

下降管式生物质快速热解实验装置设计与实验*

崔喜彬 李志合 李永军 易维明 柏雪源

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

【摘要】 为了确定在固体热载体加热方式下反应温度和停留时间对生物质热解挥发特性的影响,设计了陶瓷球热载体加热下降管式生物质热解实验装置,并进行了生物质热解挥发特性实验。该实验装置能够对反应温度进行精确控制,实现生物质粉和陶瓷球热载体按比例连续均匀喂料及热解残炭样品的采集。实验物料为玉米秸秆粉,反应温度分别为450、500、550℃。停留时间通过反应物在反应管内下降距离间接测量,下降距离分别为150、550、850、1 150 mm。利用灰分示踪法计算得到了不同条件下生物质的热解挥发率。实验结果表明:玉米秸秆粉的热解挥发率随着热解温度的升高、下降距离的加长而非线性增大。

关键词: 生物质能 热解 挥发 下降管 设计 实验

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0113-04

Design and Experiments of a Down-flow Tube Reactor for the Pyrolysis of Biomass

Cui Xibin Li Zhihe Li Yongjun Yi Weiming Bai Xueyuan

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

Abstract

In order to investigate the effects of reaction temperature and reaction distance on the pyrolysis volatilization characteristics of biomass in a down-flow tube reactor, a ceramic ball heated down-flow tube reactor was designed and fabricated, and biomass pyrolysis experiments were conducted in the reactor. The experimental apparatus could control the reaction temperature precisely, feed the biomass and heat carrier evenly and continuously. Pulverized corn stalk powder was used as the feed stock. Reaction temperatures were 450℃, 500℃ and 550℃. The falling distances, which was the indirect measure of the residence time, were 150 mm, 550 mm, 850 mm and 1 150 mm. Ash tracer method was used to calculate the volatilized fractions of the pyrolyzed biomass at different experimental conditions. The experimental results showed that the volatilized fraction of corn stalk powder increased nonlinearly with the increase of reaction temperature and residence time.

Key words Biomass energy, Pyrolysis, Volatilization, Down-flow tube, Design, Experiment

引言

生物质快速热裂解液化是在中温、绝氧、高升温速率、极短的气相停留时间条件下利用热能使生物质的分子结构裂解为小分子气态产物,经过迅速冷却气态产物中的可冷凝成分,从而得到生物油液

体燃料的一项技术。热解是生物质材料进行热化学转换的第一步,它受如生物质的组分、粒径、热解温度及加热速率等诸多因素的影响^[1~11]。生物质热解机理在热解工艺的制定和热解设备的设计中起着重要作用。利用固体热载体与生物质颗粒之间温差实现生物质颗粒的快速升温热解,这种典型工艺具

收稿日期: 2010-03-25 修回日期: 2010-06-17

* 国家自然科学基金资助项目(50875056)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA05Z401)

作者简介: 崔喜彬,硕士生,主要从事生物质热裂解技术研究,E-mail: cuixibin999@163.com

通讯作者: 柏雪源,教授,主要从事生物质热裂解液化技术研究,E-mail: baixy@stdu.edu.cn

有较高的传热效率和液体转化率。相对于流化床工艺,该工艺无需引入其他惰性气体介质,不但节约成本,而且大大降低了冷却系统的负荷,节约了能耗。为了研究固体热载体加热下降管式生物质热解挥发特性实验装置,分别对不同热解温度和固相颗粒在不同下降距离处的玉米秸秆粉热解挥发特性进行实验研究。

1 实验台的结构与原理

下降管生物质快速热解特性实验装置结构如图 1 所示。主要组成部分包括:陶瓷球加热器、温度测控系统、颗粒喂料器、下降管、陶瓷球与残炭分离箱、陶瓷球收集箱、冷却系统、热解碳粉取样系统。

1.1 加热系统

加热系统包括:采用硅碳棒加热陶瓷球加热器;采用电阻丝加热下降管保温系统。

1.1.1 陶瓷球加热器加热

作为热解主热源的陶瓷球采用硅碳棒加热,每根 $2.3\ \Omega$,3 根串联为一相,加热方式为 380 V 三相星型。温度采用温控仪表可控硅三相半控调压方式控制。硅碳棒插放在陶瓷球加热器内部均匀布置的 9 根保护套管内,保护

