

移动式生物质快速热解反应器的设计及流态化模拟

司慧, 王霄

北京林业大学工学院, 北京 100083

摘要 快速热裂解是最有发展潜力的生物质能源转化技术之一。移动式快速热裂解设备以移动工厂化的作业方式将分散的生物质就地转化为高品质生物油, 大大减少了原料的运输成本。本文对移动液化装置的关键设备——反应器进行了结构设计, 将燃烧室与反应器合为一体, 二者之间的环形区域形成反应器的工作区; 并采用 Fluent 6.2 软件分别对传统和所设计的反应器进行了流态化模拟。结果表明, 冷态条件下, 两种反应器的流态化效果非常接近, 新型反应器完全能够满足工作要求。而与传统反应器相比, 新型反应器具有热效率高、结构紧凑、操作简便等特点, 适用于移动作业。

关键词 快速热裂解设备; 移动式; 反应器; 流态化模拟

中图分类号 TQ051.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.33.007

Reactor Design of Mobile Fast Pyrolysis Apparatus and Its Simulation for Fluidization

SI Hui, WANG Xiao

College of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Fast pyrolysis is seemed to be an important approach to produce the energy from biomass. Bio-energy offers a clean, renewable source of energy. Its impressive potential makes this technology develop fast. Mobile fast pyrolysis apparatus works as a mobile plant. It could convert the biomass into bio-oil with high quality which will be used to produce other products. The mobile apparatus is designed to have the mobility in order to collect the biomass dispersed in the fields. In this way, the cost of raw materials transportation will be largely reduced. The reactor which is the key component of this apparatus is designed. This new type of reactor is a combination of combustion chamber and reaction space. An annular reacting area is provided by the special structure of the reactor. This construction makes the reactor small enough to seize the space need by the whole equipment. The software of Fluent 6.2 is used for the digital simulation of fluidization condition in the traditional reactor and the new one. The results show that the fluidization effects of these two reactors are almost same under the cold condition. The new type of reactor is proved that is adequate to the job. Comparing with the traditional reactor, the new one has the characteristics of high thermal efficiency, compact, easy operation, etc, which make it well suite to the mobile operation.

Keywords fast pyrolysis apparatus; mobile; reactor; simulation of fluidization

0 引言

快速热解液化技术能够将生物质原料连续地转化为高能量密度、易储存且使用方便的生物油。作为清洁的液体燃料, 生物油可以用于锅炉燃烧和燃气透平等设备, 精制后可

作为动力或交通工具燃料, 还可以直接作为化工原料或通过精炼提取高附加值的化工产品。其副产品不可冷凝气体可作清洁燃气。热解炭是制备活性炭的良好原料, 还可以用作颗粒燃料、肥料、固体稳定剂等。被世界公认是最有发展潜

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2011-11-21

基金项目: 国家林业局 948 引进项目 (2012-4-19); 科技部农业科技成果转化资金项目 (2010GB23600654)

作者简介: 司慧, 副教授, 研究方向为生物质能源化利用技术、机械设计及理论, 电子信箱: sihui@bjfu.edu.cn

力的生物质能源转化技术之一。但是生物质资源分散、运输成本高,难以被大规模高效利用。而移动式快速热解液化设备可以深入生物质资源较为丰富的林场、村落,将分散的林木生物质就地转化为高密度的液态生物油,可在当地利用,也可集中储存、后续加工利用。这种移动工厂式的作业方式可以大大降低林木生物质长距离的收集、运输成本,提高设备的利用率和运行经济性。

