

竖直管内陶瓷球和玉米秸粉混合颗粒运动的 PIV 测量

王娜娜, 易维明*, 杨延强, 柏雪源, 李志合

(山东理工大学轻工与农业工程学院, 山东省清洁能源工程技术研究中心, 淄博 255049)

摘要: 为了研究玉米秸粉和陶瓷球混合颗粒在竖直管内的运动规律, 设计制造了一套透明有机玻璃试验装置。利用 PIV 无接触测量技术, 在微负压条件下, 对混合颗粒在竖直管内的速度场进行了研究。结果表明, 混合颗粒的轴向速度呈类似抛物线状分布, 在靠近管壁约 0%~25%管宽范围内, 即在试验装置距管壁约 15 mm 范围内, 轴向速度变化较大, 其他位置处变化较小; 涡量在靠近管壁约 0%~16.7%管宽范围内, 即在试验装置距管壁约 10 mm 范围之内变化明显, 从距离管壁 10 mm 到竖直管中心涡量逐渐减小到接近为零。

关键词: 玉米秸粉; 陶瓷球; 竖直管; PIV

中图分类号: TK6

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-3-0154-04

王娜娜, 易维明, 杨延强, 等. 竖直管内陶瓷球和玉米秸粉混合颗粒运动的PIV测量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 154-157.

Wang Nana, Yi Weiming, Yang Yanqiang, et al. Particle image velocimetry of motion of the mixture of corn stalk particles and spherical ceramic particles in a vertical pipe[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(3): 154-157.(in Chinese with English abstract)

0 引言

颗粒物料在管内流动及换热现象广泛存在于化工、能源领域。如流化床^[1]、物料输送^[2]、生物质热解下降床^[3]、下降管反应器^[4,5]等。颗粒在管内混合运动过程中通过气固对流、颗粒间、颗粒与壁面间的碰撞与接触导热产生热量的交换, 从而实现工业目的。颗粒在管内的流动行为, 如速度分布、浓度分布以及颗粒间、颗粒与壁面间的碰撞对换热具有很大影响。因此, 研究颗粒在管内的流动规律对于研究换热具有重要意义。

PIV(Particle Image Velocimetry)即粒子图像测试技术, 是一种非接触、瞬时、动态、全流场的速度场测量技术。近年来, PIV 测试技术已经广泛应用于多相流领域的研究, 许多学者在多相流方面做了很多工作。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^[6]。Changfu You 等人用高速相机和 PIV 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^[7]。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^[8]。王洪涛等人利用 PIV 技术对风洞内与天然沙接近的石英沙风沙流沙颗粒浓度沿高度分布进行了研究^[9]。石惠娟等对冷态循环流化床流场进行了试验研究^[10,11]。魏名山等为研究静电除尘分离器内的流场以便深入研究清灰等问题, 采用 PIV 对不同进口流速、不同截面位置的流场进行测定^[12]。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^[13,14]。张东东等对气固两相射流流场内颗粒运动的二维速度场进行了 PIV 试验研究^[15,16]。本文利用 PIV 技术研究生物质粉和陶瓷球混合后在竖直管内的运动规律, 为热态试验中研究两者热交换规律提供参考。

收稿日期: 2007-07-11 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576048)

作者简介: 王娜娜(1977—), 山东莒南人, 助教, 主要从事新能源技术研究。淄博 山东理工大学轻工与农业工程学院, 255049。

Email: wnn@sdut.edu.cn

*通讯作者: 易维明(1963—), 河北涿州人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究。淄博 山东理工大学轻工与农业工程学院, 255049。Email: yiweiming@sdut.edu.cn

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

PIV 试验装置主要由竖直管、喂料装置、真空泵、稳压装置等组成, 如图 1。喂料装置由料斗、倾斜角度调节螺栓、空气振动器、空气压缩机等组成。料斗是倾斜可调装置, 利用角度调节螺栓来调节料斗的倾斜角度以达到调节下料量的目的; 料斗分为两层, 满足试验中玉米秸粉和陶瓷球颗粒同时加入的要求。

试验所采用的 PIV 测量系统由北京立方天地科技发展公司开发, 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 1600×1200, 最小光圈系数 1.4。图像处理系统采用 FFT 互相关算法。试验时相机距被测流场为 1040 mm, 片光源出口距离被测流场为 700 mm。

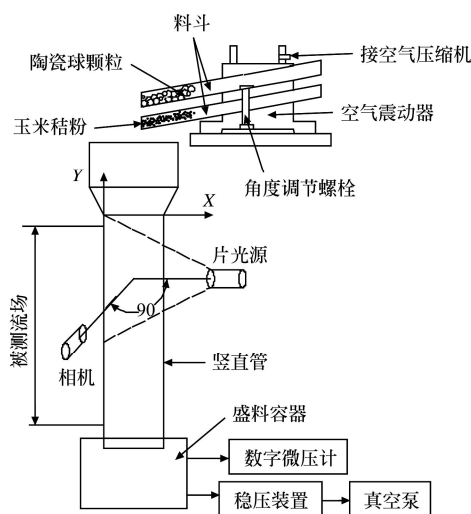


图 1 PIV 测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PIV measurement system

