

黄酒米浆水残渣与木质成型燃料 燃烧特性研究

董颖娜¹, 张来娇¹, 郭 明¹⁻³, 李茜云¹, 张 蔚³

(1. 浙江农林大学农业与食品科学学院, 临安 311300; 2. 浙江农林大学理学院, 临安 311300;
3. 浙江农林大学工程学院, 临安 311300)

摘 要:以木质加工剩余物与黄酒米浆水固体残渣为原料,利用热压成型技术制备新型生物质燃料。利用热重-微分热重-差示扫描量热法(TG-DTG-DSC)热分析联用技术,对制备的新型生物质燃料的燃烧特性进行研究。研究表明:制备的新型生物质燃料随米浆水残渣添加量的增加,其可燃性、稳定性增强,但燃尽性降低。故米浆水固体残渣与木屑混合比例为1:1时所制备的生物质燃料综合燃烧性能较高,用于替代纯木屑生物质燃料最为合适。

关键词:米浆水; 生物质燃料; 燃烧特性; 燃烧动力学

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

目前开发新型生物质成型燃料代替化石类能源是能源领域的前沿和热点。林业加工剩余物是目前生物质成型燃料的主要组成部分^[1]。但随着木材加工剩余物利用途径的不断拓展^[2],将其压制成生物质燃料的成本不断提高。开展新型混合型低值生物质燃料研发已成为必然趋势。

米浆水为黄酒酿造过程中的副产物,直接排放会造成黄酒企业附近河流的水体富营养化,严重污染环境。文献[3]对黄酒米浆水重复利用的方法主要是将米浆水回用于黄酒酿造的前酵阶段。该方法用量不当时会导致酿造的黄酒过酸,故一般不被黄酒企业采用,大多将米浆水通过絮凝沉淀法固液分离后排放,此过程会产生大量固体残渣,其中含有丰富的淀粉、蛋白质,若将其作为生物质原料,能增强生物质原料颗粒间的粘结力,提高生物质燃料成型品质^[4-6]。

以黄酒米浆水残渣作为生物质成型燃料的原料,开发利用的潜力巨大。本文以木屑及黄酒米浆水固体残渣混合型生物质燃料为研究对象,利用

TG-DTG-DSC 技术对其进行热重分析并进行动力学分析,以期对低价生物质能源的开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验原料与仪器

糯米浆水固体残渣(浙江圣塔绍兴酒有限公司),杨木木屑(国家木质资源综合利用工程技术研究中心),CaCl₂(CP,国药集团化学试剂有限公司),变色硅胶(国药集团化学试剂有限公司)。

Sartorius 电子分析天平(德国赛多利斯集团),箱式电阻炉 SX2-4-10(上海跃进医疗器械厂),万能粉碎机 FW80(上海跃进现代农业有限公司),螺旋挤压式成型机 DS-1000(郑州东阳机械设备有限公司),电热恒温鼓风干燥箱 DHG-9123A(上海恒科学仪器有限公司),真空干燥箱 DZF-6020(上海精宏实验设备有限公司),热重分析仪 Q5000IR(TGA)(美国 TA 公司),差示扫描量热仪 Q2000(DSC,美国 TA 公司),全自动氧弹热量计 Parr 6400(北京东方圣隆达科技有限公司)。

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY16C160012); 浙江省省院合作科技项目(2015SY11)

通信作者: 郭 明(1967—),男,博士、教授,主要从事生物质材料合成方面的研究。guoming@zafu.edu.cn

1.2 实验方法

1.2.1 生物质燃料制备

取新鲜米浆水,用 NaOH 溶液调节 pH 值,添加适量的混凝剂或助凝剂,以 80 r/min 速率搅拌 1 min,静置 6~48 h 后,采用板框布式压滤机将其固液分离。黄酒米浆水固体残渣和杨木木屑经过自然干燥后,利用万能粉碎机切碎,过筛,再利用螺旋式挤压成型机在一定压力和温度下将其挤压成型,冷却至室温定型后储存。

