

文章编号:2095-6134(2016)03-0398-05

基于红外加热的生物质热解技术及关键参数

隋春平^{1†}, 王 雷², 黄洪风²

(1 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

(2015 年 9 月 6 日收稿; 2015 年 10 月 8 日收修改稿)

Sui C P, Wang L, Huang H F. Biomass pyrolysis technologies based on infrared heating and key parameters of reaction device[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(3): 398-402.

摘 要 生物质是一种清洁的可再生能源, 生物质快速热解技术对生物质的利用很重要. 本文提出将红外加热应用于生物质热解反应. 根据生物质及其热解过程中的大分子中间产物的红外光谱图分析确定生物质热解过程中的红外吸收带, 选择红外涂料. 设计出基于红外加热的生物质热解反应器的炉体结构, 应用 Ansys Fluent 对炉体燃烧室进行燃烧数值模拟, 确定了最佳温度场分布.

关键词 红外加热; 生物质热解反应; 燃烧模拟; 温度分布

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 03. 017

Biomass pyrolysis technologies based on infrared heating and key parameters of reaction device

SUI Chunping¹, WANG Lei², HUANG Hongfeng²

(1 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 School of Mechanical Engineering and Automation Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract Biomass pyrolysis technology is important for biomass utilization. In this paper, we suggest application of infrared heating in biomass pyrolysis reaction. According to the infrared spectra of biomass and its macromolecular intermediate product in the pyrolysis process we determine the infrared absorption bands in the pyrolysis process and select infrared coating. We have designed furnace body structure of biomass pyrolysis reactor based on infrared heating and performed combustion numerical simulation of the combustion chamber of furnace body, using ANSYS fluent software, to determine the optimal temperature field distribution.

Key words infrared heating; biomass pyrolysis reaction; combustion simulation; temperature distribution

生物质是一种清洁的可再生能源, 快速热解液化技术是生物质利用的一种重要途径. 该技术

将产生液态产物, 具有产率高、加工速度快、生物油利用价值高、易储备运输等优点. 自 20 世纪 80

† 通信作者, E-mail: cpsui@sia.cn

年代起,国内外就已开始对生物质热解技术的研究^[1-2],包括美国、日本、巴西、印度、丹麦、荷兰、德国、法国、加拿大、芬兰等许多国家都制订了相应的开发研究计划,并形成了各自的开发体系和技术优势,目前已形成诸如流化床^[3]、旋转锥^[4]等快速热解液化技术.上述技术主要采用接触式加热方式,解热过程中往往需要传热介质,存在加热效率低、产物分离困难等缺陷.

因此,本文提出基于红外的非接触辐射式加热热解技术.红外加热技术是利用红外辐射器发出的射线辐照被加热物体,当二者的固有频率相匹配时,被加热物质会很好地吸收辐射能达到快速升温的目的.该技术发展已经相当成熟,广泛应用于油漆、塑料、食品、药品等行业,具有加热效率高、速度快、节电效果显著等优点^[5].但是,由于红外加热应用的热源普遍也是电能,如果继续用电能为红外加热提供热源,显然就失去了研究意义.

目前尚未见将红外加热应用到生物质热解技术中.本文的红外加热热解技术拟采用焦炭和不可冷凝短链热解气等副产物作为燃料,实现自热式热解.这样既减少能源浪费,也使得副产物得到重新利用,并可实现野外移动式作业.

本文将首先分析生物质及中间产物的红外光谱吸收带;在此基础上选择红外涂料,并设计基于红外加热的生物质热解反应器的炉体结构;最终应用 Ansys Fluent 对炉体燃烧室进行燃烧数值模拟,确定最佳温度场分布.

1 生物质红外加热机理研究

本研究的目的是要获知生物质在红外光线照射下有没有吸收峰,确定生物质对红外光线的吸收能力,以明确是否能将红外辐射加热应用到生物质热解反应中.

1.1 生物质红外吸收带的确定

生物质的红外吸收带包括生物质各组分红外吸收带和生物质热解过程中产生的大分子中间产物的红外吸收带,包括纤维素、半纤维素、木质素、淀粉、活性纤维素、左旋葡聚糖、纤维二糖、纤维三糖等的红外吸收带^[6-7].

