

# 层流炉反应管内炭粉颗粒运动的 PIV 试验

王娜娜, 易维明\*, 刘珠伟, 柏雪源

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东省清洁能源工程技术研究中心, 淄博 255049)

**摘要:** 为了研究炭粉颗粒在层流炉反应管内的运动规律, 按照 1:1 比例设计制造了一套透明玻璃试验装置用于 PIV 流场测量。分别在 4 种不同的主气流量下, 对粒径为 100~120 目的炭粉颗粒在反应管内的速度场进行了 PIV 无接触测量。结果表明, 在反应管中心处, 开始时, 炭粉颗粒的轴向速度在下料口附近很小, 然后迅速增加到最大值, 而后以此速度运动一段距离后, 速度开始减小。在约 1.8~123.8 mm 段, 炭粉颗粒的轴向速度在管道中心处为最大。轴向速度沿径向成类似抛物线状分布; 通过对测量数据的分析计算, 获得了管内气流雷诺数与炭粉颗粒停留时间(无量纲处理后)的关联式。

**关键词:** 微粒, 速度测量, 试验, 垂直管, PIV

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.045

中图分类号: Q353; TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0255-04

王娜娜, 易维明, 刘珠伟, 等. 层流炉反应管内炭粉颗粒运动的 PIV 试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 255—258.

Wang Nana, Yi Weiming, Liu Zhuwei, et al. PIV measurement of char powders motion in laminar entrained flow reactor [J].

Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 255—258. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

粒子图像测试技术 (particle image velocimetry, PIV) 是 20 世纪 80 年代随着电子技术、计算机技术、图像处理技术和激光技术的发展而发展起来的一种先进流场测量技术, 该技术具有能够实现无扰动, 精确有效测量二维、三维流场的流速分布形式的特点, 应用非常广泛。S.Fohanno 等人对竖直矩形玻璃管内粒径为 3 mm 的玻璃球颗粒在重力作用下流动时颗粒之间及颗粒与壁面之间的碰撞进行了研究<sup>[1]</sup>。Changfu You 等人用高速相机和 PTV 技术对竖直管内粒径为 1.8 mm 颗粒之间的碰撞率进行了研究<sup>[2]</sup>。Kaoru Miyazaki 等人利用 PIV 技术测量了气固两相螺旋水平管内流动中颗粒的运动规律<sup>[3]</sup>。石惠娟等对冷态循环流化床流场进行了试验研究<sup>[4-7]</sup>。易维明等对水平携带床内的气固两相流进行了 PIV 试验研究<sup>[8]</sup>。罗惕乾等应用 PIV 技术对喷动床导向管内粗颗粒的运动特性进行了研究<sup>[9]</sup>。

层流炉是用来研究固体燃料在极高加热速率 (升温速率  $10^4$  °C/s 以上, 也称为闪速加热) 条件下热解挥发特性的设备。易维明、修双宁等利用自制的层流炉进行了多种生物质 (玉米秸、麦秸、棉花杆、稻壳、花生壳、椰子壳、白松) 闪速热解挥发特性的研究<sup>[10-12]</sup>, 在反应管内极细的生物质颗粒在等离子提供的高温氩气下迅速

热解为残炭, 氩气携带残炭运动, 最后被收集管收集。通过改变收集管与生物质粉加料口的距离改变炭粉在层流炉内的停留时间, 最终获得生物质挥发量与挥发停留时间的关系数据, 用于热化学动力学分析。

残炭在反应管中停留时间的确定直接影响到试验数据的准确性。由于层流炉是不透明的陶瓷材料制造, 不能在实际试验中直接测定。以往的试验采用无滑移假定: 即假定残炭颗粒与气流同步运动, 无滑移。利用充分发展的管内层流流动规律估算这个停留时间。这明显存在误差, 有必要对颗粒在反应管内的流动情况进行系统研究。本文介绍了利用 PIV 技术对 1:1 比例的透明层流炉反应管内部流动的冷态测量, 获得了颗粒流的运动规律, 获得了管内气流雷诺数与炭粉颗粒停留时间 (无量纲处理后) 的关联式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

根据层流炉的结构和尺寸, 设计了一套 1:1 的透明玻璃层流炉模拟装置。该装置主要由喂料装置、反应管、收集管、旋风分离器、真空泵、稳压装置、PIV 测试系统等组成。

