

不同添加剂油茶壳炭粉成型性能与燃烧特性研究

秦丽元¹ 张世慧¹ 高忠志¹ 罗立娜¹ 蒋恩臣^{1,2}

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 华南农业大学材料和能源学院, 广州 510642)

摘要: 以油茶壳炭粉为原料,纤维素和氧化淀粉为添加剂,采用万能试验机研究成型温度、成型压力、原料含水率对燃料成型品质的影响。研究发现,成型温度在 60 ~ 100℃ 时成型燃料的品质较好,提高成型温度对燃料的松弛密度影响不明显,但比能耗增加,对径向抗压强度影响与添加剂种类有关。提高成型压力,成型燃料的松弛密度、比能耗和径向抗压强度都随之增大,成型压力在 6 ~ 8 kN 时成型燃料品质较好。提高原料含水率对降低能耗有显著作用,但原料含水率过大不利于成型,原料含水率在 15% ~ 20% 时成型燃料品质较好。对成型燃料燃烧特性研究发现,纤维素和氧化淀粉的加入,着火温度能分别降低至 362.5℃ 和 324.5℃,添加氧化淀粉后燃料品质和燃烧特性最好;添加纤维素的混合成型燃料热值降低更少,且品质受成型因素影响较小。

关键词: 油茶壳; 生物质炭; 添加剂; 成型特性; 燃烧特性

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2018)07-0303-08

Molding Fuel and Combustion Characteristics of Biochar Prepared from *Camellia oleifera* Shell Pyrolysis

QIN Liyuan¹ ZHANG Shihui¹ GAO Zhongzhi¹ LUO Li'na¹ JIANG Enchen^{1,2}

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

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

Abstract: Biomass carbonization forming technology is one of the main utilization technologies of biomass energy, which is of great significance to achieve the sustainable development of energy. The biochar prepared from *Camellia oleifera* shell pyrolysis as raw materials was molded by using universal testing machine, with cellulose and oxidized starch as additives. By analyzing the relax density, specific energy consumption and compressive strength of molding fuel, the effects of different conditions of molding on physical quality of molding fuel were made sure. The results showed that the fuel quality was the best at molding temperature of 60 ~ 100℃, molding pressure of 6 ~ 8 kN, moisture content of 15% ~ 20%. The combustion characteristics of the fuel were studied by thermogravimetric analysis. The results showed that the addition of cellulose and oxidized starch decreased the ignition temperature of *Camellia oleifera* shell carbon powder, the ignition temperature was decreased to 362.5℃ and 324.5℃, respectively. The combustion stability index and comprehensive combustion characteristic index of fuel with oxidized starch additive were better than those of pure carbon powder and cellulose additive fuel. But the heat value of cellulose added fuel was reduced even less. The significance of the research was to optimize the parameters of the molding process, provide theoretical basis for the preparation of biomass carbon molded fuel with excellent performance and convenient storage.

Key words: *Camellia oleifera* shell; biochar; additive; molding properties; combustion properties

0 引言

油茶壳作为油茶加工的副产物,占油茶果质量

的 50% ~ 60%,其成分主要是约 52% 的木质素和 30% 的多缩戊糖。目前,油茶壳除了用于制备有机肥、钾盐、活性炭、培养基等,大多数被丢弃或者直接

收稿日期: 2018-02-13 修回日期: 2018-05-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(51706040)、黑龙江省科学基金项目(QC2015049)、中国博士后科学基金项目(2016M601405)、黑龙江省博士后启动项目(LBH-Q17024)、黑龙江省高效创新人才项目(UNPYSCT-2017001)和黑龙江省留学归国项目
作者简介: 秦丽元(1982—),女,副教授,主要从事生物质能源转化与利用研究,E-mail: qinliyuan2006@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@sina.com

焚烧,资源浪费,固体废弃物污染增加^[1-2]。采用炭化成型技术将油茶壳制备成炭成型燃料,不仅能达到高品质利用、减少固体废弃物污染的目的,还可以实现 CO₂ 的零排放,保护环境^[3]。

与生物质直接成型燃料相比,生物质炭成型燃料改善了因生物质种类不同或同一种生物质的生长部位、成熟度不同造成的压缩成型特性差异,降低了机器的机械磨损和挤压加工过程中的功率能耗。此外,生物质炭成型燃料还弥补了生物质成型燃料堆积密度低、灰分高、热值低的不足^[4-5]。但直接成型的炭粉在储存、运输和使用过程中容易开裂或破碎,采用混合成型技术可以降低成型原料之间的异质性,改善生物质炭成型效果^[6-7]。

作为农林废弃物的主要成分,纤维素在自然界中含量丰富,秸秆、木材、棉麻等都是其主要来源。纤维素分子内和分子间强大的作用力使其直接利用受到了一定限制,对其改性也带来一定困难。所以,对纤维素的研究主要集中在改性和改性后的应用上,而对纤维素直接掺混利用的研究较少^[8]。然而,作为一种廉价且易得的丰富资源,纤维素还是替代不可降解的化石燃料的优质可再生天然聚合物^[9]。在一定温度和含水率条件下,纤维素可被软化发挥黏结效果,成为燃料的骨架^[3]。氧化淀粉是淀粉在酸、碱、中性介质中与氧化剂作用得到的一种变性淀粉,其价格低廉、来源广泛^[10]。氧化淀粉的