上述各物质对红外光线是否具有吸收带需根据其各自的红外光谱图得知.红外光谱图是由红外光谱仪测得的物质在不同波段下对红外光线吸

收率或透过率的曲线图.本文基于中国科学院上海有机化学研究所红外光谱图^[8],分析各成分对红外光线的吸收能力,得到相关成分红外光线吸收波段,列于表 1 中.

表 1 生物质各成分的红外吸收波段
Table1 Infrared absorption bands of components in biomass

物质	波数范围/cm ⁻¹	波长范围/μm
纤维素	900 ~ 1 800,2 800 ~ 3 700	2.7 ~ 3.57, 5.55 ~ 11.11
半纤维素	900 ~ 1 500,2 700 ~ 3 700	2.7 ~ 3.7, 6.67 ~ 11.11
木质素	1 000 ~ 1 700,3 200 ~ 3 700	2.7 ~ 3.125, 5.88 ~ 10
淀粉	1 000 ~ 1 400,2 800 ~ 3 700	2.7 ~ 3.57, 7.14 ~ 10
活性纤维素	900 ~ 1 800,2 800 ~ 3 700	2.7 ~ 3.57, 5.55 ~ 11.11
左旋葡聚糖	900 ~ 1 400,2 700 ~ 3 700	2.7 ~ 3.7, 7.14 ~ 11.11
纤维二糖	900 ~ 1 400,2 700 ~ 3 700	2.7 ~ 3.7, 7.14 ~ 11.11
纤维三糖	900 ~ 1 200,2 400 ~ 3 600	2.78 ~ 3.125,8.33 ~ 11.11

从表 1 可以看出,各物质对红外光都有强烈的吸收带,说明红外加热生物质热解反应是可行的;各物质的红外吸收带非常相似,可以将生物质的红外吸收带归纳为 2.5 ~ 3.2、6 ~ 10 μm,属于短波吸收物质^[9].

1.2 红外涂料的选择

红外加热的原理是,当红外光线辐射源的辐射波长和生物质吸收波长相一致时,生物质开始吸收辐射能,从而改变或加剧其内部分子的运动,达到发热升温的作用^[9].所以生物质热解过程中的红外吸收波带也就是其红外线辐射波带,不同红外涂料的辐射波带也不相同.辐射波带为2.5 ~ 3.2、6 ~ 10 μm 的辐射涂料属于短波辐射涂料,主要包括沸石分子筛系、高硅氧和半导体氧化钛涂料等.通过参考短波辐射涂料的辐射特性^[9]可以得出,半导体氧化钛涂料辐射率比较高,而且波动小,辐射率基本维持在 0.85,所以,本课题选择的红外涂料为半导体氧化钛涂料,它的最佳辐射温度为 577 ℃.

2 反应器结构设计

2.1 反应器结构特点

反应器结构如图 1 所示.主要由两大部分组成:一是反应腔部分,除生物质反应区以外,还包括生物质进料口、反应气体产物的收集口和反应固体产物的收集口;二是燃烧室部分,包括燃料和氧化剂的进口、保温系统、通风系统和燃烧残渣的收集口.

