

下降管冷态热解液化实验台设计与应用*

杨延强¹ 易维明² 李志合² 柏雪源² 李永军² 崔喜彬²
(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

【摘要】 为了探索下降管式热解液化装置中生物质半焦和陶瓷球两种颗粒混合下落的运动规律,设计了下降管冷态模拟装置。通过冷态模拟,测试了陶瓷球和生物质半焦喂料器的稳定性和连续性,该装置能够实现两种颗粒的均匀、精确、连续喂料,能够满足实验所需要的两种颗粒的不同混合质量比的要求;PIV 实验测试表明,该装置能够满足实验需要;陶瓷球和生物质半焦的混合,消除了 PIV 用圆管测试时由于光的反射和折射问题在管道轴线两侧所形成的许多亮白条纹,提高了数据的准确性。

关键词: 热解液化 下降管 实验台 陶瓷球 生物质半焦
中图分类号: S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0130-05

Design and Experiment of Cold State Pyrolysis Equipment of a Down Flow Tube Reactor

Yang Yanqiang¹ Yi Weiming² Li Zhihe² Bai Xueyuan² Li Yongjun² Cui Xibin²
(1. School of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China
2. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract

The cold state PIV analog equipment was designed to explore the movement law of the biomass chars and ceramic balls mix flows in the down flow reactor. By simulating the cold state, the stability and continuity of the equipment of ceramic ball and biomass char, the equipment implements even, precise and continuous down the mix of two particles were tested; it satisfied the requirements of the two particles different mass proportions in the experiment; by testing, the equipment can satisfy the experiment; many bright and white stripes formed by the light's reflection and refraction in two sides of the round tube axes in PIV were avoided by using the biomass char, and the veracity of data were greatly enhanced.

Key words Pyrolysis, Down flow tube reactor, Experimental equipment, Ceramic ball, Biomass char

引言

生物质热裂解液化技术是国际上流行的一种生物质废弃物处理和利用技术^[1]。下降管式热解液化装置是国内具有自主知识产权的反应器,该反应器利用高温陶瓷球使生物质粉末在极高加热速率(达到 1 000℃/s 以上,也称为闪速加热)条件下快速热解。在如此快的升温速率下,生物质粉体颗粒进入反应管后迅速热解为生物质半焦,因此反应管

内实质上是生物质半焦与陶瓷球混合散体颗粒的换热。

在下降管内,生物质的热解不但受热解动力学控制,而且还受到颗粒流动与传热过程的影响,因此要研究下降管反应器内生物质的热解规律,必须对颗粒的流动规律进行研究。

国内外许多学者对散体颗粒流动规律进行了大量研究^[2~8]。本文为探索下降管内生物质半焦与陶瓷球混合散体颗粒的混合运动规律,设计下降管冷

收稿日期: 2010-05-24 修回日期: 2010-09-27
* 国家自然科学基金资助项目(50876056)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA05Z401)
作者简介: 杨延强,博士生,主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究,E-mail: yanqiang227@163.com
通讯作者: 易维明,教授,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,E-mail: yiweiming@sdut.edu.cn

态模拟实验台。

1 实验设备与仪器

下降管冷态模拟实验台由陶瓷球喂料器、生物质半焦喂料器、倾斜下降管、物料收集箱以及 PIV 测量系统等组成,如图 1 所示。

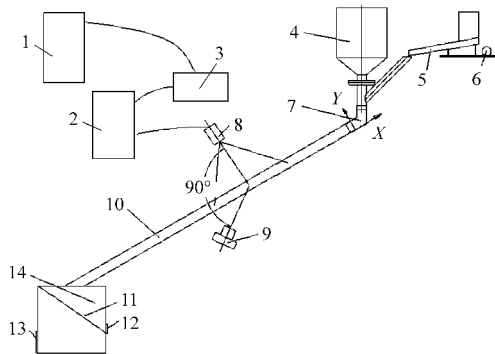


图 1 下降管冷态模拟实验台示意图

Fig. 1 Schematic of the down flow reactor's cold state analog equipment

1. 计算机数据采集装置 2. 激光发生器 3. 同步器 4. 陶瓷球喂料装置 5. 生物质喂料装置 6. 振动电动机 7. 弯头 8. 片光源 9. 相机 10. 测量管 11. 物料筛分装置 12. 陶瓷球出口 13. 生物质出口 14. 收集料斗

