

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.01.014

生物质炭添加比例对煤粉燃烧性能的影响

刘竹林¹, 蒋友源², 郑林², 周云花², 但家云², 李毅¹

(1. 湖南工业大学 冶金与材料工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 农业废弃物含有较高的C元素和较低的S元素及灰分, 将这类生物质炭化并细磨后, 与煤粉混合喷吹进入高炉燃烧, 可有效利用可再生能源, 减少炼铁工业的CO₂排放, 且有利于提高生铁质量, 并显著提高煤粉的燃烧率。因此, 对玉米秸秆和花生壳热解产物进行了表征分析, 采用差热分析法研究这两种生物质炭与煤粉按不同配比混合对煤粉燃烧性能的影响。SEM及BET检测结果均表明, 玉米秸秆炭和花生壳炭的组织疏松, 比表面积大, 硫与灰分含量低, 可明显增大试样与氧的接触面积; 热重试验结果表明, 生物质炭与煤粉按3:7的质量比混合的燃烧性能最好, 着火点明显降低, 燃烧过程稳定, 燃烧率显著提高。

关键词: 生物质炭; 农业废弃物; 节能减排; 可再生能源; 燃烧率; 煤粉

中图分类号: TF526

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)01-0085-07

引文格式: 刘竹林, 蒋友源, 郑林, 等. 生物质炭添加比例对煤粉燃烧性能的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(1): 85-91.

Effect of Biochar Addition Ratio on Combustion Performance of Pulverized Coal

LIU Zhulin¹, JIANG Youyuan², ZHENG Lin², ZHOU Yunhua², DAN Jiayun², LI Yi¹

(1. College of Metallurgy and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: After the process of carbonization and fine grinding, the biomass of higher C and lower S elements and ash contained in agricultural wastes, when mixed with pulverized coal, are to be injected into blast furnace for combustion, which can effectively utilize renewable energy, reduce CO₂ emission of iron-making industry, improve cast iron quality, and significantly improve the combustion rate of pulverized coal. Therefore, a characterization analysis has been made of the pyrolysis products of corn straw and peanut hull, and based on the differential thermal analysis, a research has been carried out on the effects of different mixing ratios of the two biomass charcoal on the combustion performance of pulverized coal. SEM and BET test results show that the corn straw charcoal and peanut shell are characterized with a loose structure, a large specific surface area and a low value of sulfur and ash content, which helps to significantly increase the contact area between sample and oxygen. The thermogravimetric test results show that the combustion performance of the mixture of biochar and pulverized coal is the best with a mass ratio of 3:7, with its ignition point obviously reduced, the combustion process stabilized and the combustion rate significantly increased.

Keywords: biochar; agricultural waste; emission reduction; renewable energy; combustion rate; pulverized coal

收稿日期: 2019-07-09

基金项目: 湖南省华菱湘潭钢铁有限公司技术开发基金资助项目

作者简介: 刘竹林(1965-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事烧结球团, 高炉炼铁以及农作物废弃物在炼铁中的利用方面的教学与研究, E-mail: zhulinliu65@163.com

1 研究背景

农业废弃物中含有较高的 C、H、O 元素、较低的 S 元素以及灰分, 将这类农业废弃物进行炭化处理并且细磨后, 再与煤粉混合喷入高炉中燃烧, 不仅可以有效利用可再生能源, 减少对化石燃料的依赖, 而且能够减少炼铁工业中的二氧化碳排放量, 有利于降低生铁中 S 的含量, 显著提高煤粉的燃烧率。当前对于各种农作物废弃物热解方面的研究较多, 但是将产物用于高炉喷吹以提高煤粉燃烧率的研究相对较少。从长远看, 将生物质燃料用于高炉喷吹可以实现 CO₂ 的净排放为零, 因而高炉喷吹生物质燃料成为国内外铁系统节能减排的研究与发展趋势之一^[1-3]。目前, 我国高炉喷吹用燃料主要是无烟煤粉, 为了提高无烟煤粉的燃烧性能, 需要加入一定比例价格较高而且存量稀少的烟煤。生物质炭具有与烟煤相似的特点, 如挥发份含量较高、结构疏松等, 因此在煤粉中添加一定比例的生物质炭理论上亦能降低煤粉的着火点, 提高煤粉的燃烧速率和燃烧率, 达到改善煤粉燃烧性能的目的。