20世纪90年代末开始了对移动式快速热解设备的研究,标志性的研究成果出现在21世纪。2002年,美国密西西比州立大学和Renewable Oil Internationals LLC (ROI)公司研发出移动式快速热解设备,可以实现移动工厂化作业。该设备带有原料处理系统,可以将原料筛选、磨碎、干燥处理后投入反应器,但系统规模大,结构相对复杂;2004年,WIPO PCT公开了一种车载移动式生物质热裂解设备专利,其中涉及到的热解反应器为离心烧蚀式,可以利用较大粒径原料,但反应器内有运动部件,结构较复杂。2007年加拿大Agri-Therm公司研制出农用可移动热裂解设备,反应器中使用了特殊的竖(升)管,使换热效率得以提高。国内华中科技大学在2007年研究出一种移动式生物质热解液化系统,采用流化床反应器,通过气化燃烧和热解不凝气等供热,能量可以部分自给,目前没有工业化应用。这些研究成果,特别是Agri-Therm公司的设备,可由拖拉机等交通运输工具拖运至各类不同地域,转场时不需要卸载,使快速热解液化工艺技术相对固定,加快了生物质热解技术的工业化进程。而存在的主要问题是:(1)整体设备,特别是反应器结构相对复杂;(2)正常热解反应时,自供热系统还不能完全可靠、稳定的供给能量^[1-5]。

本文对移动式快速热解液化设备的反应器进行了设计,并进行了冷态工作模拟。其目的是使设备结构紧凑、操作方便、热效率高、适用于移动作业,从而能够为农林生物质提供一条可行的高效利用途径。

1 反应器结构分析

移动液化装置中的关键设备是热解反应器。由于原料种类和生产场所等会发生变化,因此反应器需要满足更高的要求。反应器应具有良好的适应性,既能实现生物质高效转化,又能满足系统布置方便、结构紧凑、能量利用率高等要求。在各种生物质热解反应器中,流化床反应器具有结构简单、传热效率高、原料适应性广、设备体积小、控制方便、加热速率快等优点,无论是理论研究还是实际应用中都是使用最广泛的热解反应器,符合移动设备要求^[2-5]。

因此,本设计采用流化床反应器,但在结构上进行了改变:将反应器与燃烧室合二为一。二者同为等高圆柱形体,燃烧室位于反应器中央,其外壁与反应器内壁之间的环形区域形成热裂解反应区。利用反应器和燃烧室共用的器壁可以直接传热,使热效率更高;另外,反应器和燃烧室合并为一体,可以节省空间,从而使整体结构更加紧凑,适用于移动作业。

2 反应器及燃烧室结构设计

2.1 基本参数

该移动热解设备的生产能力为100kg/h。经计算最小流化速度 u_{mf} 为0.061m/s;颗粒的带出速度 u_t 为8.561m/s;操作速度 u 为0.67m/s;压力降 Δp 为2.32kPa。所需功率为 P ,主要是指反应器升温阶段的功率,包括床体升温所需功率、床料升温所需功率、循环流化气体升温所需功率、生物质升温及热解反应所需功率等(这个过程时间较短,约30min)。经过计算,取加热功率为90kW^[6]。而在正常工作阶段所需功率比这个数值要小得多,甚至不需要外加能源,视加热方式、加热介质温度、保温效果等因素而定。

2.2 燃烧室内径

通过对反应器功率 P 、燃料热值 q 、空气与燃料体积比 n 、燃烧室流化速度(取操作速度 u)的计算,取燃烧室内径 d_b 为220mm。

2.3 反应器内径

参照北京林业大学设计的生产能力分别为5kg/h、35kg/h的快速热解设备及中试生产线^[6-7],可得反应区横截面面积 A_r 为

$$A_r = \frac{100}{5} \times A' \approx 157079.63 \text{ mm}^2$$

考虑该移动式装置为环形反应区,可得反应器直径 d_r 为

$$d_r = 2 \sqrt{\frac{A_r + A_b}{\pi}} = 501.98 \text{ mm}$$

取

$$d_r = 500 \text{ mm}$$

其中, A' 为5kg/h反应器横截面面积, A_b 为燃烧室横截面。

2.4 反应器高度

根据操作速度和驻留时间,确定反应器(及燃烧室)的高度为900mm。

2.5 布风板

布风板的作用是:(1)均匀分布气体,使分布板孔道上下两端压降一致。由于分布板下端各点气体的动压头和分布板上端各点气体受床层波动影响的静压头不同,须使分布板压降远远超过上述压头偏差,使各孔道流速一致,气流分布均匀;(2)支承物料。在流化床反应器长期运行或突然停车状况时,分布板不泄漏不堵塞;(3)整流和稳定作用。使流化床反应器有一个良好的起始流态化状态,能在分布板附近形成一个好的气固接触氛围^[8]。

