

# 内旋流流化床垃圾焚烧炉 及其研究中的测量技术\*

田文栋\*\* 魏小林 盛宏至  
(中国科学院力学研究所)

## 摘 要

内旋流流化床具有燃烧迅速、温度均匀、排放清洁、燃烧过程可控等特点,是一种适合于焚烧城市生活垃圾及其它特种燃料的炉型。包括内旋流流化床锅炉在内的许多流化床锅炉的床料颗粒空隙率小,光线不能穿透;并且颗粒的尺寸大,动量高,其环境难以满足通常测量手段的基本要求。尤其在颗粒相和气相速度场以及其相互作用规律研究上缺乏理想的测量手段。本文介绍了力学研究所建造的内旋流流化床炉,总结了在进行内旋流流化床垃圾焚烧炉试验过程中所采用的部分测量方案。

关键词: 内旋流流化床, 垃圾, 焚烧, 测量

## The Measurement in Municipal Solid Waste Incinerator of Internal Circulating Fluidized Bed

Tian Wendong Wei Xiaolin Sheng Hongzhi  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

The Internal Circulating Fluidized Bed (ICFB) system with its fast combustion, even temperature, low emission and controllable combustion process, is a kind of new clean combustion system, which can be used in various fuels, such as Municipal Solid Waste (MSW) and other special fuels. Because the porosity of the bed materials is very small in the Fluidized Beds (include ICFB), the light can't go through. Besides, as the particles have big size and high momentum, it is difficult to collocat measurement instruments. Especially there are few perfect measurement methods to

原稿收到日期为 1998-04-27, 修改稿收到日期为 1998-09-07。

\* 论文研究工作得到了中国科学院重点项目(KY95T-03-02)和国家自然科学基金(59776023)的资助。

\*\* 中国, 北京, 邮编 100080。

be used in the study of particle, gas flow field and their reciprocity. This paper describes the internal circulating fluidized bed (ICFB) made in Institute of Mechanics, and the measurement methods used in the experiment with the bed

**Key words:** Internal circulating fluidized bed, Waste, Incineration, Measurement

### 引言

焚烧制能是高效、清洁、低成本解决城市生活垃圾污染又可回收部分资源的处置办法。但由于垃圾含水量高、热值低、含有毒有害物质多、品质性状不一、预处理性差,不利于燃料稳定、彻底、清洁的燃烧,并且易产生二次污染。因此研究和发 展适用于垃圾燃料焚烧的新型燃烧装置具有重要意义。

内旋流流化床 ICFB<sup>[1,2]</sup> (internal circulating fluidized bed) 是一种与传统的鼓泡床和循环流化床不同的流化床类型,通过非均匀的分段布风,各段之间较大的流化倍率差形成床料颗粒的大尺度内旋流,加剧了燃料和床料颗粒之间的碰撞混合,从而可破坏燃料的凝聚结团,防止不良流化状态的发生,有利于不燃物的分离排出,改善了燃料的扩散和燃烧特性,能有效控制污染物的排放。因此内旋流流化床是一种适合于包括城市生活垃圾在内的多种劣质燃料的燃烧装置。

### 1 内旋流流化床垃圾焚烧炉

中国科学院力学研究所根据内旋流的原理,建立了处理量为 1 吨/天的内旋流流化床垃圾焚烧试验系统,该系统包括焚烧炉主体、风量控制调节系统、测量系统和辅机(鼓引风机、出灰装置、床料循环装置、除尘器、空气预热器等)四部分。其结构示意图见图 1。

图 2 所示为包括空气预热器在内的焚烧炉主体结构简图,从下到上分别为风室段、出灰段、浓相床区段、过渡段、二次风段和烟气出口段,主体部分的外形尺寸为 1 200 mm (长) × 800 mm (宽) × 3 600 mm (高)。整个炉体为组装式的轻型炉墙结构,每一段均由钢板焊接而成,内

