

生物质成型炭燃烧特性研究

王才威, 张守玉, 姚云隆, 吴顺延, 江锋浩, 张一帆

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 使用固定床反应器对成型棉秆、成型木屑及二者混合成型生物质进行炭化实验,利用快速氧弹量热仪、热重分析仪等对生物质炭的成型质量、着火温度、燃尽温度和综合燃烧系数 S 进行研究。应用 Coats-Redfern 积分法建立其氧化反应动力学模型,分析成型炭的反应动力学参数和燃烧机理。结果表明,随着炭化温度的升高(400~600 ℃),成型炭的热值提高,灰分产率增加,燃烧性能变差。相同炭化温度下,棉秆成型炭的燃烧性能优于木屑成型炭,但灰分高、热值低。在木屑中掺混棉秆可有效改善成型炭的燃烧性能。燃烧动力学方面,成型生物质炭化后,其燃烧过程由内扩散阻力控制的片状燃烧反应机理变成化学反应阻力控制的球状燃烧反应机理,反应活化能增加。通过先成型再炭化制得的成型炭,其灰分产率(4.9%~9.1%, wt)和固定碳产率(67.8%~83.8%, wt)均符合欧标要求,尤其灰分产率明显低于欧标;与商用机制烧烤炭相比,该成型炭燃烧性能优,反应活化能低(18.71~41.99 kJ/mol)。

关键词: 生物质; 成型炭; 燃烧特性; 反应动力学

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

燃烧特性与反应动力学参数是评价生物质炭品质的重要参考依据,也是配套燃烧设备设计开发及燃烧方式优化的重要理论依据^[1]。国内外学者对生物质与生物质炭的燃烧特性进行了大量实验研究^[2-5]。研究表明,原料种类、炭化温度、升温速率等对生物质炭的燃烧过程有较大影响。张守玉等^[6]利用沉降炉对动物粪便进行炭化实验,发现较高的升温速率与水蒸气气氛可提高半焦的反应活性。熊绍武等^[7]利用管式炉分别对棉秆、木屑和竹屑进行炭化实验,发现随着炭化温度的升高,生物质炭的燃烧特性降低。侯宝鑫等^[8]在此基础上,添加羧甲基纤维素钠等粘结剂对生物质炭粉进行成型实验,发现粘结剂与焦粉的掺混比例超过 7:10 将造成成型炭孔隙的堵塞,氧气通过率降低,燃烧特性变差。上述工作均旨在研究焦粉或焦粉配胶后压制成型制得成型炭的燃烧特性,而对生物质原料先成型再炭化制得成型炭燃烧特性的研究较少。

近年来,不添加粘结剂的先成型再炭化工艺备受关注^[9],研究该工艺制得成型炭的燃烧特性对其现实应用有较高的价值。

本文在上述研究的基础上,利用热重分析法研究生物质成型炭的着火温度、燃尽温度和综合燃烧系数 S 。同时利用 Coats-Redfern 积分法拟合计算其燃烧反应动力学参数——平均活化能 E ,分析其燃烧反应机理。为成型生物质炭的制备及相关燃烧过程的开发提供理论依据与指导。

1 实 验

1.1 实验原料

本实验所选用的原料为棉秆(CS)、木屑(WS)及混合生物质(WS-CS),其中 WS-CS 是将 CS、WS 以 1:1(w/w)的比例均匀混合。CS 和 WS 的元素分析、工业分析和灰分组分分析分别见表 1 和表 2。所有原料经自然干燥后进行破碎,并筛分出粒径 0.5~1.0 mm 的颗粒用于后续实验。

收稿日期: 2017-03-01

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAA04B01); 上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ213)

通信作者: 张守玉(1971—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事生物质能源转化利用方面的研究。zhangsy-guo@163.com

表1 CS和WS的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of cotton stalk (CS) and wood sawdust (WS)

原料	工业分析/%, wt, ad				元素分析/%, wt, ad					$Q_{\text{net, ad}}/$ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>FC</i>	[C]	[H]	[O] _{diff.}	[N]	[S]	
棉秆	4.25	3.78	72.11	19.86	47.56	3.18	39.97	0.86	0.40	17.96
木屑	2.13	1.64	80.67	15.56	53.60	2.78	38.86	0.96	0.03	19.75

