

# 内旋流流化床颗粒运动的研究

(中国科学院力学研究所) 田文栋 魏小林 吴东垠 盛宏至

**摘 要:**内旋流流化床供风的速度较低,颗粒的流动属于稠密气固两相流,利用通常的测量手段研究内旋流流场,尤其是颗粒的速度场存在一定的困难。由于内旋流流化床是一种近似二维床,可以利用瞬态平面二维速度场测量技术(PIV和DPIV)测量流化床某一断面的颗粒流场。对实验室原有的 DPIV 系统进行了改进,并用该系统初步研究了内旋流流化床颗粒运动的速度场。结果较好地描述了颗粒的二维流动。

**关 键 词:**两相流;流化床;速度测量;粒子图象测速

中图分类号:TK224.1<sup>+</sup>1

文献标识码:A

## 1 引言

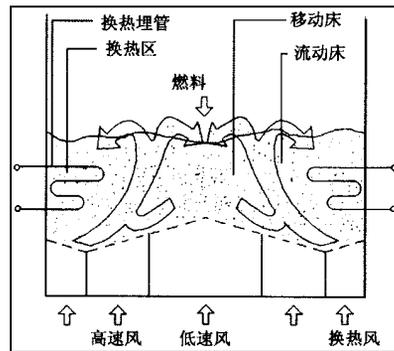
内旋流流化床(Internally Circulating Fluidized Bed - ICFB)在结构和布风上均不同于通常的鼓泡型和循环型流化床,它利用强非均匀的分段布风,在浓相床区形成流动床和移动床组成的复合床<sup>[1,2]</sup>,使得床料颗粒在流化床的浓相床区形成大尺度的回旋流动——内旋流,该流动现象不仅强化了气相、床料颗粒相和燃料颗粒相之间的强烈相间相互作用,改善了燃料的扩散和燃烧特性,而且能有效地控制燃料燃烧过程中污染物的排放量,因此内旋流化床是一种适合于多种特种燃料燃烧的装置,尤其是能很好地适应城市生活废弃物之类燃料的焚烧要求。内旋流流化床改变了以往流化床内部床料颗粒的单一流动状态,利用复合床的结构,加剧了浓相床区内各相之间的相互作用。因此对床内气固相互作用的探索是研究内旋流流化床扩散、燃烧、传热与传质特性的基础。

两相流的试验研究可采用热膜流速仪、PDPA、LDV、磷光示踪、激光全息、射线穿透成相、粒子图象测速(Particle Image Velocimetry - PIV 和 Digital PIV)等方法进行。由于内旋流流化床内床料颗粒平均速度与鼓泡床相当,床料流化时的空隙率仅比堆积时大 20%~50%,属于稠密气固两相流,激光和普通光线均不能透射床层,难以布置光学测量仪器的光通路,热膜、PDPA、LDV、磷光示踪、激光全息等方法

也难于应用。但是由于内旋流流化床横截面为矩形,只沿床宽方向不均匀布风,因此在沿纵深方向能量和质量的传递明显小于横向,即内旋流流化床流场可视为近似的二维流场,可以利用 PIV 及 DPIV 技术测量二维模型剖面上的颗粒运动。

粒子图象测速<sup>[3,4]</sup>技术是 80 年代以来随计算机技术和图像处理技术的发展而逐步完善的一种速度测量技术。PIV 适用的流速范围宽;测量精度高;空间分辨率高;还可进行“实时”测量。PIV 技术已经在燃烧、湍流、边界层、复杂流动、剪切流动、多相流动等试验研究中得到了广泛的应用。

## 2 内旋流流化床实验装置



如图 1 所示,内旋流流化床采用强非均匀分段布风,浓相床区存在高低两个风速区域,低速风区处于临界流化状态附近( $1 u_{mf}$ ,  $u_{mf}$  为初始流化速度),高速风区风速介于鼓泡床和循环床之