2.5.1 开孔率

目前生产中采用的开孔率由0.03%—10%不等,范围很宽。采用较大开孔率首先是套用了筛板塔的开孔率;其次是限制气体出气孔的速度在生成连珠泡气速之下。除此之外,气体布风板开孔数不宜过多,过多可能造成部分孔不出气,使出气不均匀^[9]。根据过往经验,在现有操作速度下,开孔率为1%较为合适。

2.5.2 流化孔直径

当排列形式相同时, 开口直径越小, 流场速度分布达到稳定越快, 同时压降越大^[8]。根据经验, 流化孔直径为 2mm 较为合适。

2.5.3 流化孔排列形式

当布风板开口直径相同时, 三角形排列比正方形排列更容易使流体速度达到稳定, 出口速度大小基本不受排列形式影响, 压力损失较小。所以采用三角形排列形式^[9]。

因此, 根据以上结论可得, 该反应器圆环形布风板流化孔总数为 462, 以边长为 19mm 的等边三角形均匀排布。

2.6 结构图

反应器 (包括燃烧室) 结构如图 1 所示。

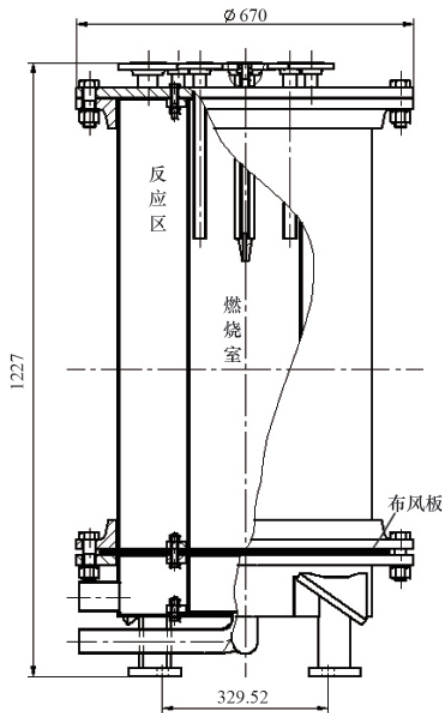


图 1 反应器结构 (单位: mm)
Fig. 1 Structure of reactor (Unit: mm)

3 反应器流态化模拟

采用 Fluent 6.2 软件对圆柱形和圆环形反应器的流态化效果进行动态模拟。

两种反应器容积相等, 同时进行冷态环境下的模拟。设流化载气为空气, 流化风速为 2m/s, 床料为石英砂, 其堆积高度为反应器高度的 15%, 所处环境为常温常压。空气和石英砂的物性如表 1 和表 2 所示。

3.1 模型建立

根据已知参数构造出圆柱形和圆环形两种反应器的外形结构, 综合考虑初始化时间、计算花费和数值耗散等因素后, 将圆柱形反应器的几何结构划分成“Hex & Cooper”(六面

表 1 空气物性
Table 1 Physical parameters of air

参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	运动黏度 $\nu / (10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	动力黏度 $\mu / (10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s})$	定压比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
数值	1.225	1.57	1.7894	1.04

表 2 石英砂物性
Table 2 Physical parameters of quartz sand

参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	堆积密度 $\rho_p / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径 d_p / mm	定压比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
数值	2580	1580	0.45	0.882

