

6种生物质颗粒成型燃料性能测试分析

孙毅¹, 张文标^{1*}, 林启晨¹, 李文珠¹, 汪孙国²

(1. 浙江农林大学工程学院, 浙江 临安 311300; 2. 加拿大光润生物质材料与生物能源技术公司, 加拿大 埃德蒙顿 T6R3J6)

摘要: 对竹粉、红木粉和杉木刨花、树皮、棉秆、玉米秆6种生物质成型燃料进行工业分析、元素测试、密度和发热量及燃烧特性等相关参数的测定。结果表明: 各生物质成型燃料的全水分、密度、灰分、挥发分和固定碳的物理特性参数基本满足瑞典生物质颗粒燃料标准 SS187120 的要求; 通过元素分析法可知, 6种生物质成型燃料的 N 为 0.51% ~ 3.45%, S 为 0.03% ~ 0.22%, 都远低于煤的值, 是一种清洁能源; 通过锥形量热仪的测试分析, 结合傅一张着火特性指标 FZ 可知, 6种生物质成型燃料的着火温度从低到高依次是红木粉 > 杉木刨花 > 竹粉 > 树皮 > 玉米秆 > 棉秆。综合各项性能指标考虑, 红木粉成型燃料的性能最优, 其热值 20.64 MJ/kg, 全水分 6.49%, 灰分 0.41%, 挥发分 82.01%, 固定碳 11.09%, N 元素 0.51%, S 元素 0.03%, 点燃时间 13 s。

关键词: 生物质; 成型燃料; 热值; 工业分析; 元素分析; 燃烧特性

中图分类号: S789

文献标识码: A

Test and Analysis on Properties of Six Kinds of Biomass Pellets

SUN Yi¹, ZHANG Wen-biao^{1*}, LIN Qi-chen¹, LI Wen-zhu¹, WANG Sun-guo²

(1. College of Engineering, Zhejiang A & F University, Linan 311300, China; 2. Sungro Bioresource & Bioenergy Technologies Corp, Canada T6R3J6)

Abstract: Proximate and elemental analysis, determinations of density, calorific value and TTI were made on six kinds of biomass pellets made from bamboo powder, wood powder, Chinese fir shaving, tree bark, cotton stalk and cornstalk. The results showed that the total moisture, density, ash content, volatiles and fixed carbon of tested biomass pellets met the requirements of SS187120. Elemental analysis demonstrated that the content of N and S of tested pellets was 0.51%-3.45% and 0.03%-0.22%, both were lower than that of the coal, indicating clean energy. Cone calorimeter method with fire indicators of Fz showed that the ignition temperature of tested pellets was ordered by wood powder>Chinese fir shaving>bamboo powder>tree bark>cornstalk>cotton stalk. Integrated indicators resulted that properties of pellets from wood powder was the best, with calorific value of 20.64MJ/kg, total moisture of 6.49%, ash content of 0.41%, volatiles of 82.01%, fixed carbon of 11.09%, the content of N of 0.51%, the content of S of 0.03%, time to ignition of 13 seconds.

Key words: biomass; briquette fuel; calorific value; proximate analysis; element analysis; combustion property

随着世界经济的飞速发展, 石化能源消耗量急剧增加, 人类的可持续发展受到严重影响。积极开发和利用可再生清洁能源、减少石化能源消耗、降低温室气体排放, 已经成为世界各国缓解能源危机和气候变化问题的共识^[1]。生物质能是继煤和石油之后的世界第三大能源, 素来以来源丰富、环境友好、可持续利用而跻身世界

收稿日期: 2015-05-05; 修回日期: 2015-10-21

基金项目: 省农业科技成果转化项目 (2012T201-06)

作者简介: 孙毅 (1990-), 男, 河北廊坊人, 硕士生, 从事竹材工业化利用研究; *通讯作者。

能源的舞台。目前, 生物质能应用广泛, 其中生物质成型燃料是生物质固体形态的能源化利用方式, 也是生物质能源化利用最简单、最直接的途径之一, 在 21 世纪后得到了飞速发展, 产量以每年 18% ~ 25% 的速度增长^[2~3]。利用机械力将生物质压缩或挤压成为容积密度较大、热效率较高、便于运输和储藏的固体成型燃料, 其容积密度可以提高到原来的 10 倍以上 (大于 600 kg/m³), 形状和尺寸统一, 使用方便, 易于燃烧, 是煤和薪柴优秀的替代燃料^[4]。

