

文章编号: 1672-9897(2006)04-0094-05

水平携带床内玉米秸颗粒速度场的 PIV 实验研究

李志合, 易维明, 王娜娜

(山东理工大学轻工与农业工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要:为研究生物质颗粒在水平携带床中的流动特性, 搭建了水平携带床透明模拟装置。利用 PIV 无接触测量技术, 在氩气流量为 $1.9\text{m}^3/\text{h}$ 工况下, 对 60~160 目粒径的玉米秸颗粒流进行了速度场的研究。计算出了颗粒和氩气的平均速度以及流经水平携带床的时间, 对颗粒与氩气的跟随性进行了分析。研究结果表明, 颗粒流的轴向速度沿轴方向不断增大, 管道中心附近的颗粒加速最为明显, 而边壁附近的颗粒速度变化相对较慢; 颗粒流的速度沿径向大致呈抛物线状分布; 颗粒流的平均运动速度比氩气低, 颗粒流通过水平床的平均时间略大于氩气。

关键词:玉米秸颗粒; 水平携带床; PIV; 速度场

中图分类号: Q353; TK6

文献标识码: A

Experimental study on velocity field of corn stalk granules in horizontal entrained bed by PIV

LI Zhi-he, YI Wei-ming, WANG Na-na

(School of Light Industrial and Agricultural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255049, China)

Abstract: A horizontal entrained bed made of transparent glass was design and built in order to study the movement characteristics of biomass granules. Using a non-instructive technique of Particle Image Velocimetry (PIV), the velocity fields of corn stalk granules which mesh size ranges from 60 to 160 were studied at the $1.9\text{m}^3/\text{h}$ volume flux of Argon gas. The mean velocity and time passing the horizontal entrained bed of the particles and Argon gas were obtained and the difference between the granules and the gas movement in mean velocity was analyzed. The researches show that the axial velocity of the granules accelerates along axis and especially, the central velocity along axis of the bed increased remarkably, while the velocity of the granules near the bed wall changes slowly. The velocity distribution of the granules flow is like a parabola along radius. The mean velocity of the granules is lower than the gas, so the time passing the bed is longer than the gas.

Key words: corn stalk granules; horizontal entrained bed; Particle Image Velocimetry; velocity field

符 号 说 明

X 沿轴向坐标, mm

Y 沿径向坐标, mm

U 轴向速度, m/s

V 径向速度, m/s

U_g 气体平均速度, m/s

U_p 颗粒平均速度, m/s

Q 体积流量, m^3/s

Q_u 床上半部分体积流量, m^3/s

Q_L 床下半部分体积流量, m^3/s

A 床截面积, m^2

T_p 颗粒流经床时间, s

T_g 氩气流经床时间, s

• 收稿日期: 2005-12-19; 修订日期: 2006-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576048)。

作者简介: 李志合(1975-), 男, 山东夏津人, 博士研究生, 研究方向: 后续能源。

0 引言

PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子图像测速仪) 作为一种近 20 年来发展起来的测试技术, 它实现了对测试对象的无接触测量, 与传统测试方式相比, 对测试对象无任何干扰, 尤其适合对流场的测试。近年来, 学者们应用 PIV 技术在多相流流场测试方面做了很多工作。Miyazaki 等人将 PIV 技术成功应用到水平管内螺旋气固两相流粒子运动^[1]。Daniel A. Steingart 利用 PIV 研究了颗粒流在两维漏斗中的流动特性, 并进行了数值模拟^[2]。魏名山等利用 PIV 研究了静电旋风除尘器内的流场以便深入研究清灰问题^[3]。张东东等人利用清华大学研制的粒子图像测速系统对出口内径为 10mm 的气固两相自由射流流场进行了实验研究^[4]。石惠娟等对循环流化床流场进行了实验研究^[5-7]。华中科技大学煤燃烧国家重点实验室王汉封等用 PIV 数据估算了槽道内湍流动能耗散率^[8]。浙江大学热能工程研究所李水清基于 DPIV 技术对回转圆筒内颗粒流场进行了可视化研究^[9]。