1.2.2 物理性能测试

视密度测定方法:准确称量制备的生物质燃料压块,质量为 m 。在量筒中注入其容量一半的水,读取水面刻度 V_0 ,将称量好的压块倒入量筒,若出现漂浮现象,迅速用大头针将其扎入水中,在 10 s 内迅速读取水面刻度 V 。测试结果按式(1)计算生物质成型燃料的密度,计算 3 次重复实验结果的平均值,保留小数点后两位。

$$\rho = \frac{m}{V - V_0} \quad (1)$$

式中, ρ ——生物质成型燃料的密度, g/cm^3 ; m ——试样的质量, g 。

生物质燃料常规指标水分 (M_{ad})、灰分 (A_{ad})、挥发分 (V_{ad})、固定碳 (FC_{ad}) 测定参照 GB/T 212—2008 进行测定及分析。

1.2.3 燃烧性能测定

利用热重-微分热重-差示扫描量热法 (TG-DTG-DSC) 热分析联用技术,对不同比例固体残渣和木屑所制备的生物质燃料。实验选用美国 Q5000IR (TGA) 热重分析仪和 Q2000 差示扫描量热仪。该分析仪主要技术指标为:温度范围为室温至 800 $^{\circ}\text{C}$;样品最大装填量为 5 g;平衡气体为 N_2 ,流量设定为 40 mL/min。样品气体为空气,载气流量设定为 60 mL/min,实验升温采用程序升温的非等温法,升温速率为 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。通过计算机进行数据采集和处理,得到燃料的特性值,如燃尽温度、着火点、最大失重率、最大释热量等,通过这些数据计算相应的判别指标、综合燃烧特性指数和燃烧动力学参数,从而对燃烧特性进行评价。

2 结果与讨论分析

2.1 加工工艺

由于生物质具有热值低、体积密度小、物理形态不规则等特征,严重限制了生物质的能源化利用。生物质致密成型技术是解决以上问题的有效方法。生物质致密成型技术即利用机械力将生物质压缩或挤压成为体积密度较大、热效率较高、便于运输及储藏的固体燃料^[7]。热压成型是目前普遍采用的致密成型工艺。热压过程中基于文献[8,9]研究成果,采用图 1 的制备工艺。本次研究工艺条件确定为:米浆水固体残渣和木屑分别粉碎,过 20 目筛,热压成型温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,挤压速度 1 m/min,含水率 8%~10%。米浆水固体残渣制备生物质环保燃料的工艺流程图如图 1。

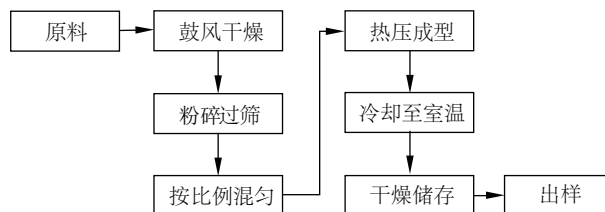


图 1 木屑与米浆水固体残渣制备生物质燃料的工艺流程图

Fig. 1 Manufacturing process of densified biomass fuel

2.2 物理性能测试

根据 1.2 节实验,木质与米浆水固体残渣制备生物质燃料的物理性能测试结果列于表 1。由表 1 可知,由米浆水固体残渣及木屑按一定比例制备的 5 种生物质燃料,其视密度均大于 1.00 g/cm^3 ,符合生物质燃料颗粒技术要求 ($>1.0 \text{ g/cm}^3$)^[10]。100%木屑制备的生物质燃料视密度最大为 1.32 g/cm^3 ,100%固体残渣制备的生物质燃料视密度最小为 1.07 g/cm^3 ,随固体残渣含量比例的增大,5 种生物质燃料的视密度呈下降趋势。根据 GB/T 212—2008,生物质燃料工业分析指数满足:水分含量 (%) + 灰分含量 (%) + 挥发分含量 (%) + 固定碳含量 (%) = 100%。由表 1 可看出,随着米浆水固体残渣含量配比的增加 (从 0% 到 100%),所制备的生物质燃料灰分含量逐渐增加,挥发分含量逐渐降低,固定碳含量先增高后降低,这可能与原料配料的物质形态、粉

碎过程对其纤维素、半纤维素以及木质素结构造成一定破坏,也可能与不同物料本身所含有的矿物质

和非金属成分不同有关。

表1 物理性能测试表

Table 1 Measurement table of combustion performance

样品编号	质量配比	视密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$M_{\text{ad}}/\%$	$A_{\text{ad}}/\%$	$V_{\text{ad}}/\%$	$FC_{\text{ad}}/\%$
1	100%木屑	1.32	4.19	0.82	88.24	6.75
2	75%木屑+25%残渣	1.29	3.87	1.19	86.32	8.62
3	50%木屑+50%残渣	1.23	3.24	1.08	83.65	9.87
4	25%木屑+75%残渣	1.11	2.78	3.71	82.41	11.10
5	100%残渣	1.07	2.36	8.94	79.69	9.01

