

城市污泥与秸秆共水热炭化产物的 燃烧特性与动力学研究

胡剑坤^{1,2}, 邢献军^{1,2*}, 常珠侠³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学先进能源技术与装备研究院, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省蓝天能源环保科技有限公司, 安徽 合肥 231606)

摘要:采用热重分析法研究了城市污泥(SS)与小麦秸秆(WS)在 220℃ 下共水热炭化(Co-HTC)产物水热炭(Hydrochar)的燃烧特性与反应动力学。对比分析水热炭从室温升至 1 000℃ 的燃烧特性,采用 KAS 法计算燃烧过程中样品的活化能。结果表明,水热炭化后,污泥和秸秆的着火温度升高,失重率下降。随着混合物中 WS 质量分数从 30% 增加到 70%,共炭化产物的综合燃烧特性指数从 3.47 增加到 11.35,燃烧性能显著增强,且 T_i 和 T_f 之间的温度区间变窄。城市污泥与秸秆混合水热制备的生物质炭燃烧过程中存在协同作用,在 320℃ 时协同作用最强。WS 质量分数为 50% 时,水热炭燃烧的平均活化能达到最小值,为 22.55 kJ/mol。

关键词:城市污泥;秸秆;共水热炭化;燃烧;动力学;活化能

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)07-0135-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.07.027

Combustion characteristics and kinetics of hydrochars derived from co-hydrothermal carbonization of municipal sludge and straw

HU Jian-kun^{1,2}, XING Xian-jun^{1,2*}, CHANG Zhu-xia³

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2.Advanced Energy Technology and Equipment Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009,
China; 3.Anhui Blue Sky Energy and Environmental Science and Technology Co., Ltd., Hefei 231606, China)

Abstract: The combustion characteristics and reaction kinetics of hydrochars, which are produced by co-hydrothermal carbonization of municipal sludge (MS) and wheat straw (WS) at 220℃, are studied by thermogravimetric analysis. The combustion characteristics of hydrochars from room temperature to 1 000℃ are analyzed, and the activation energy of the sample during combustion is calculated by means of KAS method. It is shown that the ignition temperature of both sludge and straw increases, and the weight loss rate decreases after hydrothermal carbonization. Comprehensive combustion characteristic index of co-carbonized products, hydrochars, increases from 3.47 to 11.35 when the mass fraction of WS in the mixtures increases from 30% to 70%, showing a significantly enhanced combustion performance. The temperature range between T_i and T_f becomes narrower. There exists synergistic effect in the combustion process of biomass char prepared by mixing municipal sludge and straw, and the synergistic effect reaches the strongest at 320℃. The average activation energy for combustion of hydrochars reaches the minimum value, 22.55 kJ·mol⁻¹ when the mass fraction of WS is 50%.

Key words: municipal sludge; straw; co-hydrothermal carbonization; combustion; kinetics; activation energy

近年来随着我国城镇化发展的加快以及污水综合排放标准的逐年严格,城市污水处理厂产生大量废弃污泥^[1]。通过焚烧法处理污泥可回收其热值,然而由于污泥的高含水率,在燃烧之前需要做干燥等预处理,以提高燃料品质和能量密度^[2]。

水热炭化(HTC)将高含水废弃物有效转化为清洁的固体燃料得到了广泛的研究与应用。Zhao等^[3]用 HTC 工艺处理污泥并生产固体燃料,能量回

收率达到 50%。Kim 等^[4]指出 HTC 工艺可显著改善厌氧消化污泥的脱水能力。HTC 可显著降低污水污泥中重金属含量和降解抗生素的生物利用度,得到氮、硫质量分数低、热值高、燃料性能较好的水焦^[5-6]。与 SS 相比,木屑等木质纤维素生物质水分质量分数低、碳质量分数高。因此,SS 和木质纤维素生物质的 Co-HTC 被认为是一种途径,可降低灰分质量分数并提高碳回收率^[7]。Zhang 等^[8]对污泥

收稿日期:2021-07-19;修回日期:2022-05-03

基金项目:合肥市借转补对外合作项目(J2018D02)