山东理工大学利用热等离子体进行了水平携带床内生物质快速热解液化制取生物油的研究^[10]。生物质颗粒在等离子提供的高温氩气携带下流经水平携带床, 并在床内发生热解, 颗粒在热解管中的停留时间即为热解时间。由于热解时间对热解产物有很大影响^[11-12], 实验中必须严格控制生物质的反应时间。以往实验根据氩气体积流量及热解管尺寸等, 利用理想气体理论计算氩气流经管道所需时间并作为生物质的热解反应时间, 即假设生物质颗粒与氩气流无滑移。然而, 这样的假设存在一定误差, 因此有必要对颗粒在床内流动情况进行研究。本研究利用 PIV 技术对水平携带床内的颗粒运动情况进行了测试, 获得了颗粒流的运动规律, 并计算出了颗粒流经水平携带床的时间, 为生物质热裂解研究提供了理论依据。

1 实验

1.1 实验装置

根据热解液化系统的结构和尺寸, 设计了一套 1:1 的透明有机玻璃水平携带床模拟装置, 如图 1 所示。该装置主要由水平管、旋风分离器、PIV 测试系统、计算机及其处理软件组成。其中, PIV 由北京立方天地科技发展公司开发, 配备 MicroVec 软件系统,

采用 FFT 互相关算法。捕捉图像的数码相机为 Nikon 公司生产的 PIV 专用 AF NIKKOR 数码相机, 最小镜头焦距 50mm, 图像分辨率 1600X1200, 最小光圈系数 1.4。

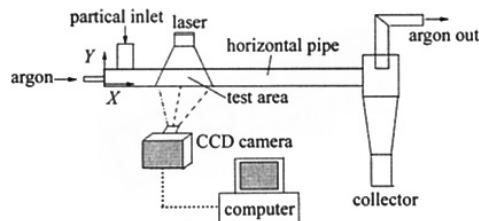


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic drawing of the experimental set-up

氩气由进气嘴通入水平管, 生物质颗粒由加料口加入。氩气携带生物质颗粒通过水平管, 经旋风分离器分离后落入集料箱, 气体排出外部。水平管内径 30mm, 壁厚 2mm, 管长 1m。进气口内径为 7mm, 进气口距喂料口中心为 30mm。

1.2 实验方法

选取管下壁为坐标原点, 水平方向为 X 轴正方向, 竖直向上为 Y 轴正方向建立坐标系, 如图 1 所示。激光片光从水平管上部垂直向下射向管道, CCD 相机拍摄光路与片光平面垂直。由于透明圆管对片光存在折射和反射, 为减小误差, 要合理选择材料。实验发现, 在测量圆管时, 有机玻璃管比玻璃管反射影响小。因边壁厚度对折射也有影响, 在保证强度的前提下, 边壁尽量薄。在管道测试区后面放一黑布, 可以吸收部分光减小透光反射。

实验物料为 60 与 160 目筛间玉米秸颗粒, 选用浙江上虞新光仪器厂生产的标准震动分样筛分离。实验中, 氩气流量 $1.90\text{m}^3/\text{h}$, 下料速率 $15 \sim 20\text{g}/\text{min}$ 。在 X 为 240 ~ 300mm, 400 ~ 460mm, 580 ~ 640mm, 725 ~ 785mm, 850 ~ 945mm 5 个测量段进行了测量。拍摄区域为 60mm × 45mm 矩形。实验中采用一次拍摄 50 对图像的方法, 将每对图像得到的速度分布进行叠加平均, 得到颗粒流在管道内的时均速度分布。

2 实验结果及分析

以 80 ~ 100 目颗粒为例对颗粒在管内的速度分布进行了详细分析, 对 60 ~ 80 目、140 ~ 160 目颗粒的速度分布进行了简要介绍。3 种颗粒在管内的速度分布趋势基本一致。