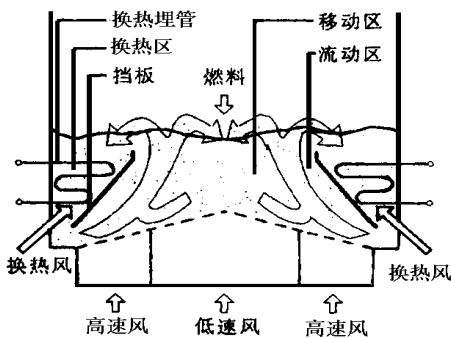


图 1 内旋流流化床结构示意图

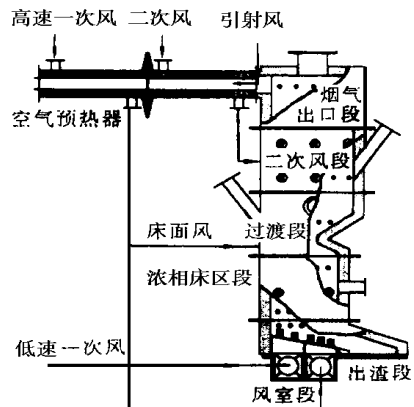


图 2 流化床垃圾焚烧炉结构图

部衬有 20 mm 厚的隔热材料和 60 mm 厚的耐热材料,各段之间通过法兰连接。风室段由风帽、布风板、风室和扩压段组成,试验台的高速风区(流动区)和低速风区(移动区)分别安装了 6 个和 4 个风帽,风帽均匀地布置在倾斜 15° 的布风板上,一次风通过风室段按要求送入炉内;由出渣段排出床料和灰,通过筛分排除不燃物,再将床料返回到浓相床区;浓相床区横截面积为 500 mm (长) × 240 mm (宽),在浓相床区段的流动区和移动区分别布置了换热管,用于研究内旋流流化床埋管换热问题;在过渡段炉膛尺寸逐步扩大,增加了烟气在燃烧室内的停留时间,有利于焚烧过程中产生的剧毒物质(如二噁英和呋喃)的分解,用于控制燃烧速率的床面风在过渡段被送入炉内;二次风段布置了床料回流口和多重二次风入口;烟气出口段延长了炉体的高度,使得烟气在炉体内有一定的停留时间。过渡段上方、二次风段以及烟气出口段已补充了二次风,燃烧温度比浓相床区高,并且为气相燃烧,统称为自由空间。

试验台上共开设了 46 个温度测点和 3 个烟气取样孔,并配备了自动化程度高、灵敏度高、记录时间长的温度测量系统,该系统可以同时记录 32 路温度信号,测量流化床沿三个方向的温度分布;烟气的成分分析则通过烟气采样孔取样,再利用烟气分析仪进行分析。试验台配备两台流量  $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、压头 12 kPa 的鼓风机,空气分三部分进入炉内:高速、低速一次风及二次风。同时一次风又有一部分作为床面风被送入,以调节废弃物的燃烧速率,并利用了高温烟气预热高速一次风和二次风。

内旋流流化床采用了换热埋管和床面风两种调节手段,以适应垃圾热值的波动。当纸张、塑料等高热值可燃物大量进入炉内时,挥发份急剧析出,来不及燃烧易造成空气污染;而且纸张、塑料的快速燃烧释放大量的热,破坏了炉内已有的温度平衡,易造成布风板事故和二噁英等物质的合成。通过换热埋管可以迅速从流化床内取出热量,保证浓相床区温度,通过床面风调节床料和燃料之间的换热系数,降低挥发份的析出速率。

焚烧炉的处理量为:一天工作 16 小时焚烧 1 吨高位热值为 6 000 kJ/kg,含水率为 50% 左右的城市生活垃圾。焚烧炉运行时,浓相床区的温度为 650 °C 左右,可以防止垃圾中玻璃和轻金属熔融造成的布风板堵塞,同时减少出灰系统损失的热量;补充了二次风之后,烟气温度进一步提高,维持在 800 ~ 1 000 °C 之间,保证了垃圾燃烧过程中产生的剧毒物质分解所需条件。通过空气预热器后空气被加热到 150 °C 左右。