1.2 试验方法

为了便于 PIV 测试分析, 将竖直管设计成边长为 60 mm 的

方管，管长 1600 mm。试验时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，如图 1 所示。

试验物料为玉米秸粉和陶瓷球颗粒的混合颗粒，玉米秸粉粒径为 80~100 目之间。陶瓷球为山东省淄博市华光陶瓷厂生产的直径为 1.0~2.0 mm 的球状颗粒，实密度为 2000~2400 kg/m³，吸水率小于 0.5%，耐酸度大于 99%，耐碱度大于 95%，表 1 列出了混合颗粒的 PIV 试验参数。

表 1 混合颗粒的 PIV 试验参数

Table 1 PIV experimental parameters of mixed particles

试验物料	陶瓷球	玉米秸粉
下料速率/g · s ⁻¹	20~30	0.8~1.0
物料直径	1.0~2.0 mm	80~100 目
抽真空的流量/m ³ · h ⁻¹		9.0
负压/Pa		4.0

试验时，从图 1 所示喂料装置中加入物料颗粒，利用负压控制装置保证竖直测量管内为微负压，打开空气压缩机，达到所需压力后，打开出气阀，空气振动器开始振动，带动喂料装置振动，从而将玉米秸粉和陶瓷球颗粒加入到竖直管内。陶瓷球颗粒下料速率为 20~30 g/s，玉米秸粉的下料速率为 0.8~1.0 g/s，下料比较均匀。试验过程中，由于陶瓷球的反光性强，散射率大，光圈要调到最小，跨帖延时设为 200 μs，可以拍摄到清晰的图像。

从上管口到下管口，测量 50~1550 mm 的长度，每 90 mm 为一个测量段，总共测量了 17 段。为了消除各种随机性因素的影响，在测试段连续拍摄 100 幅图像（PIV 模式下拍摄速率为 26 幅/s），然后将计算结果进行平均。

在试验中加入竖直管的陶瓷球和玉米秸粉的质量比是

10:1，整个 PIV 视场内充满了生物质颗粒，PIV 测定的速度信息只有生物质颗粒的情况。本文没有获得陶瓷球颗粒的速度。

采用本试验系统得到瞬时高分辨率的颗粒流场图片，如图 2 所示。图中显示出混合颗粒的浓度分布情况，从图 2 可以看出，流场中陶瓷球的密度相对玉米秸粉的密度非常小。

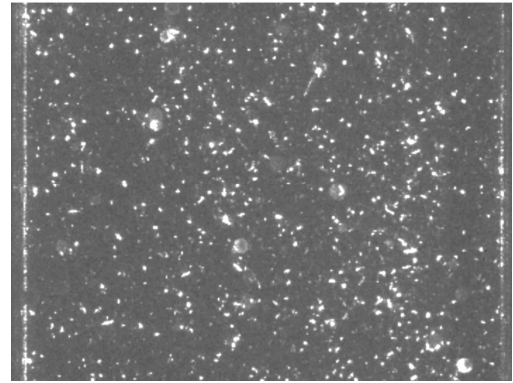


图 2 竖直管内混合颗粒流场

Fig. 2 Flow field of the mixed particles

2 试验结果及分析

图 3 是混合颗粒不同测试段轴向速度的变化，图中 X 坐标为对径向距离进行归一化处理的结果，即用竖直管的边长除以 X 坐标。图 3 中散点代表各位置处颗粒的实际速度，曲线是用 origin 拟合的速度结果。从图中可以看出混合颗粒的轴向速度分布类型呈类似抛物线状，并不是平滑曲线。轴向速度在靠近下料口 81 mm 范围内变化较大，最大达到 1.0 m/s；随着混合颗粒的下落，速度先是减小，而后稳定在约 0.7~0.8 m/s 之间，变化很小。轴向的速度在距离管壁约 25%~75% 管宽范围内变化较小，在距离管壁约 0%~25% 和 75%~100% 管宽范围内，轴向速度变化非常明显，从约为 0.7~0.8 m/s 一直下降到约 0.2 m/s。

