

图像技术在非均匀布风流化床颗粒运动分析中的应用¹⁾

田文栋 魏小林 孙满弟 黎 军 吴东垠 盛宏至

(中国科学院力学研究所环境科学与技术中心, 北京 100080)

摘要 通过实验得到了非均匀布风流化床内示踪颗粒在床层内的运动历程, 以及床层内颗粒的浓度分布随时间的变化, 并归纳得到颗粒在非均匀布风的内旋流流化床中不同区域的扩散系数。内旋流流化床颗粒的纵向扩散系数和横向扩散系数大小相近, 横向扩散系数明显大于均匀布风的鼓泡床的横向扩散系数, 具有较好的横向扩散特性, 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, 图像分析

1 前言

目前, 流化床作为一种反应器, 在化工、能源、石油、冶金等工业领域得到了广泛应用。在流态化技术中, 床内各种物质的均匀混合是流化床反应器正常工作的一个重要问题, 若原料在床内得不到充分混合, 则会降低系统的使用效率, 严重时将导致事故发生。一般的流化床具有较好的纵向均匀性, 即在流化介质运动方向上, 床内物质均匀性良好; 而在流化床的横向上, 则存在较大的差异。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^[1~4], 但对于非均匀布风流化床的颗粒运动特性研究较少。

流化床中, 受壁面影响流化介质速度降低, 在壁面附近出现小范围的内旋流^[5,6], 该内旋流是由于在流化床横向存在速度梯度而形成的。同样, 人为地将流化介质分段非均匀布置, 造成床内较大范围的速度梯度, 可以形成大尺度内旋流运动, 该流动显著增强流化床的横向扩散特性, 使得床内物质的分布更加均匀。这种流化床被称为内旋流流化床^[7,8]。通过实验^[9]和理论分析^[10,11]已经定性验证了内旋流流化床具有很好的横向扩散能力。本文以实验为基础得到了示踪颗粒在床内的浓度分布随时间的变化, 并求得了颗粒的内旋流流化床不同区域的扩散系数。

2 实验过程及结果

图 1 为实验系统简图, 主要由流化床试验台 (包括供风、风量控制等) 和图像采集处理两部分。

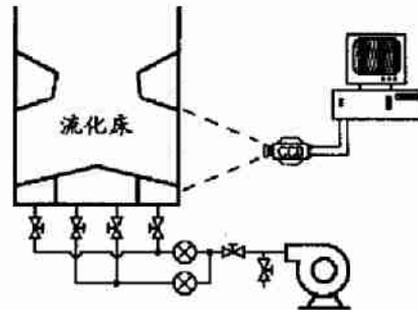


图 1 实验装置简图

内旋流床宽度方向为非均匀布风, 纵深方向为均匀布风, 因此内旋流床为近似的二维床。试验台尺寸为 80 mm(纵深)×600 mm(横向)×1200 mm(纵向), 与横向尺寸比, 纵深方向尺寸较小; 实验装置的正面安装了普通玻璃作为窗口, 便于摄像机拍摄图像; 采用密孔板布风方式, 开孔率为 5%, 开孔半径 2.5 mm; 选取平均粒径为 3.0 mm 的不同颜色颗粒分别作为床料颗粒和示踪颗粒, 床层高度为 300 mm 左右; 流化床两侧风室布风速度较高, 为 $5.4u_{mf}$ (u_{mf} 为初始流化速度), 其上为颗粒剧烈运动的流动区, 中心风室布风速度较低, 为 $1.8u_{mf}$, 其上为颗粒缓慢移动的移动区。图 2 给出了内旋流流化床浓相床区颗粒运动的图像。

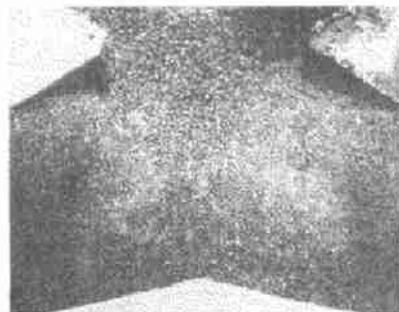


图 2 非均匀布风流化床流场照片

图像采集处理部分包括: CCD 摄像机 (分辨率为 768×576)、微型计算机和图像采集处理软件。

实验装置运行时产生两个对称的内旋流, CCD

1) 国家自然科学基金项目 (59776023) 和中国科学院重点项目 (KY95T-03-02) 资助。

2000-02-27 收到第 1 稿, 2000-06-30 收到修改稿。

摄像机的视场仅包括单侧内旋流。实验时首先将流化床启动,然后一次性将示踪颗粒快速放置到移动区上方,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过程(如图 3 所示)。图中灰色部分为床料颗粒,黑色部分为示踪颗粒,每一幅图的左半部分下方为高速风,右半部分下方为低速风,右侧边界为流化床中心对称线,右下点为倾斜布风板顶点,上边界近似为流化床浓相床区顶端(反射板下边缘)。