## 2 内旋流流化床实验研究方法及结果

内旋流流化床一次风速度在  $0.5u_{mf} \sim 12u_{mf}$  之间 ( $u_{mf}$  为床料颗粒的初始流化速度),高速的流动区为  $6u_{mf} \sim 12u_{mf}$ ,低速的移动区为  $0.5u_{mf} \sim 2.0u_{mf}$ ,在浓相床区,床料颗粒的空隙率仅比堆积状态下大 20% ~ 50%,属于稠密的气固两相流。由于光线不能穿透床层,而且床料颗粒的尺寸和动量较大,部分浓相床区物理量难以采用通常方式(动静压、激光、热线等)进行测量。本节介绍针对不同实验目的而采取的实验手段。

### 2.1 内旋流流化床布风对内旋流的影响

内旋流流化床炉燃烧的优劣直接与移动区和流动区的结构相关连,而移动区和流动区的结构主要受空气分配的影响,只有确定了内旋流流化床的布风和流化状态之间的关系,才能得到适合于燃烧的床料颗粒的流动状态。分别改变高速风和低速风的大小可以得到多种复杂的复合流态,每种复杂流态中均包含两种及两种以上的基本流态:流动区(床料被空气裹挟做

剧烈运动); 移动区(床料缓慢沉降); 鼓泡区(床料做小尺度上下运动); 固定区(床料静止不动)。只包含流动区和移动区的流态才是有利于燃料扩散和燃烧的内旋流。

首先采用了普通的河砂做床料,此时的流化为聚式流化状态,虽然移动区和固定区之间的分界线很清晰,但由于存在大的气泡,流动区和移动区之间的界限不明显,而且波动性很大,为观察和测量的方便,选用了颗粒密度稍轻的塑料小球作为床料,此时的流化为散式流化。改变床料时,保持  $\rho d^2 g / \mu u$  不变,保证了流化床浓相床区的相似性。

采用非均匀布风,内旋流流化床两侧为高速风,中心为低速风,通过对中心线处颗粒运动与否的判断,找到固定区顶点,准确测量出固定区高度,得到图3所示流化倍率( $u_{mf}$ )和固定床高( $H$ )的关系,用同样方法测得移动区和流动区之间的界限,确定了布风和流化床内颗粒运动状态的对应关系。

通过内旋流流化床布风对内旋流形成影响的实验得到了布风规律<sup>[3]</sup>:高速风室表观流化速度大于  $6u_{mf}$ 时,可以形成内旋流流动;低速风室表观流化速度大于  $1.3u_{mf}$ 时,内旋流流谱中的固定床区基本消失,形成只有流动区和移动区共存的内旋流流化状态。

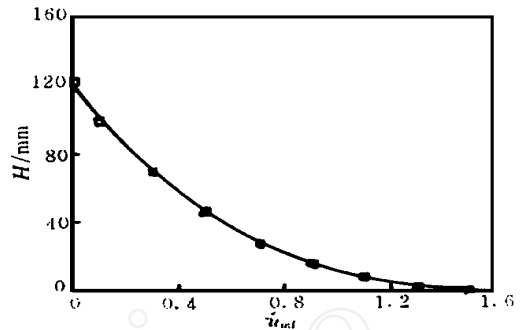


图3 中心风与固定床高的关系

## 2.2 燃料颗粒扩散规律的记录方式

燃料颗粒的扩散速度直接影响到焚烧炉的燃烧稳定性和温度均匀性。通过与鼓泡床的对比实验,研究燃料颗粒在内旋流流化床中扩散规律,选用4种不同的材料作为示踪粒子来分别模拟垃圾中的主要成分,实验时将总数一定的4种粒子沿宽度方向( $W$ )一次性均匀放入到床层表面对称线处,然后启动风机供风,经过一定的时间后停机,测量不同流化时间下的分散情况,得到了各种示踪粒子在沿长度( $L$ )和高度( $H$ )两个方向上的不同分布(床的二维性决定粒子分布沿宽度方向是均匀的)。