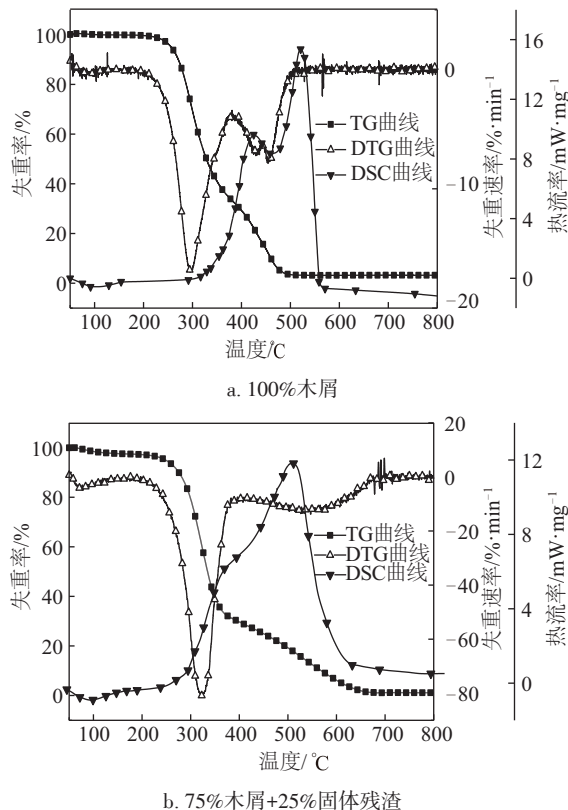
2.3 燃烧动力学特性研究

2.3.1 燃烧特性曲线分析

按上述实验条件,对不同配料比例制备的5种生物质燃料分别进行燃烧性能测试,图2分别为100%木屑、75%木屑+25%固体残渣、50%木屑+50%固体残渣图、25%木屑+75%固体残渣与100%固体残渣(均为质量比)5种生物质燃料的TG、DTG和DSC曲线图。

由图2生物质燃料的TG曲线可知,不同混合比例配制的5种生物质成型燃料在程序升温控制下,样品的重量均随温度变化不断减少,但不同样品在相同温度变化情况下,样品的失重情况不同。生物质成型燃料的燃烧特性分析主要包括样品水分蒸发、挥发分析出和固定碳燃烧3个燃烧过程^[11, 12]。水分蒸发即脱水,指样品中的水分受热而蒸发汽化,燃烧时从中逸出。挥发分的析出和燃烧是指样品受热后,低分子量的物质成分首先分解气化,随后达到着火点后即可形成气相燃烧火焰,这种燃烧温度有助于加快样品中纤维素的热解过程,并产生大量挥发性成分,出现第1个反失重速率的峰值。焦炭的燃烧是指样品中的木质素全部炭化,燃烧速度较快,并出现第2个波峰,随后燃烧速度逐渐变慢,最终趋于不变,即达到燃尽温度(450~600℃)后,样品质量不再发生变化。100%木屑、75%木屑+25%固体残渣与50%木屑+50%固体残渣制备的3种样品随温度的升高,质量减少较多,燃烧后剩余物即灰分含量少。25%木屑+75%固体残渣与100%固体残渣制备的生物质燃料在程序升温条件下,质量减少较少,燃烧后灰分量大,这与表1中测量数据相符,即样品1、样品2与

样品3灰分含量较低,样品4和样品5灰分含量较高。5种生物质燃料的水分含量差别不大,室温至210℃为100%木屑、75%木屑+25%固体残渣与50%木屑+50%固体残渣制备的3种样品的水分蒸发及少量挥发性气体析出阶段,25%木屑+75%固体残渣与100%固体残渣制备的生物质燃料在约280℃才析出完毕。210~320℃内为100%木屑、75%木屑+25%固体残渣与50%木屑+50%固体残渣制备的3种样品挥发分析出及燃烧阶段,320~500℃内为焦炭燃烧引起的质量损失;25%木屑+75%固体残渣与100%固体残渣制备的生物质燃料的质量损失主要集中在280~360℃内。