实验过程:打开 PIV 测量系统,调整好相机与激光位置;打开生物质半焦喂料器,将生物质半焦颗粒均匀送入下降管中,接着把陶瓷球以稳定的速率自喂料器垂直喂入下降管中;待下降管内的流场基本稳定后,采集图像并记录数据。

1.1 陶瓷球喂料器

陶瓷球喂料器(图 2)主体为不锈钢圆筒,下端是圆锥体,设计容量为 25 L,喂料器顶部与外界直接接触。一次加料的情况下,实验时间可达 1 h,长时间下料,有利于整个系统达到稳态。

陶瓷球喂料器的开关类似于汽车风门,在圆锥体下端直管侧壁上开两孔并攻丝,孔内穿一根螺杆,顶端有把手,在圆锥体下端直管内的螺杆加工成方形,其上固定一圆片,圆片随着螺杆的旋转可以上下

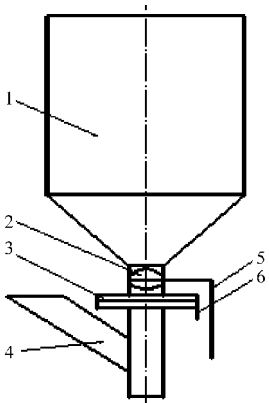


图 2 陶瓷球喂料器示意图
Fig. 2 Schematic of the feeder of ceramic ball

1. 料箱 2. 开关阀门 3. 法兰 4. 生物质半焦喂入管 5. 把手 6. 插板

下行至与圆管平行位置时,喂料器则打开,可使陶瓷球顺利下落。

逆时针旋转螺杆,圆片翻转,当螺杆到达卡座(卡座固定在支架上)时,正好关闭喂料器。

陶瓷球喂料器的喂料速率控制是由圆锥形筒体直管法兰处安装的一不同口径的插板实现的。散体从漏斗中下落的速率是由散体颗粒直径与漏斗出口直径的比值决定的^[8],因此在同一个插板下对于同一种粒径的陶瓷球颗粒流量是恒定的。通过更换不同孔径的插板,可以得到稳定的陶瓷球下落量。插板由一系列 0.5 mm 厚的圆形铁片组成,中心开有一圆形孔,孔的最小直径为 2 mm,最大为 20 mm。当需要改变流量的时候,只需更换插板就可以准确选择想要得到的陶瓷球流量。

1.2 生物质半焦喂料器

生物质半焦属于粉状物料,颗粒细、堆积密度低,且表面积大,不能依靠自身重力下料,易附着于物体表面,喂料较为困难。为实现均匀、稳定喂料,设计的生物质半焦喂料器由料斗、倾斜角度调节螺栓、振动电动机等组成(图 3);料箱设计容量为 3 L,一次加料情况下,实验时间可达 30 min,长时间下料,能保证喂料的稳定性;料斗是倾斜可调装置,利用调整螺栓调节料斗的倾斜角度以达到调节下料量的目的。

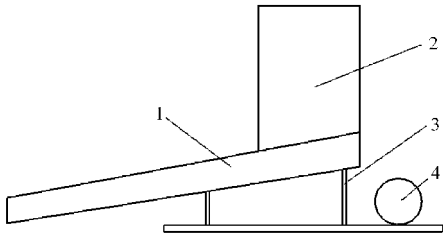


图 3 生物质半焦喂料器示意图

Fig. 3 Schematic of the feeder of biomass char

1. 料斗 2. 料箱 3. 调节螺栓 4. 振动电动机

1.3 测量系统

实验所采用的 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。其中激光器为 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 1 600 × 1 200,最小光圈系数 1.4;图像处理系统采用 FFT 互相关算法。实验时相机距被测流场 1 040 mm,片光源出口距离被测流场 700 mm。

2 冷态实验

2.1 实验物料

实验物料包括生物质半焦和陶瓷球。

生物质半焦以流化床热解玉米秸秆粉后的残炭(热解率为 63.46%)为原料,陶瓷球选用山东省淄博市华光陶瓷厂生产的氧化铝陶瓷球颗粒,实密度为 2 000~2 400 kg/m³,吸水率小于 0.5%,耐酸度大于 99%,耐碱度大于 95%。