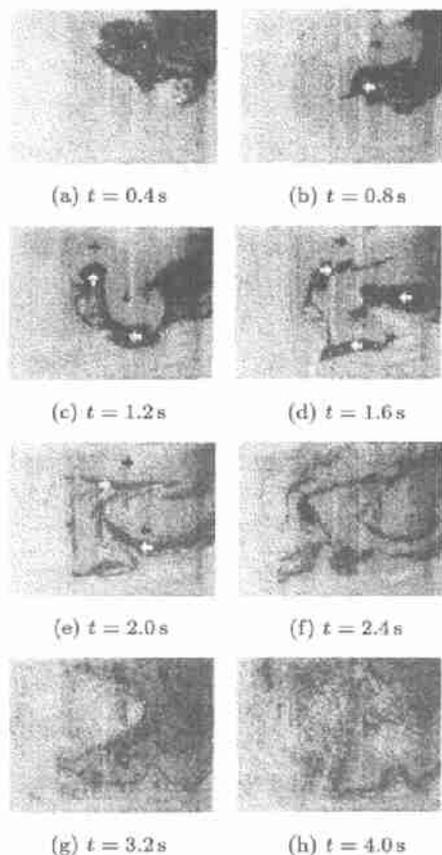


图 3 非均匀布风流化床内示踪颗粒的扩散过程

3 结果分析及讨论

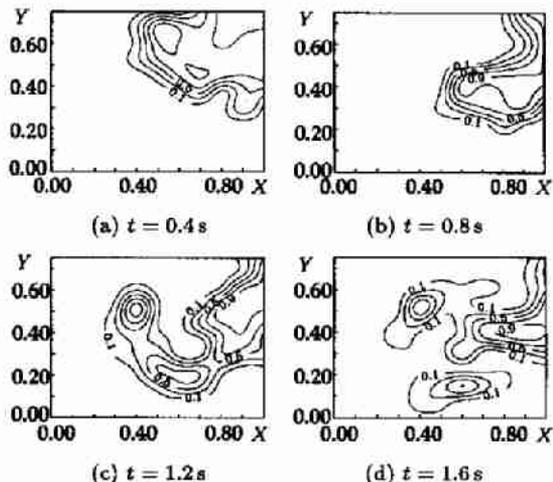
从图 3 可以看出:示踪颗粒进入床层后,迅速向下并向流动区扩散,床料颗粒在流化床上层从流动区向移动区方向横向运动(图 3(b)中黑色箭头所示),将示踪颗粒流压缩分割,同时示踪颗粒流在流化床底层从移动区向流动区方向横向运动(图 3(b)中白色箭头所示);随着时间推进,在后续床料颗粒的推动下,横向运动的床料颗粒流在移动区发生转折,向下运动(图 3(c)中黑色箭头所示),回旋流动的床料颗粒流将示踪颗粒流分割开来,并且推动示踪颗粒流从移动区向流动区运动,到达流动区的示踪颗粒又被携带向上卷折

(图 3(c)白色箭头所示),此时处于前端的示踪颗粒与床料颗粒开始混合;被床料颗粒切分的示踪颗粒流继续在床层底部由移动区横向向流动区运动,在床层上部由流动区向移动区运动(图 3(d)白色箭头所示),同时床料颗粒继续在床层上部由流动区向移动区运动,并与示踪颗粒充分混合;当前端的示踪颗粒从移动区到达流动区,并从流动区折返至移动区后,床内已经不存在大面积的示踪颗粒,示踪颗粒与床料颗粒已经互相渗透分为数层,层和层之间的界限开始模糊,这些层依然遵从在床层底部从移动区向流动区运动、在床层上部从流动区向移动区运动的规律,同时层与层之间依然在不断扩散混合;随着回旋流动的进行,示踪颗粒层与床料颗粒不断卷起,层数越来越多,层的厚度越来越薄(图 3(f)所示);随着时间的继续,层逐步消失(图 3(g)所示);最后,示踪颗粒完全弥散到床料颗粒中,达到一种比较均匀的状态(图 3(h)所示)。

3.1 示踪颗粒浓度分布

将图 3 中每一幅图像划分为 24×18 个网格,每个网格包含 32×32 个像素点,利用程序数出每个网格内示踪颗粒数目及总粒子数,两者之比即为该网格内示踪颗粒的浓度。图 4 给出了视场内示踪颗粒浓度分布随时间的变化。图中纵横坐标分别为视场的无量纲宽度和高度,流化床为对称结构,以流化床的半宽度为基准进行无量纲化;等值线为示踪颗粒的浓度分布,等值线之间的间隔为 0.2,浓度范围为 0.0~1.0。