体随机性网格), 将所设计反应器的几何结构划分成“Hex & Map”(六面体结构性网格), 如图 2 所示。假设通过布风板后流化载气速度是均匀的, 且反应器顶端呈敞开状态, 可以指定实体的底部为进口面、顶部为出口面。由于流化风速已给定为 2m/s, 定义进口面为“VELOCITY_INLET”(速度入口边界); 且由于床料基本不会被带出反应器, 即存在回流现象, 定义出口面为“PRESSURE_OUTLET”(压力出口边界)。

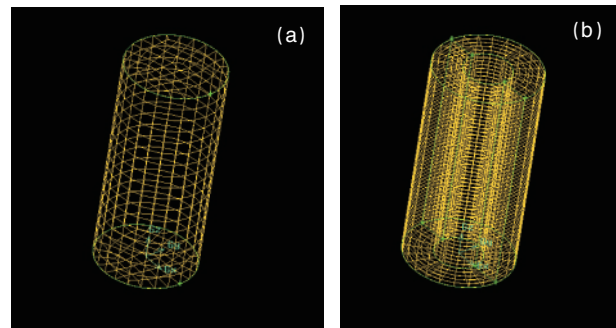


图 2 圆柱形 (a) 和圆环形 (b) 反应器实体网格划分
Fig. 2 Meshing geometry of cylinder (a) and annular (b) reactors

3.2 求解计算

启动 Fluent 6.2 三维单精度计算器, 通过定义操作条件、设置求解策略、模型初始化及迭代计算, 模拟流化床的流态化状态。

3.3 后处理

3.3.1 相体积分布

分别过 2 个反应器实体的轴线做 2 个相互垂直的平面, 以便于应用软件的流场分布云图观察内部效果。图 3、图 4 为 2 种反应器在 0.5s 和 5s 时的流态化状态。

可以看出, 流化开始后 0.5s, 床料虽然充斥整个反应器, 但大部分床料仍旧集中在反应器底部。到达 5s 时, 床料回落

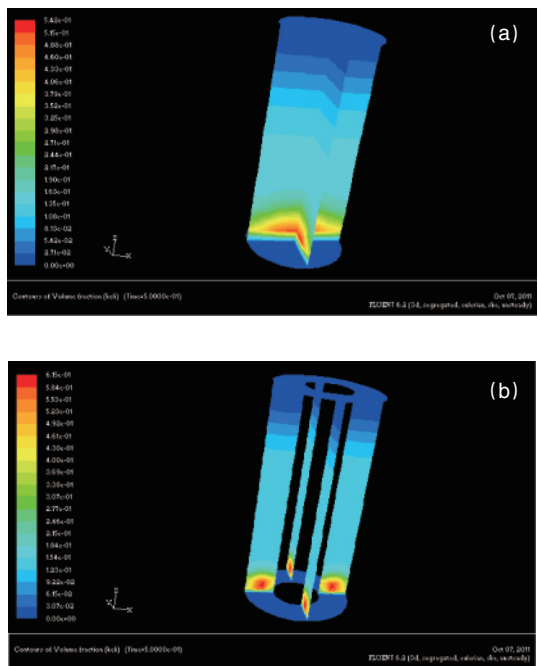


图3 $t=0.5s$ 时圆柱形(a)和圆环形(b)反应器内颗粒相体积分配

Fig. 3 Contours of volume fraction of sand in cylinder (a) and annular (b) reactors when $t=0.5s$