表2 CS和WS的灰分组分分析(% ,wt)

Table 2 Ash analysis of cotton stalk and wood sawdust(% ,wt)

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
棉秆	11.69	1.75	1.13	30.80	13.88	1.39	6.30	18.86	10.03	4.07
木屑	40.57	6.79	11.64	27.48	4.66	0.85	3.81	1.77	0.85	0.80

1.2 成型及炭化实验

使用上海乐傲试验仪器有限公司 YP-30T 成型机对生物质原料进行成型实验。每次取样品 15 g, 在 40 MPa 压力下制得成型棉秆(CS-B)、成型木屑(WS-B)和混合成型生物质(WS-CS-B), 并用于炭化实验。

使用上海贵尔机械设备有限公司 GR-AF1216 固定床反应器对成型生物质进行炭化实验。将圆柱体成型生物质放入反应器中, 先通入氮气排尽炉内空气, 流量 200 mL/min。然后将炉内温度从室温升至不同终温(400/500/600 ℃)并停留 30 min, 在氮气保护下冷却至室温分别得到棉秆成型炭(CS-CB-400/500/600)、木屑成型炭(WS-CB-400/500/600)和混合生物质成型炭(WS-CS-CB-400/500/600), 其表观密度为 900 kg/m³。

1.3 热重实验

使用美国 TA 公司 Q500 热重分析仪在空气气氛下(60 mL/min)进行燃烧分析实验。对待测样品进行切片, 得到体积约 3 mm³的立方体颗粒(5±1 mg), 然后开始实验。载气为氮气, 流量 60 mL/min, 从室温升至 150 ℃后停留 30 min 以去除水分。然后以 150 ℃作为失重(TG)和失重速率(DTG)曲线起始点进行记录, 分别以 5、10、15 ℃/min 的升温速率升至样品燃烧质量变化低于 0.1%/min(约 550 ℃)。

1.4 工业分析及发热量实验

根据欧洲标准 EN 1860-2:2005 测定干基固定碳产率和灰分产率。使用德国 IKA 公司 C200 快速氧弹量热仪测量成型炭的热值。

2 结果与讨论

2.1 燃烧特性分析

样品的燃烧特性可通过燃烧失重曲线、综合燃烧系数 *S*、着火温度、燃尽温度来表征。其中, 着火温度由失重和失重速率联合定义法确定, 即过失重速率曲线的顶点做一条垂线与失重曲线相交, 在交点处做失重曲线的切线, 该切线与开始失重时的平行线的交点所对应的温度为着火温度。燃尽温度取燃烧失重达到整个燃烧过程失重的 99%处所对应的温度。综合燃烧系数 *S* 按式(1)计算^[5]:

$$S = \frac{V_{\text{max}} \times V_{\text{mean}}}{T_i^2 \times T_e} \quad (1)$$

式中, V_{max} 、 V_{mean} ——最大和平均燃烧速率, %/min; T_i 、 T_e ——着火、燃尽温度, ℃。

图 1 为成型生物质及其炭化产物在 5 ℃/min 升温速率下的燃烧热重曲线, 其余升温速率下热重曲线呈现的趋势类似。如图 1 所示, CS-B、WS-B 和 WS-CS-B 的燃烧过程十分相似, 即在 150 ℃之后(水分析出)均可分为 2 个阶段: 1) 150~350 ℃为挥发分析出阶段, 该阶段是生物质燃烧失重的主要阶段, 在解聚反应作用下, 生物质内半纤维素、纤维素、木质素等有机组分裂解, 析出大量可燃性气体化合物(如 CO、CH₄等)^[10]; 2) 350~500 ℃为残余半焦的燃烧阶段, 该阶段的失重及失重速率显著低于挥发分析出阶段。而成型生物质经过炭化后, 挥发分产率降低, 导致成型炭在燃烧过程中挥发分析出失重明显低于残余半焦的燃烧失重, 仅 400 ℃炭化温度下制得成型炭的燃烧过程可观察到挥发分析出的肩状侧峰, 其余炭化温度下成型炭的失重速率曲线上有且仅有 1 个主燃烧峰, 且燃烧峰峰值随着炭化温度