根据国内已有相关研究, 花生壳在不同温度时的热解试验表明, 不同的升温速率对剩余物成分的影响不大, 生物质燃料热解反应的最终温度应控制在 450~550 °C^[4-6]。热解玉米秸秆可以得到生物质炭的质量分数为 29.82%、热解气体产物的质量分数为 27.49%, 以及生物油的质量分数为 42.69% 的三相分布产物^[7]。针对某些生物质燃料含较高碱金属的问题, 有研究发现: 水洗预处理能够去除花生壳中的部分金属元素, 降低灰分的含量, 并且提高花生壳的热值^[8]; 用乙酸溶液进行洗涤预处理, 可以去除玉米秸秆中

大部分的 K、Na 和 Mg 等金属元素, 降低灰分的含量^[9-10]; 并且农作物废弃物与铁矿石混合球团的还原性能良好^[11]。

国外已有研究表明, 生物质燃料具有很高的 H/C 比, 可以在共热解过程中为煤炭热解提供 H₂ 供体, 进而有助于煤炭的高效热解^[12-13]; 生物质燃料热解能够释放出更多含有大量氧的挥发分, 而产生的挥发分可以有效地和煤炭部分进行反应^[14-15]。玉米秸秆和干草的炭化时间越长, 能量密度增加越多^[16-17]。生物质燃料热裂解可以转化为以液体燃料为主产物, 含碳固体和不凝气体为副产物的具有发展前景的转化技术^[18]。

参考前人的研究结果, 本试验拟选用玉米秸秆、花生壳为原料, 首先固定温度为 500 °C 进行热解试验以获取热值较高的燃气、附加值较高的生物油, 以及本试验所需要的生物质炭原料, 然后将生物质炭与无烟煤按不同配比混合后进行差热法热重试验, 升温速率为 15 °C /min, 以探讨生物质炭的添加比例对无烟煤燃烧性能的影响, 确定燃烧性能较佳的生物质炭与粉煤的配比。

2 农作物热解及产物分析

2.1 试验原料

收集适量的农业废弃物玉米秸秆和花生壳, 通过粉碎机粉碎、筛分获得 80~150 目的试样。

无烟煤取自华菱湘潭钢铁有限公司炼铁厂, 并且通过球磨机磨细、筛分, 得到 200 目的试样。

生物质燃料和煤粉的物化特性见表 1。

表 1 生物质燃料与煤粉的物化特性

Table 1 Physicochemical characteristics of biomass fuels and pulverized coal (mass fraction)

名称	组分质量分数 /%			热值 / (MJ·kg ⁻¹)	元素质量分数 /%					m _c /m _H
	A _d	V _{daf}	FC _d		N	C	H	S	O	
无烟煤	12.33	10.23	77.44	24.64	1.368	64.735	3.193	0.362	18.010	20.27
玉米秸秆	7.32	73.35	19.33	15.82	1.853	39.400	7.188	0.231	44.010	5.48
花生壳	7.40	74.67	17.93	16.95	1.564	32.213	5.103	0.120	53.600	6.31

注: A_d 为空气干基灰分, V_{daf} 为干燥无灰基挥发分, FC_d 为空气干基固定碳。

分析表 1 中的数据可以得知, 生物质的玉米秸秆与花生壳的空气干基固定碳含量均较低, 远低于无烟煤的, 两者的质量分数分别为 19.33% 和 17.93%; 玉米秸秆和花生壳中的空气干基灰含量均较低, 且都明显低于无烟煤的, 而两者的干燥无灰基挥发分非常高, 其质量分数分别达 73.35% 和 74.67%。对于玉米

秸秆与花生壳中的各元素质量分数, 两者中的 H 元素质量分数均明显高于无烟煤的; 玉米秸秆和花生壳中均富含 O 元素, 且远高于无烟煤的, 其中花生壳的 O 元素质量分数高达 53.60%; 两种生物质燃料中硫的质量分数均低于无烟煤的, 但是其热值也明显低于无烟煤的。

2.2 热解试验方法

花生壳及玉米秸秆热解实验采用了固定床热解炉装置, 实验过程如下:

