doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.028

热解挥发物分级冷凝初分生物油研究

韩 平^{1,2} 蒋恩臣^{1,3} 李世博³ 王明峰³ 孙 焱³ 吴宇健³ (1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007; 3. 华南农业大学材料与能源学院,广州 510642)

摘要:设计了一种恒温分级冷凝装置,应用该装置对油茶果壳在 500℃时的热解挥发物进行了分级冷凝试验,获得 了 165℃以上、165~120℃、120℃以下 3 个冷凝温度段下的分级生物油产物;分析了各组产物的热值、pH 值、运动 粘度后发现:前 2 级生物油产物的含水率得到了有效降低,高位热值均大于 23 MJ/kg,比常规方法所获生物油的热 值增加约 44%,但运动粘度较大;随着冷凝温度的降低,各组生物油运动粘度显著下降,pH 值略有提升;通过热分 析曲线并结合综合燃烧特性指数分析了生物油的燃烧特性,发现利用分级冷凝所获得的初分生物油在燃烧特性上 出现了比较明显的区别,其中第 2 级生物油在各组样品中的燃烧性能最好。试验结果表明,所设计的分级冷凝装 置基本实现了热解挥发物的在线初级分离,各级产物的特性有比较明显的区别,为生物油分级冷凝装置的设计提 供了参考,为分级生物油的进一步应用奠定了基础。

关键词:油茶果壳;初分生物油;热解;分级冷凝

中图分类号: TK6; S216 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0207-06

First-fractional Bio-oil by Fractional Condensation of Pyrolysis Volatiles

Han Ping^{1,2} Jiang Enchen^{1,3} Li Shibo³ Wang Mingfeng³ Sun Yan³ Wu Yujian³

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China

3. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Pyrolysis is an important way of biomass resources utilization. As a liquid product of biomass pyrolysis, bio-oil has good application prospects in future energy market. However, the problems of low calorific value, high viscosity, high moisture content, high corrosiveness, and poor stability problem exist until now, which constrain further application of bio-oil. At present, many scholars at home and abroad focus on staged utilization of bio-oil, by different separation methods to yield the bio-oils with diverse physical and chemical properties, and then by further purification to obtain the high quality of bio-oil. Fractional condensation can realize real-time primary separation of bio-oil, which can facilitate further refinement, so the field has become research focus. In order to achieve the fractional condensation of bio-oil, various condensation because it can quickly reduce the temperature of pyrolysis gas. The tube condensation mainly depending on indirect heat transfer was used in large-scale chemical production and its technology was mature, so tube condensation was applied to the research of fractional condensation. Based on the previous researches on fractional condensation unit, a fractional condensation unit using constant temperature condensation was designed, of which condensation levels and heat exchange area can be adjusted flexibly. By the independent design of multi-level condensing unit and

基金项目:农业科技成果转化项目(2014GB2E000048)和广东省应用型科技研发专项(20150237)

收稿日期: 2016-01-01 修回日期: 2016-06-06

作者简介: 韩平(1979—), 男, 博士生, 佳木斯大学讲师, 主要从事生物质能源化利用研究, E-mail: hanping_jtys@ 163. com

通信作者: 蒋恩臣(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事生物质能源转化与利用研究,E-mail: ecjiang@ scau. edu. cn

adopting camellia seed shells as pyrolysis materials, fractional condensation tests on the pyrolysis volatiles of camellia seed shells at 500 °C were carried out, and three fractional bio-oil products under the condensation temperature levels of more than 165 °C and 165 ~ 120 °C, below 120 °C were received. The physical and chemical characteristics of the products were analyzed, and the analysis results of the first two level-fractional products at more than 165 °C, 165 ~ 120 °C showed that moisture content effectively reduced and gross calorific value was more than 23 MJ/kg on average, 44% more than the calorific value obtained by conventional condensation, but kinematic viscosity was not improved. With condensation temperature dropped, kinematic viscosity had significant reduction in each group of bio-oil and pH value was slightly rose. Combining the thermal analysis curves with comprehensive combustion characteristic index to analyze combustion characteristics of bio-oil, the results showed that bio-oils of primary separation obtained by fractional condensation had obvious differences, and YY2 demonstrated the best combustion performance. In conclusion, real-time primary separation of pyrolysis volatiles generally was achieved by dependently designed fractional condensation and the characteristics of each stage's product were varied. The device designed can provide a reference for design of fractional condensation of pyrolysis volatiles and lay a theoretical foundation for the further application of fractional bio-oil.