从图 4 可以看出,床料颗粒的内旋流运动产生的涡旋流动,不断将示踪颗粒卷起,使示踪颗粒区域变长变窄,产生破碎,最终达到均匀混合的目的。在混合的初期,存在大面积的示踪颗粒高浓度区,随着时间的推移,高浓度区被分割变小,最后消失。



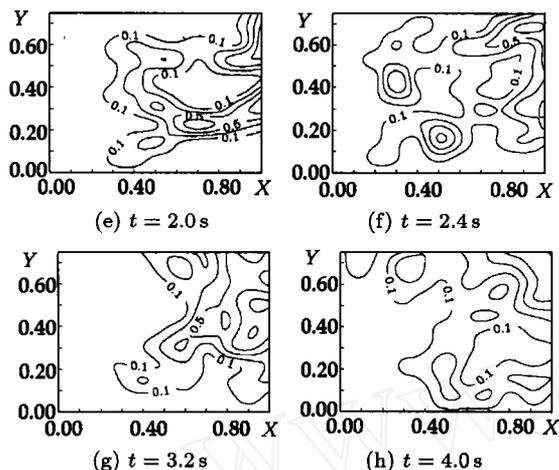


图 4 非均匀布风流化床内示踪颗粒浓度分布随时间的变化

3.2 示踪颗粒扩散系数

内旋流流化床纵深方向为均匀布风，且示踪颗粒

初始浓度均匀，因此有 $\partial/\partial z = 0$ ，则颗粒在流化床中扩散的控制方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{sr} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{sa} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中： C 为示踪颗粒浓度，示踪颗粒与总粒子数之比，无量纲； t 为时间， s ； D_{sr} 为示踪颗粒横向扩散系数， m^2/s ； D_{sa} 为示踪颗粒纵向扩散系数， m^2/s ； u, v 为横向、纵向速度， m/s ； x, y 为横向、纵向坐标， m 。

将示踪颗粒的浓度分布随时间的变化代入到方程 (1)，归纳得到了内旋流流化床的扩散系数，表 1 给出了内旋流流化床中典型区域的示踪颗粒扩散系数的数值。其中流动区流化速度 (u) 为 $5.4u_{mf}$ ，移动区流化速度为 $1.8u_{mf}$ 。

表 1 内旋流流化床中示踪颗粒的扩散系数

| 扩散系数类型 | 流动区上部 | 流动区下部 | 移动区上部 | 移动区下部 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | $u = 5.4u_{mf}$ | $u = 5.4u_{mf}$ | $u = 1.8u_{mf}$ | $u = 1.8u_{mf}$ |
| 横向扩散系数 $D_{sr} (\times 10^{-4} m^2/s)$ | 14.3 | 25.1 | 13.7 | 22.9 |
| 纵向扩散系数 $D_{sa} (\times 10^{-4} m^2/s)$ | 31.8 | 30.8 | 11.3 | 13.7 |

内旋流流化床的布风存在速度差，流动区的床料颗粒被高速的流化介质携带向上运动，并通过气泡的破碎在床表面将颗粒抛洒到低流速区域，移动区的流化介质使得床料颗粒产生松动，并流向流动区补充床料颗粒被携带走之后留下的空缺，而流动区抛洒到移动区的颗粒则在移动区下降。这样形成了颗粒在流动区由下至上、在移动区由上至下、在床层上部由流动区至移动区、在床层底部由移动区至流动区的回旋流动。流动区和移动区的纵向扩散系数在同一区域不同位置的数值近似，而且和流化速度有关，流化速度越高，纵向扩散系数越大；在流化床的底层和上部，颗粒主要以横向运动为主，因此其横向扩散系数在底部或上层的数值近似，流化速度高的位置横向扩散系数稍高。

鼓泡型流化床为均匀布风流化床，除了壁面附近外不存在显著的内旋流。文献 [3,4] 中详细讨论了鼓泡型流化床中颗粒的横向和纵向扩散情况，并归纳得到了颗粒扩散系数的经验计算公式

$$\frac{D_{sr}}{(u - u_{mf})h_{mf}} = 0.46 \left[\frac{(u - u_{mf})d_p \rho_f}{\mu_f} \right]^{-0.21} \left[\frac{h_{mf}}{d_p} \right]^{0.24} \left[\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right]^{-0.43} \quad (2)$$

$$D_{sa} = 1.058 \left(\frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu_f^2} \right)^{-0.368} [g(u - u_{mf})]^{1/3} D_t^{3/4} \quad (3)$$