1) 称取 20 g 粒径为 80~150 目的试样, 放入长 900 mm、直径为 35 mm 的石英管中;

2) 通入高纯度氮气, 氮气的流速为 200 mL/min, 且预先通气 20 min 以排干管内空气。

3) 当固定床热解炉的温度稳定至 500 °C 以后, 将石英管放入热解炉中。热解所得的气体产物先经直行冷凝管冷却后通入三口烧瓶, 然后经蛇形冷却管进一步冷却, 再用集气袋收集, 冷凝介质均为冷水。对比反应前后各冷凝管及三口烧瓶的质量, 确认液体产物的质量。

4) 热解 1 h 后反应结束, 快速抽出石英管, 并且用橡胶塞塞住石英管两端, 待石英管自然降温至接近室温后, 收集固体产物, 并称量其质量。

2.3 热解产物分析

花生壳和玉米秸秆在 500 °C 温度条件下热解 1 h 后, 得到气态、液态、固态 3 种形态的产物, 分别称取液体产物与固体产物的质量, 并通过计算, 得出气体产物的质量, 以及三态所占的质量分数, 所得结果如表 2 所示。

表 3 玉米秸秆炭、花生壳炭与煤粉的物化特性

Table 3 Physicochemical characteristics of corn straw charcoal, peanut hull charcoal and pulverized coal

名称	组分质量分数 /%			热值 / (MJ·kg ⁻¹)	元素质量分数 /%					m _c /m _H
	A _d	V _{daf}	FC _d		N	C	H	S	O	
无烟煤	12.33	10.23	77.44	24.64	1.368	64.735	3.193	0.362	18.010	20.27
玉米秸秆炭	18.75	20.36	60.89	23.57	0.690	62.050	1.910	0.130	16.470	32.49
花生壳炭	16.68	24.54	58.78	22.35	0.930	59.660	1.880	0.210	20.640	31.73

注: A_d 为空气干基灰分, V_{daf} 为干燥无灰基挥发分, FC_d 为空气干基固定碳。

分析表 3 中的数据可以得知, 生物质炭中 C 元素的质量分数最高, 为 60% 左右, 略低于无烟煤的, 但是其挥发分依然较高, 其中玉米秸秆炭的干燥无灰基挥发分的质量分数为 20.36%, 花生壳炭的干燥无灰基挥发分质量分数高达 24.54%; 生物质炭中的有害元素 S 的含量较低, H 元素因挥发分的大量分解而大幅度降低, 热值略低于无烟煤的。

2.3.2 生物质炭 SEM 与 BET 分析

生物质燃料在热解过程中, 伴随着其主要成分纤维素、半纤维素和木质素的分解, 在生物质炭表面与内部形成多孔道结构。分别对两种生物质炭进行扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 分析 (德国生产的 LEO 1530 VP/Inca 300 热场发射扫描电子显微镜) 和 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 分析 (美国

表 2 三态的质量及其质量分数

Table 2 Mass and mass fraction under three characteristics states

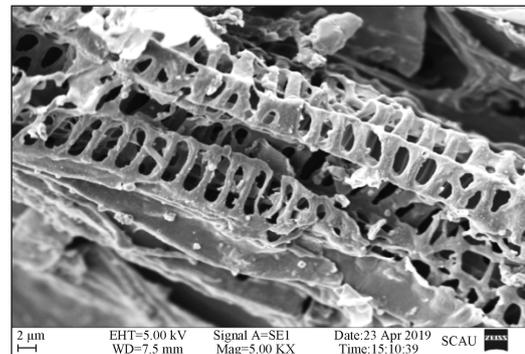
名称	气体		液体		固体	
	质量 / g	质量 分数 /%	质量 / g	质量 分数 /%	质量 / g	质量 分数 /%
花生壳	7.40	37.149	6.59	33.082	5.93	29.769
玉米秸秆	5.68	28.457	8.32	41.683	5.96	29.860