目前国内外对于生物质成型燃料的燃烧特性方面开展了一些研究。任敏娜等^[5]研究了玉米秆、稻壳等农作物颗粒燃料的着火温度等特性; 姚宗路等^[6]对中国的秸秆类颗粒燃料与瑞典的木质颗粒燃料进行研究得出燃烧结渣影响因素; 程大莉等^[7]对棉秆和竹材颗粒燃料成型工艺和性能进行了研究; 黄逢龙等^[8]对杉木、松木针叶材的锯屑颗粒燃料成型工艺进行了研究。刘志佳等^[9]人研究了毛竹材制作颗粒燃料, 其产品性能均能满足美国颗粒燃料协会标准《民用/商用生物质颗粒燃料》的要求; 其热值达到 18.4 MJ/kg, 也满足德国标准《木质颗粒燃料》(DIN 51731) 中规定的关于商业用途。国外研究比较早, 如 Boman C 等^[10]、Linda S Johansson 等^[11]分别研究了木质燃料及成型燃料的燃烧特性; Gible C 等^[12]、Gonzalez 等^[13]分别研究了不同木质、秸秆类成型燃料在家用炉具中结渣的形成与特征。

本文参照欧盟生物质固体成型燃料标准 (CEN/TC 355) 测试我国竹粉、红木粉、杉木刨花等 6 种不同生物质成型燃料的物理特性, 采用锥形量热仪测试分析其燃烧等特性, 为适合我国国情的生物质成型燃料实际应用提供理论数据。

1 试验材料和仪器

1.1 试验材料

由竹粉、红木粉、杉木粉和树皮为原材料制备的成型燃料, 来自浙江隆吉节能科技有限公司; 棉秆、玉米秆制备的成型燃料, 由安徽合肥工业大学材料科学与工程学院实验室提供。成型燃料均压缩加工成圆柱形。

1.2 试验仪器

ZDHW-5 型微机全自动量热仪 (鹤壁市科达仪器仪表有限公司)、Varid EL 元素分析仪 (德国 EMELENTAR 公司)、FTT2000 锥形量热仪 (英国)。

2 实验方法

2.1 工业分析

生物质成型燃料的工业分析 (全水分、灰分、挥发分、固定碳) 参照欧盟固体生物质燃料技术规范 (CEN/TC355) 和 GB/T 28731-2012《固体生物质燃料工业分析方法》进行测定。

2.2 元素测试

生物质成型燃料的元素主要包括 C、H、N、S、O 等元素, 其中 C、H、O 元素直接参与气化过程, 也是可燃气体中元素的主要来源。测量参照标准煤的元素分析方法 GB/T476-2001, 氧元素的质量百分比通过差减法获得。

2.3 密度和发热量测定

由于所测燃料为表面粗糙的圆柱状固体物, 不便于准确测定其长宽厚尺寸并计算其体积, 参照机制炭密度的测试方法^[14], 采用 AG204 型排液法固体密度测定仪, 以 98% 酒精为介质, 同一条件下的同种燃料经过 10 次平行测量, 取平均值, 所测得的密度为有效的密度或真实的密度。

利用 ZDHW-8A 全自动量热仪, 取 0.9 ~ 1.1 g 标准试样放氧弹内坩埚上, 充入氧气置压力达 2.8 ~ 3.0 Mpa, 通电点燃弹筒内的试样后, 试样燃烧产生的热量由弹筒壁传导给内筒水, 根据水温的上升和量热系统 (包括水筒、氧弹) 的热容量, 即可计算出试样的发热量。

2.4 燃烧特性

生物质成型燃料的燃烧特性主要由锥形量热仪测试完成，其主要工作原理就是“耗氧量原理”，即材料在锥形电加热器的热辐射下燃烧时，火焰会消耗空气中一部分氧气，同时会放出一定的燃烧热值，根据材料在燃烧时消耗氧气量的计算，测定在燃烧过程中的热释放速率（HRR）、总热释放量（THR）、质量损失速率（mass）、烟生成速率（SPR）、烟释放总量（STR）、点燃时间（TTI）等参数，用以分析该材料的燃烧性能^[15]。目前ISO 5660 标准、美国ASTM E1354 标准以及其他发达国家的一些标准都把锥形量热法确认为材料燃烧性能测试的标准实验方法^[16]。

实验时将 6 种试样放入受热表面积尺寸为 100 mm×100 mm 的燃烧容器内，需将其背面和四个侧面用铝箔紧紧包裹，尽可能减少试件非受热面热量和质量的损失。

3 实验结果与分析

6 种生物质成型燃料的测试结果见表 1。

表 1 6 种生物质成型燃料的工业分析、元素分析、发热量、颗粒密度和点燃时间

Table 1 Proximate analysis, element determination, density, caloric value and TTI of different tested biomass pellets