作者简介:胡剑坤(1996),男,硕士研究生,研究方向为固体废弃物的处理与处置,492340282@qq.com;邢献军(1964),男,博士,教授,主要从事高效清洁燃烧及能源转化利用的研究,通讯联系人,xxianjun@hfut.edu.cn。

和木屑共水热炭化处理发现污泥与松木木屑质量掺混比为 1:1 时,在有机物保留率和烃类产率方面的协同系数最高。

笔者以城市污泥与小麦秸秆的混合物为原料进行水热炭化,探讨了制备的水热炭及 2 种原样燃烧的规律,研究了燃烧过程中的交互作用和动力学特性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

城市污泥 (sewage sludge, SS) 和小麦秸秆 (wheat straw, WS) 分别选自合肥望城污水处理厂和阜阳市某农业合作社。在水热炭化预处理之前,污泥和秸秆分别置于 105℃ 的恒温干燥箱内干燥 12 h。干燥后样品数次破碎成粉末状,并过 80 目 (180 μm) 筛。

1.2 实验方法

称取 5 g 不同质量比的样品置于反应釜内,向其中加入纯水,用玻璃棒搅拌均匀。实验时向反应釜内充入足量的氮气,确保釜内为惰性环境,并密封反应釜,加热至设定温度并保持 4 h。根据先前的研究^[4,8],实验的炭化温度选为 220℃。保温阶段结束后取出反应釜对其进行降温处理,用纯水和乙醇清洗釜内的固液混合物,过滤得到的产物置于干燥箱干燥,于密封袋中保存。不同质量比下制备的样品分别标记为 H-WS、H-W7S3、H-W5S5、H-W3S7、H-SS,其中 H-W3S7 表示 WS 和 SS 以 3:7 的质量比例混合,而 H-WS 表示单独的 WS 制备的水热炭。

1.3 实验设备与测试方案

燃烧测试仪器为同步热重分析仪,采用模拟空气气氛(N₂与 O₂ 的输入体积比为 4:1)作为实验的载气,每次称取 (12±0.1) mg 的实验样品。升温速率分别选择 10、20、40℃/min,从室温升至 1 000℃。实验前进行空白实验以减小误差。

1.4 燃烧特性参数

采用综合燃烧特性指数 S 和火焰燃烧稳定性指数 F_{ith} 对其燃烧性能进行评价。 S 值越大则燃料的燃烧特性越好,而 F_{ith} 则是燃烧稳定性指标^[9],两项指标的计算式分别为:

$$S = [(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{max}}(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{mean}}]/(T_i^2 T_f) \quad (1)$$

$$F_{\text{ith}} = [(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{max}}]/[T_i(T_f - T_i)] \quad (2)$$

式中: $(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{max}}$ 为最大失重速率, %/min, 其为 DTG 曲线的最大峰值; $(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{mean}}$ 为平均失重速率, %/min。

2 结果与讨论

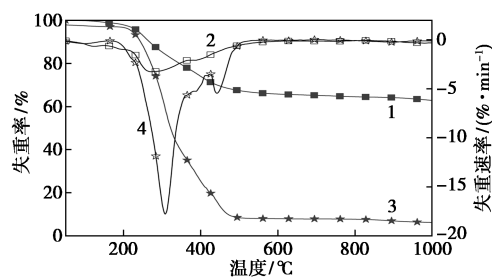
2.1 原样的燃烧特性分析

WS、SS 及水热炭的元素分析和工业分析见表 1。由于水热过程中的脱水和脱酸反应,水热炭化之后,污泥水热炭和秸秆水热炭的 C 元素质量分数增大,而 H 元素和 O 元素的质量分数有所下降。污泥的 N 元素质量分数由 3.14% 降到 1.84%,这是由于含 N 表面官能团在 HTC 过程中的丢失。