首先要对生物质半焦和陶瓷球进行筛分处理。根据筛分结果,20 目以下生物质半焦只有 1.24%,20~140 目的生物质半焦占原料总质量的 59.18%,140 目以上粒径的虽然也占 39.58%,但由于其粒径太小很容易粘附在管壁上,对实验影响很大,故不予考虑。所以 20~140 目粒径的生物质半焦最具代表性。陶瓷球筛分粒径 d 分别为 1、2、3 mm。

2.2 冷态模拟喂料实验

为保证实验时生物质半焦和陶瓷球喂料量精确可控、散体颗粒下落均匀、质量比精确,先进行冷态的模拟喂料实验。

2.2.1 生物质半焦喂料器性能测试

通过调节螺栓调整料斗倾斜角 α 于 1°~10°,打开喂料器,用秒表记时,每隔 1 min 称量一次下料量,总共测量 8 min,求出生物质半焦喂料速率。

由图 4a 可以看出,在料斗不同倾斜角度下,喂料量与喂料时间呈线性关系,调节料斗的角度,可以精确控制喂料速率,如果要得到某个预定的下料量,则可以从图 4a 上查出其所对应的料斗角度,进行插值计算实现准确控制生物质半焦下料量。

图 4b 为料斗不同倾斜角度下,从喂料开始到料斗中 0.25 kg 生物质半焦完全喂入整个过程的喂料量与所用时间关系图。从图中可以看出同一倾斜角

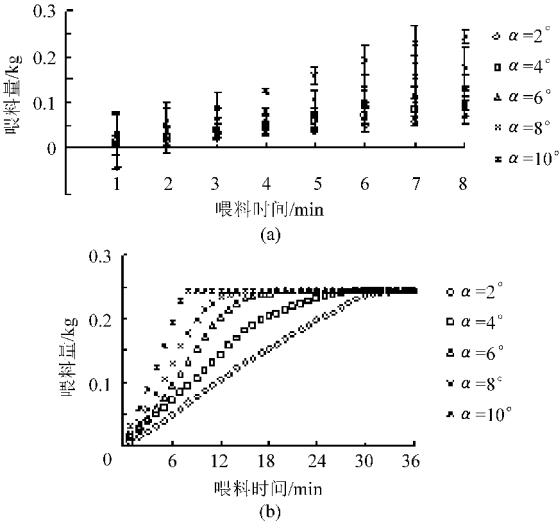


图 4 料斗不同倾斜角度下生物质半焦喂料量与喂料时间的关系
Fig. 4 Relationship between feed weight of biomass char and feeding time in different angles
(a) 不完全喂入 (b) 完全喂入

度下喂料量先是随着时间增加呈线性规律增加,到达某一点后,增加量随着时间增加而逐渐减小,直到不再增加,此时喂料结束。而其中增加量随时间增加而减小的那一点,正好料斗中的含料量高度小于出料口高度。

2.2.2 陶瓷球喂料器性能调试

首先关闭控制阀,放入插板,向陶瓷球喂料器中加入一定量同一粒径的陶瓷球,顺时针旋转控制阀至最大,使通过阀的流量远大于通过插板口径的流量,这样插板的开口直径就是决定陶瓷球流量的唯一因素。

实验采用的插板口径分别为 9、11、14 mm,对应的陶瓷球粒径分别为 1、2、3 mm,总共测量 4 min,每 30 s 记录一次下料量。

由图 5 可知,陶瓷球喂料器的喂料量与喂料时间呈线性关系,喂料量非常稳定,可以认为是一个稳态的量,这样能很好地保证陶瓷球与生物质半焦的喂料质量比。

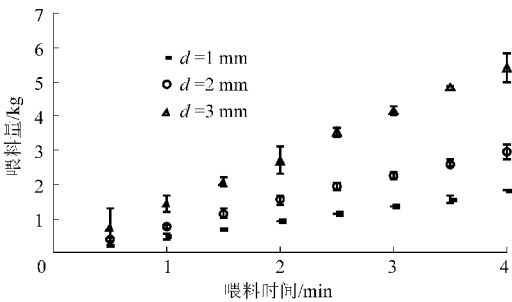


图 5 不同粒径陶瓷球喂料量与喂料时间的关系
Fig. 5 Relationship between feed weight of ceramic ball and feeding time in different diameters