套管和硅碳棒间使用耐高温绝缘陶瓷管绝缘,结构示意图如图 2 所示。陶瓷球加热器中间有螺旋搅拌器,加热过程中缓慢转动,将中心区域陶瓷球向上提升,外侧陶瓷球在重力作用下向下滚动,保证陶瓷球受热均匀,避免因局部温度过高,导致陶瓷球融化结渣,影响陶瓷球下料。陶瓷球加热器外壁包有保温材料,以减少热量的散失。

1.1.2 下降管反应器保温

陶瓷球和生物质粉末在反应器中发生热解反应,因为整个反应过程是吸热反应,为了保证下降管反应器内部温度场的稳定,所以在下降管外壁用电阻丝加热辅助保温,电炉丝选用镍镉材料,直径为 1.5 mm,电炉丝上穿有直径为 2 mm 的绝缘陶瓷珠。

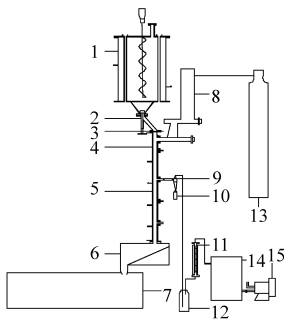


图 1 陶瓷球固体热载体下降管式生物质热解特性实验装置结构图
Fig. 1 Scheme of ceramic ball heated down-flow tube for pyrolysis characteristics of biomass

- 1. 陶瓷球加热器 2. 陶瓷球流量开关 3. 陶瓷球流量控制板 4. 下降管反应器 5. 热电炉丝 6. 陶瓷球残炭分离箱 7. 陶瓷球收集箱 8. 生物质喂料器 9. 旋风分离器 10. 集碳器 11. 转子流量计 12. 过滤器 13. 氩气瓶 14. 稳压灌 15. 抽气风机

温度采用温控仪表可控硅单项调压方式控制,下降管反应器外壁包有保温材料,以减少热解过程中温度的变化对实验的影响。

1.2 颗粒喂料器

实验要求陶瓷球和生物质粉能够准确、可控、连续、均匀、稳定地喂料,因此根据陶瓷球和生物质粉各自的物性特性,分别设计陶瓷球喂料器和生物质粉喂料器。

1.2.1 陶瓷球喂料器

陶瓷球直径 1~2 mm、流动性较好的球形体,具有绝缘好、热惯性大等特点,但受到强力挤压易破碎,流量控制困难。实验中设计了陶瓷球喂料器,如图 3 所示。陶瓷球流量由陶瓷球流量开关和流量控制板控制,陶瓷球流量开关控制喂料与否,而陶瓷球流量大小由陶瓷球流量控制板控制。

1.2.2 生物质粉喂料器

由于生物质粉料的特殊性质,使得生物质粉在喂料箱里容易发生架桥现象,从而使得喂料不均、甚至中断,难以保证喂料的准确、可控、连续、均匀、稳定性。实验中生物质粉喂料器采用两级螺旋加气力输送式喂料。两级螺旋减速变速电动机由变频器控制,第 1 级喂料器实现喂料量的精确控制,第 2 级喂料器保证把第 1 级落料能快速、连续地输送到反应器中,因此,第 2 级喂料器的转速要高于第 1 级,以保证不产生积料,堵塞管道。

1.3 下降管反应器

反应器结构如图 4 所示。反应器长 1 500 mm,反应器内径 61 mm,壁厚 3 mm。在反应器上生物质下料距

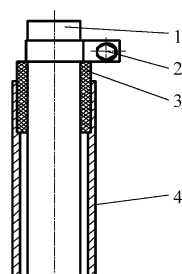


图 2 硅碳棒保护结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the silicon carbide heater protection

- 1. 硅碳棒 2. 接线端子 3. 绝缘陶瓷管 4. 保护套管

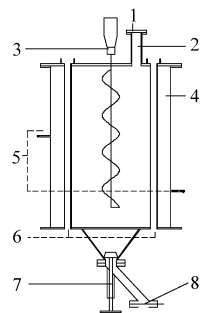


图 3 陶瓷球储料筒
Fig. 3 Ceramic ball cylinder

- 1. 联结法兰 2. 陶瓷球加料口 3. 陶瓷球螺旋搅拌器 4. 陶瓷球储料箱 5. 温度测控传感器插孔 6. 硅碳棒插孔 7. 陶瓷球流量开关 8. 陶瓷球流量控制板