本试验所采用的 PIV 测量系统由北京立方天地科技发展有限公司开发, 主要由激光器、同步器、CCD 相机及图像处理系统组成。其中激光器系统是 Nd:YAG 激光器, CCD 相机为 Nikon 公司生产的 PIV 专用 AF NIKKOR 数码相机, 最小镜头焦距 50 mm, 图像分辨率 1600 dpi×1200 dpi, 最小光圈系数 1.4。图像处理系统采用 FFT 互相关算法。

### 1.2 试验方法

针对层流炉内颗粒流动特性, 结合 PIV 技术的试验要求, 将垂直管设计成边长为 50 mm, 管长为 1100 mm

收稿日期: 2010-07-18 修订日期: 2010-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50876056)

作者简介: 王娜娜 (1977—), 女, 山东莒南人, 讲师, 主要从事新能源技术研究。淄博 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东省清洁能源工程技术研究中心, 255049。Email: wnn@sdlut.edu.cn

\*通信作者: 易维明 (1963—), 河北涿州人, 教授, 博士, 主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究。淄博 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东省清洁能源工程技术研究中心, 255049。

Email: yiweiming@sdlut.edu.cn

的方管。竖直管对应于热态试验的反应管(内径为 50 mm 的圆管), 测量段为从下料口到收集口的这段距离, 为 350 mm。收集管入口设计为漏斗状, 上部直径为 22 mm, 下部直径为 6 mm。试验装置如图 1 所示。选择过竖直管中心的竖直平面为研究平面, 选择水平向右的方向为 X 轴正方向, 竖直向上的方向为 Y 轴正方向, X 轴与竖直管左壁面内壁交点为坐标原点 O, 如图 1 所示。

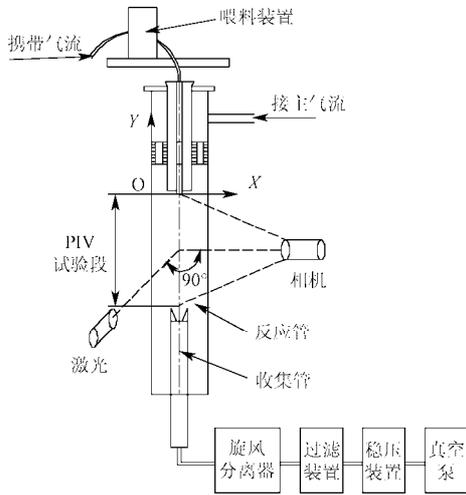


图 1 PIV 测量试验台布局示意图  
Fig.1 Schematic diagram of PIV measurement system

试验物料为热态试验的产物—炭粉, 粒径在 100~120 目之间, 约为 110 μm。喂料速率为 0.15 g/min, 从下料口到收集管口, 测量 0~350 mm 的长度, 每隔 70 mm 为一个测量段, 共测量了 5 段。为了消除各种随机性因素的影响, 试验中在测试段连续拍摄 100 幅图像, 然后将计算结果进行平均。表 1 列出了竖直管内炭粉颗粒的 PIV 试验参数。

试验时, 炭粉在低速的氩气流携带下由喂料装置喂

入到反应管中, 在主气流(氩气)携带下流经反应管, 被收集管吸入, 炭粉经旋风分离器的分离作用被吸入收集器, 而气体则在真空泵的作用下排出。

表 1 炭粉颗粒的 PIV 试验参数  
Table 1 Experimental parameters of char powders

主气流流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	抽真空流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	携带气流流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1.0	0.2	
1.5	0.3	
2.0	0.4	0.045
2.5	0.5	

## 2 结果及分析

试验的目的是为了研究管道中心处炭粉颗粒的停留时间, 并且收集管设计成漏斗形, 入口直径为 22 mm, 所以只对 X=10~40 mm 范围内的速度进行分析。

图 2 为主气流流量 Q=1.0 m<sup>3</sup>/h 时, 炭粉在不同测试段的轴向速度变化, 图中散点代表各位置处颗粒的实际速度, 负号表示速度方向与定义的正方向相反。h 表示颗粒下落高度, h=0 mm 表示颗粒位于下料管出口位置。从图 2 中可以看出, 轴向速度在靠近下料口 h=1.8~18.4 mm 范围内变化很大, 在 h=1.8 mm 处, 仅为 0.05 m/s; 到达 h=18.4 mm 处, 速度迅速增大到约 0.52 m/s。在 h=24.1~46.3 mm 段, 管道中心处的速度为最大并且稳定在约 0.51~0.52 m/s 之间。而在 h=49.1~123.8 mm 段, 虽然管道中心处的速度虽仍保持为最大, 但随着炭粉颗粒的下落逐渐减小。而在 h=126.6~350 mm 段, 速度开始发生波动, 最大速度不一定位于管道的中心, 而是在管道中心左右 5mm 范围内波动, 但与管道中心处的速度相差很小, 约为 0.01 m/s。因此, 在计算炭粉颗粒的停留时间时, 仍然使用管道中心处的速度。从图 2 中还可以看出, 在整个试验段, 炭粉颗粒的轴向速度分布类呈类似抛物线状。