表 1 WS、SS 及水热炭的元素分析和工业分析

样品	工业分析/%				元素分析/%				热值/ (MJ· kg ⁻¹)
	V	FC	A	C	H	O	N	S	
SS	30.13	2.80	63.79	14.96	2.33	21.48	3.14	2.25	9.21
WS	76.63	4.83	11.38	42.70	5.48	37.49	2.83	0.41	14.35
H-SS	18.54	3.29	75.23	16.82	1.63	14.59	1.84	1.21	12.36
H-WS	70.42	13.87	10.69	48.25	4.92	32.15	2.15	0.24	14.49
H-W5S5	39.45	10.56	46.34	26.93	3.12	25.41	1.15	0.74	15.14

原材料在升温速率为 20℃/min 时的燃烧失重曲线如图 1 所示,其燃烧特性参数如表 2 所示。



1—SS-TG; 2—SS-DTG; 3—WS-TG; 4—WS-DTG

图 1 SS 和 WS 在为 20℃/min 时的热重曲线

表 2 原材料和水热炭在升温速率为 20℃/min 时的燃烧特性参数

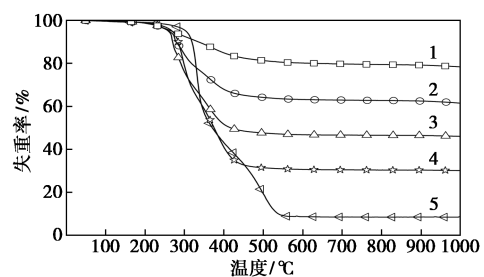
样品	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{max}}/(\text{d}\alpha/\text{d}t)_{\text{mean}}/$ $(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S/$ $[10^{-7}$ $(\text{min}^2 \cdot$ $^\circ\text{C}^3)]$	$F_{\text{ith}}/$ $[10^{-8}$ $(\text{min} \cdot$ $^\circ\text{C}^2)]$	
SS	229.6	688.4	3.25	0.86	0.77	8.16
WS	262.5	575.4	17.76	3.23	14.47	216.20
WS	262.5	575.4	17.76	3.23	14.47	216.20
H-SS	236.5	694.6	1.85	0.77	0.37	17.10
H-WS	310.2	596.3	36.23	5.24	38.74	586.60
H-W7S3	297.6	558.3	18.01	4.07	11.35	232.10
H-W5S5	262.3	584.6	13.36	3.05	10.13	158.00
H-W3S7	253.4	625.5	7.65	1.82	3.47	81.10

从图1中可以看出,SS燃烧失重过程分为3个阶段:弱结合水分子和轻质挥发性化合物的释放,失重2.69%;挥发分组分和固定碳的燃烧与分解,失重率为27.3%;第3阶段(570~730℃)失重率为6.3%,为污泥中的碳酸盐及碱金属化合物的高温分解反应^[10]。针对WS,燃烧过程中观察到2个尖锐的失重峰,分别对应于脱挥发和半焦燃烧^[11]。其中主要的失重过程位于第2阶段(190~420℃),DTG曲线急剧下滑,失重量占初始质量的59.15%。

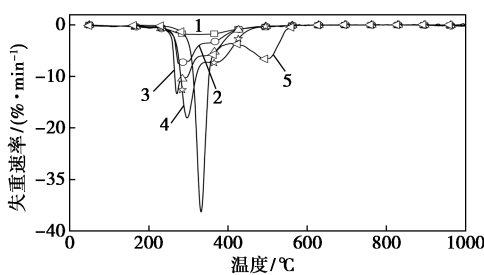
由表2中可以看出,与WS相比,SS有较低的 T_i (229.6℃)和较高的 T_f (688.4℃), T_i 值的比较表明SS的活化能比WS低。SS的高反应活性(O/C=1.43)归因于其含有大量的含氧基团^[12]。此外,SS中灰分质量分数较高,灰分中无法分解的无机矿物质、金属氧化物等物质较多,使SS的 T_f 较高、失重率较低^[13]。

2.2 掺混比对燃烧特性的影响

20℃/min升温速率下,城市污泥和小麦秸秆在不同掺混比下共水热炭化产物燃烧的TG和DTG曲线如图2所示。由图2中可以看出,HTC对原样品的热重反应有显著影响。与原料相比,在H-WS(185~595℃)和H-SS(205~440℃)温度范围内,第2阶段H-WS和H-SS的失重分别降低了5.62%和11.53%。第3阶段的趋势与原料阶段相反,这是由于HTC过程中发生的脱水、去羟基化等反应降低了挥发分质量分数而增加固定碳和灰分质量分数。