原料类型	工业分析/%				元素分析/%					发热量 /MJ·kg ⁻¹	密度 /g·cm ⁻³	点燃时间 /s
	全水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S			
竹粉	6.66	5.75	78.34	9.25	42.15	1.18	55.76	0.82	0.08	20.58	1.30	19
红木粉	6.49	0.41	82.01	11.09	49.57	1.35	48.53	0.51	0.03	20.64	1.26	13
杉木刨花	7.52	2.14	80.17	10.17	43.18	0.53	52.78	3.45	0.06	20.53	1.32	15
树皮	9.61	8.56	74.38	7.45	33.75	0.83	63.77	1.56	0.09	17.55	1.33	22
棉秆	9.03	20.02	67.33	3.62	37.52	1.65	58.84	1.76	0.22	18.08	1.33	29
玉米秆	9.89	14.07	71.48	4.56	35.60	1.36	61.29	1.60	0.15	17.73	1.30	25

3.1 工业分析

工业分析包括全水分、挥发分、灰分、固定碳等。从表 1 可知，6 种成型燃料的全水分在 6.49%~9.89%，其中红木粉成型燃料的全水分最低，玉米秆的最高，所有成型燃料的全水分能满足瑞典生物质颗粒燃料标准 SS 187120 的参考值（≤10%）要求。水分的存在不仅使生物质中可燃物质含量相对减少，热值降低，而且使着火变得困难，影响燃烧速度。但是其在吸出过程中的“造孔效应”起到了与可燃物质成分同样重要的作用。

生物质成型燃料的挥发分通常是较高的，这几种成型燃料的挥发分差异也较大，红木粉最大为 82.01%，而棉秆只有 67.33%，其它的成型燃料均在 71.48%~80.17%。从表中还可看出，一般木质燃料的挥发分相对较高，而秸秆类燃料相对较低。挥发分对生物质的燃烧有很大影响，从表 1 中可以看出，红木粉成型燃料点燃时间最短，为 13 s。

6 种生物质颗粒燃料的灰分值有显著差异，从竹粉的 1.21%到树皮的 11.53%，而树皮的灰分较大很可能是因为其含杂质较多所致。成型燃料灰分的变化规律与挥发分正好相反，一般木质燃料的灰分相对较低，而秸秆类燃料却相对较高。

生物质颗粒燃料的固定碳值跨度也很大，从棉秆的 3.62%到红木粉的 11.09%，其它燃料均在这个范围内。一般木质燃料的固定碳含量高，而秸秆类燃料的含量就相对低些。固定碳含量的多少会影响发热量的大小，从表 1 中也可以看出，红木粉成型炭的固定碳含量最高，其热值也相应高些。

3.2 元素分析

从表 1 可知，红木粉成型燃料C质量分数最高，为 49.57%，其次是竹粉和杉木刨花，都在 40%以上，其余三种燃料C质量分数均低于这个数值，但差异不大，其中树皮的最低为 33.75%。H，除了杉木刨花和树皮低于 1%以外，分别是 0.53%、0.83%，其余四种燃料差异不大，棉秆的最高为 1.65%。不同成型燃料中的S、N质量分数差异较大，从表中可看出，木质燃料的S、N一般要低于秸秆类燃料，这与罗娟等的研究结果相同^[17]。对于N，杉木刨花要远大于其它几种燃料，相应导致燃烧后烟气中产生的NO_x也会更多一些^[6]，其它燃料的N质量分数在 0.51%~1.76%，其中红木粉的最小。对于S来说，一般燃料低于 0.1%，而红木粉仅为 0.03%，但是棉秆和玉米秆要高

于 0.1%, 分别为 0.22%、0.15%。一般煤中 S 元素的含量要大于 1%, 基于此点同煤相比较, 生物质成型燃料更为清洁环保。

3.3 发热量

发热量是评价颗粒燃料优劣的一个极为重要的参数, 不同原料的成型燃料发热量差异较为明显, 红木粉的发热量最大, 为 20.64 MJ/kg, 其次是竹粉和杉木刨花, 其值分别为 20.58 MJ/kg、20.53 MJ/kg, 三种成型燃料发热量都超过了 20 MJ/kg, 在市场上均属于较为优质的燃料; 其它三种成型燃料的发热量在 17.55 ~ 18.08 MJ/kg, 其中树皮的发热量最低, 总之, 6 种成型燃料的发热量都满足 SS187120 的参考值 (≥ 16.9 MJ/kg) 要求。