2.1 速度分析

图 2~3 为在 $X = 840\text{--}900\text{mm}$ 测得的颗粒轴向速度 U 和径向速度 V 分布云图。可以看出,径向速度 V 与轴向速度 U 相比很小,由于 V 对颗粒流通过管道的时间影响很小,因此,本研究不考虑径向速度 V ,只对轴向速度 U 进行研究。

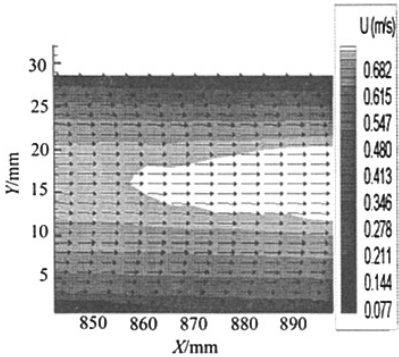


图 2 轴向速度分布云图
Fig.2 Sketch of the axial velocity distribution

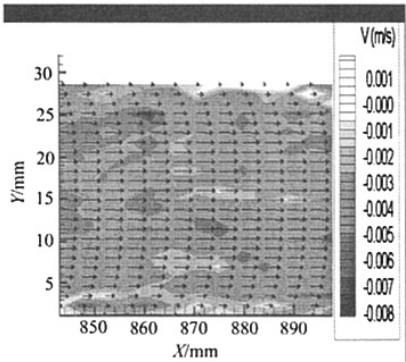


图 3 径向速度分布云图
Fig.3 Sketch of the radial velocity distribution

图 4 为对图 2 数据处理后得到颗粒流的轴向速度沿 X 向分布,可以看出,轴向速度沿 X 向不断增加,增幅约 0.04m/s 。图 5 为 $X = 860\text{mm}$ 截面处轴向速度沿 Y 向分布,表明轴向速度在 Y 向大致呈抛物线状分布,但管道上半部速度比下半部稍大,这点可以从图 6 清楚的看出。这是由于重力作用,管道内下半部分颗粒较多,浓度较大,增加了气流运动阻力的缘故。

图 7 为各测量段上管道中心颗粒沿 X 向速度分布,可以看出,管道中心的颗粒在各个测试段上,随运动距离的不断增加,沿 X 方向上各点的速度都会有所增加,而图 8 则显示了不同测试段的速度沿 Y 变

化趋势。各截面沿 Y 向速度分布趋势基本一致,大致呈抛物线形。而且在管道中心,即 $X = 15\text{mm}$ 处颗粒速度增加最为明显。

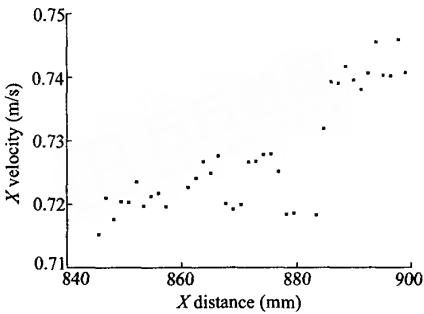


图 4 颗粒沿 X 向速度分布
Fig.4 Velocity distribution of the particles along X

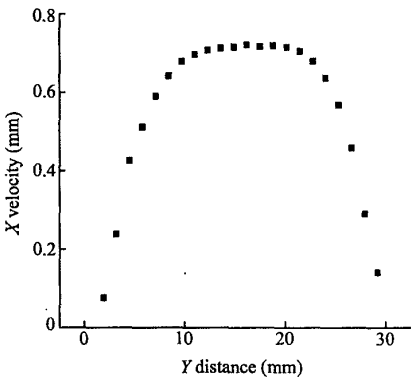


图 5 颗粒沿 Y 向速度分布 ($X = 860\text{mm}$)
Fig.5 Velocity distribution of the particles along Y ($X = 860\text{mm}$)