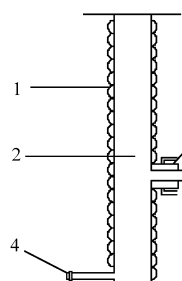


图 4 下降管反应器
Fig. 4 Down-flow tube reactor

- 1. 电阻丝 2. 下降管反应器内径 61 mm,壁厚 3 mm。3. 水冷系统 4. 温度测控传感器插孔 5. 取样口

离为 150、550、850、1 150 mm 处分别留有残炭取样口,并且在管壁另一侧有 4 个间隔 200 mm 均匀分布的温度测控孔,用来安放测温 and 控温传感器。各残炭取样口采用水冷却,终止取样残炭进一步热解。

1.4 热解残炭采样系统

样品的采集是整个实验的关键,根据实验要求,实验专门设计了热解残炭采样系统。热解残炭采样系统的原理是利用旋风分离器的分离作用把在某种工况下发生热解的生物质残炭收集在积炭器里。抽气风机的抽气量可调节,实验中抽气量为 1.5 m³/h;流量计显示抽气量大小;过滤器的作用是过滤生物质热解过程中产生的生物油和部分残炭,避免生物油和残炭进入流量计,影响流量计精度;稳压管起到稳定气压的作用。

1.5 陶瓷球残炭分离箱

陶瓷球残炭分离箱的作用是把解热后的陶瓷球和残炭进行分离,以使陶瓷球热载体中不会大量混入炭粉,以保证热载体的循环利用和实验中残炭样品的纯度。在分离箱内斜放一筛网,筛网的孔径大小可以透过生物质残炭,而不能透过陶瓷球。当陶瓷球和反应后的残炭混合颗粒从下降管落到筛网上时,在重力作用下沿筛网向下流动,流动过程中残炭落入筛网下面,而陶瓷球则沿着分离箱的出口流入陶瓷球收集箱。分离箱外壁包有保温材料,以减少热量损失对反应器管温度的影响。

2 实验

2.1 实验材料

实验所用样品是 40~46 目的玉米秸秆粉,具体制备过程如下:把自然干燥的玉米秸秆用高性能粉碎机磨成很细的粉末,粒度达到 120 目。用标准分样筛筛分玉米秸秆粉,取 40~46 目的 0.5 kg 生物质粉末在 105℃鼓风干燥箱干燥 24 h 后待用。40~46 目玉米秸秆的堆积密度为 157.5 kg/m³,含水率为 8.19%。

实验所用陶瓷球颗粒:直径为 2~3 mm;形状球形;实堆积密度 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%。

2.2 生物质喂料实验

控制陶瓷球和生物质粉连续准确喂料,是研究生物质热解特性的重要条件,只有生物质和陶瓷球连续均匀准确下料,实验才有可能顺利进行。通过设定第一级喂料电动机的频率来控制喂料器的喂料量,通过实验得到玉米秸秆的喂料量与时间的关系曲线,如图 5 所示。电动机喂料量与电动机频率的关系曲线,如图 6 所示。

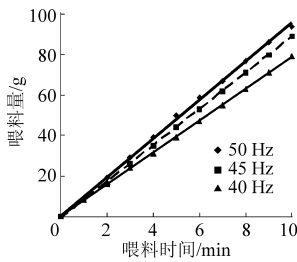


图 5 玉米秸秆粉喂料量与时间的关系曲线

Fig. 5 Biomass feeding rate of corn stalk powder vs time

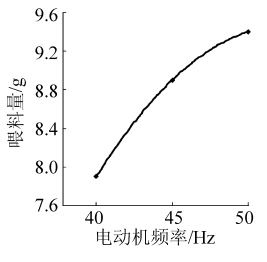


图 6 玉米秸秆粉喂料量与电动机频率的关系曲线

Fig. 6 Corn stalk powder feeding rate vs motor frequency

2.3 陶瓷球喂料实验

陶瓷球喂料量由陶瓷球流量控制板决定,通过实验得到 14 号流量控制板与喂料时间的关系曲线,如图 7 所示。

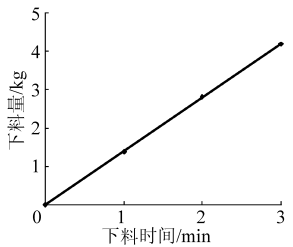


图 7 陶瓷球流量与时间的关系曲线

Fig. 7 Ceramic ball feeding rate vs time

3 热解特性实验

3.1 实验设计与结果

分别对 450、500、550℃ 温度和 150、550、850、1 150 mm 反应距离处的玉米秸秆粉的热解挥发特性进行实验。

实验过程以 500℃、150 mm 为例:开冷凝水,预热陶瓷球和下降管,当温度稳定在 500℃ 时,旋转陶瓷球流量开关喂入陶瓷球,通过温度采集系统观察下降管温度,当下降管温度场均匀稳定后,通氩气,启动二级喂料电动机、一级喂料电动机,生物质粉和热的陶瓷球在下降管反应器内发生快速热解反应,启动抽气风机,气相和热解残炭在残炭采样口被抽出,经过旋风分离器的分离作用把残炭收集在积炭器里,直到收集足够的残炭,再进行下一个位置取样,而气相先后还要经过滤器、转子流量计、稳压灌和抽气风机。把得到的残炭随机取样,利用灰分示踪法^[12]得到生物质在不同工况下热裂解挥发率。