发热量与水分、灰分、固定碳等因素有关, 但同固定碳含量的关系最显著。

从图 1 可知, 生物质颗粒燃料的固定碳含量与发热量大致成线性关系, 固定碳含量越高, 其发热量越多, 这是因为固定碳是主要的可燃成分, 生物质的发热量绝大多数是由固定碳中的 C 元素发生反应生成 CO_2 提供的, 所以发热量与固定碳密不可分, 而且这个结果同煤的发热量关系相吻合^[18]。

3.4 密度

成型燃料的密度会影响能量密度, 也会左右生产者和消费者的运输成本和储存成本。由表 1 知, 6 种生物质成型燃料的密度没有显著差别, 在 $1.26 \sim 1.33 \text{ g/cm}^3$, 均满足 SS187120 的参考值 ($\geq 1.12 \text{ g/cm}^3$) 要求, 说明它们成型工艺基本相近。其中树皮与棉秆的成型密度最大, 均为 1.33 g/cm^3 , 这可能是因树皮中有少量的果胶和蜡质, 棉秆中含有脂腊质、韧皮纤维、果胶等物质, 在热的作用下形成类似胶黏剂的物质, 所形成燃料密度较大的原因。红木粉的成型炭密度相较之下最小, 为 1.26 g/cm^3 , 可能是因其质地坚硬, 成型中难以压缩紧密, 有空隙存在。

3.5 燃烧特性分析

3.5.1 傅-张着火特性通用指标 傅-张着火指标是在煤焦非均相着火理论假设条件下得出的理论, 由于生物质成型燃料没有完善的理论, 故本文以此理论来研究生物质颗粒燃料的着火性能。傅维标^[19]等提出煤的着火特性通用指标为:

$$F_z = (V_{ad} + M_{ad})^2 \times C_{ad} \times 100$$

式中: F_z 是着火特性指标; V_{ad} 是挥发分; M_{ad} 是全水分; C_{ad} 是固定碳含量。 F_z 值越大, 着火性能越好。各生物质颗粒燃料的傅-张着火指标如图 2 所示。

根据 F_z 指标, 着火温度由低到高排列的燃烧性能为: 红木粉 > 杉木刨花 > 竹粉 > 树皮 > 玉米秆 > 棉秆。该指标强调了挥发分和内在水分析出时对碳燃烧过程的影响, 认为两者析出后在碳内部形成空隙, F_z 是和 $(V_{ad} + M_{ad})$ 的平方成正比, $(V_{ad} + M_{ad})$ 与 C_{ad} 比较而言, 前者对于着火的影响要比后者大得多。这个结论同表 1 结果相吻合的。

3.5.2 易点燃性能 易点燃性能主要由点燃时间 TTI 体现, TTI 反应了材料被点燃的难易程度, 一般来说, TTI 越小, 材料越容易点燃, 其易点燃性能越佳。从表 1 中知, 红木粉易点燃性能最好, 其次是杉木刨花, 接着是竹粉, 其它三种燃料点燃时间都在 20 s 以上, 棉秆的易点燃性能最差, 这和其挥发分和全水分含量有关。各生物质颗粒燃料的挥发分和全水分对点燃时间的影响如图 3 所示。