为了给出分布的量的概念,每次实验结束后,在床层的19个区域内进行了取样计数,如图4所示,利用插板先将床层沿宽度( $W$ )方向划分成两部分,然后将其中的一侧沿长度方向均分为10个小区域,除了左侧第一个区域外,每个小区再沿高度方向分两层取样,数出每个小区域内的各种粒子的数目。由于内旋流流化床为近似的二维床,宽度( $W$ )方向的扩散不明显,因此另一侧不再区分各区的粒子数,而只计算示踪粒子的总数,与测量记录侧的粒子数对比判断实验是否成功。

将若干次相同参数的实验数据进行统计平均,得到了燃料颗粒在浓相床区的分散和破碎规律。图5给出了各种示踪粒子的分散情况<sup>[3]</sup>。内旋流流化床在燃料颗粒混合、分散、破碎等方面优于鼓泡床,可以使轻质的燃料颗粒快速分散到浓相床区的每个部位,利于燃料颗粒的干燥预热燃烧和床温的均匀稳定;使重质的燃料颗粒偏析到排出口附近(在内旋流流化床的两侧),便于金属玻璃等不燃物的排出。内旋流流化床比鼓泡型流化床更适合于垃圾焚烧。

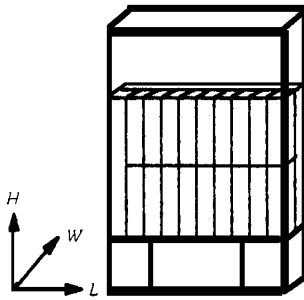


图 4 取样区域划分

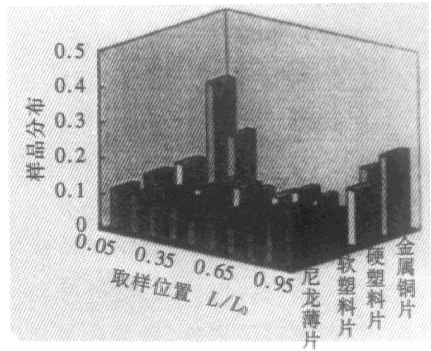


图 5 垃圾样品的分散情况

### 2.3 内旋流流化床换热埋管传热系数的测定

内旋流流化床垃圾焚烧炉为达到严格的排放标准, 一般将浓相流化床区和自由空间的温度控制在 600 ~ 800 和 800 ~ 1 000 之间。换热埋管是控制手段之一, 利用埋管换热可以大幅度调整从流化床中取出的热量, 防止燃料热值波动时流化床温度的骤升和骤降。

实验选择了低温流化床高温换热埋管的反向传热模式, 通过热流方向对换热系数的修正, 得到高温流化床低温埋管正向传热时埋管与床料换热系数。由于不易实现 U 型换热管转折处的等热流换热, 且换热管上温度测量元件的安装易破坏床内流动, 实验中采用等壁温换热管。图 6 为试验装置图, 在换热区安装 U 型换热管, 管内通加热的锭子油, 只在换热埋管的进出口布置一对匹配的铂热电阻测量换热流体流经床层前后的温度差。通过管内流体的快速流动, 保证换热埋管内流体进出口温度差小于 0.5