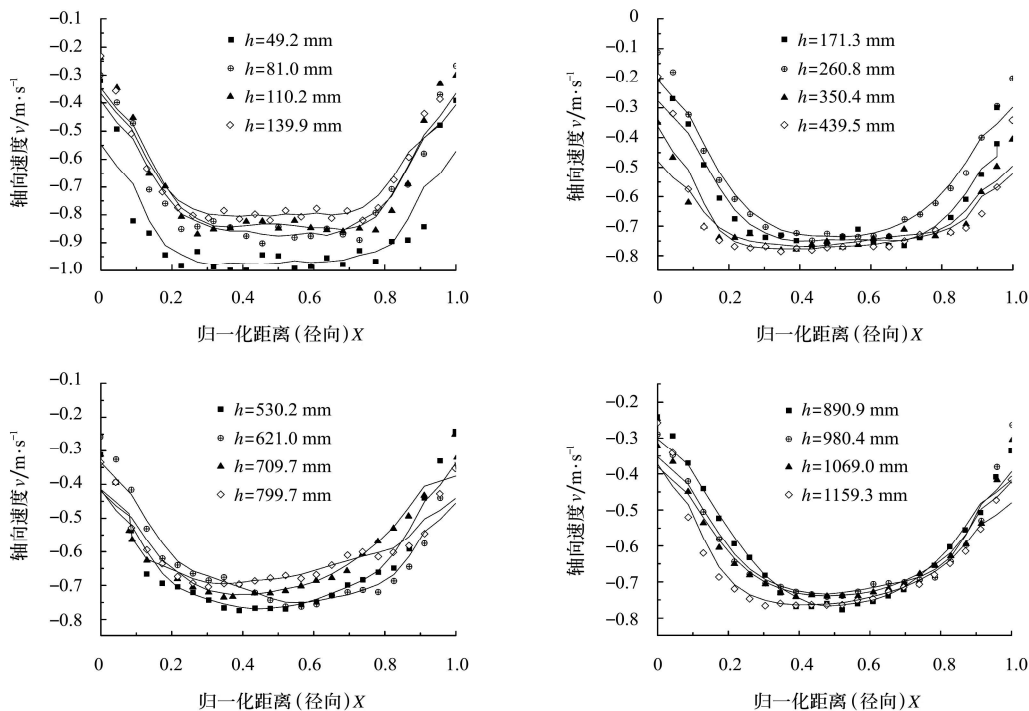


图 3 不同管截面处轴向速度的变化

Fig.3 Axial velocity distributions at different cross-sections of pipe

图4为混合颗粒不同测试段轴向速度的变化云图,图中颜色的深浅代表轴向速度大小,图中流线的切向方向表示合速度的方向。从图中也可以看出在靠近管壁约0%~25%和75%~100%管宽范围内,轴向速度变化较大,其他位置混合颗粒沿着Y轴的负方向竖直往下运动,径向速度变化较小,流场比较稳定。

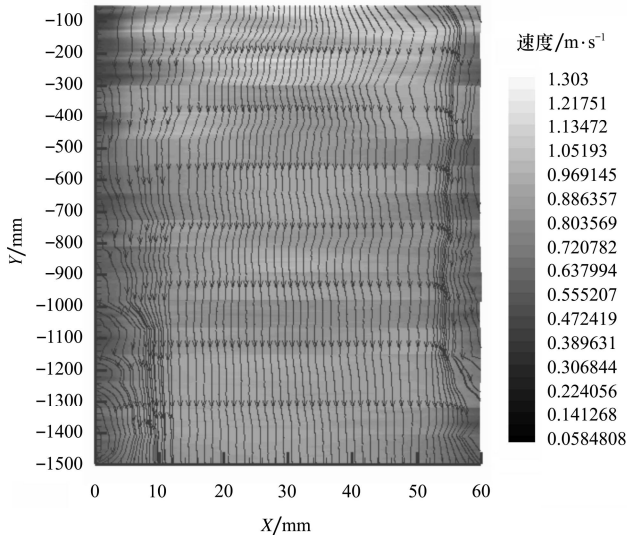


图4 不同管截面轴向速度的变化云图

Fig.4 Axial velocity nephogram at different cross-sections of pipe

图5是混合颗粒不同测试段涡量的变化。从图中可以看出,陶瓷球与玉米秸粉的混合流动涡量变动范围比较大。在靠近下料口处除管道中心外涡量变化都很明显。随着混合颗粒的流动,在靠近管壁约0%~16.7%和83.3%~100%管宽范围内涡量变化比较明显,越靠近管壁,涡量的变化也越大。涡量从距离管壁约10mm到竖直管中心逐渐减小到接近为零。这表明管壁附近颗粒碰撞的概率较高,越靠近管道中心碰撞概率越低。