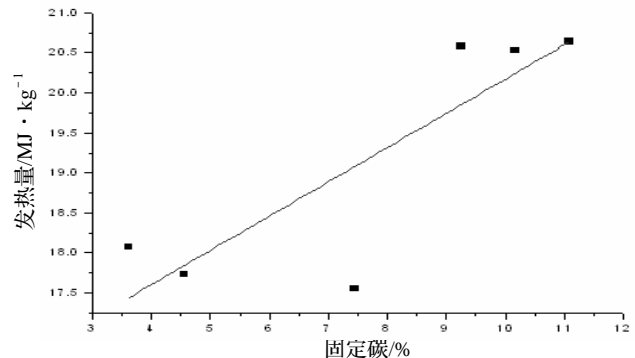


图 1 生物质颗粒燃料的固定碳与发热量的关系

Figure 1 Relation between fixed carbon with caloric value of different

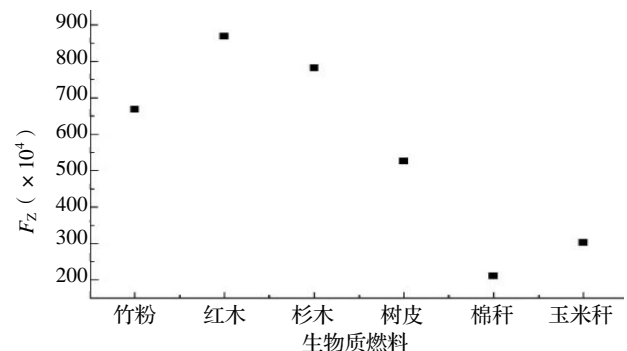


图 2 各生物质颗粒燃料参数 F_z 的计算值

Figure 2 Fire properties of different tested biomass pellets based on F_z

从图 3 中可看出, 点燃时间与挥发分大致成线性关系, 挥发分越高, 点燃时间越短, 这是因为生物质燃料中的挥发分中含有大量氢气、甲烷、不饱和烃、一氧化碳等可燃气体, 挥发分越高, 则生物质燃料越容易着火。而点燃时间与全水分大致呈指数关系, 全水分越高, 点火时间越长, 这是因为生物质燃料中全水分越高, 一方

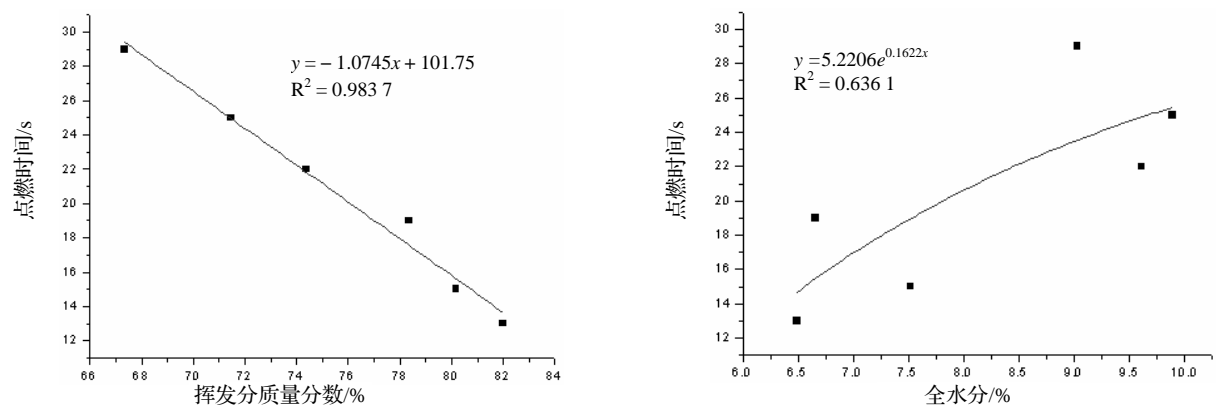


图 3 生物质颗粒燃料挥发分质量分数、全水分对点燃时间的影响

Figure 3 Effect of volatile mass fraction and total moisture of tested biomass pellets on time to ignition

面延长了干燥时间, 另一方面降低了绝热燃烧温度, 从而使燃料所需的点燃时间延长。罗娟等研究的农业生物质颗粒燃料点燃时间结果也验证了以上结论。

3.5.3 热释放性能 HRR是燃料最重要的燃烧参数之一, HRR越大, 燃烧反馈给材料表面的热量就越多, 随之导致材料热解速率的加快和挥发性可燃物生成量的增多, 从而加速了火焰的传播。如图 4 所示, 所有HRR曲线均具有两个放热峰, 结合实验现象, 第一放热峰对应于点燃时的有焰燃烧过程, 第二放热峰对应与第二次出现较高火焰的燃烧过程, 第一放热峰值均比第二放热峰值大, 且该峰下面所覆盖的面积(放热量)也高于第二放热峰, 因而第一放热峰对燃烧性的贡献较大。红木粉的第一放热峰出现的最早, 这跟其点燃时间较短有很大关系, 可能是由于其木材内含有较多的易燃性抽提物所致。竹粉的两个放热峰都大于其它燃料, 最大峰峰值为 328.39 kW/m^2 , 说明其燃烧相对剧烈, 放出的热也相对快速些, 但持续燃烧时间就相对短些。杉木刨花紧随其后, 总体燃烧也很剧烈, 放热也很迅速, 但持续燃烧性上更优秀些。HRR曲线最差的应该是树皮, 最大峰值为 172.72 kW/m^2 , 整体燃烧缓慢, 放热较少, 这缘于树皮加工时掺入很多不燃杂质, 阻碍了热解产物的扩散和热量的传递。