物化特性良好,含有羟基、羧基、羰基等官能团,能与多种物质发生反应。有研究发现,氧化淀粉在提高耐久性和降低能耗方面优于原淀粉^[11]。目前常用的小麦、玉米、木薯等氧化淀粉均可用作燃料的添加剂^[12-13]。成型燃料对其掺混所用的纤维素要求较低,作为最廉价的高聚物纤维素还具有无毒无害的特点,氧化淀粉在与炭粉掺混时,表现出较好的亲和力并能均匀分布在炭粉表面,而且所制备的成型炭满足无毒、环保的要求^[10]。

与秸秆炭相比,油茶壳炭固定碳含量高,灰分和挥发分含量少,更适合用于制备生物质炭成型燃料^[14-15]。所以从成本、性能等多方面考虑,本文以油茶壳热解炭粉为原料,纤维素和氧化淀粉为添加剂,制备生物质炭成型燃料,并研究成型温度、成型压力和原料含水率等条件对成型燃料品质的影响及其燃烧特性,以期为生物质炭成型燃料的制备和实现生物质能的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验原料:油茶壳炭粉、纤维素(纯度大于97%)、氧化淀粉(化学纯)。采用自制变螺距生物质连续热解装置制备油茶壳炭粉^[16],将其过筛后取粒度在16~100目之间的备用。表1为原料的具体成分和热值,表中的质量分数均为占空气干燥基的百分比。

表 1 原料成分及元素分析(质量分数)
Tab.1 Properties analysis of feedstock

原料	高位热值/ (MJ·kg ⁻¹)	工业分析/%				元素分析/%			
		水分	固定碳	挥发分	灰分	C	H	O	其他
油茶壳炭粉	29.65	6.92	64.90	21.01	7.17	75.17	3.068	21.076	0.686
纤维素	17.31	6.57	9.64	83.79		41.60	6.451	51.915	0.034
氧化淀粉	17.03	7.68	9.70	82.62		41.14	6.886	51.927	0.047

1.2 试验

1.2.1 成型条件

生物质炭成型试验采用自制成型模具^[17]。成型时,将原料放入模具中,成型压力由万能试验机提供,成型温度由温度控制器调节。原料含水率包括炭粉和添加剂2部分的含水率,称取一定量的炭粉和添加剂,将其放入70℃的干燥箱中干燥24h至质量恒定,计算原料本身含水率,然后加入适量纯水调整到试验所需含水率。添加剂的作用是提高燃料的物理品质,但用量过多会增大成本、降低热值。钱湘群等^[13]发现淀粉用量为10%~30%时,提高了燃料的松弛密度,降低了能耗,制备出的竹炭成型燃料品质最佳。通过单因素试验选取添加剂5%~13%进

行研究^[17],发现纤维素质量分数为9%的混合成型燃料物理品质最优。所以综合考虑燃料的物理品质和成本经济性,将添加剂的质量分数设置为9%。在试验过程中,成型温度分别取40~120℃(间隔20℃),成型压力分别取2~10kN(间隔2kN)、含水率分别取10%~30%(间隔5%)。当万能试验机的压杆与燃料间的压力达到设定值时停止移动,移开底座,便可挤出燃料。

1.2.2 成型燃料品质测试

(1)松弛密度:将静置14d后的成型颗粒,用电子天平称量,用游标卡尺测其尺寸,然后根据密度公式,计算得出松弛密度。

(2)径向抗压强度:采用万能试验机对成型燃

料进行径向压缩试验,颗粒破碎或断裂时所承受的最大径向载荷,即为所求的径向抗压强度。

(3)比能耗:燃料压缩成型过程中的能耗与其质量的比值,它表示压缩单位质量燃料耗能的大小。压缩能耗可用成型过程中压力-位移曲线所围成的积分面积表示。比能耗计算公式为

$$E_{sc} = \frac{\int Fds}{m}$$

(1)