Key words: Camellia oleifera shell; first-fractional bio-oil; pyrolysis; fractional condensation

引言

热解是生物质资源利用的一种重要方式^[1],其 液体产物生物油,在未来的能源市场将占有重要地 位。然而,现阶段生物油普遍存在热值低、粘度大、 含水率高、腐蚀性强和稳定性差等问题,以致生物油 不能被很好地利用。目前,国内外许多学者把研究 重点放在生物油的分级利用上,即通过不同分离手 段获得理化性质不同的生物油产物,然后再对其进 行精加工作为燃料或提取高价值的化工品。现有主 要的分离手段包括蒸馏、离心、萃取、柱层析、色谱分 离和分级冷凝等^[2-4]。其中,分级冷凝能在生物油 收集过程中,根据各组分沸点的不同,逐级将不同沸 点的有机化合物冷凝下来^[5],可以在生物质热解过 程中初步实现生物油的分离,为生物油下一阶段的 综合利用奠定良好的基础,是经济性最好的方法,成 为目前研究的热点之一^[6-7]。

CHANG 等^[8]采用 2 级冷凝装置,通过控制各级的冷凝温度获得了组分不同的生物油产物。 WESTERHOF 等^[9-10]采用 3 级分级冷凝装置对热 解气进行冷凝。左武等^[11]利用 3 级分级冷凝装置 对污泥热解油进行回收。上述分级冷凝装置中,都 采用了喷淋冷凝方式,该方式可以迅速降低热解气 的温度,达到快速冷凝的目的。但在大部分文献中 所用的喷淋介质均为冷凝下来的生物油,在实际应 用过程中,由于生物油具有腐蚀性且粘度大,对设备 的抗腐蚀性和密封性要求较高;此外,生物油长期处 于冷却加热再冷却的循环过程中是否会发生其他理 化反应,现在还没有明确的研究结论,这种方式能否 应用到未来的规模化生产中,仍需要进行大量的研究。

而以间接式换热为主的管式冷凝,在化工生产 中已经大规模采用,技术工艺都比较成熟,所以这种 冷凝方式更适合应用到分级冷凝工艺中。谭洪 等^[12]研制的生物质热解装置中就采用了3级间接 冷凝系统,石文等^[13-14]采用4级间接冷凝系统来分 离收集生物油,POLLARD等^[15]设计了5级分级冷 凝装置。以上间接冷凝装置中大部分都采用对流循 环的冷凝方式,通过控制每一级冷凝温度,获得分级 生物油产物,优点是换热效果好,但是冷凝温度不易 控制,如果想获得高沸点重组分的生物油产物,要求 冷凝介质温度很高,有一定的难度。

结合以上关于分级冷凝装置的研究现状,本文 设计一种采用恒温冷凝方式的分级冷凝装置,且冷 凝级数及换热面积可以灵活调整,并以油茶果壳为 热解原料,开展分级冷凝试验研究,获得初分离生物 油,并对所得生物油产物进行理化特性分析。

1 试验装置和原料

1.1 分级冷凝装置

分级冷凝装置采用单根长度为 500 mm,壁厚为 2 mm 的不锈钢管作为冷凝管路,呈蛇形连通;不锈 钢管之间采用活接连接,可以根据实际需要对冷凝 管的数量进行增减;冷凝管外壁均匀缠绕电加热带 将管路加热至设定温度,可以把每根管路设置为不 同的温度,也可以把相邻的管路设为相同的温度;每 根冷凝管的出口处安装有 PT100 型温度传感器监 测热解挥发物离开管路时的温度,并以此温度来划 分各级冷凝的温度段;数据通过数据采集装置进行 采集;为了保持冷凝管路温度的稳定,在加热带外包 裹纤维保温棉;各级冷凝管路下方安装有收集瓶来 收集生物油产物。