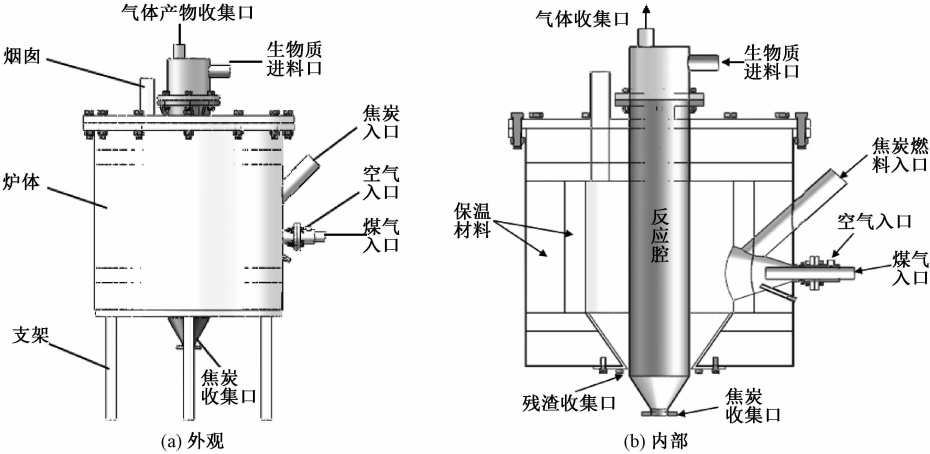


图 1 反应器结构
Fig.1 Structure of the reactor

反应腔部分和燃烧室部分是可拆卸的,反应一段时间后,反应腔从燃烧室内抽离,分别对反应腔和燃烧室内的残渣进行清理,如果反应腔内的红外涂层遭到破坏或者因使用时间太长而脱落,可以直接更换新的反应腔。

2.2 反应腔内径的确定

反应腔内径与辐射距离有关.据一般资料推荐,辐射距离以 100 ~ 400 mm 为宜^[9].由于反应腔为直筒形,属于四周环射布局,所以反应腔的直径应该在 200 ~ 800 mm.因为本文设计的反应器结构为小型试验用结构,所以选择反应腔内径为 200 mm.

2.3 反应腔辐射高度的确定

生物质颗粒在反应腔内自由下落,一边下落,一边得到反应,所要达到的反应条件为 1 s 内升温到 500 ℃.通过估算生物质 1 s 内在气体阻力下下落的高度,得到

$$s(1) = \frac{m}{b} \left[\ln \left(e^{\frac{2\sqrt{ab}}{m}} - 1 \right) - \frac{2\sqrt{ab}}{m} \right] + \sqrt{\frac{a}{b}}, \quad (1)$$

式中, m 为生物质颗粒的质量; b 为风阻系数,取 0.5; $a = mg$, g 为重力加速度.

由式(1)可知生物质的下降距离与其质量有关,初步估算生物质颗粒的质量在 10 g 以内,故反应腔辐射高度在 500 mm 以内,为使生物质得到充分反应,取反应腔辐射高度 $h = 500$ mm.

2.4 生物质反应量的确定

生物质反应量的计算公式如下:
生物质反应量 =

$$\frac{1\text{ s 内辐射总热量 } Q_{\text{辐}}}{1\text{ kg 生物质 } 1\text{ s 内所需辐射热量 } Q_{\text{需}}}, \quad (2)$$

$$Q_{\text{辐}} = C_b \varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4 \pi D h, \quad (3)$$

$$Q_{\text{需}} = C \cdot \Delta T \cdot \eta, \quad (4)$$

式中, C_b 是黑体辐射系数^[9],取为 4.88 kcal/(m²·h·K⁴); ε 是红外涂料辐射率,根据 2.2 小节取为 0.85; T 是涂料的最佳辐射温度 850 K; D 是反应腔内径 200 mm; h 是反应腔辐射高度 500 mm; C 是生物质的比热容,以玉米芯为例,其比热容为 1 000 J/(kg·℃); ΔT 是生物质温差,反应要求生物质从常温升温到 500 ℃,所以 $\Delta T = 480$ ℃; η 是生物质的吸热效率,按照红外加热的匹配加热原理,取 $\eta = 0.8$.最终生物质反应量计算结果为 47.43 kg/h.

3 燃烧数值模拟

本文采用炉体内燃料燃烧给红外加热提供热源,很可能造成燃烧室温度不均匀.那么涂料辐射也会不均匀,被加热物质吸热不均匀,升温速率不一致,使温度达不到要求.所以,保证燃烧室内温度均匀性很重要.被加热物质要求的反应温度为 500 ℃,红外涂料的最佳辐射温度为 577 ℃(即 850 K),燃烧室内的温度传递到涂料存在热量损失,本文将燃烧室内平均温度控制在 580 ~ 620 ℃范围内,即 853 ~ 893 K 范围内.应用 Ansys Fluent 软件,通过改变燃料种类、燃料和氧化剂的入口布置或者入口速度,进行多组燃烧数值模拟,得到燃烧室内温度分布云图,通过数据处理得到最优

结果.