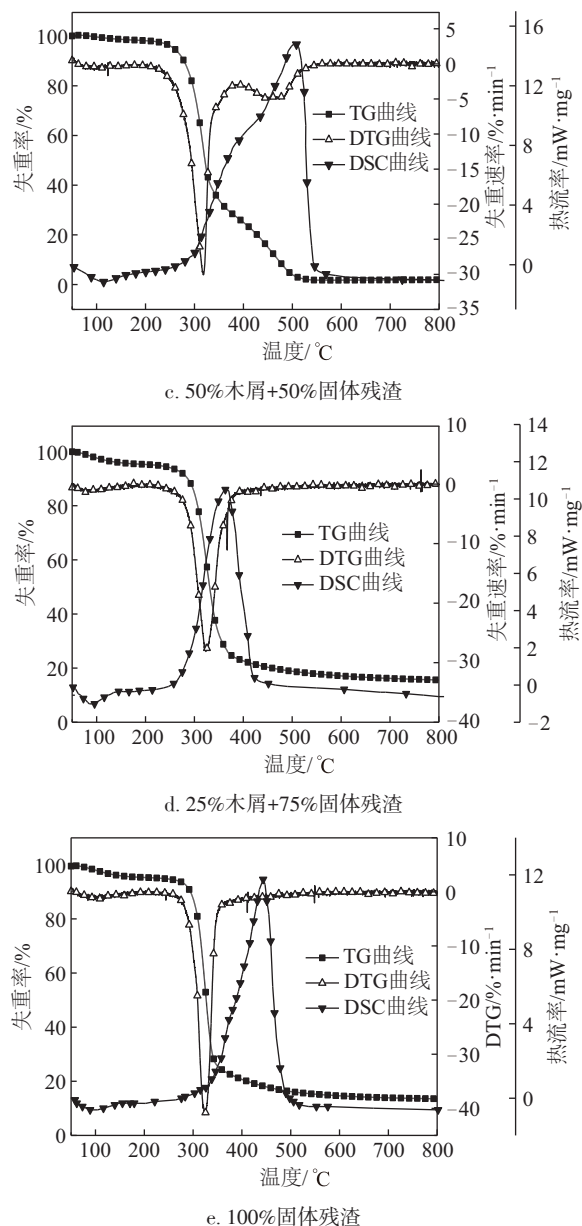


图2 5种生物质燃料的TG-DTG-DSC曲线图

Fig. 2 Thermal analysis of TG-DTG-DSC curve of 5 kinds of biomasses' briquetting

由图2生物质成型燃料的DTG曲线可看出,在220~420℃失重速率最大。当温度在220~320℃时,样品中不稳定物(半纤维素)开始热解。随后木质素和纤维素也开始热解燃烧,当320~350℃以后,样品的失重速度开始下降,木屑和米浆水固体残渣本身物质不同,下降速度差距明显,320~420℃阶段主要是样品中木质素和纤维素成分热解燃烧,而半纤维素热解燃烧基本完成。从图2a~图2c看出DTG曲线出现2个较为明显的波峰,且

第1个波峰峰值显著高于第2个波峰,而第2个波峰主要由样品中木质素的热解产物,即固定碳燃烧失重所致。而图2d、图2e DTG曲线中,第2个波峰不明显,原因可能是米浆水固体残渣中木质素含量相对于木屑而言较少,当混合物料中木屑含量显著低于固体残渣时,在温度由320℃升至420℃,木质素含量较低的样品4和样品5无法显现出明显的波峰^[13]。

分析图2中DSC曲线可知,50%木屑+50%固体残渣制备的生物质燃料放热峰值最大,这可能是由于米浆水固体残渣的加入。木质生物质燃料在半纤维素、纤维素及木质素足够的情况下颗粒间的粘接力增强,生物质成型品质提高,燃烧反应更加集中。米浆水固体残渣含量超过50%时燃烧反应更加集中,但木质素含量过低,导致放热峰值变小^[14]。根据生物质成型燃料燃烧过程,对燃烧特性曲线定义了4个重要的特征参数: T_1 为失水率最大时对应的温度; T_i 为着火温度,确定采用常用的TG-DTG方法确定^[15]; T_{max} 燃烧速率最大时对应的温度; T_b 为燃尽温度,对应TG和DTG曲线不再变化时的温度。5种样品燃烧特性参数详见表2。

表2 燃烧特性参数

样品	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$T_b/^\circ\text{C}$	热值 $q/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
1	84	261	296	505	17964.9
2	88	281	323	670	17395.6
3	85	287	315	523	17124.8
4	84	298	324	678	16866.2
5	94	305	324	715	15696.4