式中 E_{sc} ——比能耗,J/g
 F ——压力,kN
 s ——位移,mm
 m ——燃料质量,g

1.3 微观结构观察

试样沿径向切开的燃料进行喷金处理后,用日本日立公司 S-4800 型冷场发射电子显微镜观察成型燃料的微观结构。

1.4 热值与热重分析

成型燃料热值通过长沙友欣公司的 LI-THERM

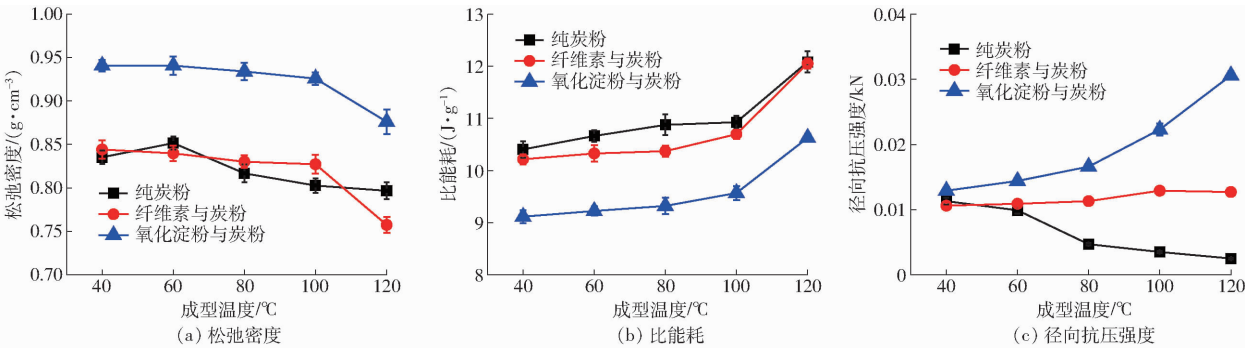


图 1 成型温度对成型燃料物理品质的影响

Fig. 1 Effect of molding temperature on physical quality of formed fuel

3 种成型燃料的比能耗都随成型温度的升高而增大,尤其是当温度超过 100℃ 时,比能耗增加得更显著;氧化淀粉添加燃料的比能耗最低,如图 1b 所示。因为温度超过 100℃,原料中的水分多以气态的形式存在,增大了成型过程中的阻力,所以能耗增大。如图 1c 所示,纯炭粉成型燃料的径向抗压强度与成型温度成反比;添加纤维素的混合燃料径向抗压强度比纯炭粉高并且基本不随成型温度变化;添加氧化淀粉的混合成型燃料径向抗压强度都随成型温度的升高而增大,并且氧化淀粉因具有较好的流动性,从而在成型后具有更高的抗压强度且径向抗压强度变化最明显。

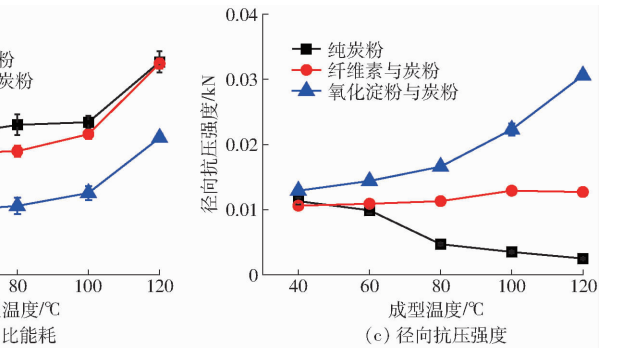
图 2 为成型温度 40℃ 和 100℃,其它成型条件相同时,制备的 3 种成型燃料。其中纯炭粉和添加纤维素的混合成型燃料表面都较粗糙,如图 2a、2b 所示。而氧化淀粉是淀粉经化学改性后得到的半合成高分子化合物,其分子结构上具有羟基、羧基、羰

基等多种极性基团,极性基团较淀粉增多,故黏性变大^[18],所以在较低成型温度时,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的表面也较光滑(图 2c)。纤维素是由葡萄糖单体构成的天然高分子化合物,虽含有极性很强的醇羟基,但黏结力一般低于半合成高分子化合物^[19]。所以在同一成型温度下,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的物理品质优于纤维素与炭粉混合成型燃料和纯炭粉成型燃料。图 2d 为成型温度 100℃ 制备的氧化淀粉与炭粉混合成型燃料;与 40℃ 下制备的成型燃料相比,其表面更加光滑,成型性更好。综合图 1 中 3 种成型燃料的品质分析,油茶壳生物质炭混合成型燃料的成型温度在 60 ~ 100℃ 之间较好。

2 结果与分析

2.1 成型温度对成型燃料物理品质的影响

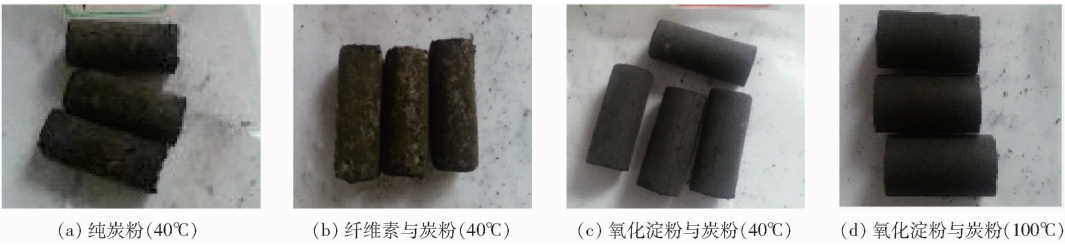
在成型压力 6 kN、原料含水率 20%、添加剂质量分数 9% 条件下,不同成型温度对成型燃料的物理品质影响如图 1 所示。从图 1a 可以看出,纯炭粉成型时,松弛密度随成型温度的升高先增大后减小,在 60℃ 时达到最大值。但在成型温度未超过 100℃ 时,成型温度的升高对添加纤维素和氧化淀粉的炭粉混合成型燃料的松弛密度影响不明显,添加氧化淀粉的混合成型燃料松弛密度明显高于纯炭粉和添加纤维素混合成型燃料。继续升高成型温度到 120℃,松弛密度都明显减小。这是因为温度超过 100℃ 之后,水分蒸发但又无法从模具中排出,只能以自由水的状态附着在颗粒表面,增加了颗粒间的距离,使得密度减小。