间( $4 u_{mf} \sim 12 u_{mf}$ ),换热区则根据换热的需要,布风在很宽的范围内调节( $0 u_{mf} \sim 10 u_{mf}$ ),这样在燃烧区形成中间移动床和两侧流动床的复合床结构,使得床料颗粒在床内形成大尺度的内旋流流动。

考虑到换热区的流化与燃料的燃烧过程关系不大,设计的内旋流流化床冷态模型实验系统取消了换热区,只保留的流动床和移动床组成的浓相床区。模型的底部安装了中心高两侧低的倾斜角度为  $12^\circ$  的布风板,在流化床的侧壁安装了反射板,反射板下沿的倾角为  $30^\circ$ ;冷态模拟实验装置的几何尺寸为  $400 \text{ mm}(L) \times 150 \text{ mm}(W) \times 650 \text{ mm}(H)$ ,反射板安装高度为  $200 \text{ mm}$ ;床层的有效截面积为  $380 \text{ mm} \times$

收稿日期:1998-12-25

基金项目:中国科学院重点资助项目(KY95T-03-02);国家自然科学基金资助项目(59776023)

作者简介:田文栋(1969-),男,河北辛集人,中国科学院力学研究所助理研究员,从事垃圾的焚烧处理、流化床、燃烧、流体力学及燃烧的测量。

通讯处:100080 北京海淀区中关村路 15 号

130 mm, 静止床高为 130 mm; 装置的正面材料为玻璃, 便于摄像机记录床料颗粒的运动状态。经测量常温下床料的初始流化速度  $u_{mf} = 0.20 \text{ m/s}$ ; 内旋流流化床实验装置的风室分为三个部分: 两侧风室面积相等且等于中心风室面积的一半; 实验中采用分段非均匀布风: 两侧风室的风速超过  $6 u_{mf}$ , 中心风室的风速为  $1 u_{mf}$  左右。这样在内旋流流化床内形成右侧逆时针左侧顺时针旋转的两个大尺度床料的旋流。

### 3 内旋流流化床颗粒运动的图象测速系统

DPIV 技术采用 CCD 相机直接记录粒子图象的运动序列, 可以简化整个 PIV 测量系统的硬件构成, 免去了底片的湿法处理, 并且增加了图像的信息量, 方便了速度求解, 而且全数字化的数据流提高了处理的效率。

#### 3.1 DPIV 系统组成及特性

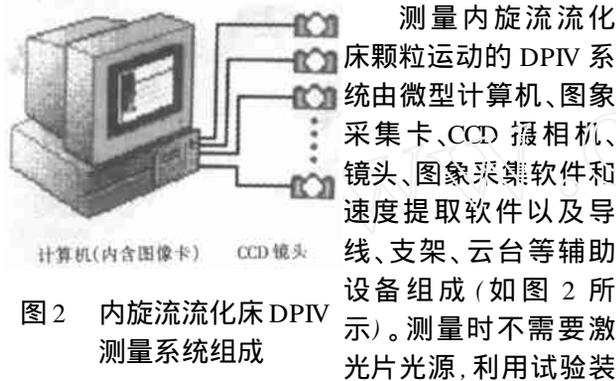


图 2 内旋流流化床 DPIV 测量系统组成

DPIV 测量的速度范围与 CCD 照相机的空间分辨率和时间分辨率有关, 分辨率越大, 可以测量的速度越高。本文所测量的速度较低, 设计的 DPIV 测速系统采用标准的工业用 CCD 摄像机作为录入设备即可满足测量的要求, 工业用 CCD 摄像机分辨率为  $768 \times 576$  像素, 隔行扫描模式, 两帧之间的时间间隔为  $0.04 \text{ s}$ 。本文的 DPIV 颗粒流场测量系统部分主要性能指标如下:

速度矢量数目:	48 ~ 6 417 根 (单个摄像机)
矢量提取时间:	< 0.02s (判读区域 $96 \times 96$ 像素, 软件实现)
测量范围:	< $3L/s(L$ 单个摄像头视场对角线长度)
系统误差:	< 3.0% (与计算区域的大小有关)