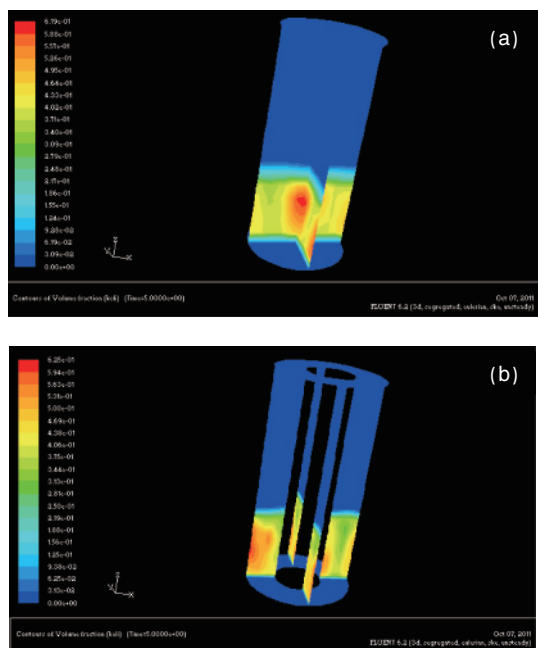


图4 $t=5s$ 时圆柱形(a)和圆环形(b)反应器内颗粒相体积分配

Fig. 4 Contours of volume fraction of sand in cylinder (a) and annular (b) reactors when $t=5s$

到稳定高度,且颗粒分布趋于均匀。这种现象是由于流化伊始,静止床料突然受到运动空气的作用,使位于顶层的颗粒

瞬间获得一部分空气分子的动量,速度迅速提升,并弥漫于整个反应器。随着时间推移,越来越多的床料颗粒获得了动量,开始运动;而最先飞扬起的那部分颗粒在重力作用下逐渐回落,并和其他颗粒融在一起,最终在空气推动作用下,实现稳定的流态化运动。2种反应器流态化效果非常接近。

3.3.2 速度分布

图5、图6是2种反应器在流化开始后0.5s和5s时刻的空气速度云图。

可以看出流化开始后0.5s,空气分子在靠近反应器底部时速率很高,达4m/s;随着高度的提升,空气分子速度迅速下降,然后逐渐趋于平稳。到达5s时,速度大于4m/s的空气分子体积比明显增大(图6中黄色部分),而在位于反应器中上部的空气分子速率趋于稳定,基本维持在2m/s。这2个时刻的共同特点是,空气分子在穿过床层时速率会变高。这是因为空气分子穿过床层时,由于有颗粒作为障碍,只能在有限的颗粒空隙中寻找出路。同样可以得出,2种反应器流态化效果基本相同。

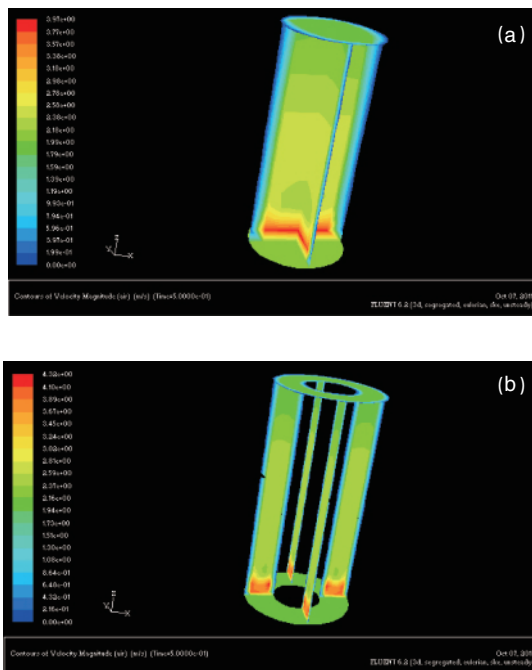


图5 $t=0.5s$ 时圆柱形(a)和圆环形(b)反应器内空气速度分配(单位:m/s)

Fig. 5 Contours of air velocity in cylinder(a) and annular(b) reactors when $t=0.5s$ (Unit: m/s)

3.3.3 结果分析

从以上颗粒相体积分配图和空气速度分配图中可以看出,2种反应器的流态化效果非常接近。表明在冷态条件下,所设计的反应器与传统的反应器无明显差别,新型反应器可以满足工作要求。