的升高而增大,峰值温度向高温区移动。

表 3 为 5 °C/min 升温速率下成型生物质与成型炭的燃烧特性参数,其余不同升温速率下的燃烧特性参数呈现出相同的变化趋势。由表 3 可知,3 种成型生物质炭化后的着火温度和燃尽温度均升高, S 值降低,燃烧特性变差。随着炭化温度的升高,成型炭的燃烧特性进一步降低,这与图 1 中样品的燃烧失重速率曲线的变化规律一致。其原因是较高的温度加深了样品的炭化程度,低反应活性组分增加,高反应活性组分减少,从而导致成型炭的燃烧

性能变差。此外,由表 3 可得,CS-B 炭化前后的着火温度和燃尽温度均低于 WS-B,具有较优的燃烧特性。由表 2 可知,CS 原料中的 Ca、Mg、K、Na 等碱金属元素含量均高于 WS。研究表明^[6,11]碱金属及碱土金属对半焦的燃烧具有催化作用。对于混合成型生物质,CS-WS-B 炭化前后的燃烧特性均低于 CS-B,但优于 WS-B。因此,在 WS 中掺混 CS 可改善成型炭的燃烧性能,这可能是由于 WS-CS-CB 在燃烧过程中,棉秆半焦高含量的碱金属及碱土金属促进木屑半焦的燃烧,产生协同催化效应。