由表2可知,这5种生物质燃料在失水过程中的最大失水速率对应的温度 T_1 不存在差异,说明水分在木屑和米浆水固体残渣中的吸附方式与含量不同。各样品的着火温度(着火温度越高,说明着火越困难)随米浆水固体残渣添加量的增加而升高,米浆水固体残渣的加入量少于50%时,对着火温度的影响并不显著。挥发分燃烧峰值温度、燃尽温度(燃尽温度越高,说明该样品的燃尽特性较差)由高到低均依次是100%残渣、25%木屑+75%残渣、75%木屑+25%残渣、50%木屑+50%残渣、100%木屑。50%木屑+50%残渣制备的生物质燃料挥发分燃烧对应的峰值温度、燃尽温度与

100%木屑生物质燃料的更为相近。此外,生物质燃烧放热区间主要从着火温度到燃尽温度之间。进一步分析表2可知,50%木屑+50%残渣的样品的主要燃烧区间相较于100%木屑生物质燃料更为集中。50%木屑+50%米浆水残渣制备的生物质燃料从燃烧性能看作100%的木屑生物质燃料的替代品更为适宜。同时,对5种生物质成型燃料的热值进行测定,木屑含量占50%以上的生物质成型燃料发热量相对较高,且5种样品发热量均达到二类烟煤的标准。

2.3.2 燃烧特性指数分析

可燃特性指数 C_r 代表可燃性能,其定义式为:

$$C_r = \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_i^2} \quad (2)$$

式中, $(dw/dt)_{\max}$ ——最大燃烧速度, %/min; T_i ——着火温度, °C。

燃烧稳定性判别指数 R_w 代表燃烧稳定性能,其定义为:

$$R_w = \frac{655}{T_i} \times \frac{763}{T_{\max}} \times \frac{(dw/dt)_{\max}}{8.73} \quad (3)$$

式中, 655——碳粉着火温度, °C; T_i ——样品着火温度, °C; 763——碳粉最大燃烧速率对应的温度, °C; $(dw/dt)_{\max}$ ——最大燃烧速度, %/min; 8.73——碳粉最大燃烧速率, %/min。

燃尽特性指数 C_b 代表燃烧是否完全,其定义为:

$$C_b = (f_1 f_2) / t_0 \quad (4)$$

式中, f_1 ——初始燃尽率, %; f_2 ——后期燃尽率, %; t_0 ——燃尽时间, min。

综合燃烧性能指数 P 反映综合燃烧特性,其计算方法参考文献[16~18]定义,即:

$$P = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_h} \quad (5)$$

式中, $(dw/dt)_{\text{mean}}$ ——平均燃烧速度, %/min; T_h ——燃尽温度, °C。

5种样品燃烧特性指数详见表3。可燃特性指数 C_r 在一定程度上反映生物质的可燃性。可燃特性指数 C_r 越大,说明样品的可燃性越好。由表3可知,黄酒米浆水残渣与木质成型燃料随米浆水固体残渣比例的增大,可燃性指数 C_r 增大。当米浆水固体残渣含量大于25%时,制备的新型成型燃料可燃性高于100%的木屑成型燃料。

燃烧稳定判别指数 R_w 可评判燃烧过程中燃料的稳定性,燃烧稳定判别指数 R_w 越大,说明燃烧越稳定。分析表3可知,黄酒米浆水残渣与木质成型燃料随米浆水固体残渣比例的增大,燃烧稳定判别指数 R_w 增大,燃烧稳定性增强,且制备的新型成型燃料燃烧稳定判别指数均大于100%的木屑成型燃料。说明米浆水固体残渣的加入可提高木屑成型燃料的稳定性。燃尽特性指数 C_b 高,表明燃烧速率快,燃烧比较完全。当制备的新型成型燃料中米浆水固体残渣含量为25%~50%时,燃尽特性指数 C_b 最高,燃烧速率较快,燃烧更为完全。综合燃烧特性指数值越大,表示样品的综合燃烧性能越好。