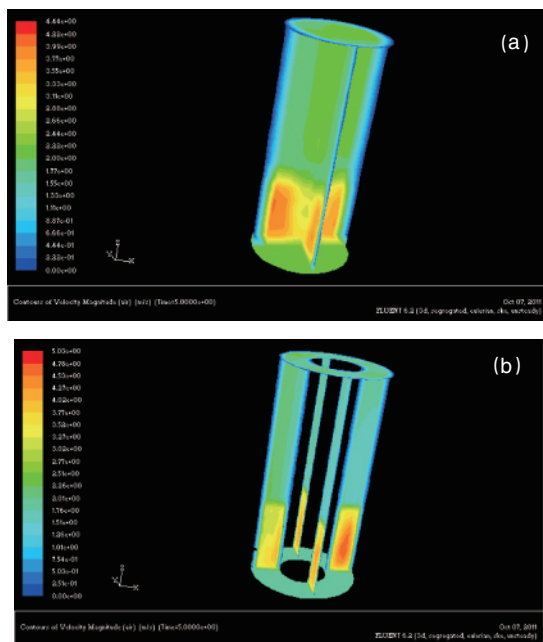


图 6 $t=5s$ 时圆柱形 (a) 和圆环形 (b) 反应器内空气速度分配 (单位: m/s)

Fig. 6 Contours of air velocity in cylinder (a) and annular (b) reactors when $t=5s$ (Unit: m/s)

4 结论

将燃烧室与反应器合二为一的结构设计,既发挥出流化床结构简单、处理量大、物料适用范围广等优点,又使得设备整体结构紧凑、热效率高、操作简便,适用于移动作业。通过流态化模拟,证实了所设计反应器工作可行性和效果。下一步将按照上述设计研制产能为 100kg/h 的移动式生物质快速

热解样机。

参考文献 (References)

- [1] Berruti F, Briens C. Thermal self-sustainability of biochar production by pyrolysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(1): 55-56.
- [2] Berruti F, Briens C. Apparatus and process for the pyrolysis of agricultural biomass. WO, 130977[P]. 2006-12-14.
- [3] Vanderwey. Mobile power plant: WO, 042844[P]. 2004-10-31.
- [4] Phillip C. Badger, Fransham P. Use of mobile fast pyrolysis plants to densify biomass and reduce biomass handling costs -A preliminary assessment[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 30(4): 321-325.
- [5] 王贤华. 生物质流化床热解液化实验研究及应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Wang Xianhua. The experimental study and application of biomass fast pyrolysis with fluidized bed [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [6] 任学勇, 王文亮, 王鹏起, 等. 流化床式木材快速热解设备加热功率的确定[J]. *木材加工机械*, 2010, 1(4): 1-4.
Ren Xueyong, Wang Wenliang, Wang Pengqi, et al. *Wood Processing Machinery*, 2010, 1(4): 1-4.
- [8] 梁雪松, 肖勇, 吴立群. 流化床反应器分布板开孔率计算方法初探[J]. *云南化工*, 2006, 33(4): 30-32.
Liang Xuesong, Xiao Yong, Wu Liqun. *Yunnan Chemical Technology*, 2006, 33(4): 30-32.
- [9] 莫之光, 梁应昌, 李遵稚. 鼓泡塔反应器分布板的开孔率和液体返混[J]. *化工学报*, 1979, 2(1): 185-194.
Mo Zhiguang, Liang Yingchang, Li Linque. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1979, 2(1): 185-194.
- [10] 马新辉. 生物质热裂解液化装置与流化床冷态模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
Ma Xinhui. Biomasspyrolysis liquefaction apparatus and normal condition simulation of fluidized bed [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.

(责任编辑 郑伟, 刘志远)

· 学术动态 ·

“第十七届全国青年通信学术会议”征文



由中国通信学会主办、中国通信学会青年工作委员会承办的“第十七届全国青年通信学术会议”将于 2012 年 8 月召开。

征文范围: (1) 通信与通信工程; (2) 网络与信息安全; (3) 多媒体处理技术与应用; (4) 信号与信息处理; (5) 数字版权管理; (6) 内容安全; (7) 电子科学与技术; (8) 控制科学与工程; (9) 计算机科学与技术; (10) 其他。

全文截止日期: 2012 年 1 月 10 日。

电 话: 010-62262770

通信地址: 北京邮电大学 287 信箱 (100876)