

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.005

# 烘焙芝麻秸秆与煤混合燃烧特性及动力学研究

焦然<sup>1,2</sup>, 邢献军<sup>1,2,3</sup>, 陈涛<sup>2</sup>, 张学飞<sup>2,3</sup>, 常珠侠<sup>4</sup>

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 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. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009; 4. 安徽省蓝天能源环保科技有限公司, 安徽合肥 231606)

**摘要:**文章以烘焙芝麻秸秆(torrefied sesame straw, TSS)和煤为研究对象,通过热重分析法研究不同掺混比例和不同升温速率下样品的燃烧特性,利用 Flynn-Wall-Ozawa (FWO)法和 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)法计算样品的活化能大小。研究表明:烘焙预处理有利于燃烧反应的进行;烘焙芝麻秸秆的掺混有助于改善混合物样品的燃烧性能;升温速率的提高会产生热滞后现象,但对样品的总失重影响不大;烘焙芝麻秸秆与煤混合燃烧时会出现协同效应,且高温阶段更加显著;烘焙芝麻秸秆掺混比为70%的混合物样品活化能最小,FWO法和KAS法计算的活化能分别为60.51、51.43 kJ/mol。

**关键词:**烘焙;芝麻秸秆(SS);混合燃烧;协同效应;动力学

**中图分类号:**TK62

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2023)03-0313-07

## Study on combustion characteristics and kinetics of torrefied sesame straw and coal

JIAO Ran<sup>1,2</sup>, XING Xianjun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, ZHANG Xuefei<sup>2,3</sup>, CHANG Zhuxia<sup>4</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Advanced Energy Technology and Equipment Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Anhui Blue Sky Energy and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hefei 231606, China)

**Abstract:** The combustion characteristics of torrefied sesame straw (TSS) and coal were studied by thermogravimetric analysis under different mixing ratios and heating rates. The activation energies of the samples were calculated by Flynn-Wall-Ozawa (FWO) and Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) methods. The results show that torrefying pretreatment is beneficial to the combustion reaction. The mixing of TSS can improve the combustion performance of the mixture. The increase of heating rate can produce thermal hysteresis, but it has little effect on the total weight loss of the samples. The synergistic effect will appear in the mixed combustion of TSS and coal, and it is more significant in the high temperature stage. The activation energies of the mixture with 70% TSS are the lowest, which are 60.51 kJ/mol for the FWO method and 51.43 kJ/mol for the KAS method.

**Key words:** torrefaction; sesame straw (SS); mixed combustion; synergistic effect; kinetics

生物质作为一种重要的可再生能源,有良好的燃烧和发电前景,同时生物质还具有储量大、灰分低、碳中性等优点。因为煤的燃烧会产生大量的污染物,造成严重的环境污染,所以生物质与煤混合燃烧已成为一种很有前景的能源利用方式,

其可以有效地缓解传统化石燃料短缺带来的压力,同时可以达到减少污染物与温室气体排放的目的。但是,生物质与煤的燃料特性不同,即生物质的含水量高、热值低,这可能会影响混合燃料的燃烧特性。目前,生物质掺混比在工业应用中很

**收稿日期:**2021-06-08

**基金项目:**合肥市关键技术重大研发类资助项目(J2019G22);合肥市借转补对外合作资助项目(J2018D02)

**作者简介:**焦然(1992—),男,安徽巢湖人,合肥工业大学硕士生;

邢献军(1964—),男,安徽无为,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: xxianjun@hfut.edu.cn.

难超过 20%<sup>[1]</sup>,为了解决这些问题,有必要对生物质进行烘焙预处理以改善其燃料特性。

近年来,烘焙预处理技术以及生物质与煤混合燃烧受到了越来越多国内外科研人员的关注。文献[2]对松木屑和伐木残渣进行烘焙研究,结果表明烘焙后的生物质显示出更高的热值且改善了可磨性;文献[3]从能量平衡方面研究,结果表明烘焙后的生物质可获得更高的能量产率;文献[4]利用 TG-MS 联用方式研究了桉树皮和褐煤的混合燃烧特性,结果表明在褐煤中添加桉树皮可有效地减少 CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放;文献[5]研究了水热处理后的椰子纤维及椰子壳与煤混合燃烧,结果表明它们在燃烧过程中有明显的协同效应。而目前对于煤与烘焙生物质混合燃烧的研究,尤其是与烘焙芝麻秸秆(torrefied sesame straw, TSS)混合燃烧的研究很少。

本文利用热重分析仪研究煤与烘焙芝麻秸秆在不同升温速率以及不同掺混比下的混合燃烧特性,同时分析两者混合燃烧时的协同效应,并利用 Flynn-Wall-Ozawa(FWO)法和 Kissinger-Akahi-ra-Sunose(KAS)法计算烘焙芝麻秸秆与煤混燃过程中的动力学特性参数。