基等多种极性基团,极性基团较淀粉增多,故黏性变大^[18],所以在较低成型温度时,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的表面也较光滑(图 2c)。纤维素是由葡萄糖单体构成的天然高分子化合物,虽含有极性很强的醇羟基,但黏结力一般低于半合成高分子化合物^[19]。所以在同一成型温度下,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的物理品质优于纤维素与炭粉混合成型燃料和纯炭粉成型燃料。图 2d 为成型温度 100℃ 制备的氧化淀粉与炭粉混合成型燃料;与 40℃ 下制备的成型燃料相比,其表面更加光滑,成型性更好。综合图 1 中 3 种成型燃料的品质分析,油茶壳生物质炭混合成型燃料的成型温度在 60 ~ 100℃ 之间较好。

2.2 成型压力对成型燃料物理品质的影响

在成型温度 80℃、原料含水率 20% 和添加剂质量分数 9% 条件下,油茶壳炭粉成型燃料物理品质随成型压力的变化如图 3 所示。随着成型压力的增



(a) 纯炭粉(40℃) (b) 纤维素与炭粉(40℃) (c) 氧化淀粉与炭粉(40℃) (d) 氧化淀粉与炭粉(100℃)

图 2 炭粉成型燃料

Fig. 2 Molding fuel

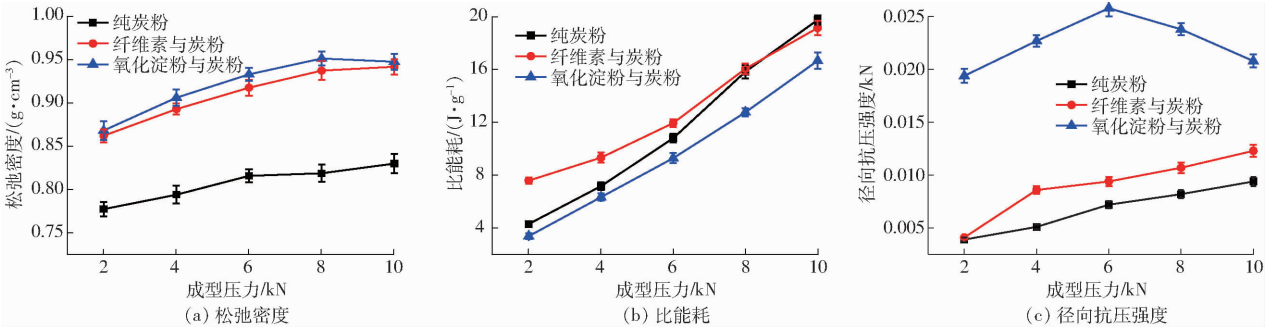


图 3 成型压力对成型燃料物理品质的影响

Fig. 3 Effect of molding pressure on physical quality of formed fuel

大,3 种成型燃料的松弛密度都呈现先增大后平缓的趋势,其中添加淀粉和纤维素的燃料松弛密度相近,如图 3a 所示。成型初期,随着成型压力的增大,成型原料之间的水分和空气被挤出,原料间空隙不断减小,体积相应减小,导致密度增大。但实压阶段,继续增大成型压力松弛密度基本不改变。从图 3b 中看出,成型压力增大,3 种成型燃料的比能耗都增大。图 3c 中纯炭粉成型燃料和纤维素与炭粉混合成型燃料的径向抗压强度都随成型压力增大而增大,但明显低于氧化淀粉添加的混合燃料;而氧化淀粉混合燃料的径向抗压强度随成型压力的增大出现先增大后减小的趋势,在 6 kN 时,其径向抗压强度最大。

纤维素和氧化淀粉的加入都能提高成型燃料的松弛密度和径向抗压强度。对成型压力 6 kN 下制备的添加纤维素和淀粉的混合成型燃料微观结构进行观察,结果如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,纤维素与炭粉主要以机械互锁的方式相结合,这种交叉结合的方式,增大了两种颗粒的接触面积,降低了成型燃料的回弹形变。此外,在与炭粉混合成型中,纤维素与炭粉颗粒相互缠绕、嵌套,也发挥着增强成型燃料强度的骨架作用^[3]。氧化淀粉与炭粉除了以机械互锁方式相结合外,还可观察到燃料中部分区域形成了网状结构,该结构将炭粉包围连接成一片,显著地增强了燃料的强度^[20],如图 4b 所示。但当成型压力过大,超出弹性范围时,就会引起氧化淀粉的回弹,故径向抗压强度先增大后减小,在 6 kN 时其径向抗压强度最大。此外,氧化淀粉具有较好

的渗透性,能渗透到炭粉的微孔中,并且能与炭粉中的活性基团形成氢键,所以淀粉添加成型燃料具有更好的品质。综合成型压力对 3 种成型燃料的品质影响分析,成型压力在 6 ~ 8 kN 之间较好。

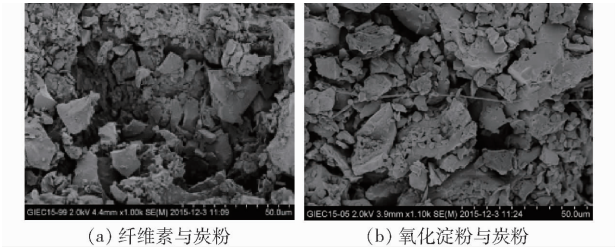


图 4 混合成型燃料的微观结构

Fig. 4 Microstructure diagrams of molding fuel

2.3 原料含水率对成型燃料物理品质的影响

在成型温度 80℃、成型压力 6 kN 和添加剂质量分数 9% 条件下,炭粉成型燃料物理品质随原料含水率的变化如图 5 所示。从图 5a 可知,3 种成型燃料的松弛密度都随着原料含水率的增大而增大。并且提高原料含水率对降低成型燃料的比能耗均有显著成效(图 5b)。添加纤维素的混合成型燃料和纯炭粉成型燃料的径向抗压强度都随原料含水率的增加而增大,但是添加氧化淀粉的混合成型燃料径向抗压强度随原料含水率的增加先增大后减小,如图 5c 所示。其原因一方面是水分在成型过程中能够增大粒子间的接触面积,有助于原料粒子的嵌合,促进粒子粘结;另一方面,水分作为成型过程中的润滑剂,能够增强粒子间的流动性,从而降低成型过程的比能耗。但当原料含水率过高时,多余的水分将分布于原料粒子之间,使得粒子之间结合不紧密,不