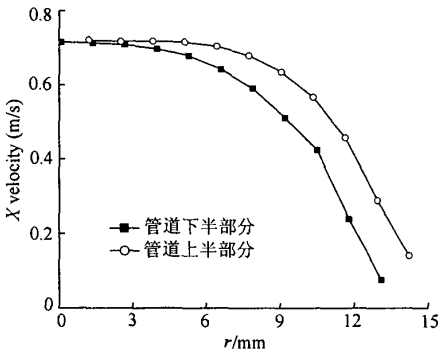


图 6 上半部与下半部 Y 向速度对比 ($X = 860\text{mm}$)
Fig.6 Comparison between the upper and lower velocyty along Y ($X = 860\text{mm}$)

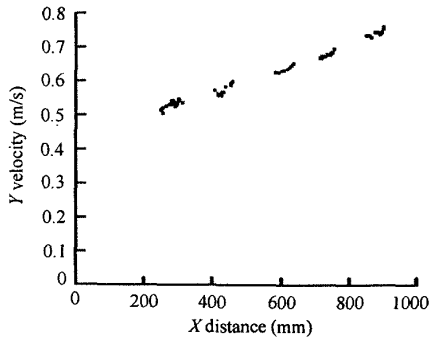


图7 不同测试段沿 X 向速度分布

Fig.7 Velocity distribution of different distance along X

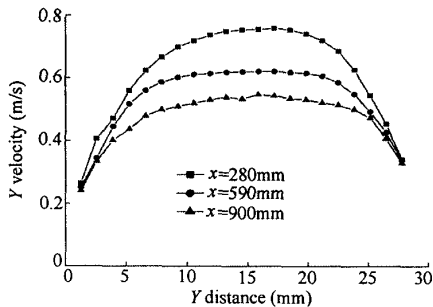


图8 不同测试段沿 Y 向速度分布

Fig.8 Velocity distribution of different distance along Y

2.2 不同粒径颗粒速度分布

分别在 X 为 345 ~ 405mm, 725 ~ 785mm, 880 ~ 945mm 测试段对 60 ~ 80 目和 140 ~ 160 目玉米秸颗粒的轴向速度进行了测量。测试结果表明:在不靠近边界的区域内,颗粒的速度分布趋势比较一致,沿 X 向速度不断增加,中心速度增加明显。图 9 显示的为 $X = 777\text{mm}$ 不同粒径颗粒的轴向速度沿 Y 的分布规律,可以看出,其沿 Y 向分布大致也呈抛物线形,各测试段的速度分布趋势基本一致。

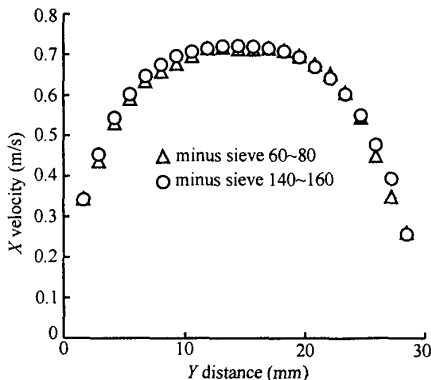


图9 不同粒径颗粒沿 Y 向速度分布的对比

Fig.9 Velocity comparison of different particle size along Y

3 颗粒跟随性分析

3.1 平均速度

为了获得颗粒通过管道所需的时间,需知道颗粒通过管道的速度。因为管内流体的流量可以通过对截面上各面积微元上的速度进行积分求得。而用流量除以截面面积即可得到该截面上平均速度。因此,可以将颗粒流看作沿 X 轴不断变化的流体,采用式(1)求出颗粒流在某截面上的流量。

$$Q = \frac{1}{2} \int_0^r 2\pi r U dr \quad (1)$$

以 $Q = 1.9\text{m}^3/\text{h}$, $X = 860\text{mm}$ 处的平均速度为例,由于管道上、下两部分的速度分布不同,所以应分别处理。利用(1)式对管道上半部分各位置处的速度进行积分,求出上半部分颗粒流的流量 Q_u 为 $1.71 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$,下半部分流量 Q_L 为 $1.28 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ 。所以,该位置处颗粒流的平均速度为:

$$U_p = \frac{Q_u + Q_L}{A} = 0.423\text{m/s}$$

用同样方法可以计算出其他位置处的平均速度。图 10 是计算出的该工况下六个位置处的平均速度。可以看出,该工况下,颗粒的平均速度沿 X 轴也是不断增大的。在 $X = 300\text{mm}$ 附近约为 0.36m/s 至 $X = 900\text{mm}$ 附近约为 0.425m/s 。