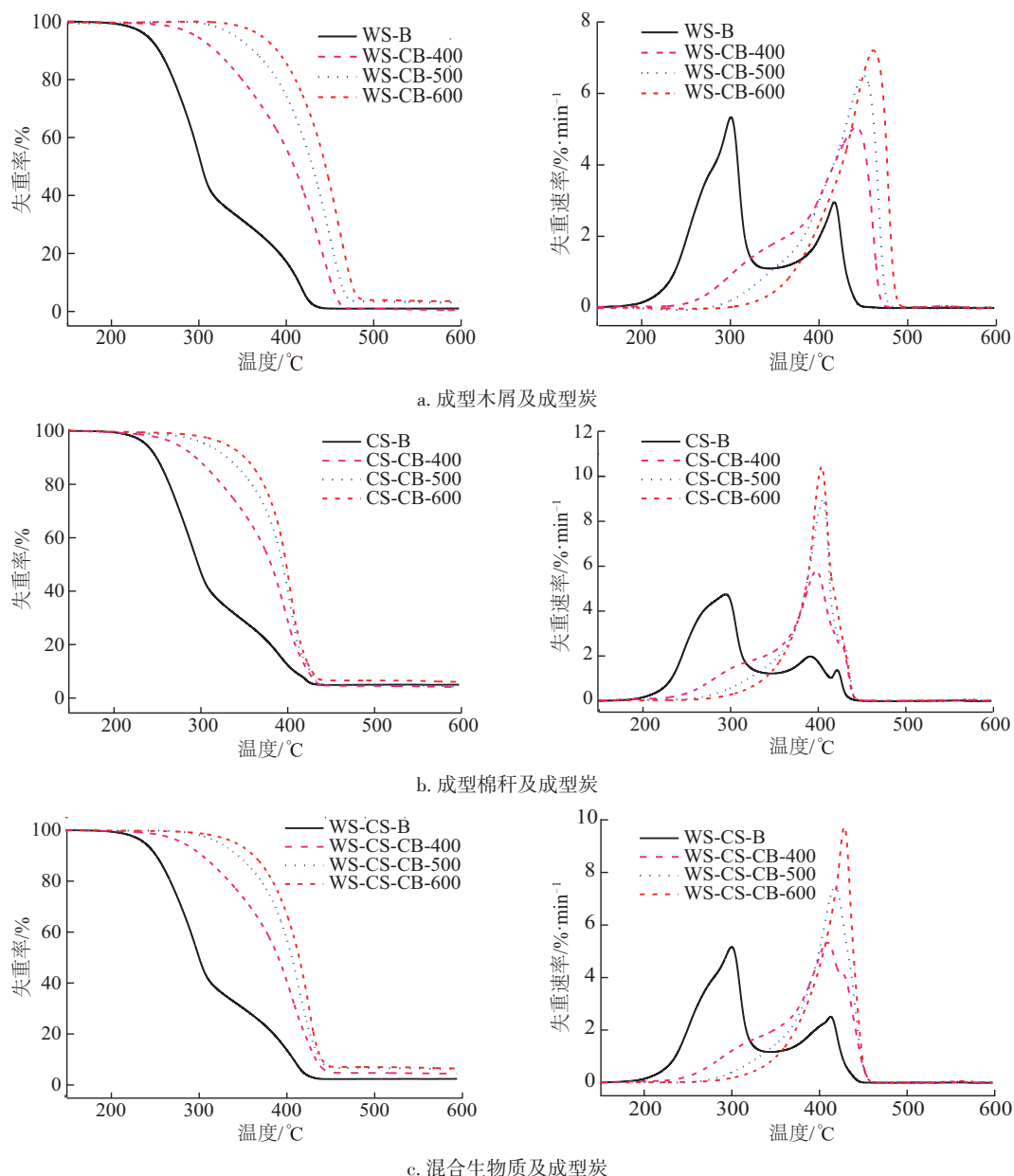


图 1 成型生物质及成型炭燃烧失重与失重速率曲线

Fig. 1 TG and DTG curves of biomass briquettes and carbonized briquettes

表3 成型生物质及成型炭燃烧特性参数

Table 3 Combustion characteristic parameters of biomass briquettes and carbonized briquettes

样品	$A_d/\%$	$FC_d/\%$	$Q_{net}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	升温速率5℃/min		
				$T_i/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$S\times 10^7/\%^2\cdot\text{min}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-3}$
WS-B	1.6	15.6	19.8	259	430	3.65
WS-CB-400	4.9	67.8	28.7	361	465	3.53
WS-CB-500	5.4	79.6	30.8	394	472	3.07
WS-CB-600	6.4	83.8	32.0	417	488	2.85
CS-B	3.8	19.9	18.0	243	425	6.12
CS-CB-400	7.0	64.5	27.8	344	435	5.71
CS-CB-500	8.3	75.0	28.6	367	446	4.38
CS-CB-600	9.1	79.0	29.9	377	456	3.96
WS-CS-B	2.7	17.8	18.8	250	425	4.69
WS-CS-CB-400	5.9	67.0	28.5	350	447	3.89
WS-CS-CB-500	6.8	78.5	30.0	378	458	3.26
WS-CS-CB-600	7.8	81.6	31.1	394	469	2.99
商用机制烧烤炭	—	—	26.6	397	483	2.38
EN 1860-2	<18	>60	—	—	—	—

为了研究本实验制得成型炭市场化应用的可行性,将成型炭的固定碳产率、灰分产率、热值、燃烧特性参数分别与欧标 EN 1860-2 和商用机制烧烤炭进行对比分析。如表 3 所示,各炭化温度下制得成型炭的灰分产率和固定碳产率明显低于欧标,并且热值也高于商业机制烧烤炭。燃烧特性方面,对比于商用机制烧烤炭,除 WS-CB-600 的着火点和燃尽点略高外,其余所有成型炭的各项燃烧特性参数均较优。此外,WS-CB 的着火温度较高,不能直接用于烧烤炭的制备。采用先成型再炭化工艺制得的成型炭,可避免因添加粘结剂造成热值降低、燃烧特性变差等问题,市场利用前景广阔。

2.2 燃烧反应动力学分析

2.2.1 燃烧反应模型的建立

生物质燃烧的第 2 阶段(残余半焦的燃烧)和成型炭的燃烧过程均为典型的非等温非均相气固反应,故采用 Coats-Redfern 积分法^[12]进行燃烧反应动力学计算,其具体原理及推导如文献[12],最终得到方程(2):

$$\ln\left[\frac{G(\alpha)}{T^2}\right]=\ln\frac{AR}{\beta E}-\frac{E}{RT}$$

(2)