(a) 不同水热炭的失重率



(b) 不同水热炭的失重速率

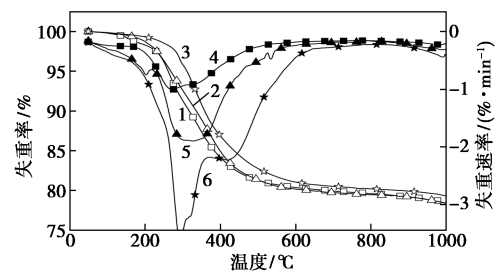
1—H-SS; 2—H-W3S7; 3—H-W5S5; 4—H-W7S73; 5—H-WS

图2 不同掺混比的水热炭的热重曲线

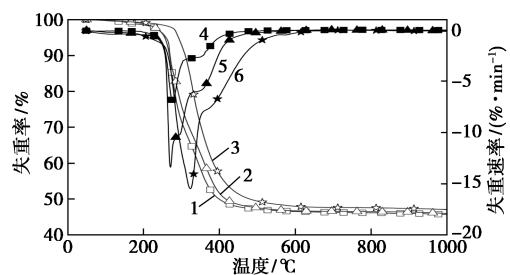
从表2中还可以看出,HTC明显改变了SS和WS的燃烧特性参数。可以看到HTC后,WS的着火温度 T_i 由262.5℃升至310.2℃,这主要归因于制成的水热炭的挥发分质量分数减少。Lin等^[10]在用水热法制备清洁固体燃料的研究中也报道了类似的发现。根据之前的研究^[14],高的 T_i 值可以避免潜在的火灾危险,炭在安全装卸、储存、运输等方面均优于污泥。经水热炭化后的SS和WS,其S值和 F_{th} 与原样品相比均有所增大,具有较好的燃料品质。此外,随着WS质量分数的增加,水热炭的 T_i 值进一步显著提高,而 T_f 值则逐渐下降。 T_i 和 T_f 之间的温度区间变窄,说明WS添加剂加速了SS的燃烧。与H-SS相比,随着WS质量分数从30%增加到70%,共炭化产物的S值从3.47增加到11.35,表明水热炭的燃烧特性增强。结果表明,WS添加剂能同时提高SS的燃烧性能、燃尽性能和燃烧稳定性。

2.3 升温速率对燃烧特性的影响

在不同升温速率下H-SS和H-W5S5燃烧热重曲线如图3所示,对应的燃烧特性参数如表3所示。由图3中可以看出,随升温速率增大,H-SS和H-W5S5燃烧消耗量下降,主要是由于样品在较高的升温速率下不完全燃烧,过多的灰分抑制焦炭的分解^[15]。随着升温速率的增大,DTG峰值变大,且与DTG峰值相对应的温度也逐渐增加,主要是当升温



(a) H-SS



(b) H-W5S5

1—TG(10℃/min); 2—TG(20℃/min); 3—TG(40℃/min);
4—DTG(10℃/min); 5—DTG(20℃/min); 6—DTG(40℃/min)

图3 不同升温速率时水热焦的燃烧热重曲线

表 3 不同升温速率时 H-SS 和 H-W5S5 的燃烧特性参数

样品	$\beta/$ ($^{\circ}\text{C}\cdot$ min^{-1})	$T_i/$ $^{\circ}\text{C}$	$T_f/$ $^{\circ}\text{C}$	$(d\alpha/dt)_{\max}/$ ($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	$(d\alpha/dt)_{\text{mean}}/$ ($\%\cdot\text{min}^{-1}$)	$S/$ ($\text{min}^2\cdot(\text{min}\cdot$ $^{\circ}\text{C}^3)$)	$F_{\text{th}}/$ (10^{-8} $^{\circ}\text{C}^2$)
H-SS	10	230.5	682.5	0.95	0.38	0.11	9.1
	20	236.5	694.6	1.85	0.77	0.37	17.1
	40	242.5	706.5	3.66	1.52	1.34	32.5
H-W5S5	10	259.5	574.2	6.87	1.51	2.68	84.1
	20	262.3	584.6	13.36	3.05	10.13	158.0
	40	275.4	594.3	15.49	5.87	20.17	176.4