该装置采用恒温冷凝,可以根据实际的情况调整分级冷凝的温度段,便于对目标产物的收集;也可以根据需要调整分级冷凝所需冷凝管的数量,相当 于调整了整体分级冷凝系统的换热面积;还能够与 其他冷凝方式联合使用,应用方便、灵活。

本试验中共设置4根不锈钢冷凝管路,前2根 管路设定相同的冷凝温度,作为1级冷凝,后2根 管路设定相同的冷凝温度,作为2级冷凝,为了使 剩余挥发物充分冷凝,后加玻璃冷凝管,冷凝介质 采用冰水混合物,作为3级冷凝。热解挥发物依 箭头方向流经分级冷凝装置实现分级冷凝,如图1 所示。



Fig. 1 Fractional condenser

1.不锈钢冷凝管
 2.玻璃纤维保温棉
 3.电加热带
 4.活接
 5.温度传感器
 6.玻璃冷凝管
 7.生物油收集瓶

1.2 试验装置

试验装置由连续热解装置、分级冷凝装置、数据 采集装置、产物收集及处理装置4部分组成。连续 热解装置采用华南农业大学生物质能重点实验室 自主设计的无轴螺旋连续热解装置^[16],分级冷凝 装置为本试验自行设计,试验装置整体结构如图2 所示。

1.3 试验原料

试验原料为油茶果壳。油茶是我国特有的纯天 然高级油料作物,年产量可达70万t左右,其中占 油茶果实总质量50%~60%的油茶果壳却并未得 到有效利用^[17-18]。将这部分资源进行合理开发对 加强农林废弃物的综合利用具有重要意义。

试验前将油茶果壳自然晾晒后过20目筛,去除 杂质和粉末。对原料进行工业分析和热值测试,测 试结果如表1所示。





1. 驱动电动机
 2. 连接轴
 3. 给料箱
 4. 给料螺旋
 5. 反应管
 6. 电阻炉
 7. 温度传感器
 8. 数据采集装置
 9. 出气口
 10. 风
 机
 11. 过滤器
 12. 分级冷凝系统
 13. 炭箱

表1 油茶果壳工业分析和热值

 Tab. 1
 Industrial analysis and calorific value of

 Camellia oleifera shell

	含水	灰分质量	挥发分质	固定碳质	高位热值/
広 件	率/%	分数/%	量分数/%	量分数/%	$(MJ \cdot kg^{-1})$
油茶果壳	11.07	3.22	66.99	18.72	16.86

从表1中可以看出,油茶果壳的挥发分含量较高,适合制取生物油。

2 试验方法

2.1 冷凝温度的确定

以液氮为冷凝介质采用完全冷凝的方式将油茶 壳热解挥发物完全收集起来,通过静止分层,可以获 得上清液、油状液以及胶质层 3 部分。分别对这 3 部分进行蒸馏处理后发现,上清液的沸点范围是 50~110℃;油状液的沸点范围是 120~160℃;而胶 质部分由于包含大量大分子有机物及炭颗粒,在蒸 馏过程中存在结焦现象,在 160℃开始有液体被蒸 馏出来,因此该部分的沸点范围要大于 160℃。为 了更好地分析生物油各部分的主要性质,因此将冷 凝温度设定为 120℃以下、120~165℃、165℃以上 分离收集 3 级生物油产物。

2.2 试验方法

在 500℃ 热解温度下,通过连续热解装置对油 茶果壳进行热解,热解时间为 11 min,处理量为 2.82 kg/h。产生的固体炭产物直接进入炭箱;热解 挥发物通过出气口进入分级冷凝装置进行冷凝以获 得初分生物油,控制热解挥发物离开一级冷凝器出 口处温度为 165℃,离开二级冷凝器出口处温度为 120℃;不可凝气体经风机排出并点燃。