分析表 2 中的数据可以得知, 两种生物质燃料的液体产物质量分数均较高, 固体产物质量分数均约为 30%。由气相色谱仪 (美国 Agilent 公司生产的 6890 型色谱仪) 对气体产物进行分析, 结果显示, 气体产物主要由 CO、H₂、CH₄ 和 C_nH_m 等可燃高热值气体组成, 可以为生物质燃料热解炉提供热量; 热解过程中, 大分子有机物分解成小分子有机物, 形成多种生物油成分, 含量最高的是乙酸 (CH₃COOH), 其质量分数为 29.8%, 可提取另作他用。所得固体产物 (生物质炭) 通过处理与煤粉按一定比例混合燃烧, 其目的主要是充分利用可再生资源, 减少 CO₂ 排放, 另外利用生物质炭的特性以提高煤粉的燃烧率。

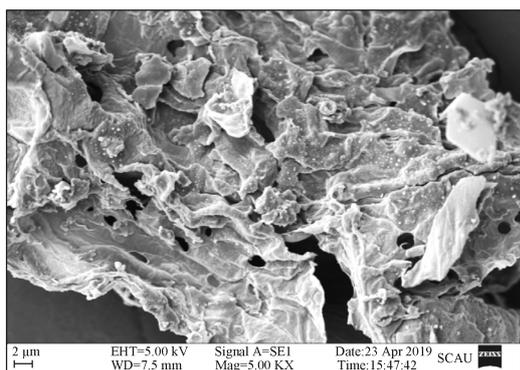
2.3.1 生物质炭物化特性

将得到的生物质炭进行物化特性分析, 并与无烟煤比较, 结果如表 3 所示。

Quantachrome 公司 GEMINI VII 2390 全自动快速比表面积与孔隙度分析仪)。图 1 为玉米秸秆炭两个试样的 SEM 照片。



a) 试样 1



b) 试样 2

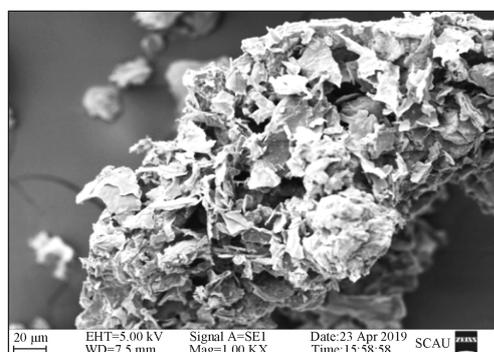
图 1 玉米秸秆炭 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of corn straw charcoal

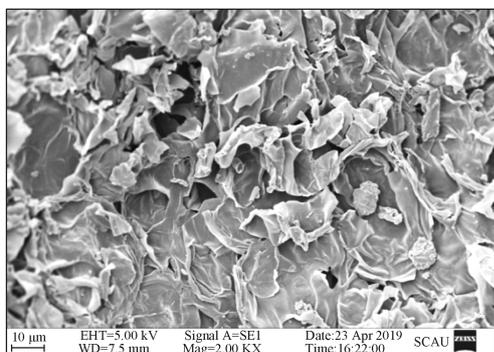
由图 1a 可以看出, 玉米秸秆炭由很多带孔结构和通道结构组成。由于玉米秸秆海绵状结构中很多原有生物质结构分解消失, 主要留存炭化木质素等支撑起的多孔炭架结构, 炭化后外围轮廓清晰, 孔隙结构非常丰富, 使玉米秸秆炭具有更大的比表面积, 燃烧时可增大与氧气的接触面积, 具有较快的燃烧速率, 有利于降低着火点, 提高燃烧率。

图 1b 显示, 玉米秸秆炭中规则的孔洞结构有所破坏, 部分孔道受热应力、外力作用而变成片状或粒状结构, 但总体结构依然显得疏松。

图 2 为花生壳炭的两个试样 SEM 照片。



a) 试样 1



b) 试样 2

图 2 花生壳炭 SEM 照片

Fig. 2 SEM photograph of peanut shell charcoal

在花生壳裂解过程中, 由于水分和挥发分逐渐从生物质组织表面及内部逸出, 形成许多气孔。由图 2a 可见, 花生壳炭为类似纤维状物质, 并且存在褶皱结构, 表面可见密集的、通透的孔洞结构。图 2b 中部分孔洞结构有所破坏, 孔洞越来越不规则, 孔洞数量也减少, 可能是随着热解的进行, 花生壳中炭化的木质素结构支撑的孔架结构受热应力和外力的作用发生破损引起了孔洞的破坏。可见, 花生壳炭的总体结构疏松, 对燃烧极为有利。