速率增大或过大时,受传热极限的影响^[16],样品内外部产生温差,热量的传递需要一定的时间,使得燃烧分解发生延迟,但升温速率的增加对热重曲线分布规律的影响不大。

由表 3 可知,随着升温速率的增加,燃烧的特征温度(T_i 和 T_f)均持续提高,降解速率显著增加,H-W5S5 的最大失重速率由 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的 6.87 增加到 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时的 15.49。随着升温速率从 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 增加到 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,H-SS 的综合燃烧特性指数提高了 12 倍,H-W5S5 升高了 8 倍,燃烧稳定性指数也具备这样的规律。

2.4 水热炭燃烧过程中的协同效应

为分析城市污泥与秸秆共水热炭化产物燃烧过程中存在的协同效应,计算各组分单独燃烧的物理混合物的理论值,得到共水热炭化产物的理论失重曲线,引入总失重量 W_{total} 的公式为:

$$W_{\text{total}} = \lambda_{\text{SS}} W_{\text{SS}} + \lambda_{\text{WS}} W_{\text{WS}} \quad (3)$$

式中: λ_{SS} 和 λ_{WS} 分别为共混合物中 SS 和 WS 的质量比; W_{SS} 和 W_{WS} 分别为 SS 和 WS 单独燃烧的失重量^[17]。

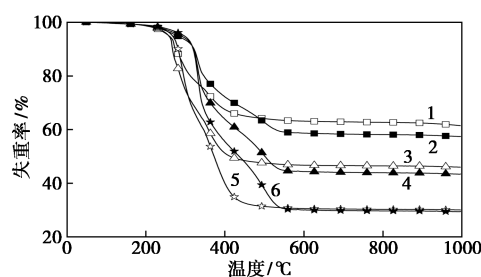
为比较燃烧过程中理论计算失重量与实际失重量的差别,引入参数 ΔW :

$$\Delta W = W_{\text{exp}} - W_{\text{cal}} \quad (4)$$

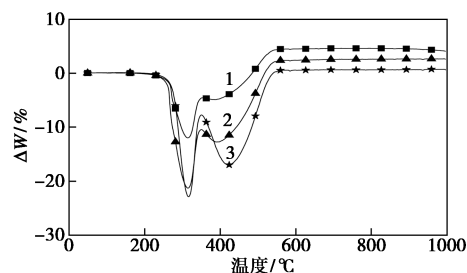
式中: W_{exp} 和 W_{cal} 分别为实际与理论计算失重率。

升温速率 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下样品的实际与理论计算失重量、实验与理论计算失重率差曲线如图 4 所示。由图 4(a) 中可以看出,温度低于 485 $^{\circ}\text{C}$ 时失重率的实验值低于计算值,而在固定碳燃烧阶段失重的实际值高于理论值。

由图 4(b) 中可以看出,3 种不同掺混比例的水



1—H-W3S7 计算值;2—H-W3S7 实验值;3—H-W5S5 计算值;4—H-W5S5 实验值;5—H-W7S3 计算值;6—H-W7S3 实验值
(a) 不用样品的理论和实验失重率



1—H-W3S7 差值;2—H-W5S5 差值;3—H-W7S3 差值
(b) 不同样品的 ΔW

图 4 样品理论与实验热重曲线

热炭理论与实验失重率差的变化趋势基本一样。从 240 $^{\circ}\text{C}$ 开始, ΔW 开始下降, 240 ~ 485 $^{\circ}\text{C}$ 下, $\Delta W < 0$, W5S5 的下降速度最大, 且在 320 $^{\circ}\text{C}$ 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 附近有较明显的波峰, 表明在该温度范围内共水热炭化的混合物之间的协同作用促进了炭化产物的燃烧, 这是因为污泥中的蛋白质与秸秆中的碱金属存在相互作用, 且碱金属化合物可催化污泥的燃烧。当温度大于 540 $^{\circ}\text{C}$ 时, 3 种样品的 ΔW 均大于 0, 且随着反应的进行, ΔW 基本保持不变, 该温度范围内 SS 处于碳酸盐及其他无机化合物的热分解阶段, 较难燃烧, 需要的能量较高, 水热炭因热量不足其燃烧受到抑制^[18]。