采用上海超精科技贸易有限公司 ZKF - 1 型卡 尔费休水分测定仪测试各级初分生物油的含水率; 采用长沙友欣有限公司 YX - ZR9301 型自动量热仪 测试各级产物的热值;采用德国肖特公司 Titroline Easy 型电位滴定仪测试 pH值;依照 GB/T 10247—2008《粘度测量方法》^[19],采用毛细管法测试生物油运动粘度;采用德国耐驰公司 STA449C Jupiter 型同步热分析仪分析各级产物的燃烧特性,测试温度范围设定在 30~800℃,升温速率为 10 K/min,保护气采用 99.99% 的高纯氮气,吹扫气为干燥空气,流量均为 50 mL/min。

3 结果与分析

热解挥发物依次通过各级冷凝段出口处的温度 分别记为 T_1 、 T_2 。试验过程中,需要根据实际温度 变化来控制调整各级冷凝管路的加热温度,其中 T_1 的平均值为165.61 °C,标准偏差为3.43 °C; T_2 的平 均值为118.66 °C,标准偏差为1.95 °C,各级冷凝管 出口处的温度与设定值虽有一定的偏离,但均在可 控范围内。

通过分级冷凝装置共收集到3级生物油,各级 生物油的产率依次为3.98%、5.37%和32.85%。 前2级生物油产物分别记为YY1、YY2,第3级生物 油产物静置后出现分层,对下层为黑褐色油状产物 和上层为红棕色透明液体产物进行了单独分析,分 别记为YY3、YY4。为了方便对比,将常规方法获取 的生物油记为CG。

3.1 生物油的理化特性

分别对 4 种产物的理化特性进行了测定,其中 含水率和热值的结果如表 2 所示。由表 2 可知, YY1、YY2 含水率分别为 12.12% 和 12.19%,而常 规冷凝方法所获得生物油的含水率一般都在 20% ~ 30%之间^[20-24],相比之下前 2 级冷凝所获生物油的 含水率得到了有效降低,但 YY4 的含水率高达 62%,证明热解产生的大部分水分被分离在第 3 级 冷凝装置中。分析热值可以发现 YY1、YY2 的高位 热值均大于 23 MJ/kg,比常规方法所获生物油 15 ~ 18 MJ/kg 的热值增加约 44%。虽然 YY3 的热值也 达到了 21.99 MJ/kg,但实际应用中仍需要和水相组 分进一步分离。

表 2 油茶果壳生物油的含水率和热值 Tab. 2 Moisture content and high calorific value of camellia seed shells bio-oil

	生物油编号				
参奴	YY1	YY2	YY3	YY4	CG
含水率/%	12.12	12.19	13.64	62.03	$20\sim 30$
高位热值/(MJ·kg ⁻¹)	24.16	23.2	21.99		$15 \sim 18$

经对比发现,前2级生物油产物的水分得到了 有效降低,而且高位热值明显提高,这对提高生物油 的品质具有重要的意义。

生物油 pH 值测定结果显示,各组生物油的 pH 值在 3.65~4.07 之间,且随着冷凝温度的降低,生物油 pH 值略有提升。

运动粘度是评价生物油的流动性能,以及确定 其应用方向的重要指标之一^[25-26]。因此,试验中分 别测量了各组样品在温度为 30、40、50、60℃时的运 动粘度,结果如表 3 所示。

表 3 各组生物油在不同温度环境下的运动粘度 Tab. 3 Kinematic viscosity of hierarchical bio-oil

at different temperatures

 mm^2/s

生物油	温度/℃				
编号	30	40	50	60	
YY1	1 747.81	519.51	280. 27	176.30	
YY2	779.63	297.13	137.66	84.50	
YY3	56.36	16.10	9.68	6.55	
YY4	1.37	1.10	0.93	0.74	

从表 3 中可以看出,在 30℃时,YY1 和 YY2 的 运动粘度都比较大,需要进行改性以便更好地利用, 而 YY4 的含水率高达 62%,所以其运动粘度很低; 另外,随着测试温度的升高,各组生物油运动粘度显 著下降,证明环境温度对生物油的运动粘度影响较明 显,可以为生物油的储存、运输与应用提供重要参考。