表3 燃烧特性指数表

Table 3 Index of combustion characteristics of biomass

试样编号	$(dw/dt)_{\max}/\% \cdot \text{min}^{-1}$	$(dw/dt)_{\text{mean}}/\% \cdot \text{min}^{-1}$	$C_r/\text{K}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$	$R_w/\% \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$	C_b/min^{-1}	$P/\text{K}^{-3} \cdot \text{min}^{-2}$
1	16.90	7.41	2.48×10^{-6}	0.13	3.09×10^{-3}	5.64×10^{-7}
2	18.37	4.48	2.33×10^{-6}	0.12	5.83×10^{-3}	2.84×10^{-7}
3	20.60	7.04	2.50×10^{-6}	0.13	5.94×10^{-3}	5.80×10^{-7}
4	27.53	3.71	3.10×10^{-6}	0.16	3.63×10^{-3}	3.29×10^{-7}
5	40.46	3.43	4.35×10^{-6}	0.24	5.37×10^{-3}	4.37×10^{-7}

从表3可看出,样品3(即50%木屑+50%米浆水固体残渣混合后)制备的生物质成型燃料综合燃烧性能指数最大,燃烧特性最好,其次为样品5、样品4、样品2。在相同升温速率下,50%木屑+50%米浆水固体残渣混合后制备的生物质成型燃料的综合燃烧指数略高于100%木屑生物质燃料。同时,

制备的新型生物质燃料其综合燃烧性能指数 P 在 $(2.84 \sim 5.80) \times 10^{-7} \text{ K}^{-3}/\text{min}^2$ 范围内,均显著大于煤的燃烧性能指数 $(5 \sim 61) \times 10^{-9} \text{ K}^{-3}/\text{min}^2$ [19,20],两者相差2个数量级。

2.3.3 燃烧动力学参数分析

生物质燃料燃烧动力学分析采用 Freeman-

Carroll^[21, 22]进行求解。通过线性回归处理,由比较所得线性关系的优劣来确定最可能的函数模型,并由直线的斜率和截距得到 E 和 A 的大小。其基本公式为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E/RT} f(\alpha) \tag{6}$$

取自然对数:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln A - \frac{E}{R}\left(\frac{1}{T}\right) + n \ln(1-\alpha) \tag{7}$$

式(7)两边除以 $\ln(1-\alpha)$, 得:

$$\ln\left(\frac{d\alpha/dt}{1-\alpha}\right) = -\frac{E}{R} \times \frac{1/T}{\ln(1-\alpha)} + \frac{\ln A}{\ln(1-\alpha)} \tag{8}$$

式中, α ——热分解失重率, %; t ——时间, min; A ——频率因子, min^{-1} ; E ——表观活化能, kJ/mol ; R ——气体常数, $R=8.31 \text{ J/mol}$; T ——热力学温度, K。

对 $Y = \ln\left(\frac{d\alpha/dt}{1-\alpha}\right)$, $X = \frac{1}{T}$ 作图得一直线, 通过斜率和截距得到 E 和 A 的大小。

5 种样品的燃烧动力学参数见表 4。表 4 拟合方程相关系数 r 均大于 0.984, 线性回归较合理, 所采用模型的计算结果可靠。样品 1 在低温燃烧阶段的活化能低于在高温阶段燃烧的活化能, 主要是 100% 木屑燃烧时木质素含量较多, 木质素热分解所需的活化能大于半纤维素及纤维素的热分解所需的活化能^[23]。样品 2、样品 3 在高温燃烧阶段的活化能低于在低温阶段燃烧的活化能, 说明木质中加入一定量的米浆水固体残渣后, 在高温阶段会变得易分解。样品 4、样品 5 中木屑比例低, 米浆水固体残渣比例高, 压制而成的生物质燃料木质素含量较低, 挥发分的析出和焦炭的燃烧过程界限不明显 (因为样品 4、样品 5 动力学参数计算时只能拟合出 1 个阶段的方程), 故只对应 1 个燃烧阶段。当木屑中加入的米浆水固体残渣含量低于 50% 时, 在挥发分燃烧阶段的活化能略高于 100% 木屑的活化能, 焦炭燃烧阶段其活化能低于 100% 木屑的活化能, 有利焦炭的完全燃烧。