2.3 PIV 实验

冷态模拟试验装置测量管是直径为 60 mm 的圆管,管长 1 600 mm。

2.3.1 透光特性实验

对粒径为 1 mm 的陶瓷球颗粒与生物质半焦质量比为 10:1 的混合颗粒进行了实验。

从图 6a 中可以看出由于光的反射、折射等原因,在管道轴线两侧形成许多亮白线条,严重影响数据处理结果,甚至导致无法获得准确的实验数据。图 6b 中可以看出光的反射、折射等影响所形成的条纹有所减弱。而在图 6c 中却基本无此现象,说明生物质半焦颗粒的加入大大消除了光的反射、折射等影响,从而提高了实验所获得数据的准确性。

2.3.2 速度分布特性实验

对稳定流动阶段粒径为 1 mm 的陶瓷球颗粒与生物质半焦质量比为 10:1、30:1 和 50:1 的混合颗粒

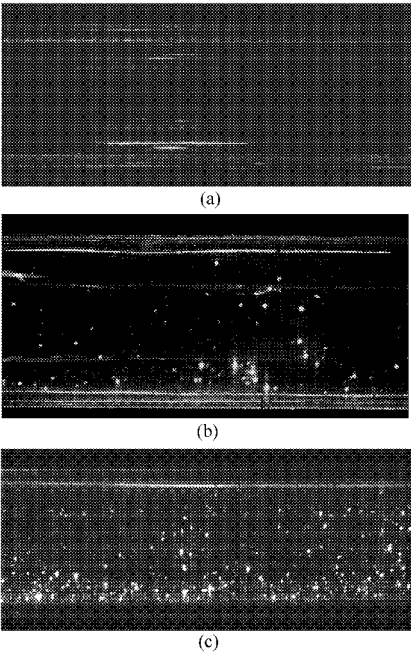


图 6 PIV 拍摄下降管所获得的图像

Fig. 6 Image of the down flow tube by PIV
(a) 不加料 (b) 单独陶瓷球
(c) 陶瓷球与生物质半焦混合

速度分布特性进行了 PIV 实验。结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出随着下降距离的增大,轴向时均速度也逐渐增大;轴向时均速度在径向归一化 0~1 范围内,都有速度梯度,但明显分为 3 部分,靠近上下管壁处的速度梯度要比中间部分大;同一截面内不同混合质量比的轴向速度大小也不相同。

在下降距离为 190 mm 处,由于混合颗粒流动处于紊乱流动阶段,因此相对于下降距离为 690 mm 和 1 190 mm 稳定流动阶段,其轴向时均速度分布规律并不明显;而在稳定流动阶段,随着混合质量比例的增大,轴向时均速度是逐渐增大的,其中陶瓷球在运动中起到了主要作用;但径向归一化 1 处,即管顶附近,基本没有陶瓷球,生物质半焦颗粒也很少,因此不管是运动距离还是质量比的变化对其轴向时均速度基本没有影响。

同一截面不同混合质量比下,其轴向时均速度分布形状基本一致。

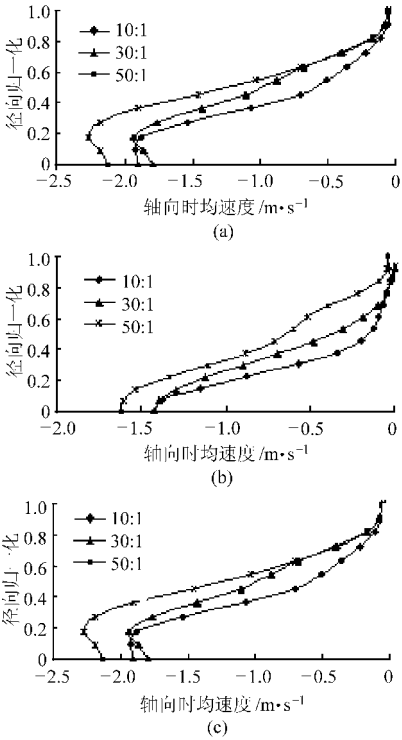


图 7 混合颗粒不同截面的轴向速度分布
Fig. 7 Axial velocity distribution of mixed granular in different sections
(a) 下降距离 190 mm (b) 下降距离 690 mm
(c) 下降距离 1 190 mm