3.2 生物油燃烧特性

通过热分析曲线来分析生物油的燃烧特性^[27], 具体结果如图 3 所示。

结合图 3 中 TG、DTG 和 DSC 曲线分析得出,



图 3 空气气氛下各组生物油的 TG、DTG 及 DSC 曲线



YY1、YY2、YY3 在空气氛围下燃烧均分为3 个阶 段:第1阶段为水分和低沸点组分的蒸发,YY1、 YY2、YY3 三者相比,YY3 在第1阶段的失重量和失 重速率最高,且在 DSC 曲线上出现了明显的吸热 峰,可以说明3组样品中,YY3中所含轻质组分较 多。YY1、YY2的变化趋势相似,但在相同温度下, YY2 的失重量始终大于 YY1,且 YY2 中低沸点组分 的蒸发早于 YY1。而 YY4 几乎只经历了这个阶段, 在112℃时失重量已达90%,说明YY4 中几乎不含 重质组分。第2阶段为重质组分的裂解反应,产生 可燃气体并燃烧,YY2 的 DSC 曲线的下降趋势较 YY1 和 YY3 明显,说明 YY2 裂解产生的可燃气体 较多。第3阶段为重质组分的剧烈燃烧,从DTG曲 线上, YY2 的最大失重速率高于 YY1 和 YY3, DSC 中,YY2产生最大的放热峰,证明 YY2 在各组样品 中的燃烧性能是最好的。

为了更全面评价生物油的燃烧特性,本文综合 热重曲线所得到的参数,分析了各组样品的综合燃 烧特性指数。

综合燃烧特性指数 S_n 广泛用于表征燃料的燃烧特性, S_n 值越大,表示燃烧性能越好^[28-30]。

 $\left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\tau}\right) = \frac{f}{T - T}\beta$

$$S_{n} = \frac{\left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\tau}\right)_{\max} \left(\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}\tau}\right)_{\max}}{T_{i}^{2}T_{h}}$$
(1)

其中

$$f = 0.98 - f_1$$
 (3)

式中
$$\left(\frac{dw}{d\tau}\right)_{max}$$
 ——最大燃烧速率,%/min
 $\left(\frac{dw}{d\tau}\right)_{max}$ ——平均燃烧速率,%/min
 T_i ——着火温度,K
 T_h ——燃尽温度(转化率为98%时的温度),K
 f ——后期燃尽率,%
 f_1 ——初始燃尽率,%
 β ——升温速率,K/min
各级生物油的燃烧特性参数如表4所示。

表4 生物油燃烧特性参数

Tab. 4 Combustion characteristics parameters of bio-oil

会 粉	生物油编号			
<i>②</i> 奴	YY1	YY2	YY3	
着火温度/℃	299	288	295	
燃尽温度/℃	601	554	544	
最大燃烧速率/(%・min ⁻¹)	3.70	4.50	2.58	
平均燃烧速率/(%・min ⁻¹)	1.78	1.76	1.06	
初始燃尽率/%	44.26	51.14	71.28	
后期燃尽率/%	53.74	46.86	26.72	
综合燃烧特性指数/ (% ² ·K ⁻³ min ⁻²)	2. 30 × 10 $^{-8}$	3.05 × 10 $^{-8}$	1.05 $\times 10^{-8}$	

从表 4 中可以看出, YY2 的综合燃烧特性指数 最高, YY1 其次, YY3 相对最差, 说明利用分级冷凝 所获得的初分生物油在燃烧特性上出现了比较明显 的区别, 对于组分中所含沸点较高的物质, 其燃烧特 性也较好。

4 结论

(1)设计了一种可以灵活调整冷凝级数及换热 面积的恒温分级冷凝装置,并应用该装置对油茶果 壳在 500℃获得的热解挥发物进行了分级冷凝试 验,获得了 120℃以下、120~165℃、165℃以上 3 个 冷凝温度段下的分级生物油产物。

(2)分别分析了各组产物的理化特性,结果显示,前2级生物油产物的含水率得到了有效降低,高位热值均大于23 MJ/kg,比常规方法所获生物油的 热值增加约44%,但运动粘度较大。随着冷凝温度的降低,各组生物油运动粘度显著下降,pH值略有提升。