3.1 物理模型

燃烧数值模拟的物理模型即燃烧室的外形结构,本文设计的燃烧室是一个环形结构,如图 2 所示.为模拟方便,定义入口①、入口②、入口③作为燃料和空气的入口.其中:入口③为焦炭入口,入口①、②为煤气和空气入口且可互换.在不同入口以不同速度加入燃料和空气,进行燃烧模拟,并对图中具有代表性的 8 个点处温度进行平均值和标准差计算,来分析燃烧室内的平均温度和温度均匀性.燃烧模拟的 6 种组合情况见表 2.

3.2 求解方法

本文采用压力基分离求解器;采用 SIMPLE 算法进行压力项和速度项的耦合;PDF 非预混燃

烧模型; $k-\varepsilon$ 湍流模型; $P-1$ 辐射换热模型;为加速收敛,控制方程采用一阶迎风格式离散,动量方程采用 QUICK 格式离散^[10];减小亚松弛因子的值使迭代曲线趋于稳定^[11].

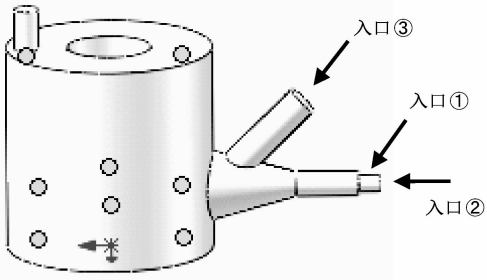


图 2 燃烧数值模拟物理模型
Fig.2 Physical model of the combustion simulation

表 2 燃烧模拟的 6 种组合情况
Table 2 Six cases of the combustion simulation

模拟组合	1		2		3		4		5		6		
燃料	煤气		煤气		煤气		煤气		焦炭		煤气和焦炭		
入口布置	①	②	①	②	②	①	②	①	③	①	③	②	①
入口流速/(m/s)	9	3	3	9	7	3	3	3	1	5	1	5	3

3.3 模拟结果

对表 2 中所列的入口组合和入口速度进行模拟,每个组合中相对较好的模拟结果的温度分布

云图如图 3 所示.对图 3 中的模拟结果进行数据处理,分别得到它们的平均温度和温度标准差如表 3 所示.