THR 也是重要的燃烧参数之一, THR 越大, 材料燃烧所放出的热量就越多。结合图 4、图 5 可以看出, 从

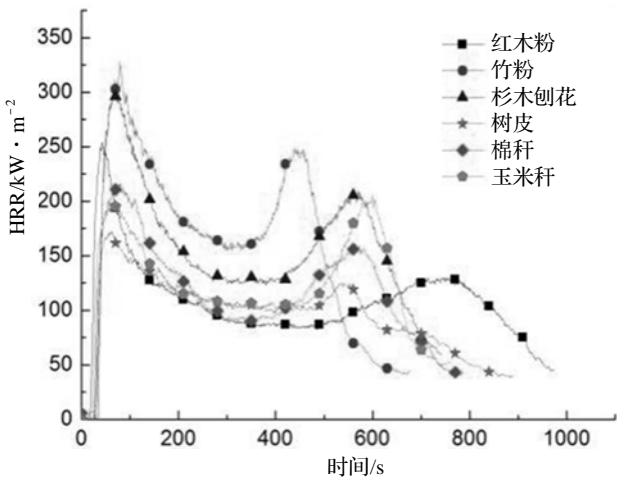


图 4 热释放速率曲线
Figure 4 Heat release rate

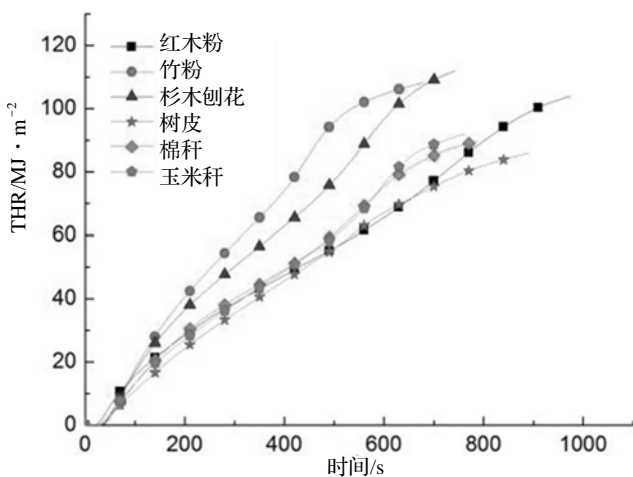


图 5 总热释放量曲线
Figure 5 Total heat release

试样被点燃到第二放热峰峰值出现的有焰燃烧阶段, 总热释放量迅速增加并且在放热峰出现时变化最快: 当第二放热峰过后, 总热释放量增加很缓慢, 说明几种生物质颗粒燃料燃烧释放的热量最主要是由有焰燃烧提供的。从图 5 中看出杉木刨花 THR 值最大, 竹粉和红木粉紧随其后且三者间差距不大, 树皮的最小, 不难看出燃料的 THR 最大值比较趋势基本和其发热量值相符合, 不过 THR 的数值更接近实际燃烧产生的热量。

3.5.4 烟释放性能 SPR 和 TSR 都是材料烟释放性能重要的表征参数, 一般 SPR、TSR 越大, 其烟释放性能越好, 但是从实际环境安全角度看, 烟释放性能越好, 燃料的品质越差。图 6 所示, SPR 曲线的形状及峰值位置与其相对应的 HRR 曲线相似, 但是点燃初期出现的第一发烟峰较低, 这是由于点燃初期燃烧温度较低和相对缺氧等原因而产生未彻底氧化的有机物质, 降低了燃烧热。

从图 6、图 7 中可以看出, 竹粉的生烟速度相对较快和生烟量很大, 表明其烟释放性能最佳, 究其原因可能是因为竹粉颗粒较小, 成型不是很完全, 造成其未彻底燃烧所致。