利于成型,所以混合后原料含水率控制在 15% ~ 20% 燃料成型品质更好。同时氧化淀粉提高成型燃

料物理品质更明显,但是径向抗压强度受原料含水率影响也最明显。

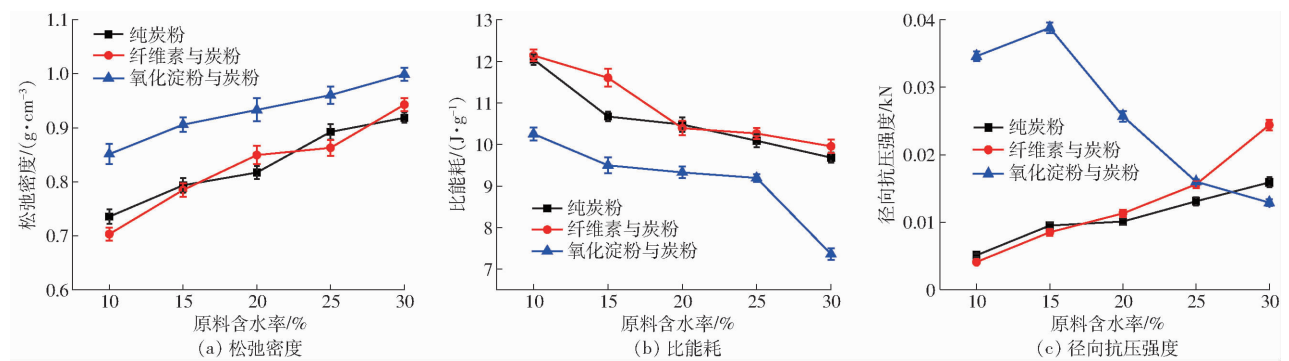


图 5 原料含水率对成型燃料物理品质的影响

Fig. 5 Effect of moisture content of materials on physical quality of formed fuel

通过以上分析可知,油茶壳热解生物质炭成型燃料成型温度在 60 ~ 100℃ 之间时成型燃料的物理品质较好,其中氧化淀粉添加成型燃料品质最好,但纤维素添加成型燃料的径向抗压强度基本不受成型温度影响。增大成型压力有利于增大混合成型燃料的松弛密度,但同时增大了成型的比能耗,所以控制成型压力在 6 ~ 8 kN 之间较好。增加原料含水率能够提高成型燃料的松弛密度,降低比能耗;但原料含水率超过一定值后,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的径向抗压强度减小,而且试验过程中发现当原料含水率超过 20% 时,会有水分从模具中挤出,因此最佳原料含水率为 15% ~ 20% 。

2.4 成型燃料燃烧特性

考虑到成本、性能和成型过程中设备磨损等,选取较优成型条件:成型温度 80℃、成型压力 6 kN、原料含水率 20% 成型后,对油茶壳纯炭粉成型燃料、纤维素与炭粉混合成型燃料和氧化淀粉与炭粉混合成型燃料进行燃烧特性研究。

2.4.1 热值与热重分析

经热值测试得到:油茶壳炭粉加入纤维素成型后热值为 29.14 MJ/kg,加入氧化淀粉成型后热值为 28.01 MJ/kg。并且由表 1 可知,纤维素和氧化淀粉中固定碳含量都很低,油茶壳炭粉的固定碳含量却占其质量的 50% 以上,而固定碳的燃烧

对热值的贡献最大。所以加入添加剂后,混合成型燃料的热值都比相同质量纯炭粉成型燃料有所降低,而且加入同质量的氧化淀粉比加入纤维素热值降低更明显。

图 6 为 3 种成型燃料的热重曲线,从热重曲线可以看出 3 种成型燃料的燃烧都可分为 4 个阶段,即成型燃料的自身失水、挥发分析出与燃烧、固定碳燃烧和燃尽阶段。各阶段燃烧特性参数如表 2 所示。从图 6a 可以看出,油茶壳炭粉成型燃料在第 1 阶段为 25 ~ 170.09℃,失重约 2.5%,DTG 曲线在 75.59℃ 时出现峰值;第 2 阶段 170.09 ~ 375.41℃ 为挥发分析出与燃烧阶段,其 DTG 曲线在 350.08℃ 出现失重峰;第 3 阶段 375.41 ~ 580.75℃ 为固定碳燃烧阶段,该阶段失重约 78%,着火温度为 385.65℃,DTG 曲线在 518.49℃ 时出现最大失重峰,第 4 阶段为 580.75℃ 以后,为燃尽阶段。