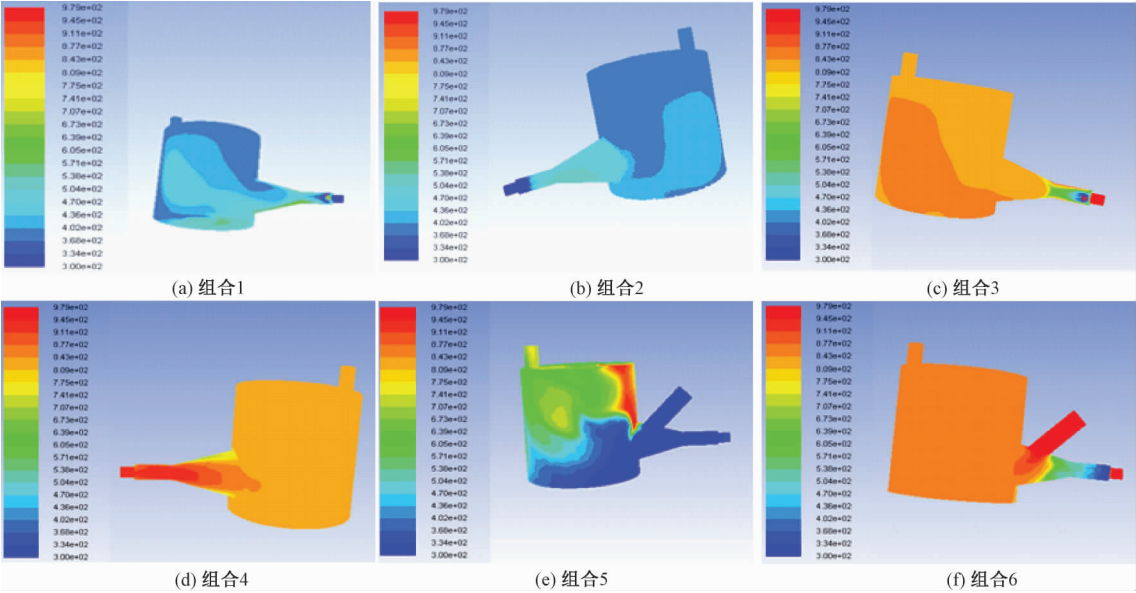


图 3 燃烧模拟结果的温度分布云图

Fig.3 Temperature distributions based on the combustion simulation results for the 6 cases

由模拟结果可知,不同的进料方式和速度,对燃烧温度及其均匀性影响明显.其中组合 1、2 采

用周孔进空气、中心孔进燃气燃烧效率较差;而组合 3—6 采用中心孔进空气,燃烧效果较好.分析

评判燃烧室内温度能否达到要求的标准为:平均温度在 853 ~ 893 K 温度范围内,标准差相对较低.从表 3 看出,组合 3 和组合 6 可以达到温度要求,且温度均匀性相对较好.

表 3 平均温度和温度标准差
Table 3 Average temperatures and their standard deviations

模拟组合	1	2	3	4	5	6
平均温度/K	437.054	382.622	854.349	849.157	659.544	890.691
温度标准差	44.88	3.66	10.87	6.24	158.61	5

4 结论

- 1) 确定生物质的红外吸收带为 2.5 ~ 3.2、6 ~ 10 μm,根据生物质的红外吸收带选择半导体氧化钛为本装置的红外涂料.
- 2) 设计基于红外加热的生物质热解反应器的炉体结构,计算得到反应器的关键参数,包括反应腔内径 $D = 200\text{ mm}$ 、反应腔辐射高度 $h = 500\text{ mm}$ 和生物质单位时间反应量 47.43 kg/h.
- 3) 利用 Ansys Fluent 软件进行燃烧室内燃烧数值模拟,最终确定燃烧室的最佳设置:燃料不能只有焦炭;入口布置为①是空气入口,②是煤气入口,③是焦炭入口;速度设置为煤气 5 m/s,焦炭 1 m/s,空气 3 m/s.

参考文献

[1] Wang S, Ru B, H Lin, et al. Degradation mechanism of monosaccharides and xylan under pyrolytic conditions with theoretic modeling on the energy profiles [J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 378-383.

[2] Wang S, Guo X, Liang T, et al. Mechanism research on cellulose pyrolysis by Py-GC/MS and subsequent density functional theory studies [J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 722-728.

[3] Scott D S, Piskorz J. The continuous flash pyrolysis of biomass [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1984, 62 (3): 404-411.

[4] 李滨. 转锥式生物质闪速热解装置设计理论及仿真研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.

[5] 高扬, 解铁民, 李哲滨, 等. 红外加热技术在食品加工中的应用及研究进展 [J]. 食品与机械, 2013, 29 (2): 218-222.

[6] 廖艳芬, 王树荣, 马晓茜. 基于纤维素热裂解反应机理及中间产物生成过程模拟研究 [J]. 燃料化学学报, 2006, 34 (2): 184-190.

[7] Blasi C Di, Lanzetta M. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1997, 40/41: 287-303.

[8] 中国科学院上海有机化学研究所. 化学专业数据库: 中国 [DB/OL]. [2015-06-04]. <http://chemdb.sgst.cn/scdb/default.asp>.

[9] 卢为开. 远红外辐射加热技术 [M]. 上海科学技术出版社, 1983.

[10] 尚庆, 张健, 周力行. QUCIK 格式在湍流旋流流动数值模拟中的应用 [J]. 计算物理, 2004, 21 (4): 283-289.

[11] Saxena V, Pope S B. Simulation of turbulent combustion incorporating detailed chemistry [J]. Combustion and Flame, 1999, 117: 1-2.