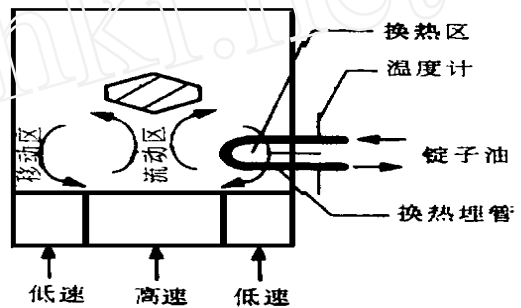


图 6 换热埋管传热系数测定试验装置示意图

, 满足等壁温条件(温差小于 1 )。系统的辅助装置包括油的电加热系统、温度控制系统和热流测量装置<sup>[5]</sup>。

测定电加热功率, 得到加入到流化床中的热量, 结合壁温以及流体的物性参数, 得到换热埋管与床料间的换热系数。由实验获得: 内旋流流化床最大换热系数约为鼓泡床的 1.3 倍, 且不随换热区流化倍率的提高而变化; 流动区的流化速度对传热系数有显著影响, 换热系数随流化速度的上升而明显增加; 随着换热区流化速度的提高, 换热系数固定不变, 未出现鼓泡床中换热系数下降的现象。内旋流流化床换热区最大换热系数为

$$h_{max,h} = 46 \cdot 4k_g^{0.6} \rho_s^{0.2} d_p^{-0.36} \quad (1 < u_{mf} < 8, 0.5 \text{ mm} < d_p < 1.0 \text{ mm}) \quad (1)$$

式中:  $k_g$  为气相导热系数;  $\rho_s$  为颗粒相密度;  $d_p$  为颗粒的平均球形粒径。

### 2.4 内旋流流化床垃圾焚烧炉温度测量

焚烧炉系统内的温度在 100 (预热的空气)~ 1 200 (部分自由空间) 之间, 采用镍铬镍硅热电偶(低于 1 000 )和铂铑铂热电偶(高于 1 000 )进行温度测量。配合简单的 A/D 器件开发了一套适用于内旋流流化床试验台的测量软件, 实时测量记录并显示炉体内各点的

温度变化以及整体温度的分布<sup>[3]</sup>。软件可根据不同测量对象编辑实验台结构、测孔位置,显示设计的炉体结构、测点的分布、炉膛的温度分布及随时间的变化;并随时显示各个热电偶的测量值。

使用居民区生活垃圾(高位热值 6 MJ/kg 左右)和配置的模化垃圾(高位热值 4.7 MJ/kg 左右)进行了焚烧试验<sup>[3]</sup>。图 7 和图 8 给出了浓相床区和自由空间温度随时间的变化(包括点火、运行、燃料更换、停止燃料供应和停炉的温度曲线)。图 8 上、中、下三条曲线分别给出了浓相床区流动区、中心线和移动区的温度,流动区的温度明显高于移动区,说明燃烧主要发生在流动区,而新垃圾的预热和干燥则在移动区进行。在过渡段补充了二次风,挥发份继续燃烧,自由空间的温度比浓相床区流动床的温度高 150 左右。