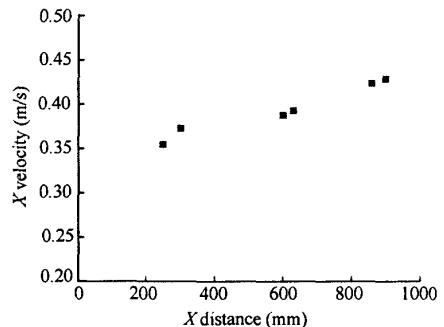


图10 颗粒沿轴向平均速度

Fig.10 Mean velocity of the particle of different axial position

3.2 时间分析

根据以上分析方法求得各测试段的平均速度,用各段距离除以平均速度分别计算时间,将各段时间相加可以得到颗粒通过 $X = 250\text{mm} \sim 1000\text{mm}$ 管道的总时间约为 $T_p = 1.95\text{s}$ 。而根据气体流量计算出氩气通过该段的平均时间约为 $T_g = 1.52\text{s}$ 。可见,颗粒流

通过该段距离的平均时间要略大于氩气的平均时间,或者说颗粒对氩气的跟随性并不一致。

4 结 论

颗粒在水平携带床内的径向速度 V 与轴向速度 U 相比很小,轴向速度 U 沿 X 方向不断增大,且在管道中心增加最为明显,轴向速度 U 沿 Y 向近似呈抛物线分布,管道上半部分颗粒的速度比下半部分稍大;在研究的粒径范围内,不同粒径的颗粒速度分布趋势基本一致。

玉米秸颗粒和氩气通过水平携带床的平均速度、平均时间不同,颗粒的平均运动速度比氩气的低,所以颗粒流通过该段距离的平均时间要略大于氩气的平均时间。快速热解研究中,在进行精确计算时不能用氩气流经水平携带床的时间代替热解时间。

参考文献:

- [1] KAORU Miyazaki, CHEN Gang, FUJIO Yamamoto, et al. PIV measurement of particle motion in spiral gas-solid two-phase flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999, 19(4): 194 ~ 203.
- [2] DANIEL A S, JAMES W E. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by Particle Image Velocimetry. Part I: experimental method and results[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(4): 1043 ~ 1051.
- [3] 魏名山, 马朝臣, 李向荣等. 用 PIV 进行静电旋风除尘器流场的测定[J]. *北京理工大学学报*, 2000, 20(4): 496 ~ 499.
- [4] 张东东, 许宏庆, 何枫. 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.
- [5] 石惠娴, 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.
- [6] 赵晓东. 循环流化床气固两相流动特性 PIV 测试[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [7] 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.
- [8] 王汉封, 柳朝晖, 郭福水等. 用 PIV 数据估算槽道内湍流动能散率[J]. *化工学报*, 2004, 55(7): 1065 ~ 1071.
- [9] 李水清, 严建华, 张志霄等. 基于 DPIV 技术回转圆筒内颗粒流场可视化研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(4): 56 ~ 60.
- [10] 易维明, 柏雪源, 何芳等. 利用热等离子体进行生物质液化技术的研究[J]. *山东工程学院学报*, 2000, 14(1): 9 ~ 12.
- [11] RAVEENDRAN K, ANURADDA, GANNESH, et al. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components[J]. *Fuel*, 1996, 75(8): 987 ~ 998.
- [12] LAPPAS A A, SAMOLADA M C, IATRIDIS D K, et al. Biomass pyrolysis in a circulating fluid bed reactor for the production of fuels and chemicals [J]. *Fuel*, 2002, 81(16): 2087 ~ 2095.