中与床料颗粒的混合扩散过程。在图 3 各幅图的右下角黑色部分为倾斜的布风板顶端,左上角黑色部分为内旋流流化床中促使颗粒循环运动的偏折板,图右侧为移动区,左侧为流动区。

由于移动区流速较低,不存在大体积气泡,小体积气泡产生后迅速向流动区倾斜运动,和流动区的气泡合并<sup>[13]</sup>。因此在移动区,示踪颗粒床料颗粒的运动扩散与散式流态化时类似,示踪颗粒向下向右运动,逐步汇入流动区,如图 3(a),(b)所示,到达流动区之后,示踪颗粒在流动区迅速向上运动的床料颗粒带动下向上偏转,如图 3(c)所示。在聚式流化态中存在大的气泡,如图 3(d)中黑色箭头所指,此气泡在上升过程中,与在移动区稳定运动的示踪颗粒流相遇,并造成较大的冲击,尤其是气泡到达流化床顶部时,其体积增大,将其能量传递给周围的颗粒,使颗粒向四周运动,迅速完成床料颗粒和示踪颗粒之间的混合,图 3(e)上部黑色箭头所指区域为气泡、床料颗粒和示踪颗粒的混合物,在此区域内,两种颗粒得到了较好混合,图 3(e)下部黑色箭头处为新生成的气泡,该气泡又将后续的示踪颗粒流与床料颗粒进行了混合,如图 3(f)所示。到达床顶部的颗粒又被输送到移动区上方,此时示踪颗粒在床料颗粒中基本分散均匀,如图 3(g)所示。示踪颗粒和床料颗粒的混合体在移动区再次下降,开始了新一轮循环,如图 3(h)所示。最终达到较好

的混合状态。

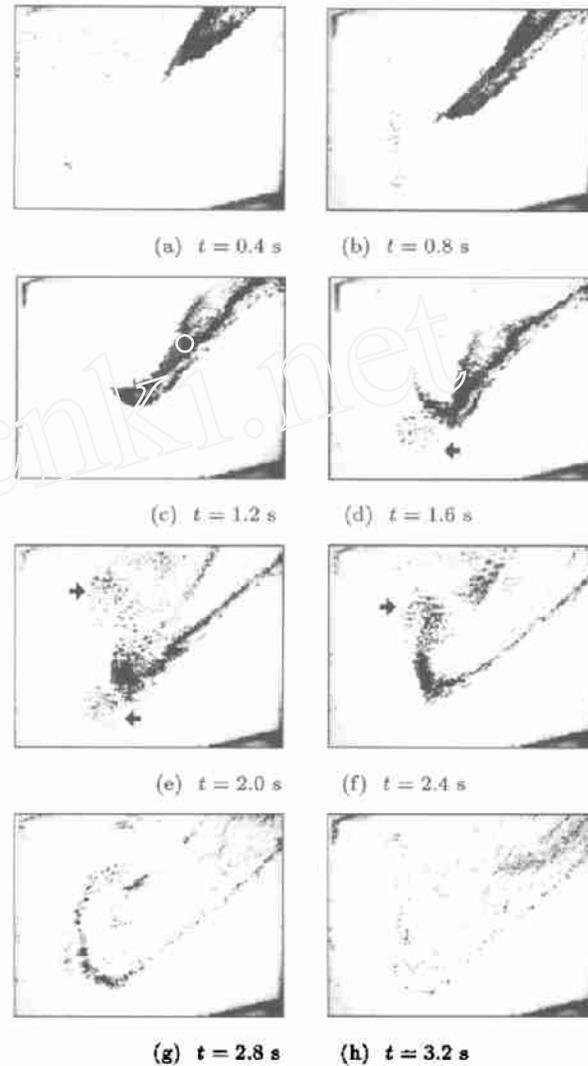


图 3 非均匀布风内旋流流化床(聚式流态)中示踪颗粒的扩散过程

对比图 2 和图 3 可以看出,聚式流态化和散式流态化状况下,示踪颗粒的扩散过程以及分散动力略有不同:散式流态中主要依靠床料颗粒对示踪颗粒流的卷折、拉伸,实现对示踪颗粒流的破碎,最终达到混合的目的。聚式流态中气泡对示踪颗粒流的破碎起到一定的作用,加速了混合进程,但由于颗粒之间的粘滞力较大,颗粒运动速度较慢,混合所用时间相当,而且示踪颗粒较难进入移动区底部。

图 4 给出了在聚式流化态状况下,示踪颗粒在均匀布风鼓泡床内与床料颗粒的混合扩散过程。

在鼓泡床中存在颗粒向下运动的区域,例如在流化床的壁面附近,该区域和周围颗粒向上运动的区域组成较小尺寸的内旋流。在图 4(a)上可以看到

开始进入床层的示踪颗粒流和床层内多个气泡。示踪颗粒进入床层之后,在下降区域顺着颗粒下降的趋势运动(如图4(b)所示),并向上升区域弯曲(如图4(c),(d)所示),进入上升区域的颗粒流在气泡和床料颗粒的共同作用下进行混合(如图4(e),(f),(g)所示),上升区域速度较快,且包含较多气泡,示踪颗粒和床料颗粒得到了较好的混合,但示踪颗粒的范围仅局限于该小尺度内旋流附近(如图4(h)所示)。但在下降区域,始终存在较大面积的示踪颗粒,该区域与白色的床料颗粒之间的界限明显,混合程度很低。