BET 测试结果表明, 选用的无烟煤的比表面积为 $1.983 \text{ m}^2/\text{g}$, 而玉米秸秆炭和花生壳炭的比表面积分别为 $6.469 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $6.444 \text{ m}^2/\text{g}$, 约为无烟煤的 3 倍, 而无烟煤与生物质炭的粒径基本相当, 这也充分说明生物质炭的内部气孔多、密度小、结构疏松。

3 生物质炭对喷吹煤粉燃烧率的影响

3.1 试验方法

采用 NETZSCH STA 449 C 型热差热重综合热分析仪 (德国耐驰), 对各试样的燃烧失重行为进行分析。首次测试时, 在样品台放入煨烧好的空坩埚, 记录此次试验所需条件的基线。试验时, 取粒径为 100 目的干燥试样 10 mg, 以空气为载气, 空气流速为 50 mL/min, 并设定起始温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 终止温度为 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率为 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

3.2 试验结果与分析

将花生壳炭、玉米秸秆炭分别与煤粉以质量比为 1:9, 2:8, 3:7 的配比均匀混合后进行热重试验, 分别记为 H10、H20、H30, Y10、Y20、Y30。根据热重数据绘出 T-TG 的关系曲线, 图 3 为不同配比花生壳炭及煤粉的 TG 曲线, 图 4 为不同配比玉米秸秆炭及煤粉的 TG 曲线。

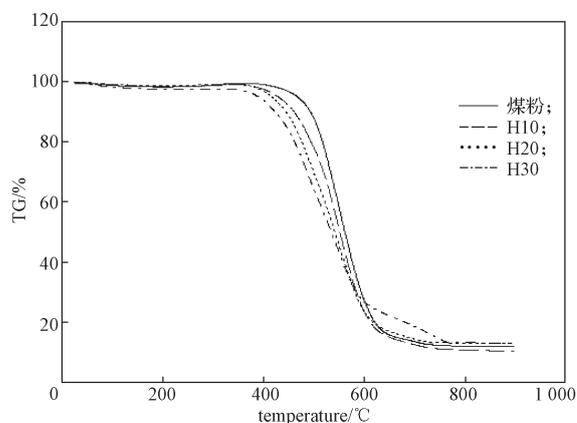


图 3 不同配比花生壳炭及煤粉的 TG 曲线

Fig. 3 TG curves of peanut hull charcoal and pulverized coal with different proportions

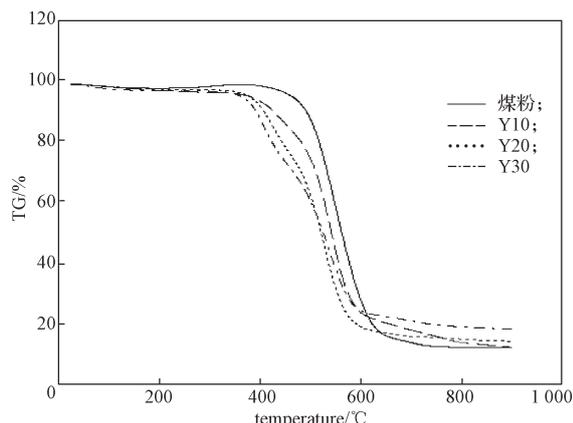


图4 不同配比玉米秸秆炭及煤粉的TG曲线

Fig. 4 TG curves of corn straw charcoal and pulverized coal with different proportions

由图3和图4所示TG曲线可以得知,在煤粉中添加玉米秸秆炭或花生壳炭后,试样燃烧的TG曲线中提前出现了下降的拐点,且生物质炭和煤粉的质量比越大,TG曲线中出现拐点的温度越低。随着混合试样的燃烧速率加快,燃烧时间变短,结束温度较低,试样燃烧更为充分。这是由于在煤粉中添加了玉米秸秆炭或花生壳炭后,混合燃料中的挥发分含量升高,导致其着火点降低,试样提前燃烧,放出大量的热,而且玉米秸秆炭和花生壳炭的组织疏松,比表面积较大,能够快速引燃煤粉,燃烧反应的渗透性更好。