式中： D_{sr} 为颗粒横向扩散系数， m^2/s ； D_{sa} 为颗粒纵向扩散系数， m^2/s ； D_t 为流化床的当量直径， m ； u 为流化速度， m/s ； h 为流化床高度， m ； d_p 为颗粒直径， m ； ρ 为密度， kg/m^3 ； μ 为黏性系数， kg/ms ；下标 mf 为初始流化状态；下标 f 为流体参数；下标 s 为颗粒参数。

参照内旋流流化床的运行参数，选取鼓泡床的布风速度分别等于内旋流流化床流动区流速、移动区流速和平均流速，由式 (2)，式 (3) 求得鼓泡床中扩散系数，结果见表 2。

表 2 鼓泡型流化床中示踪颗粒的扩散系数

| 扩散系数类型 | $u = 5.4u_{mf}$ | $u = 3.6u_{mf}$ | $u = 1.8u_{mf}$ |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 横向扩散系数 | 8.7 | 5.9 | 2.4 |
| $D_{sr} (\times 10^{-4} m^2/s)$ | | | |
| 纵向扩散系数 | 28.5 | 23.9 | 16.2 |
| $D_{sa} (\times 10^{-4} m^2/s)$ | | | |

在鼓泡型流化床中，颗粒的扩散系数和流化速度相关，随着流化速度的提高，横向和纵向的扩散系数均

逐步提高, 横向扩散系数的提高幅度大于纵向扩散系数的提高幅度。在鼓泡型流化床正常的运行范围内, 纵向扩散系数比横向扩散系数高数倍, 颗粒的扩散主要以纵向扩散为主。

内旋流流化床的纵向扩散系数和鼓泡型流化床数值大小相当, 而横向扩散系数比鼓泡床高数倍, 已经和纵向扩散系数相当。这主要是由于在内旋流流化床中存在显著的横向运动所造成。

4 结束语

通过试验得到了非均匀布风流化床中示踪颗粒在床内的运动历程, 计算出示踪颗粒浓度分布随时间的变化, 并进一步得到了在流化床不同位置颗粒的纵向和横向扩散系数, 与均匀布风的鼓泡床进行了对比。

非均匀布风造成了颗粒在床内显著的内旋流, 内旋流的存在加剧了颗粒横向的传送, 使得床内不同的物质能够比鼓泡床更迅速均匀的混合, 有利于提高流化床的效率。

参 考 文 献

- Berruti F, Scott D S, Rhodes E. Measuring and modelling lateral solid mixing in a three-dimensional batch gas-solid fluidized bed reactor. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1986, 64: 48~56
- Cho Y J, Kim S D. Radial solid mixing characteristics in shallow gas fluidized beds. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1994, 27(4): 541~544
- 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
- Lee G S, Kim S D, Baird M H I. Axial mixing of fine particles in fluidized beds. *The Chemical Engineering Journal*, 1991, 47: 47~50
- Harris B J, Davidson J F. A cone-annulus deposition model for circulating fluidized bed riser. In: Basu P, Large J F ed. *Circulating Fluidized Bed Technology II*. Pergamon Press, 1988. 147~154
- Rhodes M J. Modeling the flow structure of upward flowing gas-solid suspensions. *Power Technology*, 1990, 60: 27~38
- Nagato S, Kamisada M, Kosugi S, et al. Characteristics of the internally circulating fluidized bed boiler. In: *Proceeding of Fourth China-Japan Fluidization Science and Technology Symposium*. 1991. 56~65
- 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
- 王柏懿, 盛宏至, 戚隆溪, 田文栋. 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
- 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
- 魏小林, 田文栋, 黎军, 吴东垠, 盛宏至. 废弃物颗粒在流化床中的横向扩散特性. 见: *工程热物理学会传热传质学术会议论文集*, 苏州, 1999. VIII58~VIII63

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE TECHNOLOGY IN ANALYSIS OF PARTICLE MOVEMENT IN FLUIDIZED BED WITH UNEVEN AIR DISTRIBUTION

TIAN Wendong WEI Xiaolin SUN Mandi

LI Jun WU Dongyin SHENG Hongzhi

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

Abstract The movement course of the trace particle and its concentration distribution change with time in the bed with an uneven air distribution of fluidized bed have been obtained experimentally. And the particle diffusion coefficients of particles in different areas of this internal circulating fluidized bed are calculated. The results indicate that the lateral diffusion and axial diffusion have no apparent difference, and the value of the horizontal diffusion in the internal circulating fluidized bed is higher than that of the horizontal diffusion in the bubbling bed with an even air distribution. The concentration of particles is ameliorated by the characteristics of the horizontal diffusion of particles in the internal circulating fluidized bed.

Key words uneven distribution, internal circulating fluidized bed, diffusion, image analysis