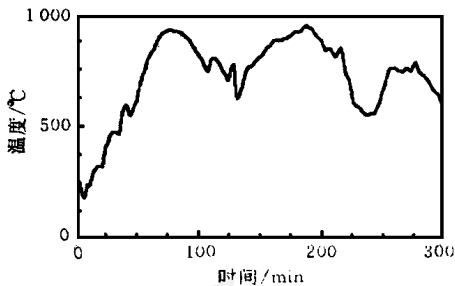


图 7 自由空间温度

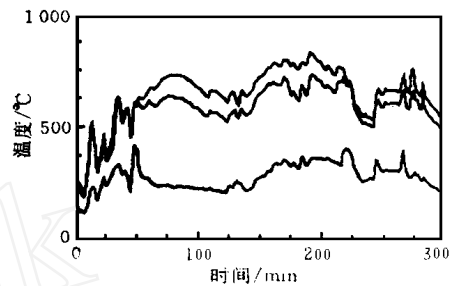


图 8 浓相床区温度

## 2.5 气固两相运动规律及气固相互作用规律的研究

内旋流流化床实验中,希望通过连续记录床料的运动状态,确定流化床内不同流化区域之间界面和床料颗粒的运动情况,以及气泡、节涌、沟流等不良流化状态的发生、演变和湮灭的具体历程,从而得到内旋流流化床内气固以及粒子之间的相互作用规律。整个研究方案的关键在于定量描述颗粒相的瞬态速度场以及相界面的变化。毕托管、热线流速仪、PDA、LDV、磷光示踪、激光全息、射线穿透成像等测量方式难以满足内旋流流化床浓相床区的测量要求,因此选择粒子图像测速仪 PIV (particle image velocimetry) 作为内旋流流化床二维瞬态速度场的测量工具。内旋流流化床俯视图为矩形,沿长度方向不均匀布风,沿宽度方向均匀布风,因此宽度方向能量和质量的传递明显小于长度方向,其流场可视为二维流场,可以利用 PIV 技术及相关技术测量二维模型剖面上的颗粒瞬态运动,研究颗粒相运动规律及气固相互作用。

通常的 PIV 系统<sup>[6,7]</sup>虽然性能非常卓越,但在内旋流流化床的应用上尚存在一定的困难。首先内旋流流化床床料颗粒间的空隙率非常小,粒子浓度相当大,光线无法透射,无法利用片光源得到流化床内部某一剖面上的二维速度分布;其次气固聚式流化床的颗粒运动呈现相当大的随机性和脉动性,需要在一定周期内连续记录、分析、平均,而通过双曝光拍摄底片再冲洗的湿法处理难以得到连续的颗粒运动图像,在一幅底片或多张底片上连续多次曝光记录时间历程的方法给 PIV 图像的相关性分析带来很大的困难,特别由于床料颗粒密集,在视场中不明显,运动的视角速度过高,需要采用较小的曝光间隔,不同底片间的相关分析误差较大;再次颗粒流场不符合流体的连续介质假设,利用不可压缩流体的连续性方程判断矢量的方向及排除坏矢量比流体测量时误差大,失误率高。

研究中采用 D-PIV (Digital PIV) 技术,由 Pentium-100 微机、CCD 摄像机及镜头、图像卡

组成了实用的测量系统(如图 9 所示),并针对系统和实验段特点开发了图像采集和处理软件。测量系统利用工业 CCD 像机对准自然光照明的二维流化床模型透明侧壁,直接记录流场中粒子图像的运动序列,通过两幅图像互相关的方法提取速度,并在较长的时间内跟踪颗粒的运动规律,连续记录和处理。通常判读 PIV 图像采用两次傅立叶变换(傅立叶变换幅度谱分析)和相关分析<sup>[8,9]</sup>等方法,不仅在处理有粒子进出判读区域边界的情况下会带来较大的误差,产生错误矢量,而且利用普通 PC 机在短时间内(1 s)难以完成求解一个矢量所需要的浮点运算量。现有的实时测量系统多数建立在工作站等高性能的计算机上,利用 PC 机难以进行实时测量。通过对相关算法和傅立叶变换幅度谱分析的简化和改进,采用了块相关、一维压缩平均和局部傅立叶变换相位谱分析等办法,提高了速度判读的效率,可以达到在高档 Pentium 系列微机上实时测量显示的要求,同时利用数次迭代预处理,可以改善粒子进出边界带来的误差,减小错误矢量的数目,该粒子图像系统可以由软件实现小于 0.02 s 的单根矢量提取时间(96 × 96 像素的判读区域)。