对比图3和图4中的曲线可以得知,玉米秸秆炭比花生壳炭的低峰先出现,说明玉米秸秆炭的添加对混合试样燃烧性能的改善效果较添加花生壳炭的更为明显。

图5所示为不同配比花生壳炭及煤粉的DTG曲线,图6所示为不同配比玉米秸秆炭及煤粉的DTG曲线。

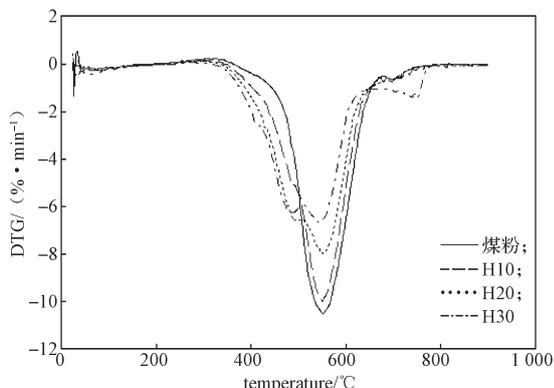


图5 不同配比花生壳炭及煤粉的DTG曲线

Fig. 5 DTG curves of peanut hull charcoal and pulverized coal with different proportions

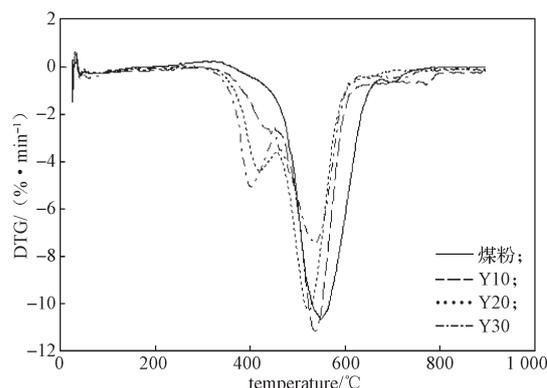


图6 不同配比玉米秸秆炭及煤粉的DTG曲线

Fig. 6 DTG curves of corn straw charcoal and pulverized coal with different proportions

由图5和6可以看出,生物质炭和煤粉混合之后燃烧时,混合试样最大的失重速率的温度区间都在450~550°C,并且煤粉(100%)在几种试样中的失重速率峰值是最大的。添加生物质炭中的混合试样的着火点较低,且生物质炭和煤粉的质量比越高,混合物的着火点越低。这可能是由于其挥发分含量较多,而挥发分成分较复杂,分解温度存在差异,故存在2~3个失重速率尖峰,最大失重速率峰值比煤粉小;生物质炭配比越高,失重速率尖峰越小,燃烧分段越明显,相对煤粉燃烧更加稳定,避免了单一煤粉瞬间快速燃烧导致燃烧不彻底的弊端。另外,生物质炭的孔隙较多,比表面积较大,混合试样燃烧开始时间提前,燃烧速度加快。

分析图3~6可以得出,试样的燃烧过程大致可以分为3个阶段:预热阶段、燃烧阶段和燃尽阶段。混合试样在开始预热阶段,存在一些自由水的蒸发而形成的异常尖峰;然后随着温度的继续升高,试样析出大量的挥发分并燃烧,固定碳随后被点燃引起质量的急剧下降,可见2~3个尖峰。单一煤粉挥发分较少,其分解温度相对较高,以至于挥发分分解、燃烧过程和固定碳燃烧过程发生重叠,在DTG曲线中表现为只有一个明显峰值。当失重速率接近0时,属于燃尽阶段,剩下的固体残留物基本为不能分解与燃烧的灰分。

根据高炉生产喷吹煤粉的燃烧特点,燃烧率的计算仅考虑试样中可燃物的燃烧失重,可得燃烧率的计算公式如下^[19]:

$$R_i = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_\infty}$$

式中: R_i 为试样燃烧至 T_i 时的燃烧率;

m_0 为试样的初始质量;

m_i 为燃烧至温度为 T_i 时试样的质量;

m_{∞} 为试样完全燃烧后的质量。

对试样的热重数据进行分析计算, 可得出不同温度下的燃烧率。由于高炉风口前温度很高, 煤粉进入高炉后会迅速燃烧, 考虑到试样在 700 °C 以上基本处于燃尽阶段, 参考意义不大。因此, 本次试验仅计算试样燃烧至 500 °C、600 °C 时的燃烧率, 计算结果如表 4 所示。