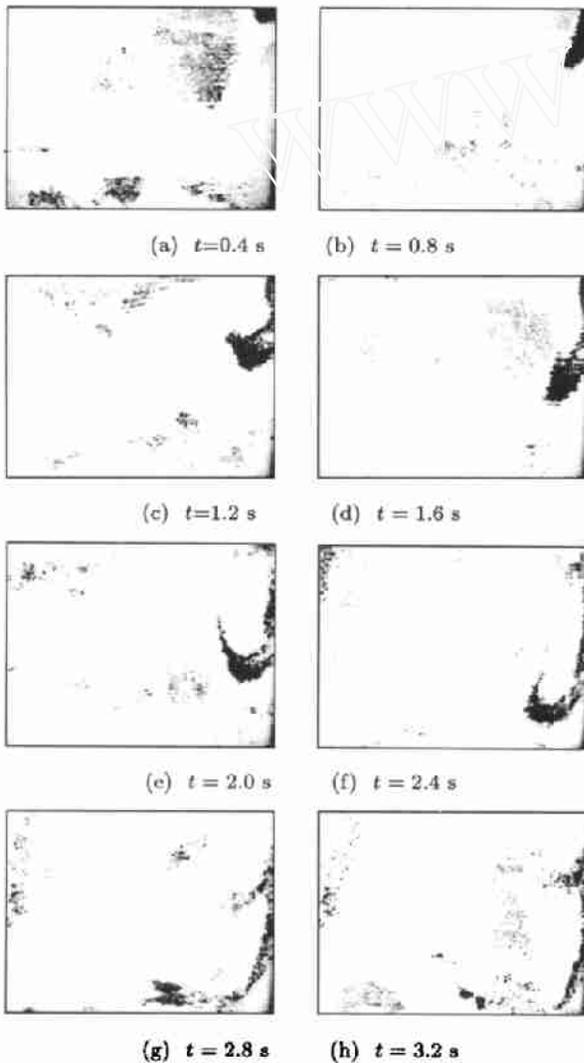


图4 均匀布风鼓泡床(聚式流态)中示踪颗粒的扩散过程

在相当的时间内,示踪颗粒在尺寸相同的鼓泡床和内旋流流化床中均完成了一次循环,但循环的径向尺寸存在差异,导致混合区域和混合程度存在较大差别。这种差别在大型流化床中将更加明显。

## 4 结 论

通过试验得到了非均匀和均匀布风流化床中示踪颗粒在床内的运动历程,在非均匀布风的作用下,示踪颗粒存在明显的横向运动,颗粒在不断的大尺度的横向纵向运动交替作用下,和床料颗粒迅速混合均匀。

## 参 考 文 献

- [1] J F 戴维森, D 哈里森. 流态化. 北京: 科学出版社, 1981. 219-312
- [2] Shi Y F, Fan L T. Lateral Mixing of Solids in Batch Gas-Solids Fluidized Beds. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1984, 23: 337-341
- [3] Lee G S, Kim S D, Baird M H I. Axial Mixing of Fine Particles in Fluidized Beds. *Chem. Eng. Sci.*, 1991, 47(1): 47-50
- [4] Harris B J, Davidson J F. A Cone-Annulus Deposition Model for Circulating Fluidized Bed Riser. *Circulating Fluidized Bed Technology II*, Basu P, Large J F ed, USA: Pergamon Press, 1988. 147-154
- [5] Morooka S. Behavior of Gas Bubble Size in a Gas-Fluidized Bed. *Int. Chem. Eng.*, 1972, 12(1): 168-174
- [6] 周亚明, 沈湘林. 气固流化床内颗粒的内循环特性的研究. *热能动力工程*, 2000, 15(1): 12-14
- [7] Walter M G. Fluidized-Bed Reactor Studies. *Chem. Eng. Pro.*, 1959, 55(12): 49-56
- [8] Lim K S. Mixing of Homogeneous Solids in Bubbling Fluidized Beds: Theoretical Modeling and Experimental Investigation Using Digital Image Analysis. *Chem. Eng. Sci.*, 1993, 48(12): 2251-2265
- [9] Rhodes M J. Modeling the Flow Structure of Upward Flowing Gas-Solid Suspensions. *Power Technology*, 1990, 60(1): 27-38
- [10] Ohshita T, Higo T, Kosugi S, et al. Formation of Internally Circulating Flow and Control of Overall Heat-Transfer Coefficient in a Fluidized-Bed Boiler. *Heat-Transfer Japanese Research*, 1994, 23(4): 349-363
- [11] 王柏鹤, 盛宏至, 戚隆溪等. 废弃物焚烧及流化床焚烧炉冷模实验研究. *工程热物 理 学 报*, 1994, 15(4): 453-456
- [12] 魏小林, 田文栋, 盛宏至. 流化床焚烧炉中颗粒扩散特性理论研究. *工程热物 理 学 报*, 1999, 20(5): 462-466
- [13] 田文栋, 魏小林, 孙满弟等. 内旋流流化床气泡运动规律. *华北电力大学学报*, 1999, 26(4): 23-27