#### 3.2 DPIV 速度提取算法

假设图像函数  $\text{Img}_1(i, j)$  和  $\text{Img}_2(i, j)$  分别表示前后两幅具有一定时间间隔的图像中相对应的判读区域 (如  $96 \times 96$  像素或其它格式), 如果该求解区域内颗粒在  $x$  和  $y$  方向上相应时间间隔内的位移分别为  $x$  和  $y$ , 并假设粒子在判读区域内位移是均匀

一致的, 那么有:

$$\text{Img}_2(i, j) = \text{Img}_1(i - x, j - y) \tag{1}$$

速度求解就是根据图像函数  $\text{Img}_1(i, j)$  和  $\text{Img}_2(i, j)$  求  $x$  和  $y$  的过程。

通常的 PIV 和 DPIV 速度提取算法有: 相关算法 (自相关、互相关和块相关)<sup>[5]</sup>、傅立叶幅度谱分析 (两次傅立叶变换)<sup>[6]</sup>、一维压缩法<sup>[7]</sup> 等。相关和傅立叶分析的计算量比较大, 通常需要好的计算机和浮点运算加速器件, 即使如此, 进行速度提取的时间也相当可观; 本文采用傅立叶变换的相位谱分析对图像函数  $\text{Img}_1(i, j)$  和  $\text{Img}_2(i, j)$  进行速度提取。

对  $\text{Img}_1(i, j)$  进行傅立叶变换, 得:

$$F_1(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [\text{Img}_1(i, j)] \times \exp(-2j \frac{m \times i + n \times j}{N}) \tag{2}$$

上式中有  $m, n \in [0, N)$ 。

对  $\text{Img}_2(i, j)$  进行傅立叶变换, 将式 (1) 代入, 并利用傅立叶变换的位移定律得:

$$F_2(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [\text{Img}_1(i, j)] \times \exp(-2j \frac{m(i+x) + n(j+y)}{N}) \tag{3}$$

以  $R$  和  $\phi$  分别表示图像函数  $\text{Img}(i, j)$  经傅立叶变换之后的幅度谱和连续相位谱, 在粒子存在均匀一致位移的前提下, 有  $R_1(m, n) = R_2(m, n)$ , 也就是两幅图像的傅立叶变换的幅度谱是完全一致的, 因此可以利用  $R(m, n)$  判断颗粒图象的相关性; 而颗粒的位移信息则包含在相位谱中, 可以表示为  $\phi_2(m, n) - \phi_1(m, n)$  的函数。傅立叶变换得到的相位谱通常是缠绕相位 (在  $-\pi \sim \pi$  之间), 需要经过相位展开计算得到连续相位谱, 才能用于粒子位移的计算。

即使颗粒在判读区域内没有任何旋转运动, 并且完全符合粒子位移均匀性的假设, 无论采用相关算法 (自相关和互相关) 或傅立叶分析法 (幅度谱分析和相位谱分析), 所提取的速度矢量均存在一定的误差, 误差主要来源于部分颗粒在一段时间之后可能会离开或进入判读区域, 降低判读区域的相关性, 影响计算的准确性, 严重时不能得到真正的速度矢量。虽然可以利用次大值及其后的大值 (互相关算法) 和第三大值及其后的大值 (自相关算法和傅立叶幅度谱分析) 修正速度矢量, 但由此带来了许多人为的因素。本文利用数次迭代, 重新给出判读区域的位置, 来消除颗粒在判读区域的进出对速度矢量提取带来的误差。

## 4 试验结果及分析



图 3.a  $t = t_0$   
时的粒子  
图像

调整流化床的布风,使得床料颗粒形成大尺度的内旋流。将摄像机对准内旋流流化床的正面,以 0.04 s 的时间间隔连续记录颗粒运动的图象(如图 3 所示)。

由于内旋流流化床的布风是左右对称的,运行过程中形成两个对称的内旋流,因此图 3 只给出了单侧的颗粒运动图象,黑色点为床料颗粒。图中左上角为反射板,下部为风室,风室左侧为高速风,右侧为低速风;因此床内左侧为流动床,空隙率稍大,存在比较大的气泡,并且颗粒运动速度很快,而右侧为移动床,空隙率很小,床料颗粒堆积在一起,运动缓慢。