表 4 不同温度下的试样燃烧率

Table 4 Combustion rates of samples at different temperatures

燃烧终止 温度 / °C	试样燃烧率 / %						
	无烟煤	H10	H20	H30	Y10	Y20	Y30
500	0	12.56	19.54	25.54	14.71	18.45	26.73
600	68.5	69.93	72.53	73.48	73.01	74.33	77.89

由表 4 可知, 混合试样在较低温度下伴随着大量挥发份的分解与燃烧, 其燃烧率明显高于单一无烟煤粉的, 且相同质量配比下玉米秸秆炭与煤粉混合试样的燃烧率比花生壳炭与煤粉混合试样的更高, 这可能与玉米秸秆炭易燃的固定碳含量高、比表面积略高存在一定的相关性。500 °C 时, 混合试样的燃烧率远高于单一无烟煤粉的燃烧率 (单一无烟煤的燃烧率几乎为 0), 其主要原因是生物质炭中的挥发分含量高于煤粉中的挥发分, 煤粉中添加生物质炭后, 混合试样中的挥发分含量增加, 且生物质炭的着火温度为 350~400 °C, 而无烟煤着火点为 600~700 °C。因此, 500 °C 时混合试样燃烧率随着生物质炭添加比例的增加而明显升高, 即所选配比中, 花生壳炭、玉米秸秆炭分别与煤粉以质量比为 3:7 的配比试样的燃烧性能最佳。600 °C 时, 随着生物质炭配比的增加, 混合试样的燃烧率均有所上升, 但幅度相对收敛, H30 和 Y30 试样的燃烧率比单一无烟煤仅高出 5%~9%。试验中发现, 当温度升高至 700 °C 后, 单一煤粉的燃烧率与混合试样的燃烧率相当。

4 结论

本试验首先对玉米秸秆与花生壳两种农作物废弃物在氮气保护下进行恒温热解, 分析其固体产物生物质炭的部分特征, 并以生物质炭与无烟煤混合, 在空气条件下进行热重试验, 探讨了生物质炭的添加比例对无烟煤燃烧性能的影响, 可得到如下结论:

1) 玉米秸秆和花生壳热解可产生高热值气体产物、高附加值生物油及可燃性良好的生物炭。生物质炭的质量分数约为 30%, 其固定碳质量分数约为 60%, 挥发分质量分数为 20%~25%, 有害杂质硫较低,

较适合高炉喷吹。

2) SEM 以及 BET 检测结果均表明, 生物炭试样气孔较多, 组织较为疏松, 比表面积较大, 燃烧时可明显增大与氧的接触面积, 具有更快的燃烧速率, 有利于降低着火点与迅速燃烧。

3) 热重试验结果表明, 煤粉中添加玉米秸秆炭和花生壳炭, 能降低混合燃料的着火点, 使煤粉提前燃烧, 试样在 500 °C、600 °C 时的燃烧率明显增加, 且燃烧率随生物质炭配比的增加而升高。

4) 在本研究所选的 3 个配比中, 花生壳炭、玉米秸秆炭分别与煤粉以质量比为 3:7 的混合试样燃烧性能最佳, 着火点明显降低, 燃烧过程稳定, 燃烧率显著提高。

参考文献:

- [1] 毕学工, 周进东, 严渝镗. 国内外钢铁制造业节能减排的研究与应用 [J]. 河南冶金, 2011, 19(2): 1-7, 12.
BI Xuegong, ZHOU Jindong, YAN Yuqiang. Study and Application of Energy Saving and Emission Reduction for Iron and Steelmaking Industry at Home and Abroad [J]. Henan Metallurgy, 2011, 19(2): 1-7, 12
- [2] LIU Zhulin, BI Xuegong, GAO Zeping, et al. Preparation and Properties of Agricultural Residuals-Iron Concentrate Pellets [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(7): 1-7.
- [3] LIU Zhulin, BI Xuegong, GAO Zeping, et al. Carbothermal Reduction of Iron Ore in Its Concentrate-Agricultural Waste Pellets [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-6. Doi:10.1155/2018/2138268.
- [4] 陈红健. 生物质热解炭化实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
CHEN Hongjian. Experimental Research on Biomass Pyrolysis Carbonization [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [5] 冯胜利. 煤和生物质低温共热解动力学研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
FENG Shengli. Pyrolysis Processes of Coal and Biomass at Low Temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [6] 杨华. 生物质棒状成型燃料热解过程和产物特性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
YANG Hua. Study of Pyrolysis Process and Characteristics of Products from Biomass Bar Briquette [D]. Beijing: Chinese Academic of Forestry, 2016.
- [7] 王雅君, 李丽洁, 邓媛方, 等. 变速升温对玉米秸秆热解产物特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2018,

- 49(4): 337-342, 350.
- WANG Yajun, LI Lijie, DENG Yuanfang, et al. Effect of Variable Heating Rate on Pyrolysis Process and Product Characteristics of Corn Stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2018, 49(4): 337-342, 350.
- [8] 崔泽苹, 李志合, 李 宁, 等. 水洗预处理对花生壳热解特性及产物的影响 [J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1431-1436.
- CUI Zeping, LI Zhihe, LI Ning, et al. Effects of Water Washing Pretreatment on Pyrolysis Properties and Products of Peanut Shell[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1431-1436.
- [9] 黄 晶, 崔嘉勇, 高安江, 等. 有机酸洗预处理对玉米秸秆热解过程的影响 [J]. 广东化工, 2018, 45(15): 14-15.
- HUANG Jing, CUI Jiayong, GAO Anjiang, et al. Effects of Organic Acid Washing Pretreatment on Pyrolysis Process and Products of Corn Straw[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(15): 14-15.
- [10] 马善为. 生物质热解气建模与分级冷凝研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- MA Shanwei. Study of Modeling and Fractional Condensation of Biomass Pyrolysis Gas[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [11] 刘竹林, 王发龙, 王建丽, 等. 农作物废弃物含碳球团还原行为研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(1): 87-92.
- LIU Zhulin, WANG Falong, WANG Jianli, et al. Study on the Reduction Process of Carbon-Bearing Pellets from Agricultural Waste[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(1): 87-92.
- [12] KRERKKAIWAN S, FUSHIMI C, TSUTSUMI A, et al. Synergetic Effect During Co-Pyrolysis/Gasification of Biomass and Sub-Bituminous Coal[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 115: 11-18.
- [13] SONCINI R, MEANS N, WEILAND N T. Co-Pyrolysis of Low Rank Coals and Biomass: Product Distributions [J]. Fuel, 2013, 112: 74-82.
- [14] JEONG H, SEO M, JEONG S. Pyrolysis Kinetics of Coking Coal Mixed with Biomass Under Non-Isothermal and Isothermal Conditions[J]. Bioresour Technology, 2014, 155: 442-445.
- [15] SONOBE T, WORASUWANNARAK N, PIPATMAN-OMAI S. Synergies in Co-Pyrolysis of Thai Lignite and Corncob[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(12): 1371-1378.
- [16] WEILAND N, MEANS N, MORREALE B D. Product Distributions from Isothermal Co-Pyrolysis of Coal and Biomass[J]. Fuel, 2012, 94: 563-570.
- [17] MEDIC D, DARR M, SHAH A, et al. Effects of Torrefaction Process Parameters on Biomass Feedstock Upgrading[J]. Fuel, 2012, 91(1): 147-154.
- [18] COLLARD F, BLIN J. A Review on Pyrolysis of Biomass Constituents: Mechanisms and Composition of the Products Obtained from the Conversion of Cellulose, Hemicelluloses and Lignin[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 594-608.
- [19] 张建良, 刘伟剑, 任 山, 等. 废塑料的添加比例对煤粉燃烧的影响 [J]. 过程工程学报, 2012, 12(5): 810-815.
- ZHANG Jianliang, LIU Weijian, REN Shan, et al. Effect of Waste Plastics Addition Ratio on Combustion of Pulverized Coal[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(5): 810-815.

(责任编辑: 廖友媛)