(3)通过热分析曲线并结合综合燃烧特性指数 分析了生物油的燃烧特性,发现利用分级冷凝所获 得的初分生物油在燃烧特性上出现了比较明显的区 别,YY2 在各组样品中的燃烧性能是最好的。

(4)通过所设计的分级冷凝装置基本实现了热 解挥发物的在线初级分离,可以为生物质热解挥发 物分级冷凝装置的设计提供参考,并为分级生物油 的进一步应用奠定研究基础。

参考文献

- 1 ROVERA Marjorie R, JOHNSTON Patrick A, WHITMERA Lysle E, et al. The effect of pyrolysis temperature on recovery of biooil as distinctive stage fractions [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014,105:262-268.
- 2 李世光,徐绍平,路庆花,等.快速热解生物油柱层析分离与分析[J].太阳能学报,2005,26(4):549-555.

(2)

- LI Shiguang, XU Shaoping, LU Qinghua, et al. Column chromatographic separation of bio-oil from fast pyrolysis of biomass[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2005,26(4):549 - 555. (in Chinese)
- 3 郭祚刚, 王树荣, 朱颖颖, 等. 生物油酸性组分分离精制研究[J]. 燃料化学学报, 2009,37(1):49-52. GUO Zuogang, WANG Shurong, ZHU Yingying, et al. Separation of acid compounds for refining biomass pyrolysis oil[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009,37(1):49-52. (in Chinese)
- 4 WANG Shurong, GU Yueling, LIU Qian, et al. Separation of bio-oil by molecular distillation [J]. Fuel Processing Technology, 2009,90(5): 738 745.
- 5 WILLIAMS P T, BRINDLE A J. Temperature selective condensation of tyre pyrolysis oils to maximise the recovery of single ring

aromatic compounds [J]. Fuel, 2003, 82(9): 1023 - 1031.