式中, $G(\alpha)$ ——反应机理函数的积分形式; T ——

样品热力学温度, K; A ——频率因子, s^{-1} ; R ——摩尔气体常数, $8.314\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; β ——升温速率, K/min ; E ——燃烧反应活化能, kJ/mol 。

根据式(2)作 $\ln\left[\frac{G(\alpha)}{T^2}\right]-\frac{1}{T}$ 的函数图像,得到一条直线,再由直线的斜率求得反应动力学参数——活化能 $E^{[11]}$ 。

2.2.2 动力学参数求解

为了研究炭化条件对成型炭燃烧过程的影响,本实验通过不同的反应机理函数建立反应动力学模型,比较不同模型拟合的相关系数,确定最概然反应机理函数,从而求解燃烧反应动力学参数。一般而言,外扩散阻力、化学反应阻力和内扩散阻力控制是燃烧过程中的 3 大影响因素^[7]。而燃烧热重实验是在空气气氛下进行,流量 $60\text{ mL}/\text{min}$,具有良好的外部气相传质条件,故可忽略外扩散阻力对燃烧速率的影响^[13]。因此,燃烧过程主要由化学反应阻力或内扩散阻力控制。此外,不同固体颗粒还具有独特的几何特征,故通过文献[13]提出的一系列不同反应机理函数进行拟合,结果见表 4。其中, H、N 分别代表化学反应阻力和内扩散阻力控制反应; 1、2、3 分别代表片状、柱状和球状反应界面。

表 4 不同机理函数下生物质成型炭燃烧线性拟合的相关度

Table 4 Linear fitting correlation of carbonized biomass briquettes combustion under different mechanism functions								
样品	升温速率/℃·min ⁻¹	温度区间/℃	H1	H2	H3	N1	N2	N3
WS-B	5	259~430	0.992	0.995	0.993	0.996	0.995	0.991
WS-CB-400	5	361~465	0.992	0.995	0.997	0.995	0.996	0.995
WS-CB-500	5	394~472	0.998	0.995	0.999	0.992	0.998	0.997
WS-CB-600	5	417~483	0.997	0.992	0.999	0.998	0.997	0.996
WS-CB-400	5	361~465	0.992	0.995	0.997	0.995	0.996	0.995
CS-CB-400	5	344~435	0.992	0.994	0.996	0.995	0.995	0.991
WS-CS-CB-400	5	350~447	0.992	0.993	0.996	0.992	0.995	0.995
WS-CB-400	5	361~465	0.992	0.995	0.997	0.995	0.996	0.995
WS-CB-400	10	378~493	0.986	0.994	0.995	0.991	0.994	0.993
WS-CB-400	15	389~513	0.991	0.992	0.999	0.995	0.998	0.996
烧烤炭	5	397~483	0.992	0.994	0.999	0.995	0.996	0.993

如表 4 所示,WS-B 和 WS-CB 在 5 ℃/min 升温速率下的燃烧过程分别在 N1 和 H3 反应机理函数下拟合度最高。同时,考察其余对照组可发现,原料和升温速率的变化并未使成型炭的燃烧机理发生改变。由此表明,成型生物质的燃烧过程遵循内扩散阻力控制的片状界面反应机理,而炭化后,成型炭的燃烧过程遵循化学反应阻力控制的球状界面反应机理。这可能是由于成型生物质在炭化过程中传热传质阻力较大,导致其内部形成较高的温度梯度,内层颗粒热解析出的挥发分扩散至外层表面时,在高温作用下发生二次裂解反应。挥发分二次裂解后的产物燃烧反应活性较低,并吸附在孔隙表面,使得成型炭的本征燃烧反应速率下降,从而导致其燃烧过程受化学反应阻力控制。对于成型生物质切片后得到的样品,由于其粒径较小,燃烧过程中温度分布均匀,挥发分析出后在内部停留时间较短,因此减缓了挥发分的二次裂解反应,残余半焦内二次裂解产物的比例降低,本征燃烧反应速率提高,使其燃烧过程受内扩散阻力控制。另一方面,样品几何特征的改变(由“片状”变成“球状”)说明挥发分的析出速率对样品微观孔隙结构的改变也具有一定影响。