表 4 5 种生物质燃料燃烧动力学参数

Table 4 Results of reaction kinetics parameters of 5 kinds of biomass fuels

样品编号	T/K	相关方程	$E/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	A/min^{-1}	r
1	501~566	$y=-13278x+19.141$	110.39	2.06×10^8	0.9960
	656~757	$y=-14201x+16.355$	118.07	1.27×10^7	0.9840
2	519~571	$y=-17497x+27.433$	158.28	1.34×10^{13}	0.9932
	647~691	$y=-11728x+13.642$	97.51	8.41×10^5	0.9874
3	518~571	$y=-17732x+27.871$	147.42	1.27×10^{12}	0.9941
	639~702	$y=-12801x+15.278$	106.43	4.32×10^6	0.9840
4	569~615	$y=-20206x+29.864$	167.99	9.33×10^{12}	0.9849
5	527~607	$y=-24598x+38.081$	204.51	3.45×10^{16}	0.9903

3 结 论

采用热压成型工艺, 利用螺旋式挤压成型机将固体残渣粉碎、干燥, 与碎木屑按一定比例混合、挤压成型, 制备生物质成型燃料, 并对样品进行物理性能和燃烧性能参数测定, 得出以下主要结论:

1) 由米浆水固体残渣及木屑按一定比例制备的 5 种生物质燃料, 其视密度均大于 1.0 g/cm^3 。随着固体残渣含量比例的增大, 5 种生物质燃料的视密度呈下降趋势, 灰分含量逐渐增大, 挥发分含量逐渐减小, 固定碳含量先增大后减小, 这可能与物料本身所含有的矿物质和非金属成分及物质结构

不同有关。

2) 黄酒米浆水残渣与木质成型燃料制备时米浆水固体残渣比例低于 50% 时, 与 100% 木屑燃烧过程相似, DTG 曲线出现 2 个失重峰, 当添加比例高于 50% 时只出现 1 个失重峰。DSC 曲线显示米浆水固体残渣的加入可提高燃料的燃烧集中性, 促进后期燃烧稳定性提高。

3) 经燃烧性能参数测定, 黄酒米浆水残渣与木质成型燃料随米浆水固体残渣比例的增大, 燃烧可燃性、稳定性增强, 但燃尽性降低, 50% 木屑+50% 米浆水固体残渣综合燃烧性能最好, 优于 100% 木屑制备的生物质燃料, 且 5 种生物质燃料的燃烧性能

指数均显著大于煤的燃烧性能指数。

4) 50%木屑+50%米浆水固体残渣与 75%木屑+25%米浆水固体残渣制备的生物质燃料比 100%米浆水固体残渣单独燃烧时的活化能低,在低温阶段比 100%木屑单独燃烧所需的活化能略高,高温阶段比 100%木屑单独燃烧所需的活化能低。焦炭燃烧阶段其活化能低于 100%木屑的活化能,有利焦炭的完全燃烧。

[参考文献]

- [1] 彭好义,姚 昆,蒋绍坚,等. 氧体积分数对木质和玉米秸秆燃烧特性的影响[J]. 热科学与技术, 2014, 13(1): 61—66.
- [1] Peng Haoyi, Yao Kun, Jiang Shaojian, et al. Effect of volume fraction of oxygen on combustion characteristics of wood pellets and corn stalks[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2014, 13(1): 61—66.
- [2] 徐 洋,杜祥哲,齐英杰,等. 浅析木材加工剩余物的利用途径[J]. 林产工业, 2015, 42(5): 40—44.
- [2] Xu Yang, Du Xiangzhe, Qi Yingjie, et al. Utilization of wood processing residues[J]. China Forest Products Industry, 2015, 42(5): 40—44.
- [3] 魏桃英,张秋汀,沈丽敏,等. 对黄酒米浆水综合回用的研究[J]. 酿酒科技, 2016, (2): 100—103.
- [3] Wei Taoying, Zhang Qiuting, Shen Liming, et al. The comprehensive reuse of rice soaking water in yellow rice wine production[J]. Liquor-making Science & Technology, 2016, (2): 100—103.
- [4] Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(7): 648—654.
- [5] Adapa P, Tabil L, Schoenau G. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw[J]. Bio-systems Engineering, 2009, 104(3): 335—344.
- [6] Kaliyan N, Vance M R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337—359.
- [7] 张 霞,蔡宗寿,陈丽红,等. 生物质成型燃料品质影响因素及成型模型研究[J]. 农机化研究, 2015, (1): 242—245.
- [7] Zhang Xia, Cai Zongshou, Chen Lihong, et al. Study on the quality affecting factors and compression models of densified biomass fuel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, (1): 242—245.
- [8] 李美华. 生物质燃料致密成型参数的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [8] Li Meihua. The study on biofuel solidification parameter [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [9] 姜 洋,曲静霞,郭 军,等. 生物质颗粒燃料成型条件的研究[J]. 可再生能源, 2006, 120(5): 16—18.
- [9] Jiang Yang, Qu Jingxia, Guo Jun, et al. Study on the formation conditions of biomass pellet[J]. Renewable Energy, 2006, 120(5): 16—18.
- [10] 向 魁. 低挥发分煤高效低NO_x燃烧试验及模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [10] Xiang Kui. Experimental and simulational study of high efficient and low NO_x combustion of low-volatile pulverized coal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [11] 刘圣勇,王艳玲,白 冰,等. 玉米秸秆致密成型燃料燃烧动力学分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 287—292.
- [11] Liu Shengyong, Wang Yanling, Bai Bing, et al. Analysis on combustion kinetics of corn stalk briquetting densification fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 287—292.
- [12] Kocabaş-Ataklı Züleyha Özlem, Okay-Öner Firuze, Yürüm Yuda. Combustion characteristics of Turkish hazelnut shell biomass, lignite coal, and their respective blends via thermogravimetric analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 119(3): 1723—1729.
- [13] Worasuwannarak N, Sonobe T, Tanthapanichakoon W. Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 78(2): 265—271.
- [14] 蒋绍坚,王 涛,彭好义,等. 木质和玉米秸秆成型燃料热重分析与燃烧动力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(10): 4312—4318.
- [14] Jiang Shaojian, Wang Tao, Peng Haoyi, et al. Thermogravimetric and combustion dynamics of moulding fuel of woodiness and cornstalk[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(10): 4312—4318.
- [15] 陈镜泓,李传儒. 热分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [15] Chen Jinghong, Li Chuanru. Thermal analysis and its application[M]. Beijing: Science Press, 1985.