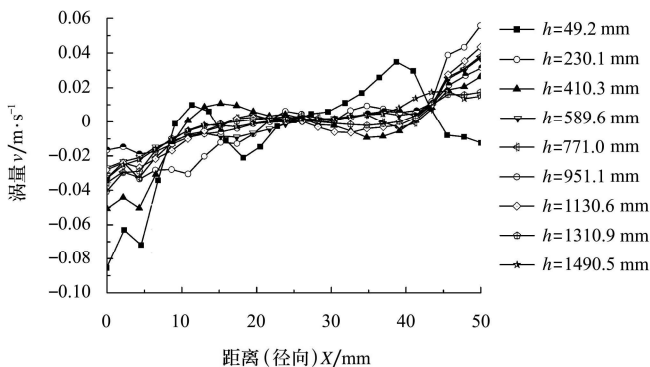


图5 混合颗粒不同管截面涡量的变化

Fig.5 Vortices of mixed particles at different cross-sections of pipe

3 结论

1) 混合颗粒的轴向速度分布近似呈抛物线状,距离管壁约25%~75%管宽范围内,即在试验装置距离管壁约15~45mm

之间,轴向的速度变化较小;距离管壁约0%~25%和75%~100%范围内,即在试验装置距管壁约15mm范围内,轴向速度的变化非常明显。在下落距离大于81mm后,速度稳定在约0.7~0.8m/s之间,变化很小。

2) 从混合颗粒不同测试段轴向速度的变化云图可以看出,靠近管壁约0%~25%和75%~100%管宽范围内,即在试验装置距管壁约15mm范围内,轴向速度变化较大,其他位置处混合颗粒基本上还是沿着Y轴的负方向竖直往下运动,径向速度变化较小,流场比较稳定。通过试验中获得的轴向速度可以计算出颗粒通过管道的停留时间,这为生物质热解中的重要参数——停留时间的控制提供了依据。

3) 涡量在靠近管壁约0%~16.7%和83.3%~100%管宽范围内,即在试验装置距管壁约10mm范围之内变化比较明显,从距离管壁约10mm到竖直管中心涡量逐渐减小到接近为零。涡量变化表明在竖直管内存在颗粒碰撞行为,尤其是管壁附近碰撞概率高,这可为系统内颗粒导热的计算提供指导。

[参考文献]

- [1] 王焱鹏,董群,王立娟,等.循环流化床固-固换热系统传热规律[J].石化技术与应用,2006,24(3):191-193.
- [2] 孙传祝,王相友,董焕俊,等.脉动流化与振动输送条件下干燥工艺的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(5):5-9.
- [3] Frain M J, Schmidt D P, Fiveland W A. An experimental investigation of the influence of gas and solid particle interaction on the heat transfer effectiveness of a falling-bed heat exchanger[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(10): 1077-1086.
- [4] 何芳,姚福生,易维明,等.下降管式生物质热解液化装置的计算分析[J].太阳能学报,2005,26(3):424-428.
- [5] 李永军.下降管式生物质热解液化实验装置的研究[D].北京:中国农业大学,2003.
- [6] 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.
- [7] You Changfu, Zhao Hailiang, Cai Yi, et al. Experimental investigation of interparticle collision rate in particulate flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30(9):1121-1138.
- [8] Miyazaki K, Chen Gang, Yamamoto F, 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.
- [9] 王洪涛,董治宝,张晓航.风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J].地球科学进展,2004,19(5):732-734.
- [10] 王勤辉,赵晓东,石惠娟,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.
- [11] 石惠娟,王勤辉,骆仲决,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.
- [12] 魏名山,马朝臣,李向荣,等.用PIV进行静电除尘气流场的测定[J].北京理工大学学报,2000,20(4):496-499.
- [13] 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.
- [14] 李志合,易维明,王娜娜.水平携带床内玉米秸颗粒速度场的PIV实验研究[J].实验流体力学,2006,20(4):94-98.
- [15] 张东东,许宏庆,何枫.气固两相射流瞬时速度场和浓度场的PIV研究[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(11):1491-1494.
- [16] 杨任刚,张东东,何枫,等.气固两相自由射流的瞬态流场研究[J].实验流体力学,2005,19(1):23-25.

Particle image velocimetry of motion of the mixture of corn stalk particles and spherical ceramic particles in a vertical pipe

Wang Nana, Yi Weiming^{*}, Yang Yanqiang, Bai Xueyuan, Li Zhihe

(School of Light Industry and Agricultural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China)

Abstract: In order to study the motion of the mixture of corn straw particles and spherical ceramic particles in vertically mounted square pipe, a set of transparent experimental apparatus was designed and fabricated. The velocity of the mixture was investigated by particle image velocimetry (PIV) at the air suction flow rate of $9.0 \text{ m}^3/\text{h}$. The results indicated that the axial velocity distribution of the mixture was a parabola-like curve along the radius and the change of the velocity was larger in the region within $0\% \sim 25\%$ of the pipe width (about 15 mm) from the pipe walls, but smaller in other positions. The vortex changed greatly in the region within $0\% \sim 16.7\%$ of the pipe width (about 10 mm) from the pipe walls and then decreased gradually to zero at the pipe center.

Key words: corn stalk particles; spherical ceramic particles; vertical pipe; PIV