2.5 动力学分析

燃烧动力学分析主要是为了解释实验所得的热反应动力学规律, 同时预测反应的难易程度。水热炭化产物的燃烧过程属于多孔气固反应, 其燃烧过程符合以下方程^[9,19]:

$$d\alpha/dT = (A/\beta)f(\alpha)\exp(-E/RT) \quad (5)$$

$$\alpha = (m_0 - m_1)/(m_0 - m_{\infty}) \quad (6)$$

通常情况下, 反应机理函数 $f(\alpha)$ 的积分形式为:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} [d\alpha/f(\alpha)] \quad (7)$$

KAS 方法基于以下等式:

$$\ln(\beta/T^2) = \ln\{AR/[Eg(\alpha)]\} - E/RT \quad (8)$$

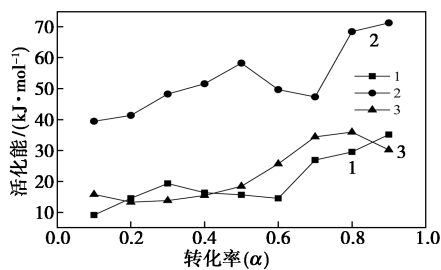
转化率 α 取值为0.1~0.9,由式(8)中的 $\ln(\beta/T^2)$ 为纵坐标, $1/T$ 为横坐标,并做回归直线,可以计算

得到频率因子 A 和活化能 E ,结果如表4所示,活化能随转化率的变化见图5。

表4 原样品和水热炭燃烧过程中的活化能 E 和相关因子 R^2

$\alpha^{①}$	SS		WS		H-SS		H-WS		H-W7S3		H-W5S5		H-W3S7	
	$E^{②}$	R^2	E	R^2	E	R^2	E	R^2	E	R^2	E	R^2	E	R^2
0.1	6.99	0.96	58.52	0.96	9.12	0.96	39.45	0.98	16.65	0.98	15.80	0.98	10.36	0.96
0.2	11.82	0.95	63.57	0.98	14.53	0.98	41.35	0.96	17.47	0.99	13.29	0.95	14.14	0.98
0.3	14.98	0.99	58.32	0.97	19.31	0.96	48.24	0.97	19.79	0.99	13.81	0.99	13.20	0.97
0.4	22.56	0.97	56.62	0.99	16.34	0.99	51.59	0.96	20.52	0.99	15.44	0.99	16.77	0.99
0.5	34.30	0.96	55.42	0.99	15.65	0.99	58.26	0.98	21.16	0.99	18.41	0.97	21.82	0.95
0.6	41.25	0.95	61.84	0.96	14.51	0.97	49.68	0.98	29.51	0.99	25.68	0.96	34.28	0.98
0.7	40.39	0.98	65.82	0.98	26.89	0.95	47.31	0.99	31.72	0.96	34.41	0.97	44.09	0.99
0.8	44.99	0.99	72.51	0.99	29.54	0.99	68.45	0.99	35.33	0.95	35.94	0.98	45.31	0.98
0.9	45.12	0.96	77.47	0.97	35.13	0.98	71.28	0.97	32.44	0.97	30.19	0.97	38.05	0.96
平均值	29.16	0.97	63.34	0.98	20.11	0.97	52.85	0.98	24.95	0.98	22.55	0.97	26.45	0.97

注:① α 为转化率;② E 为活化能。



1—H-SS;2—H-WS;3—H-W5S5

图5 活化能随转化率的变化

由表4可知,随着混合物中秸秆质量分数的增大,水热炭燃烧所需的活化能逐渐降低。当污泥与秸秆以1:1的质量比例混合时,水热炭燃烧反应所需活化能出现最小值,为22.55 kJ/mol。表明在混合物制成的水热炭燃烧过程中存在一定的协同作用或催化作用,这与YAO等^[13]的研究报道相符。结合综合燃烧特性指数 S ,在保证有较好的燃烧性能下,WS的质量分数为50%是SS与WS混合制备固体燃料的合适比例。