图 3.b  $t = t_0 + t$   
时的粒子  
图像

得到具有一定时间间隔的多幅数字图象后,通过 DPIV 系统的速度提取软件可以求得内旋流流化床颗粒运动速度分布,由于流动床和移动床的速度相差较大,在 0.04 s 的间隔内,流动床内的颗粒已经移动

了很长的距离(几十个像素),而移动床内的颗粒移动的距离很短(几乎没有位移),若采用  $96 \times 96$  像素的判读区域,流动床区的颗粒相关性差,使得判读误差增大,为了提高测量的精度,对于移动床区,增加间隔时间;对于流动床区,利用 CCD 摄像机隔行扫描,降低空间分辨率,提高时间分辨率,得到 0.02 s 的时间间隔,

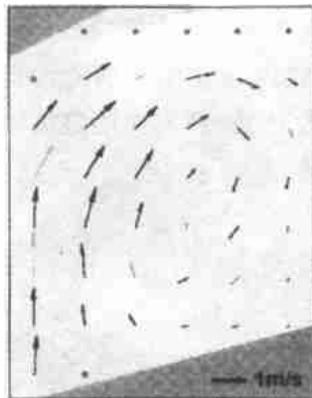


图 4 得到的速度矢量图

提高了 DPIV 算法在数字图象中判读区域的相关性。

图 4 给出了对图象进行相关计算得到的各个部位的速度矢量分布。由于流化床颗粒运动的脉动性很大,并且颗粒运动有一定的三维效应,因此,两幅图象之间的相关性较差,特别是高速风区以及浓相床区和气相空间的交界处,只得到了部分矢量。图中颜色较深的速度矢量为相关运算得到的;颜色较

浅的为通过各种修正手段(人为判断相关性的大小、插值等),对相关计算得到的不很准确的矢量进行修正得到的;对于没有任何相关信息的位置用圆点表示,这些位置的速度只能通过其它的图象的相关计算进行修正。

## 5 结论

利用 DPIV 技术可以迅速良好地完成内旋流流化床颗粒运动二维速度场的测量,不仅可以给出颗粒运动的平均速度而且可以得到瞬时的速度,可以进行流化床内颗粒运动的相互作用研究和气泡以及不同颗粒相相界面运动,研究结果可以较好地描述颗粒的二维运动。

内旋流流化床是一个准二维的流化床,可以利用 DPIV 进行二维速度场的测量,但在试验中仍存在较大的三维效应,给测量带来一定的误差。虽然 DPIV 一般可以利用 2D + 1D 技术<sup>[8]</sup>和体视 3D 技术<sup>[9]</sup>完成流场的三维测量,但由于内旋流流化床内部颗粒密度高,光线不可穿透,不能得到第三维的信息。进行内旋流流化床颗粒流场的三维测量还有待于在设备和方法上进一步提高。

## 参考文献

- [1] Nagato S, Kamisada M, Kosugi S, Miyoshi N, Furukawa M. Characteristics of the internally circulating fluidized bed boiler. *Proceeding of Fourth Chian - Japan Fluidization Science and Technology Symposium*, 1991, 9: 56 ~ 65.
- [2] 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.
- [3] Adrian R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow - a review. *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 1986 (127) : 127.
- [4] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 1991, 23 : 261.
- [5] Willert C E, Gharib M. Digital particle velocimetry. *Experiments in Fluid*, 1991 (10) : 181.
- [6] Meinhart C D, Adrian R J, et al. A parallel digital processor system for PIV. *Meas. Sci. Tech.* 1993 (4) : 619.
- [7] Huntely J M. Speckle photography fringe analysis: assessment of current algorithms. *Appl. Opt.*, 1989 (28) : 4316.
- [8] Dinkelacker F, Schafer M, et al. Determination of the third velocity component with PTA Using an intensity graded light sheet. *Exp. Fluids*, 1992 (13) : 357.
- [9] Prasad A K, Adrian R J. Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows. *Exp. Fluids*, 1993 (15) : 49.