表 5 为在 3 个不同升温速率(5、10、15 ℃/min)下通过最概然机理函数求得样品的平均活化能。一般情况下,燃料燃烧反应活化能越低,燃烧反应速率越高,反应活性越好。如表 5 所示,成型生物质及其成型炭在不同升温速率下求得反应活化

能波动微小,表明其燃烧反应活化能不因升温速率的变化而改变。成型生物质残余半焦的燃烧反应活化能在 13.76~18.42 kJ/mol 之间。炭化后,成型炭的燃烧反应活化能增加,且随炭化温度的升高呈现出不断增加的趋势,其值在 18.71~41.99 kJ/mol 之间。以上表明,炭化温度的升高会降低成型炭的燃烧反应活性,这与

表 5 不同升温速率下最概然机理函数计算的活化能
Table 5 Activation energy calculated by maximum probability mechanism function under different heating rate

样品	燃烧反应活化能 $E/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$		
	5 ℃/min	10 ℃/min	15 ℃/min
WS-B	16.40	18.40	18.42
WS-CB-400	20.84	23.02	23.07
WS-CB-500	29.55	29.47	31.52
WS-CB-600	39.19	41.74	41.99
CS-B	14.17	15.29	13.76
CS-CB-400	18.71	18.98	19.74
CS-CB-500	20.12	22.90	21.51
CS-CB-600	28.82	27.44	27.37
WS-CS-B	15.68	16.93	17.24
WS-CS-CB-400	20.04	21.27	21.99
WS-CS-CB-500	24.82	25.04	23.50
WS-CS-CB-600	32.56	30.30	32.59
烧烤炭	78.71	76.95	79.37

2.1 节所得结果一致。同一炭化条件下, WS-CS-CB 的反应活化能高于 CS-CB 而低于 WS-CB 单独燃烧时的反应活化能, 验证了在 WS 中掺混 CS 会产生协同催化效应, 使 WS-CS-CB 的反应活化能降低, 燃烧反应活性提高。先成型再炭化制得成型炭的反应活化能均低于商用机制烧烤炭, 符合商用烧烤炭的要求。

3 结 论

1) 随着炭化温度的升高(400~600 ℃), 成型炭的热值增加, 但燃烧性能降低, 灰分产率提高。相同炭化条件下, 木屑成型炭的热值高于棉秆成型炭, 但燃烧性能较差。在木屑中掺混棉秆可显著改善成型炭的燃烧性能。

2) 成型生物质的燃烧过程遵循内扩散阻力控制的片状燃烧反应机理, 反应活化能在 13.76~18.42 kJ/mol 之间。炭化后, 成型炭的燃烧过程遵循化学反应阻力控制的球状燃烧反应机理。随着炭化温度的升高, 成型炭的反应活化能增加, 其值在 18.71~41.99 kJ/mol 之间。

3) 通过先成型再炭化制得的成型炭基本符合欧标中对烧烤炭灰分产率和固定碳产率的要求, 其中, 灰分产率显著低于欧标; 对比于商用机制烧烤炭, 本研究制得成型炭的燃烧性能较优, 反应活化能较低。