因为加入的纤维素添加剂与油茶壳本身含有的纤维素类型相同,纤维素与炭粉混合成型燃料的热重曲线与油茶壳炭粉成型燃料的热重曲线形状基本一致(图 6b)。第 1 阶段为 25 ~ 178.07℃,失重约为 2.5%,DTG 曲线在 80.79℃ 对应失重峰;第 2 阶段 178.07 ~ 333.85℃ 为挥发分析出与燃烧阶段,其 DTG 曲线在 320.17℃ 对应失重峰值,该失重峰与纯炭粉成型燃料的失重峰相比更明显,因加入的纤维

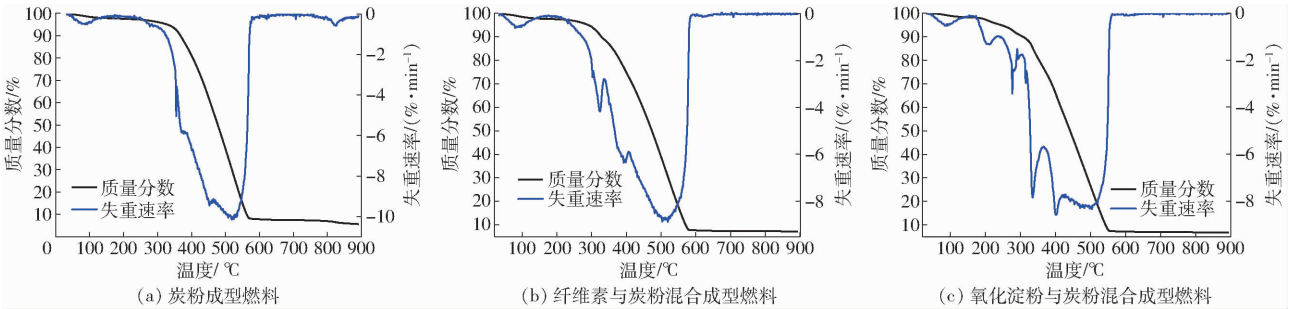


图 6 燃烧特性曲线

Fig. 6 Fuel combustion characteristic curves

素添加剂热解强化了挥发分的析出;并且由纤维素热解生成的少量焦炭与氧气接触燃烧使纤维素混合成型燃料第 3 阶段(333.85 ~ 570.60℃)的 DTG 曲线在 392.37℃时出现一个新的小失重峰,其着火温度为 362.50℃。DTG 曲线在 516.6℃时出现最大失重峰,该阶段失重约 64.3%;第 4 阶段 570.60℃以后为燃尽阶段。

从图 6c 可看出,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料第 1 阶段为 25 ~ 171.66℃,失重约 2%,DTG 曲线在 85.34℃时出现峰值;第 2 阶段 171.66 ~ 323.63℃为挥发分析出与燃烧阶段,DTG 曲线在 205.78℃和 275.18℃时都出现了失重峰,第 1 个峰应是氧化淀粉中所含的小分子挥发物析出并进入气相中燃烧产生的,第 2 个峰则是由油茶壳炭粉中挥发分的燃烧所导致;第 3 阶段固定碳燃烧阶段为 323.63 ~ 558.20℃,其 DTG 曲线上出现了 3 个失重峰,这应是少量剩余大分子挥发分的析出及燃烧,氧化淀粉和油茶壳炭粉中固定碳的燃烧所产生的。同时氧化淀粉中固定碳的燃烧所放出的热量还能促进油茶壳炭粉中固定碳的燃烧,所以该阶段失重达 70%。着火温度为 324.5℃,其中温度为 400.4℃时燃烧速率最大;第 4 阶段 558.20℃以后为燃尽阶段。

2.4.2 燃烧特性参数分析

着火温度 T_i 是反映燃料着火性能的重要参数,着火温度越低,燃烧性能越好。本试验采用 TG-DTG 法来确定着火温度,具体方法参照文献[21]。

燃烧稳定性判定指数 R_w 用于判定燃料持续稳定燃烧的性能, R_w 值越大,对应燃料的燃烧稳定性越好。以纯碳的试验参数为基准定义 R_w [22] 为

$$R_w = \frac{655}{T_i} \frac{763}{T_{\max}} \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{8.73}$$

(2)

式中 $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$ ——最大燃烧速率
 $T_{\max}$ ——最大燃烧速率对应的温度,℃

综合燃烧特性指数 S 可以对燃料的燃烧特性进行综合评价, S 值越大,燃料的燃烧特性越优 [23-24]。计算公式为

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_e}$$

(3)

式中 $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$ ——平均燃烧速率
 T_e ——燃尽温度,℃

取燃料质量损失达到 98% 时的温度为燃尽温度 [25]。

由表 2 可知,纤维素和氧化淀粉的加入,都降低了油茶壳炭粉成型燃料的着火温度和燃尽温度,加入淀粉后降低更显著。因为纤维素和氧化淀粉的加入提高了燃料中挥发分的含量,燃料的挥发分含量越高越容易着火和燃尽 [26]。纤维素与炭粉混合成型燃料的 R_w 和 S 都小于纯炭粉的相应值,说明纤维素的加入使得成型燃料的稳定性和燃烧特性都变差。而氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的 R_w 和 S 值均大于纯炭粉成型燃料,燃料的稳定性和燃烧特性都更好。并且炭粉表面附着的氧化淀粉颗粒燃烧减小了炭粉的孔道堵塞,从而使炭粉的燃烧反应加强,氧化淀粉中固定碳含量较少,所以其固定碳燃烧所需要的热量与等量炭粉中固定碳燃烧所需热量相比要少,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的着火性能更好、燃烧更稳定、燃烧特性更优。