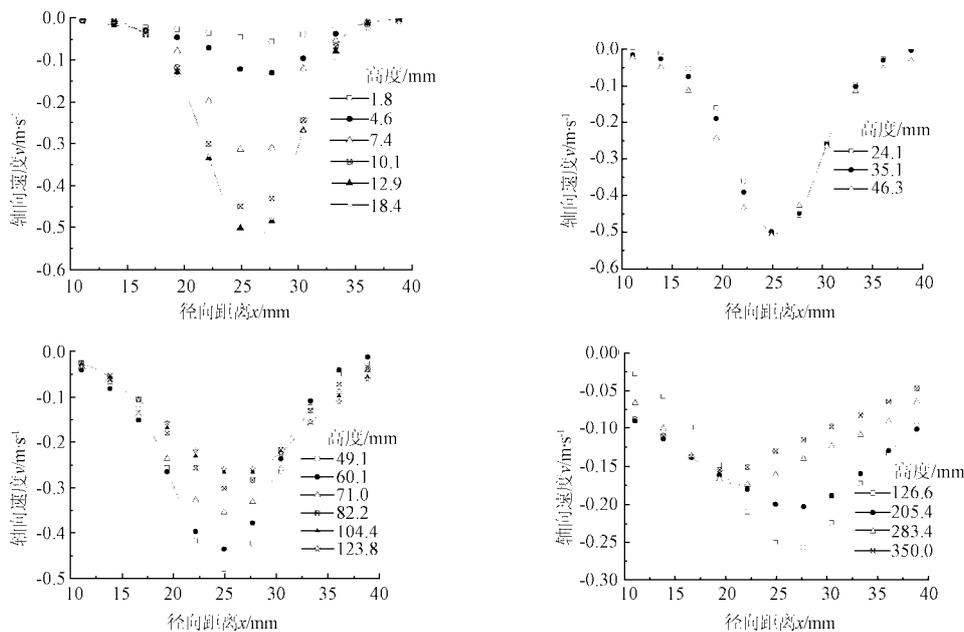


图 2 不同管截面处轴向速度的变化 (Q=1.0 m<sup>3</sup>/h)  
Fig.2 Axial velocity distributions at different cross-sections

对于主气流流量为 1.5、2.0、2.5 m<sup>3</sup>/h 时，轴向速度的变化规律与主气流流量为 1.0 m<sup>3</sup>/h 时类似。在 4 种主气流流量下，将管中心轴处的速度点取出，管道中心处炭粉颗粒的轴向速度分布如图 3 所示。

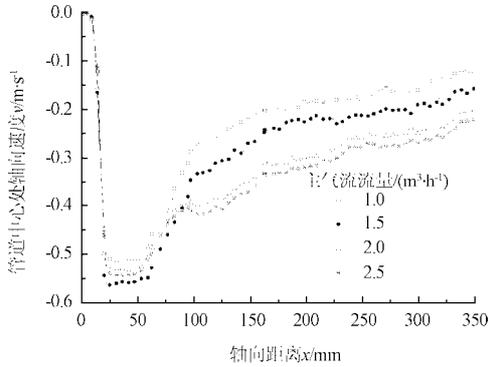


图 3 管道中心处炭粉颗粒的轴向速度

Fig.3 Axial velocity distributions at center of the pipe

### 3 时间分析

炭粉颗粒由喂料装置喂入反应管中，从下料口运动到收集口这段距离所需时间为停留时间。对拍摄的图像进行处理，对于处理后生成的数据文件，可利用式 (1) 近似计算炭粉通过反应管中心的时间。

$$T = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta S_i}{V_i} \quad (1)$$