按照上述实验设计进行了实验,结果如图 8 所示。

3.2 反应温度和下降距离与热解挥发率的关系

从实验结果可以看出,在同一反应距离的条件下,随着反应温度的增加,生物质热解挥发率呈非线性升高;在同一反应温度条件下,随着反应距离的增加,挥发率也呈非线性增大趋势。其中反应温度为 450℃、反应距离为 150 mm 时挥发分析出量最低为 34.5%,当反应温度为 550℃、反应距离为 1 150 mm 时挥发分析出量最高为 65.2%。因此,反应温度和

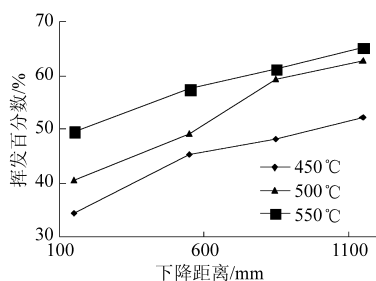


图 8 热解温度和反应距离对生物质挥发分的影响

Fig.8 Volatilized fractions of the pyrolyzed biomass
vs reaction distance at different reaction temperatures

反应距离是影响挥发分析出的重要参数,并且随着反应温度的增加和反应距离的加长生物质挥发分析出百分数还会进一步增加。

4 结束语

实验表明,所设计的实验装置能够实现固体颗粒的连续均匀喂料和样品的采集、同时温度控制精确、操作简单;生物质的热解挥发程度随着热解温度的升高、反应距离的增加而非线性增大。

参 考 文 献

- 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)
- 姚建中,陈洪章,张均荣,等. 玉米秸秆快速热解[J]. 化工冶金,2000,21(4):434~437.
- Xiu S N, Yi W M, Li B M. Flash pyrolysis of agricultural residues using a plasma heated laminar entrained flow reactor[J]. Biomass and Bioenergy, 2005,29(2):135~141.
- Putun A E, Apaydm E, Putun E. Rice-straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis[J]. Energy, 2004, 29(12~15):2171~2180.
- Yagi S, Kunii D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds[J]. AIChE, 1957, 3(3):373~381.
- 刘铁峰,房倚天,王洋. 煤高温快速热解规律研究[J]. 燃烧化学学报,2009,37(1):20~25.
Liu Tiefeng, Fang Yitian, Wang Yang. Rapid pyrolysis of coal at high temperature[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(1):20~25. (in Chinese)
- 傅旭峰,仲赵平,肖刚,等. 生物质在流化床中热裂解的实验研究[J]. 动力工程,2009,29(6):585~589.
Fu Xufeng, Zhong Zhaoping, Xiao Gang. et al. Experimental study on biomass pyrolysis in fluidized bed [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(6):585~589. (in Chinese)
- 易维明,王丽红,柏雪源,等. 层流炉温度的检测与控制[J]. 可再生能源,2004(3):15~17.
Yi Weiming, Wang Lihong, Bai Xueyuan, et al. Temperature measurement and control in a laminar furnace[J]. Renewable Energy, 2004(3):15~17. (in Chinese)
- 李志合,易维明,李永军. 等离子体加热流化床反应器的设计与实验[J]. 农业机械学报,2007,38(4):66~69.
Li Zhihe, Yi Weiming, Li Yongjun. Design and experimental study of fluidized bed heated by plasma flow jet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):66~69. (in Chinese)
- 崔喜彬,李志合,易维明,等. 下降管式生物质快速热解反应器温度场控制与检测[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊)133~136.
Cui Xibin, Li Zhihe, Yi Weiming, et al. Control and measurement of temperature field in a down-flow tube reactor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):133~136. (in Chinese)
- 袁廷璧,易维明,李志合,等. 垂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)
- 易维明,柏雪源,李志合,等. 玉米秸秆粉末闪速解热挥发特性的研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):246~250.