- 6 韩平, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 生物油分级冷凝研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 207-213.
- HAN Ping, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Research progress in fractional condensation of bio-oil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):207-213. (in Chinese)
- 7 蒋恩臣,熊磊明,王明峰,等. 生物质热解挥发物两级冷凝器的设计[J]. 东北农业大学学报,2014,45(5):110-115. JIANG Enchen, XIONG Leiming, WANG Mingfeng, et al. Development of biomass pyrolysis volatiles fractional condenser[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014,45(5):110-115. (in Chinese)
- 8 CHANG Chin-chiang, WU Seng-rung, LIN Chi-cheng, et al. Fast pyrolysis of biomass in pyrolysis gas: fractionation of pyrolysis vapors using a spray of bio-oil[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(5): 2962 2967.
- 9 WESTERHOF R J M, BRILMAN D W F, GARCIA-PEREZ Manuel, et al. Fractional condensation of biomass pyrolysis vapors [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(4):1817-1829.
- 10 WESTERHOF R J M, BRILMAN D W F, SWAAIJ W P M, et al. Effect of temperature in fluidized bed fast pyrolysis of biomass: oil quality assessment in test units[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(3):1160 - 1168.
- 11 左武,金保昇,黄亚继,等.分级冷凝回收城市污泥热解油[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):125-129. ZUO Wu, JIN Baosheng, HUANG Yaji, et al. Pyrolysis oil retrieving from sewage sludge by fractional condensation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013,43(1):125-129. (in Chinese)
- 12 谭洪,王树荣,骆仲泱,等. 生物质整合式流化床热解制油系统试验研究[J]. 农业机械学报,2005,36(4):30-33,38. TAN Hong, WANG Shurong, LUO Zhongyang, et al. Experimental research on biomass flash pyrolysis for bio-oil in a fluidized bed reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(4):30-33,38. (in Chinese)
- 13 石文,张长森,徐兴敏,等.分级冷凝与电捕获器分离精制生物油研究[J].现代化工,2010,30(3):51-53. SHI Wen, ZHANG Changsen, XU Xingmin, et al. Separation and refinement of bio-oil by fractional condensation and electrostatic precipitator[J]. Modern Chemical Industry, 2010,30(3):51-53. (in Chinese)
- 14 张长森,石文,徐兴敏,等.木屑快速热解液化与产品分析[J].化工进展,2010,29(5):952-957. ZHANG Changsen, SHI Wen, XU Xingmin, et al. Fast pyrolysis of sawdust and analysis of bio-oil produced[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010,29(5):952-957. (in Chinese)
- 15 POLLARD A S, ROVER M R, BROWN R C. Characterization of bio-oil recovered as stage fractions with unique chemical and physical properties [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012,93:129-138.
- 16 王明峰,吴字健,蒋恩臣,等. 无轴螺旋连续热解装置上的生物质热解特性[J]. 农业工程学报, 2015,31(15):216-222. WANG Mingfeng, WU Yujian, JIANG Enchen, et al. Biomass continuous pyrolysis characteristics on shaftless screw conveying reactor[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(15):216-222. (in Chinese)
- 17 蒋恩臣,郭信辉,王明峰,等.油茶壳连续热解挥发物冷凝特性研究[J].农业机械学报,2015,46(9):206-210. JIANG Enchen, GUO Xinhui, WANG Mingfeng, et al. Condensation characteristic of continuous pyrolysis volatiles of oil-tea camellia shell[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):206-210. (in Chinese)
- 18 许细薇,蒋恩臣,王明峰,等.油茶壳热解特性及动力学分析[J].中国电机工程学报,2012,32(8):118-123. XU Xiwei, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Characteristics and kinetics of camellia oleifera shell pyrolysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(8):118-123. (in Chinese)
- 19 GB/T 10247—2008 粘度测量方法[S]. 2008.
- 20 YANG Zixu, AJAY Kumar, HUHNKE Raymond L. Review of recent developments to improve storage and transportation stability of bio-oil[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50:859 - 870.
- 21 CHEN Dengyu, ZHOU Jianbin, ZHANG Qisheng, et al. Evaluation methods and research progresses in bio-oil storage stability [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,40;69 - 79.
- 22 张琦,马隆龙,张兴华. 生物质转化为高品位烃类燃料研究进展[J]. 农业机械学报, 2015,46(1):170-179. ZHANG Qi, MA Longlong, ZHANG Xinghua. Progress in production of high-quality hydrocarbon fuels from biomass [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):170-179. (in Chinese)
- 23 朱锡锋. 生物质热解液化技术研究与发展趋势[J]. 新能源进展, 2013,1(1):32 37.
 ZHU Xifeng. Research development of biomass fast pyrolysis[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013,1(1):32 37. (in Chinese)
- 24 YIN Renzhan, Liu Ronghou, Mei Yuanfei, et al. Characterization of bio-oil and bio-char obtained from sweet sorghum bagasse fast pyrolysis with fractional condensers [J]. Fuel, 2013,112:96 - 104.
- 25 EJIM C E, FLECK B A, AMIRFAZLI A. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects [J]. Fuel, 2007,86(10-11):1534-1544.
- 26 刘联胜,吴晋湘,杨华,等. 气泡雾化喷嘴颗粒平均直径经验公式的拟合[J]. 燃烧科学与技术, 2002,8(5):464-467. LIU Liansheng, WU Jinxiang, YANG Hua, et al. Empirical equation for mean drop size of effervescent atomizers[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002,8(5):464-467. (in Chinese)
- 27 李理, 阴秀丽,吴创之,等. 生物油热解及燃烧特性分析[J]. 太阳能学报, 2008,29(6):733-737. LI li, YIN Xiuli, WU Chuangzhi, et al. Study on the pyrolysis and combustion characteristics of bio-oil[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008,29(6):733-737. (in Chinese)
- 28 XIU S, ROJANALA H K, SHAHBAZI A, et al. Pyrolysis and combustion characteristics of bio-oil from swine manure [J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2012, 107(2): 823 - 829.
- 29 LI R, JIN B, JIA X, et al. Research on combustion characteristics of bio-oil from sewage sludge [J]. Frontiers of Chemical Engineering in China, 2009, 3(2): 161-166.
- 30 NIU S L, HAN K H, LU C M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(1): 532 - 537.