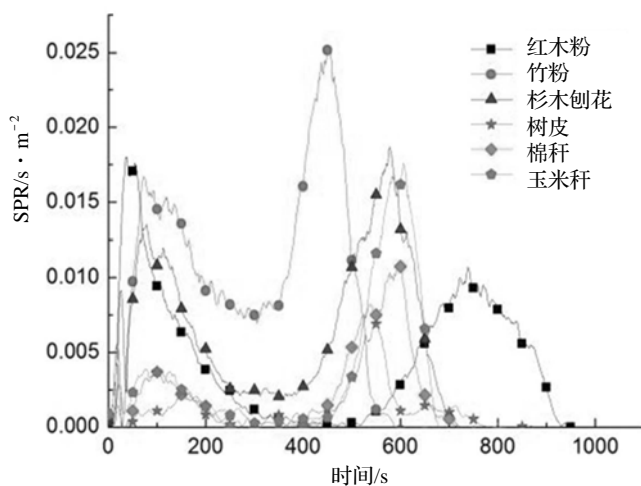


图 6 烟生成速率曲线
Figure 6 Smoke production rate

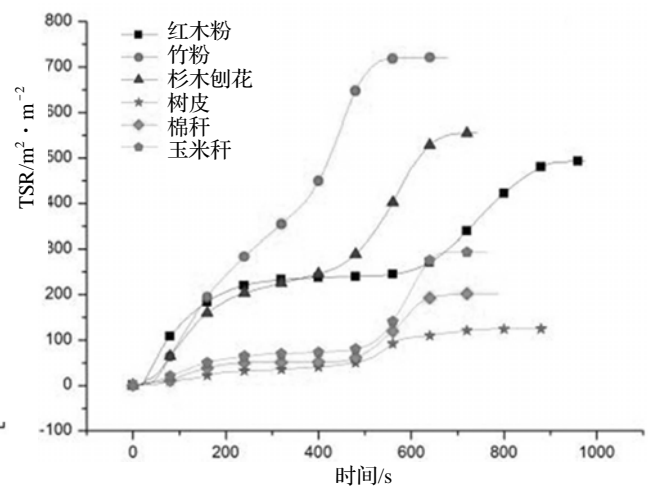


图 7 烟释放总量曲线
Figure 7 Total smoke production

3.5.5 燃烧过程中的质量变化 Mass 曲线直观反应了材料燃烧过程中的质量变化情况, 曲线斜率可以表示质量

损失速率。综合图 2、图 5, Mass 曲线与 THR 曲线折线变化位置相同, 这表明材料燃烧时热释放和质量损失是同步的, 有焰燃烧释放热量速率最快的阶段就是材料热解产生可燃物最快的阶段。曲线斜率较大的阶段对应红热燃烧阶段, 斜率较缓的阶段对应红热燃烧阶段, 不难看出质量损失和释热主要发生在有焰燃烧阶段。在此后的红热燃烧阶段, 各条曲线的斜率基本相同, 说明是同一种物质 (木炭) 发生反应, 所以有焰燃烧结束时各个试样已经完全炭化, 成炭率的差异也主要在有焰燃烧阶段的后期形成。红木粉的 Mass 曲线最缓, 说明其可持续燃烧能力相对较好, 成炭率也较好, 作为燃料来说很重要。而竹粉的 Mass 曲线最陡峭, 说明其质量损失速率最快, 而其它几种燃料的 Mass 曲线差异不大。

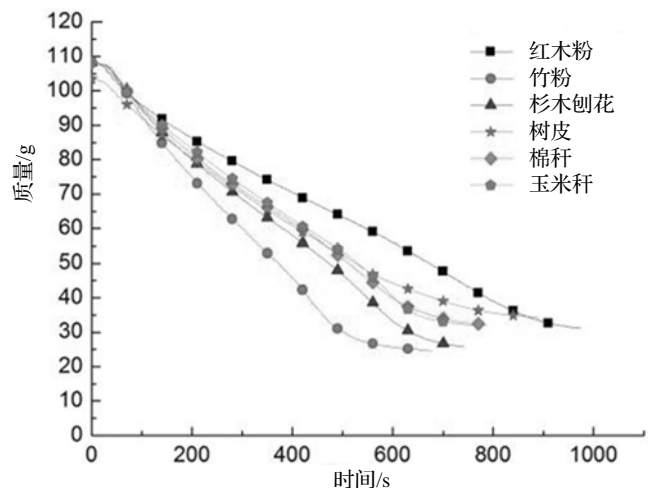


图 8 质量损失速率曲线
Figure 8 Mass loss rate

4 结论

(1) 6 种生物质成型燃料全水分、密度、灰分、挥发分和固定碳的物理特性基本满足瑞典生物质颗粒燃料

标准 SS187120 的要求。比较 6 种生物质颗粒燃料的发热量, 红木粉成型燃料的发热量最大, 达到 20.64 MJ/kg, 发热量与固定碳含量有显著关系, 固定碳含量越高, 发热量越高。从综合物理特性来说, 红木粉成型燃料是这 6 种燃料中最优, 其次是杉木刨花、竹粉、棉秆、玉米秆成型燃料, 树皮成型燃料热值最低, 其值仅为 17.55 MJ/kg。