(何静芳 编辑)

液化床燃煤过程降低  $N_2O$  排放措施评述 = **A Review of the Measures Aimed at Reducing Nitrous Oxide Emissions from a Fluidized Bed Coal-combustion Process** [刊,中] / Zhou Haosheng (Huazhong University of Science & Technology), Lu Jidong, Zhou Hu (Huazhong University of Science & Technology), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 1 ~ 3

Nitrous oxide ( $N_2O$ ) emission control constitutes a key link in the advancement of fluidized bed combustion technology. The present paper reviews the recent advances in this field of study. The main aspects covered include: combustion process control,  $N_2O$  reburning, sectionalized combustion, catalytic burning, biomass and coal mixed combustion, etc. The authors point out that an optimized simultaneous control of  $NO$ ,  $N_2O$  and  $SO_2$  emissions is essential for reducing pollutants during the fluidized bed combustion. **Key words**: fluidized bed combustion,  $N_2O$ , emission control

再燃燃料中 HCN 对  $NO_x$  还原的影响 = **The Effect of HCN Components in Fuel Returned on  $NO_x$  Reduction Rate** [刊,中] / Zhong Beijing, Fu Weibiao (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 4 ~ 8

Fuel reburning is one of the major furnace measures for reducing  $NO_x$  emissions. Through a numerical evaluation of the reburning zone under different air excess coefficients and reburning temperatures a study is conducted of the reburning process with HCN-containing natural gas ( $CH_4$ ) serving as the fuel being reburned. The results of the study show that the presence of nitrogen-containing components and the operating conditions of the reburning zone have a considerable effect on the  $NO_x$  reduction rate. In view of this, when the reburning technology is employed for reducing  $NO_x$  emissions, one should strive to optimize the combustion conditions of the reburning zone, depending on existing specific circumstances. Moreover, a proper combustion temperature and excess air coefficient for the reburning zone should also be appropriately selected. **Key words**: fuel reburning,  $NO_x$  reduction rate

内旋流流化床颗粒运动的研究 = **A Study of the Particle Movement in an Internal Circulating Fluidized Bed** [刊,中] / Tian Wendong, Wei Xiaolin, Wu Dongken, (Institute of Mechanics under the Chinese Academy of Sciences), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 9 ~ 11

Under a relatively low air-feed speed the particle flow of an internal circulating fluidized bed (ICFB) pertains to a dense gas-solid two-phase one. There exist some difficulties in studying the internal circulating flow field, especially the particle velocity field, in case conventional measuring devices are used. As the internal circulating fluidized bed approximates a planar fluidized one, it is possible to utilize the measuring technique of transient planar two-dimensional velocity field (PIV and DPIV) to measure the particle flow field of a certain section of the ICFB. An improved version of the existing DPIV (digital particle image velocimetry) in the lab has been employed to conduct a preliminary research of the velocity field of the ICFB particle movement. This has led to a better understanding and characterization of the particle two-dimensional movement. **Key words**: two-phase flow, fluidized bed, velocity measurement, particle image velocimetry

气固流化床内颗粒的内循环特性的研究 = **A Study of the Internal Circulating Characteristics of Particles in a Gas-solid Fluidized Bed** [刊,中] / Zhou Yaming, Shen Xianglin (Southeastern China University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 12 ~ 14

On the basis of analyzing the cause of the generation of particle internal circulation in a gas-solid fluidized bed further analyzed is the influence on particle internal circulation of the following factors: fluidized gas velocity, static bed layer height and particle diameter and pressure. In case of an increase in the fluidized gas velocity, static bed layer height and particle diameter there emerges an intensification of the particle internal circulation. By contrast, a pressure increase will bring about a weakening of the particle internal circulation. An intensified internal circulation of the particles will result in a drastic increase in oscillation of impulse signal (temperature, concentration and gray scale, etc.) response curves. This can lead to an improvement in the transversal mixing of particles in the fluidized bed. **Key words**: internal circula-