【参考文献】

- [1] 胡志宏, 郭新根, 郝卫东, 等. 燃用黄秆生物质锅炉性能试验研究[J]. 热力发电, 2010, 39(12): 56—60.
- [1] Hu Zhihong, Guo Xingen, Hao Weidong, et al. Study on performance test of yellow straw biomass firing boiler [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(12): 56—60.
- [2] Elyounssi Khalid, Collard Francois-Xavier, Mateke Jean-aimé Ngollo, et al. Improvement of charcoal yield by two-step pyrolysis on eucalyptus wood: A thermogravimetric study[J]. Fuel, 2012, 96(1): 161—167.
- [3] Chen Yingquan, Yang Haiping, Wang Xianhua, et al. Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: Influence of temperature[J]. Bioresource Technology, 2012, 107: 411—418.
- [4] De Jongh Willem A, Carrier Marion, Knoetze J H. (Hansie). Vacuum pyrolysis of intruder plant biomasses [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2011, 92(1): 184—193.
- [5] 彭好义, 姚 昆, 曹小玲, 等. 两种不同生物质成型燃料燃烧特性实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 1002—1008.
- [5] Peng Haoyi, Yao Kun, Cao Xiaoling, et al. Experimental research of combustion characteristics of two kinds of biomass pellets [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(4): 1002—1008.
- [6] Zhang Shouyu, Hong Ruoyu, Cao Jingpei, et al. Influence of manure types and pyrolysis conditions on the oxidation behavior of manure char [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(18): 4278—4283.
- [7] 熊绍武, 张守玉, 吴巧美, 等. 生物质制备燃料炭实验研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1041—1047.
- [7] Xiong Shaowu, Zhang Shouyu, Wu Qiaomei, et al. Study on biomass carbonization for fuel charcoal preparation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1041—1047.
- [8] 侯宝鑫, 张守玉, 茆 青, 等. 生物质炭化成型燃料直燃特性分析[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(2): 173—178.
- [8] Hou Baoxin, Zhang Shouyu, Mao Qing, et al. Direct combustion characteristics of biomass carbonized forming fuel [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(2): 173—178.
- [9] Ghiasi Bahman, Kumar Linoj, Furubayashi Takaaki, et al. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification? [J]. Applied Energy, 2014, 134: 133—142.
- [10] Neves Daniel, Thunman Henrik, Matos Arlindo, et al. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2011, 37(5): 611—630.
- [11] Zhang Shouyu, Lu Junfu, Zhang Jiansheng, et al. Effect of pyrolysis intensity on the reactivity of coal char [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(5): 3213—3221.
- [12] Ding Yanming, Ezekoye Ofodike A, Lu Shouxiang, et al. Comparative pyrolysis behaviors and reaction mechanisms of hardwood and softwood [J]. Energy Conversion & Management, 2017, 132: 102—109.
- [13] 熊绍武, 张守玉, 吴巧美, 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.

- [13] Xiong Shaowu, Zhang Shouyu, Wu Qiaomei, et al.
Investigation on combustion characteristics and kinetics

of bio-char[J]. Journal of Fuel Chemistry and
Technology, 2013, 41(8): 958—965.

STUDY ON COMBUSTION CHARACTERISTICS OF CARBONIZED BIOMASS BRIQUETTES

Wang Caiwei, Zhang Shouyu, Yao Yunlong, Wu Shunyan, Jiang Fenghao, Zhang Yifan

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Carbonization experiments of cotton stalk briquette (CS-B), wood sawdust briquette (WS-B) and mixed biomass briquette (WS-CS-B) were carried out in a fixed bed reactor to prepare the carbonized biomass briquettes. The quality, ignition temperature, burnout temperature and combustion character index (S) of the carbonized briquettes were studied by fast calorimeter analyzer, thermogravimetric analyzer, etc. Meanwhile, the model of kinetics established by using Coats-Redfern integral method was used to investigate the kinetics of the carbonized briquettes oxidation reaction. The results showed that the heating value and the ash yield of the resulted carbonized briquettes increases and the combustion characteristic becomes worse, with increasing carbonization temperature (400-600 °C). At the same carbonization temperature, the carbonized cotton stalk briquette (CS-CB) with higher ash yield and lower heating value shows better combustion characteristics than the carbonized wood sawdust briquette (WS-CB). The CS addition is beneficial to the combustion properties of the carbonized mixed biomass briquette (WS-CS-CB). In terms of combustion kinetics, the combustion mechanism of biomass briquettes is the internal diffusion resistance on the layer surface, but that of the carbonized biomass briquettes is the chemical reaction on the spherical surface. The ash yield (4.9%-9.1%, wt) and fixed carbon yield (67.8%-83.8%, wt) of the carbonized briquettes prepared by briquetting firstly and then carbonization meet the requirements in European Standard. Compared with the commercial barbecue charcoal, the resulted carbonized briquettes have better combustion characteristics.

Keywords: biomass; carbonized briquette; combustion characteristics; kinetics