表 2 燃烧特性参数
Tab. 2 Combustion characteristic parameters

样品	着火温度/ ℃	燃尽温度/ ℃	平均燃烧速率/ (%·min ⁻¹)	最大燃烧速率/ (%·min ⁻¹)	$T_{\max}$ /℃	S /(℃ ⁻³ ·min ⁻²)	R_w
炭粉成型燃料	385.7	580.7	2.251	10.137	516.4	2.641×10^{-11}	2.914
纤维素与炭粉混合成型燃料	362.5	570.6	2.225	8.883	516.6	2.638×10^{-11}	2.715
氧化淀粉与炭粉混合成型燃料	324.5	558.2	2.251	8.575	400.4	3.284×10^{-11}	3.778

3 结论

(1)在相同温度下制备的纯炭粉成型燃料和纤维素与炭粉混合成型燃料的松弛密度、比能耗相差不大,但纤维素的加入明显提高了燃料的径向抗压强度。氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的品质最优,且较低成型温度 40℃时也有较好的成型性能。当

成型温度不超过 100℃时,升高温度后,油茶壳生物炭燃料的成型性更好。

(2)随成型压力增大,成型燃料松弛密度、比能耗和径向抗压强度都随之增大,在成型压力 6 ~ 8 kN 时成型燃料品质较好。混合成型燃料内部纤维素通过骨架作用,氧化淀粉则形成网状结构将炭粉包围,使燃料强度增加。2 种添加剂都在一定

程度上提高了成型燃料的松弛密度和径向抗压强度。

(3)原料含水率增加提高了燃料的松弛密度,降低了成型比能耗;但原料含水率超过一定值后,氧化淀粉与炭粉混合成型燃料的径向抗压强度降低明显,原料含水率在 15% ~ 20% 时,成型燃料品质较好。

(4)3 种成型燃料的燃烧过程分为自身失水、挥发分析出与燃烧、固定碳燃烧和燃尽 4 个阶段。2 种添加剂的加入均提高了炭粉成型燃料的着火特性和燃尽特性。通过燃烧特性参数计算分析,添加氧化淀粉成型燃料燃烧更稳定,燃烧性能更优;添加纤维素燃料品质受成型参数影响较小,热值降低更少,与纯炭粉更为接近。

参 考 文 献

1 顾洁,周建斌,马欢欢,等.油茶壳热解产物特性及热解炭制备活性炭工艺优化[J].农业工程学报,2015,31(21):233-239.
GU Jie,ZHOU Jianbin,MA Huanhuan,et al. Characteristics of camellia shell pyrolysis products and opti-mization of preparation parameters of activated carbon[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(21):233-239. (in Chinese)

2 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/OL].农业机械学报,2015,46(9):206-210,143.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.029.
JIANG Enchen,GUO Xinhui,WANG Mingfeng,et al. Condensation characteristic of continuous pyrolysis volatiles of oil-tea camellia shell[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):206-210,143. (in Chinese)

3 孙亮,孙清,佟玲,等.花生壳热压成型工艺参数的试验研究[J].中国农业大学学报,2011,16(5):127-132.
SUN Liang,SUN Qing,TONG Ling,et al. Study on technological parameters of peanut hull hot briquetting[J]. Journal of China Agricultural University,2011,16(5):127-132. (in Chinese)

4 卢辛成,蒋剑春,孟中磊,等.生物质成型炭的制备及其性能研究[J].林产化学与工业,2013,33(2):81-84.
LU Xincheng,JIANG Jianchun,MENG Zhonglei,et al. Preparation and properties of formed biomass charcoal[J]. Chemistry and Industry of Forest Products,2013,33(2):81-84. (in Chinese)

5 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,2010,41(10):97-102.
YAO Zonglu,ZHAO Lixin, RONNBACK M,et al. Comparison on characterization effect of biomass pellet fuels on combustion behavior[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):97-102. (in Chinese)

6 李士伟,李辉,李昌珠,等.生物沥青-木屑混合成型行为和成型燃料品质分析[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48(4):1111-1118.
LI Shiwei,LI Hui,LI Changzhu,et al. Co-pelletization of bio-asphalt and sawdust:densification behavior and qualities of pellet fuel[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2017,48(4):1111-1118. (in Chinese)

7 KONG Lingjun, TIAN Shuanghong, HE Chun,et al. Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust[J]. Applied Energy,2012,98:33-39.

8 罗成成,王晖,陈勇,等.纤维素的改性及应用研究进展[J].化工进展,2015,34(3):767-773.
LUO Chengcheng,WANG Hui,CHEN Yong,et al. Progress in modification of cellulose and application[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015,34(3):767-773. (in Chinese)

9 MOHAMAD A M, MUHAZRI A M, ZUL A M H,et al. An overview on cellulose-based material in tailoring bio-hybrid nanostructured photocatalysts for water treatment and renewable energy applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2017,103:1232-1256.