式中， $T$  表示试验测量停留时间，ms， $\Delta S_i$  表示相邻两点轴向距离的差（即 PIV 图像处理中所选取的  $Y$  方向的步长乘以图像放大率），mm， $V_i$  表示 PIV 系统测得的各点的速度，m/s。而由 PIV 判读区的定义不难看出  $\Delta S_i$  值较小，由于各段的图像放大率不同，因此各段的  $\Delta S_i$  稍微有所差别，但是大约都在 2.7~2.8 mm 之间，在这么短的距离内  $V_i$  的差别是比较小的，因此这样计算出的速度是较为准确的。

式 (2)、(3) 是以平均流速计算的停留时间，以主气流流量为 1.0 m<sup>3</sup>/h 时进行说明。

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1.0}{3600 \times 0.05^2} = 0.1111 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$T' = \frac{S}{\bar{V}} = \frac{0.35 \times 1000}{0.1111} = 3150 \text{ ms} \quad (3)$$

式中， $\bar{V}$  为炭粉颗粒的平均流速，m/s， $Q$  为主气流流量，m<sup>3</sup>/h， $A$  为反应管的横截面积，m<sup>2</sup>。公式 (3) 中， $T'$  为以平均流速计算的停留时间，ms， $S$  为从下料口到收集口的距离，为 350 mm。

采用同样的方法，可以计算出主气流流量为 1.5、2.0、2.5 m<sup>3</sup>/h 时，炭粉颗粒的以平均流速计算停留时间和经试验测定的停留时间，如表 2 所示。

试验证明，对正方形，长方形，三角形截面，使用当量直径所获得的试验数据结果与圆管是很接近的<sup>[13]</sup>。因此可以利用当量直径的概念，将方管近似为圆管进行分析。对于矩形管道，当量直径可用 (4) 式计算，方管

内的雷诺数可根据 (5) 式计算。

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} \quad (4)$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi d_e \nu} \quad (5)$$

其中， $a=50$  mm， $b=50$  mm 为矩形管道的边长， $d_e$  为当量直径，mm， $Re$  为雷诺数， $\nu$  为氩气的运动黏度，m<sup>2</sup>/s。经查表<sup>[14]</sup>可知，氩气在室温下的运动黏度  $\nu=1.32 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s。计算结果见表 2。

表 2 炭粉停留时间试验值和理论计算值

主气流流量 $Q$ / (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	雷诺数 $Re$	试验测量停留时间 $T$ /ms	平均流速计算停留时间 $T'$ /ms	时间之比 (无量纲停留时间) $T/T'$
1.0	535.875	1 647.979	3 150	0.523
1.5	803.813	1 338.457	2 100	0.637
2.0	1 071.750	1 191.532	1 575	0.757
2.5	1 339.688	1 068.287	1 260	0.848

PIV 冷态试验时，无量纲停留时间 ( $T/T'$ ) 和雷诺数基本成线性关系，如图 4 所示。即存在如下的关联式

$$\frac{T}{T'} = 0.408 \frac{Re}{1000} + 0.3086 \quad (6)$$

这一冷态试验结果可用于层流炉热挥发特性试验中颗粒停留时间的计算，也就是说根据相似原理（雷诺数  $Re$  相等，两流体的运动现象相似），当热态试验时的雷诺数在所进行的冷态试验雷诺数的范围内或在这一范围附近时，可以利用关联式计算获得炭粉颗粒停留时间。

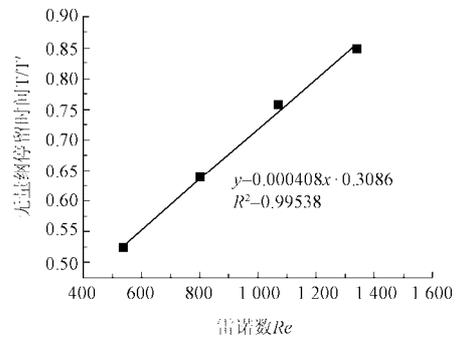


图 4 雷诺数和无量纲停留时间之比 ( $T/T'$ ) 的线性关系  
Fig.4 The linear relationship between  $Re$  and the dimensionless residential time ratio of  $T$  to  $T'$

### 4 结论

1) 在 4 种主气流流量下，炭粉颗粒在管道中心处的速度都是从下料口迅速增加到最大值，然后以此速度运行一段距离后，速度开始减小。再经过一段距离后，速度发生扰动，最大速度不一定位于管道中心，而是在管道中心左右 5 mm 范围内波动。