由图5可知,SS活化能随着转化率的升高而增大,污泥中无机化合物等残留物的分解和燃烧需较高的活化能^[21]。经水热炭化之后,SS的平均活化能由29.16 kJ/mol降低到20.11 kJ/mol,低活化能的结果与炭的独特性质密切相关^[20]。

3 结论

(1)城市污泥和生物质秸秆在水热炭化条件下

可转化为含有较低挥发分和较高固定碳的固体燃料炭。HTC反应后,污泥和秸秆的着火温度升高、失重率下降。

(2)随着WS质量分数的增加,水热炭的 T_i 值显著提高,而 T_f 值则逐渐下降。 T_i 和 T_f 之间的温度区间变窄,说明WS添加剂加速了SS的燃烧。

(3)当升温速率从10℃/min增大到40℃/min,燃烧最大失重速率和平均失重速率变大。

(4)城市污泥与秸秆在混合水热制备的生物质炭燃烧过程中存在协同作用,且在320℃时协同作用最强。由KAS法计算的污泥与污泥水热炭的活化能分别为29.16 kJ/mol和20.11 kJ/mol,当污泥与秸秆以1:1的质量比例混合时,共水热炭化产物的活化能达到最小值,为22.55 kJ/mol。

参考文献

- [1] 陈伟,郑晓园,纪莎莎,等.污水污泥水热炭化处理研究进展[J].热能动力工程,2020,35(2):18-25.
- [2] 宋艳培,庄修政,詹昊,等.城市污泥/褐煤共水热炭化产物的热化学转化特性及规律研究[J].化工学报,2020,71(5):2320-2332.
- [3] Zhao Peitao, Shen Yafei, Ge Shifu, et al. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 815-821.
- [4] Kim D, Lee K, Park K Y. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery[J]. Fuel, 2014, 130: 120-125.
- [5] Liu Tingting, Liu Zhengang, Zheng Qingfu, et al. Effect of hydrothermal carbonization on migration and environmental risk of heavy

- metals in sewage sludge during pyrolysis[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 282–290.
- [6] He Chao, Giannis A, Wang Jing-yuan. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization; Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior[J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 257–266.
- [7] Peng Chuan, Zhai Yunbo, Zhu Yun, *et al.* Investigation of the structure and reaction pathway of char obtained from sewage sludge with biomass wastes, using hydrothermal treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 114–123.
- [8] Zhang Xiaojuan, Zhang Lei, Li A. Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and pinewood sawdust for nutrient-rich hydrochar production; Synergistic effects and products characterization [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 52–62.
- [9] Guo Feihong, Zhong Zhaoping. Optimization of the co-combustion of coal and composite biomass pellets [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 399–407.
- [10] Lin Yousheng, Ma Xiaoqian, Peng Xiaowei, *et al.* Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes [J]. *Fuel*, 2016, 181: 905–915.
- [11] Wang Teng, Hou Hao-bo, Ye Yang, *et al.* Combustion behavior of refuse-derived fuel produced from sewage sludge and rice husk/wood sawdust using thermogravimetric and mass spectrometric analyses [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 1–11.
- [12] Wang Teng, Chen Yuchi, Li Jingping, *et al.* Co-pyrolysis behavior of sewage sludge and rice husk by TG-MS and residue analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 15(7): 124–134.
- [13] Yao Zhongliang, Ma Xiaoqian, Wu Zhengdong, *et al.* TGA-FTIR analysis of co-pyrolysis characteristics of hydrochar and paper sludge [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016, 123: 40–48.
- [14] Liu Zhen-gang, Quek A, Hoekman S K, *et al.* Thermogravimetric investigation of hydrochar-lignite co-combustion [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 646–652.
- [15] 范方宇, 邢献军, 施苏薇, 等. 水热生物炭燃烧特性与动力学分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 219–224.
- [16] Chen Jiacong, Liu Jingyong, He Yao, *et al.* Investigation of co-combustion characteristics of sewage sludge and coffee grounds mixtures using thermogravimetric analysis coupled to artificial neural networks modeling [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 225: 234–245.
- [17] Hu Shanchao, Ma Xiaoqian, Lin Yousheng, *et al.* Thermogravimetric analysis of the co-combustion of paper mill sludge and municipal solid waste [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 99: 112–118.
- [18] Wang Teng, Fu Tianming, Chen Kai, *et al.* Co-combustion behavior of dyeing sludge and rice husk by using TG-MS: Thermal conversion, gas evolution, and kinetic analyses [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 311: 123527.
- [19] 高鑫, 李玲, 杨东伟, 等. 石灰调质污泥的燃烧特性及动力学分析 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(6): 3019–3023.
- [20] Peng Chuan, Zhai Yunbo, Zhu Yun, *et al.* Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization; Char properties, combustion behavior and thermal characteristics [J]. *Fuel*, 2016, 176: 110–118. ■