(2) 从元素方面看, C、H 元素是颗粒燃料的重要组成部分, 其含量的最高是红木粉, 其值分别为 49.57% 和 1.35%, 最低是树皮, 其值分别为 33.75% 和 0.83%; 而 N、S 元素的含量影响燃料烟气对环境的污染程度。杉木刨花含量最高分别为 3.45% 和 0.06%, 最低是红木粉, 分别为 0.51% 和 0.03%; 6 种生物质成型燃料是一种清洁能源, 其 N、S 含量均低于煤 (0.5% ~ 2.0%、0.8% ~ 10%)。

(3) 通过 F_z 指标的计算值可以看出, 本文采用的 6 种生物质成型燃料的着火温度从低到高依次是红木粉 > 杉木刨花 > 竹粉 > 树皮 > 玉米秆 > 棉秆。从锥形量热仪测试可知, 点火时间分别为红木粉 13s、杉木刨花 15s、竹粉 19s、树皮 22s、玉米秆 25s、棉秆 29s。点火时间与挥发分、全水分密切相关, 挥发分越高, 全水分越低, 点燃时间越短。

参考文献:

- [1] 张霞, 蔡宗寿, 陈颖, 等. 世界生物质颗粒燃料产业发展现状趋势分析[J]. 农机化研究, 2015 (2): 1-5.
- [2] 张霞, 蔡宗寿, 陈丽红, 等. 生物质成型燃料加工方法与设备研究[J]. 农机化研究, 2014 (11): 214-217.
- [3] Lamers P, Junginger M, Hamelinck C, *et al.* Developments in international solid biofuel trade-An analysis of volumes, policies, and market factors[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2012, 16 (5): 3 176-3 199.
- [4] Mei Q, Tahvanainen L, Ahponen P, *et al.* Bio-energy in China: Content analysis of news articles on Chinese professional internet platforms[J]. *Energ Policy*, 2009, 37 (6): 2 300-2 309.
- [5] 任敏娜, 崔永章, 李晓, 等. 八种生物质颗粒燃烧特征分析[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27 (3): 298-301.
- [6] 姚宗路, 赵立欣, Ronnback M 等. 生物质颗粒燃料特性及其对燃烧的影响分析[J]. 农业机械学报, 2010 (10): 97-102.
- [7] 程大莉, 许斌, 蒋身学. 棉秆与竹材颗粒燃料成型工艺及其性能的研究[J]. 2014, 43 (6): 39-43.
- [8] 黄逢龙, 刘大椿, 邓欲, 等. 林业剩余物颗粒燃料成型工艺[J]. 林业科技开发, 2014, 28 (3): 115-118.
- [9] 刘志佳, 江泽慧, 费本华, 等. 竹材颗粒燃料—中国具有商业开发潜力的生物质固体燃料[J]. 林业科学, 2012 (10): 140-144.
- [10] Boman C, Israelsson S, Ohman M, *et al.* Combustion properties and environmental performance during small scale combustion of pelletized white hardwood raw material[C]. *World Bioenergy 2008*, Sweden: Jonkoping, 2008
- [11] Johansson L S, Bafver, Leckner B, Gustavsson L, *et al.* Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets[J]. *Atmos Environ*, 2004, 38 (25): 4 183-4 195.
- [12] Gilbe C, Ohman M, Lindstrom E, *et al.* Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets[J]. *Energ Fuel*, 2008, 22 (5): 3 536-3 543.
- [13] González J F, González-García C M, Ramiro A, *et al.* Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler[J]. *Fuel Process Technol*, 2006, 87 (8): 717-726.
- [14] 张文标, 王伟龙, 赵丽华, 等. 机制炭理化性能的研究[J]. 浙江林学院学报, 2003 (2): 107-110.
- [15] 刘景宏, 谢拥群, 魏起华. 用 CONE 法研究 ULDM 的阻燃特性[J]. 西北林学院学报, 2014, 29 (1): 174-177.
- [16] 于健. 聚合物锥形量热法的测试操作与分析[J]. 橡塑技术与装备, 2009 (11): 16-21.
- [17] 罗娟, 侯书林, 赵立欣, 等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. 农业工程学报, 2010 (5): 220-226.
- [18] 龚露, 罗吉国. 煤质分析中发热量与固定碳的简易互算[J]. 广州化工, 2009 (3): 69-70.
- [19] 傅维标, 张恩仲. 煤焦非均相着火温度与煤种的通用关系及判别指标[J]. 动力工程, 1993 (4): 13.