2) 在整个试验段，残炭颗粒的轴向速度分布呈类似抛物线状。

3) 获得了 PIV 冷态试验时无量纲停留时间 ( $T/T'$ ) 和气流雷诺数  $Re$  的关联式，该公式可用于层流炉热挥发

发特性试验中颗粒停留时间的计算。

#### [参 考 文 献]

- [1] Fohanno S, Oesterle B. Analysis of the effect of collisions on the gravitational motion of large particles in a vertical duct[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000,26(2): 267—292.
- [2] Changfu You, Hailiang Zhao. Experimental investigation of interparticle collision rate in particulate flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*. 2004, 30 (9): 1121—1138.
- [3] Kaoru Miyazaki, Gang Chen, Fujio Yamamoto, et al. PIV measurement of Particle motion in spiral gas-solid two-Phase flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1999, 19(2): 194—203.
- [4] 王勤辉, 赵晓东, 石惠娴, 等. 循环流化床内颗粒运动的PIV测试[J]. *热能动力工程*, 2003, 18(4): 379—381. Wang Qinhui, Zhao Xiaodong, Shi Huixian, et al. PIV (Particle Image Velocimetry) Measurements of particle movement in a circulating fluidized bed[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy&Power*, 2003,18(4): 378-381.
- [5] 石惠娴, 王勤辉, 骆仲泱, 等. PIV 应用于气固多相流动的研究现状[J]. *动力工程*, 2002, 22(1): 1589—1593. Shi Huixian, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. The application of PIV in gas-solid multiphase flow[J]. *Power Engineering*, 2002, 22(1): 1589—1593.
- [6] Sánchez-Delgado S, Marugán-Cruz C, Acosta-Iborra A, et al. Dense-phase velocity fluctuation in a 2-D fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2010(200): 37—45.
- [7] Shi Huixian. Experimental research of flow structure in a gas-solid circulating fluidized bed riser by PIV[J]. *Journal of hydrodynamics*. 2007, 19(6): 712—719.
- [8] 易维明, 王娜娜, 张波涛, 等. 水平携带床气固两相流动的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 11—14. Yi Weiming, Wang Nana, Zhang Botao, et al. Experimental study on gas-solid two-phase flow in a horizontal entrained bed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006,22(1):11-14.(in Chinese with English abstract)
- [9] 罗惕乾, 赵杏新, 刘伟民, 等. 喷动床导向管内粗颗粒的动特性[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2007, 28 (2): 138—141. Luo Tiqian, Zhao Xingxin, Liu Weimin, et al. Coarse particle flow behavior in draft tube of spouted bed[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2007, 28 (2): 138—141.
- [10] Xiu Shuangning, Yi Weiming, Li Baoming. Flash pyrolysis of agricultural residues using a plasma heated laminar entrained flow reactor[J]. *Biomass and Bioenergy* 2005, 29 (2):135—141.
- [11] Xiu Shuangning, Li Zhihe, Li Baoming, et al. Devolatilization characteristics of biomass at flash heating rate[J]. *Fuel* 2006, 85 (5-6): 664—670.
- [12] 易维明, 柏雪源, 修双宁, 等. 生物质在闪速加热条件下的挥发特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(增2): 135—138. Yi Weiming, Bai Xueyuan, Xiu Shuangning, et al. The devolatilization characteristics of biomass at high heating rates[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(Suppl.2): 135—138.
- [13] 王松岭. 流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004, 11.
- [14] 美国压缩气体协会[M]. 压缩气体手册. 北京: 冶金工业出版社, 1991, 11.

## PIV measurement of char powders motion in laminar entrained flow reactor

Wang Nana, Yi Weiming<sup>\*</sup>, Liu Zhuwei, Bai Xueyuan

(School of Agricultural Engineering and food science, Shandong University of Technology, Shandong Research Center of Engineering and Technology for Clean Energy, Zibo 255049, China)

**Abstract:** In order to study the movements of char powders in laminar entrained flow reactor, a transparent experimental apparatus was designed for Particle Image Velocimetry(PIV) measurement of flow field. The velocities of char powders whose mesh size was between 100 to 120 were investigated by PIV at the different flow rates of 1.0-2.5 m<sup>3</sup>/h. The results indicated that the axial velocity of char powers in the pipe center was very small near the outlet, subsequently rapidly reached the maximum and then decreased. The axial velocity at the center of pipe reached a maximum in the region within 1.8-123.8 mm. The axial velocity distribution was a parabola-like curve along the radius. The relationship between *Re* and the dimensionless residential time of char powders was obtained finally.

**Key words:** particles, velocity measurement, experiments, laminar entrained flow rector, particle image velocimetry(PIV)