(上接第 134 页)

- [11] Mo S, Zhang Q, Ren Q. Leaf-like Co-ZIF-L derivatives embedded on Co₂AlO₄/Ni foam from hydrotalcites as monolithic catalysts for toluene abatement [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 571–580.
- [12] Siahvashi, Arman, Chesterfield, *et al.* Propane CO₂(dry) reforming over bimetallic Mo-Ni/Al₂O₃ catalyst [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 93: 313–325.
- [13] Gonzalezcortes S, Xiao T C, Rodulfobaechler S. Impact of the urea-matrix combustion method on the HDS performance of Ni-MoS/γ-AlO catalysts [J]. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, 2005, 240(1): 214–225.
- [14] Liu L, Liu B, Chai Y. Synergetic effect between sulfurized Mo/γ-AlO and Ni/γ-AlO catalysts in hydrodenitrogenation of quinoline [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2011, 20(2): 214–217.
- [15] Li J, Gao L, Zheng S. SEM, XPS, and FT-IR studies of MoO₃ dispersion on mesoporous silicate MCM-41 by calcination [J]. *Materials Letters*, 2003, 57: 4605–4610.
- [16] Senthilkumar B, Meyrick D, Lee Y S, *et al.* Synthesis and improved electrochemical performances of nano β-NiMoO₄-CoMoO₄ · xH₂O composites for asymmetric supercapacitors [J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2013, 3(37): 16542–16548.
- [17] 华益苗, 袁骏, 岳林海, 等. SiO₂ 包覆超细 CaCO₃ 的微晶分析和 XPS 研究 [J]. *无机化学学报*, 2001, 01: 134–138.
- [18] Frederick N, Daniel A A, Jeong I H. Facilely synthesized NiMoO₄/CoMoO₄ nanorods as electrode material for high performance supercapacitor [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 742: 342–350.
- [19] Mo S, Zhang Q, Ren O. Leaf-like Co-ZIF-L derivatives embedded on Co₂AlO₄/Ni foam from hydrotalcites as monolithic catalysts for toluene abatement [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 571–580.
- [20] Volochaev M N, Komogortsev S V, Myagkov V G. Structural and magnetic characteristics of nanogranular Co-Al₂O₃ single- and multilayer films formed by the solid-state synthesis [J]. *Physics of the Solid State*, 2018, 60(7): 1425–1431.
- [21] Wu F, Tian W, Cao F. Loading amorphous NiMoO_{4-x}S_x nanosheet cocatalyst to improve performance of p-silicon wafer photocathode [J]. *Journal of the American Chemical Society Applied Energy Materials*, 2018, 1(3): 1286–1293.
- [22] Ray S K, Dhakal D, Regmi C. Inactivation of staphylococcus aureus in visible light by morphology tuned α-NiMoO₄ [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, 2018, 350: 59–68.
- [23] Li P, Ruan C, Xu J. Enhanced capacitive performance of CoO-modified NiMoO₄ nanohybrid as advanced electrodes for asymmetric supercapacitor [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 791: 152–165. ■