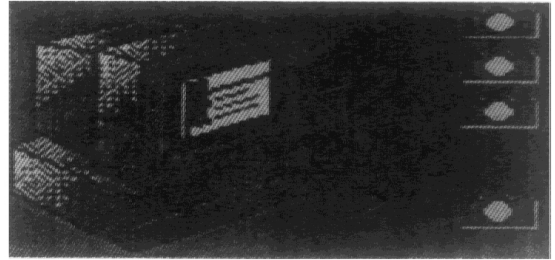


图 9 DPIV 系统的组成

该系统主要应用于内旋流流化床的冷态实验中,已完成了气泡演变过程(图 10)、颗粒运动速度分析(图 11)和燃料颗粒扩散(图 12)三方面的研究工作。

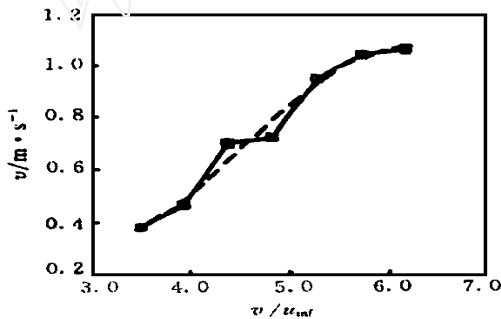


图 10 气泡速度与流化速度的关系

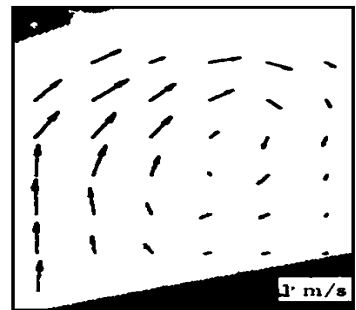
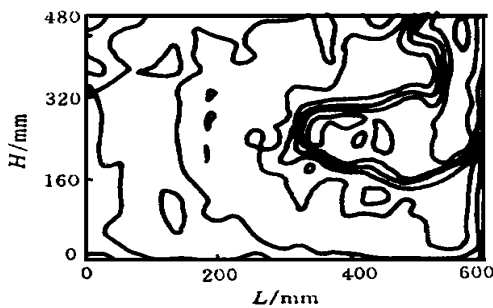
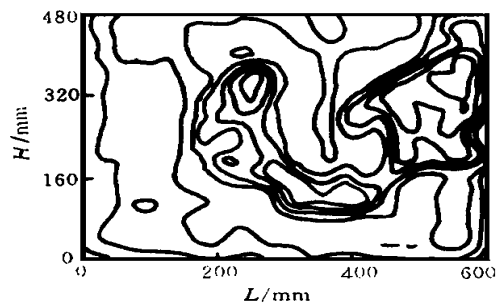


图 11 内旋流的速度场



(a)  $t = 0.40 s$



(b)  $t = 0.80 s$

图 12 燃料颗粒在流化床内的扩散情况

工业用 CCD 像机的空间和时间分辨率低, 图像为  $768 \times 576$  个像素, 两幅图像时间间隔为  $0.04 \text{ s}$ 。在较大的流化倍率的情况下, 尚不能满足测量的要求, 系统需要进一步的改进。

### 3 结束语

内旋流流化床的实验研究, 包括稠密气固两相流相互作用的探讨, 给气固两相流定量、准确、实时的测量提出了较高的要求。本文总结了在进行内旋流流化床垃圾焚烧炉试验过程中所采用的部分测量方案, 但还有许多方法和设备尚待提高和改进。

### 参 考 文 献

- 1 Nagato S, Kamisada M, Kosugi S, et al Characteristics of the Internally Circulating Fluidized Bed Boiler, Proceeding of Fourth China-Japan Fluidization Science and Technology Symposium. 1991: 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 田文栋. 内旋流流化床特种燃料锅炉实验研究[硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1997
- 4 盛宏至, 王柏懿, 田文栋等. 内旋流式流化床异密度物体运动特性试验研究. 第三届全国工业流体力学学术会议论文集. 1993
- 5 郝金华. 非均匀布风内旋流流化床埋管传热特性的实验研究[硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1996
- 6 Adrian R J. Multi-Point Optical Measurements of Simultaneous Vectors in Unsteady Flow—A Review. Int J Heat & Fluid Flow, 1986, 127: 127
- 7 Adrian R J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Annu Rev Fluid Mech, 1991, 23: 261
- 8 Willert C E, Gharib M. Digital Particle Velocimetry. Experiments in Fluid, 1991, 10: 181
- 9 Meinhart C D, Adrian R J, et al A Parallel Digital Processor System for PIV. Meas Sci Tech, 1993, 4: 619