3 结论

- (1)陶瓷球喂料器喂料量稳定、连续、易控,能够很好地满足实验所需的陶瓷球与生物质半焦的混合质量比的要求。
- (2)生物质半焦喂料器喂料量稳定、连续、易控制,可以通过标准曲线获得预定的喂料量。
- (3)陶瓷球和生物质半焦的混合,既使冷态实验更接近于实际,又消除了圆管进行 PIV 测量时由于光的反射、折射等原因在管道轴线两侧形成的许多亮白线条,提高了实验数据的准确性。
- (4)颗粒轴向时均速度分布规律在同一界面不同混合质量比基本一致,但其流动有一从紊乱流动到稳定流动的过程。

参 考 文 献

1 易维明, 柏雪源, 李志合, 等. 玉米秸秆粉末闪速加热挥发特性的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 246~250.
Yi Weiming, Bai Xueyuan, Li Zhihe, et al. Investigation of devolatilization characteristics of pulverized corn stalk at flash heating rate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 246~250. (in Chinese)

2 Hungr O, Morgenstern N R. Experiments on the flow behavior of granular materials at high velocity in an open channel [J]. Geotechnique, 1984, 34(3): 405~413.

3 Savege S B. Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 92(1): 53~96.

4 Ishida M, Shirai T. Velocity distribution in the flow of solid particles in an inclined open channel [J]. Journal of Chemical

- Engineering of Japan, 1979, 12(1): 46 ~ 50.
- 5 Drake J G. Structural feature in granular flows [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B6): 8 681 ~ 8 696.
- 6 张洲波, 谢洪勇, 胡大鹏. 颗粒在斜槽中流动的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(6): 1 ~ 4.
Zhang Zhoubo, Xie Hongyong, Hu Dapeng. Experimental study on flows of granular materials downinclined chute [J]. China Powder Science and Technology, 2001, 7(6): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 7 何芳, 易维明, 李永军, 等. 固体热载体和生物质粉沿倾斜管流动和传热的计算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 190 ~ 193.
He Fang, Yi Weiming, Li Yongjun, et al. Flow and heat transfer of mixture of solid media and biomass in inclined tube [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 190 ~ 193. (in Chinese)
- 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 11 ~ 14. (in Chinese)
- 9 袁廷璧, 易维明, 李志合, 等. 竖直下降管换热实验台改进设计与实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 107 ~ 111.
Yuan Tingbi, Yi Weiming, Li Zhihe, et al. Improved design and experiment of heat transfer platform for a down-flow tube [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 107 ~ 111. (in Chinese)
- 10 李志合, 刘焕卫, 高巧春, 等. 垂直下降管散体颗粒换热实验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 100 ~ 104.
Li Zhihe, Liu Huanwei, Gao Qiaochun, et al. Design and experiment of downward vertical tube for heat transfer of particles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 100 ~ 104. (in Chinese)
-

(上接第 90 页)

- 4 Li Guangyong, Wang Jiandong, Alam M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 637 ~ 643.
- 5 王建东. 滴头水力性能与抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Wang Jiandong. Study on the hydraulic and anti-clogging performance of emitters [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 6 王冬梅. 迷宫迷宫滴头流道结构形式和尺寸对水力及抗堵塞性能的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
Wang Dongmei. Study on the hydraulic and anti-clogging performance of flow-passage form and size of labyrinth emitters [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 8 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 51 ~ 55.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 51 ~ 55. (in Chinese)
- 7 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 45 ~ 51.
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. CFD numerical simulation and PIV verification about the movement of solid particles in labyrinth channel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 45 ~ 51. (in Chinese)
- 9 ISO/TC23/SC18/WG5N4 Clogging test methods for emitters [S]. 2003.
- 10 穆乃君, 张昕, 李光永, 等. 内镶片式齿型迷宫滴头抗堵塞试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 34 ~ 38.
- 11 Terence Allen. Particle size measurement. Powder technology series [M]. New York: Chapman and Hall, 1981.
- 12 Djamarani K M, Clark I M. Characterization of particle size based on fine and coarse fractions [J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 101 ~ 108.
- 13 傅琳, 董文楚, 郑耀泉, 等. 微灌工程技术指南 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 71 ~ 74.
- 14 顾烈烽. 滴灌工程设计图集 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2005: 10 ~ 11.
- 15 Jackson R C, Kay M G. Use of pulse irrigation for reducing clogging problems in trickle emitters [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, 37(8): 323 ~ 327.