- [16] 闵凡飞, 张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 104—108.
- [16] Min Fanfei, Zhang Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 104—108.
- [17] 李余增. 热分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [17] Li Yuzeng. Thermal analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.
- [18] 田 红, 廖正祝. 农业生物质燃烧特性及燃烧动力学[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 203—212.
- [18] Tian Hong, Liao Zhengzhu. Combustion characteristics and combustion kinetics of agriculture biomass[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 203—212.
- [19] 马孝琴. 生物质燃烧动力学特性实验研究[J]. 可再生能源, 2004, (6): 178—186.
- [19] Ma Xiaoqin. Study on kinetic characteristics in combustion process of biomass [J]. Renewable Energy, 2004, (6): 178—186.
- [20] 付娅琦, 睢利铭, 杨北方, 等. 生物质固体成型燃料的关键技术及可行性[J]. 农业装备与车辆工程, 2011, (5): 1—4.
- [20] Hu Yaqi, Sui Liming, Yang Beifang, et al. The key technology of biomass desified biofuel and its applicability[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2011, (5): 1—4.
- [21] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [21] Tu Rongzu, Shi Qizhen. Thermal analysis kinetics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [22] Wu Fang, He Qingli, Hu Dinxu, Thermal decomposition of thermoelectric material CoSb₃: A thermogravimetry kinetic analysis[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(8): 2574—2581.
- [23] Claudia J G, Gabor V, Luis P. Slow pyrolysis of woody residues and a herbaceous biomass crop: A kinetic study [J]. Industrial & Engineering chemistry Research, 2005, 44(17): 6650—6660.

STUDY ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF MOULDING FUEL OF RICE WINE RESIDUE AND WOODINESS

Dong Yingna¹, Zhang Laijiao¹, Guo Ming¹⁻³, Li Xiyun¹, Zhang Wei³

(1. College of Agricultural Sciences, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an 311300, China;

2. College of Science, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an 311300, China;

3. College of Engineering, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: The new type of biomass fuels, which derives from wood processing residues and rice wine solid residues, was prepared by hot pressing technology. The combustion characteristics of the new type of biomass fuels were studied by TG-DTG-DSC (Thermogravimetric-Differential Thermogravimetry-Differential Scanning Calorimetry) thermal analysis techniques. The results show that, with the content of rice milk residue increasing, the flammability and stability of the new type of mixed biomass fuels are enhanced, the burnout characteristic is reduced. The integrated combustion characteristic index is higher when the mixture proportion of rice milks solid residues and sawdust is 1:1 which is the most suitable one for replacing pure sawdust biomass fuel.

Keywords: rice milk; biomass fuel; combustion characteristics; combustion kinetics