10 崔旭阳,杨俊红,雷万宁,等.生物质成型燃料制备及燃烧过程添加剂应用及研究进展[J].化工进展,2017,36(4):1247-1257.
CUI Xuyang,YANG Junhong,LEI Wanning,et al. Recent progress in research and application of DBBF additive in preparation and combustion process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017,36(4):1247-1257. (in Chinese)

11 MAGNUS S, JONAS B, STEFAN F,et al. Effect on pellet properties and energy use when starch is added in the wood-fuel pelletizing process[J]. Energy & Fuels,2012,26:1937-1945.

12 MICHAEL L, VIANNEY A Y. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda[J]. Renewable Energy,2018,118:43-55.

13 钱湘群,陈腾蛟,盛奎川,等.玉米/木薯淀粉基竹炭成型燃料的品质特性[J].农业工程学报,2011,27(增刊1):157-161.
QIAN Xiangqun,CHEN Tengjiao,SHENG Kuichuan,et al. Quality characteristics of bamboo charcoal briquette based on corn and cassava starch adhesive[J]. Transactions of the CASE,2011,27(Supp.1):157-161. (in Chinese)

14 庄晓伟,陈顺伟,张桃元,等.7种生物质炭燃烧特性的分析[J].林产化学与工业,2009,29(增刊1):169-173,178.
ZHUANG Xiaowei,CHEN Shunwei,ZHANG Taoyuan,et al. Thermal analysis on the combustion characteristics of seven kinds of biomass charcoals[J]. Chemistry and Industry of Forest Products,2009,29(Supp.1):169-173,178. (in Chinese)

15 马培勇,虞浸,蒋峰,等.棉花秸秆成型颗粒炭化特性实验研究[J].太阳能学报,2016,37(3):546-552.
MA Peiyong,YU Jin,JIANG Feng,et al. Experimental study on the characteristics of cotton straw briquette granule carbonization

- [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 546 – 552. (in Chinese)
- 16 蒋恩臣, 苏旭林, 王明峰, 等. 生物质连续热解反应装置的变螺距螺旋输送机设计[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 121 – 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130223&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.023.
- JIANG Enchen, SU Xulin, WANG Mingfeng, et al. Design of variable pitch spiral conveyor for biomass continual pyrolysis reactor [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 121 – 124. (in Chinese)
- 17 秦丽元, 张世慧, 高忠志, 等. 生物质炭与木质素混合成型及燃烧特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 275 – 282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170436&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.036.
- QIN Liyuan, ZHANG Shihui, GAO Zhongzhi, et al. Molding fuel and combustion characteristics of biochar and lignin [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 275 – 282. (in Chinese)
- 18 杜衍红, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 生物质炭基复混肥造粒用淀粉胶粘剂的合成条件研究[J]. *中国胶粘剂*, 2016, 25(10): 561 – 564.
- DU Yanhong, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Study on synthesis condition of starch adhesive for biochar-compound fertilizer granulation [J]. *China Adhesives*, 2016, 25(10): 561 – 564. (in Chinese)
- 19 蒋恩臣, 卢爽, 张伟, 等. 粘结剂对生物质炭基尿素微观结构和性能影响的研究[J]. *可再生能源*, 2017, 35(10): 1437 – 1442.
- JIANG Enchen, LU Shuang, ZHANG Wei, et al. Study on the effect of binders on microstructure and properties of biochar-based urea [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(10): 1437 – 1442. (in Chinese)
- 20 王越, 白向飞. 粉煤成型机理研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2014, 20(3): 8 – 11.
- WANG Yue, BAI Xiangfei. Research progress on briquetting mechanism [J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20(3): 8 – 11. (in Chinese)
- 21 卢洪波, 戴惠玉, 马玉鑫. 生物质三组分燃烧特性及动力学分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 186 – 191.
- LU Hongbo, DAI Huiyu, MA Yuxin. Combustion characteristics and dynamic analysis of three biomass components [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(17): 186 – 191. (in Chinese)
- 22 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.
- JIANG Shaojian, WANG Tao, PENG Haoyi, et al. Thermogravimetric and combustion dynamics of mould-ing fuel of woodiness and cornstalk [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013, 44(10): 4312 – 4318. (in Chinese)
- 23 葛仕福, 赵培涛, 李扬, 等. 污泥-秸秆衍生固体燃料燃烧特性[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(17): 74 – 82.
- GE Shifu, ZHAO Peitao, LI Yang, et al. Combustion characteristics of sewage sludge-straw derived fuel [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(17): 74 – 82. (in Chinese)
- 24 熊绍武, 张守玉, 吴巧, 等. 生物质炭燃烧特性与动力学分析[J]. *燃料化学学报*, 2013, 41(8): 958 – 965.
- XIONG Shaowu, ZHANG Shouyu, WU Qiao, et al. Investigation on combustion characteristics and kinetics of bio-char [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(8): 958 – 965. (in Chinese)
- 25 LIN Y S, MA X Q, NING X X, et al. TGA FTIR analysis of co-combustion characteristics of paper sludge and oil-palm solid wastes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 727 – 734.
- 26 方立军, 于澜. 富氧环境下煤粒燃烧特性的热重试验[J]. *燃烧科学与技术*, 2014, 20(4): 297 – 302.
- FANG Lijun, YU Lan. Thermo-gravimetric experiment on combustion performance of coal particle in oxygen-enriched environments [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2014, 20(4): 297 – 302. (in Chinese)