## 1 实 验

### 1.1 材料

生物质和煤分别取自江苏省连云港地区的芝麻秸秆和山西省长治市的某煤矿烟煤。在进行实验之前,预先将芝麻秸秆和煤置于 105 °C 烘箱中烘干 12 h,然后用粉碎机将干燥后的样品粉碎,之后过 80 目(180 μm)筛,筛取后的样品用密封袋收集,分别标记为芝麻秸秆(sesame straw, SS)

和煤粉(pulverized coal, PC)

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 烘焙芝麻秸秆的制备

将均匀平铺在石英舟内的 SS 放置于 GSL-1700X 型高温管式炉(合肥科晶材料技术有限公司)内的加热区域,然后以 80 mL/min 的流通速度向管式炉内通入 CO<sub>2</sub> 以保证烘焙过程中一直是惰性气体氛围。通过设定程序使管式炉以 10 °C/min 的升温速率加热到 260 °C,并在此温度下保温 1 h,之后设备开始按照设定程序降温,直到降温至室温后关闭气体阀门,从管式炉内取出 TSS,收集到密封袋中。

将 PC 和 TSS 分别按照质量比为 3 : 7、5 : 5、7 : 3 进行掺混,记作 3PC7TSS、5PC5TSS、7PC3TSS。样品混合均匀后用密封袋收集,并置于干燥器内保存备用。

#### 1.2.2 样品分析方法

各样品的工业分析和元素分析结果见表 1 所列,样品的元素分析和工业分析分别按照国家标准 GB/T 212—2008<sup>[6]</sup>和 GB/T 31391—2015<sup>[7]</sup>进行检测。

样品的燃烧实验采用 Setsys Evo TG-DSC/DTA 型热重及同步热分析仪(法国塞塔拉姆仪器公司),实验样品质量每次为(10±0.5) mg,实验气体氛围为模拟空气气氛(N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的体积比为 4 : 1),通入气体流量为 60 mL/min,每次实验将样品均匀地铺在坩埚底部,用来避免温度梯度的影响,采用非等温法分别以 10、20、40 °C/min 的升温速率从室温升温至 1 000 °C,每次更换升温速率时,需进行一次空烧用来作为空白实验,以确保实验结果的准确性。

表 1 样品的工业分析和元素分析结果

样品	工业分析				元素分析				
	w(水分)	w(灰分)	w(挥发分)	w(固定碳)	w(C)	w(H)	w(O)	w(N)	w(S)
SS	7.69	9.43	67.18	15.70	41.49	5.84	33.76	1.40	0.40
TSS	3.88	14.08	59.12	22.92	48.74	7.90	23.05	1.94	0.41
PC	1.73	30.43	23.02	44.82	56.01	3.58	6.67	1.19	0.39

## 2 结果与讨论

### 2.1 热重曲线分析

#### 2.1.1 煤、芝麻秸秆及烘焙芝麻秸秆的热重分析

20 °C/min 升温速率下 PC 的热失重(thermo gravimetric, TG)和微分热失重(derivative ther-

mo gravimetric, DTG)曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,PC 的燃烧过程主要分为 2 个失重阶段。第 1 个失重阶段是 PC 中水分的受热挥发,由表 1 可知,因为 PC 的水分质量分数较少,所以此次失重并不明显,质量损失占样品质量 1.2%。第 2 个失重阶段主要发生在 380~660 °C 之间,最

大失重速率出现在 505 °C,这一阶段是 PC 中挥发分的析出和固定碳的燃烧。由表 1 还可知,因为 PC 中挥发分的质量分数较少,固定碳质量分数较多,所以主要以固定碳的燃烧为主,挥发分的析出伴随着固定碳的燃烧<sup>[8]</sup>,DTG 曲线呈现的是 1 个明显峰,此阶段 TG 曲线迅速下降,失重明显,质量损失占样品质量 68.9%。

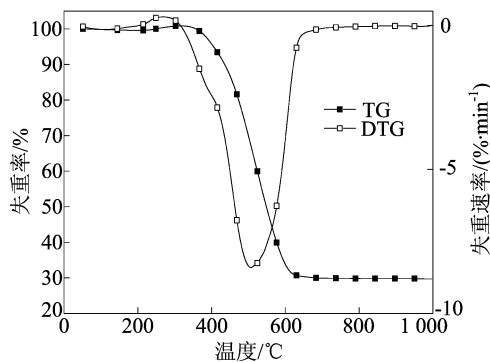


图1 PC的热重曲线

20 °C/min 升温速率下 SS 和 TSS 的 TG 和 DTG 曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,SS 的燃烧过程可以分为 3 个阶段:第 1 阶段(50~195 °C)主要是水分的挥发,TG 曲线稍微下降,质量损失较小,失重量占样品质量的 3.51%;第 2 阶段(195~387 °C)归因于挥发分的析出与燃烧,主要是在脱挥发分阶段半纤维素和纤维素发生了热降解<sup>[9]</sup>,这一阶段 TG 曲线迅速下降,质量损失很大,失重量占样品质量的 59.53%,DTG 曲线在 295 °C 出现最大失重峰,说明在此刻燃烧速率最快;第 3 阶段(387~526 °C)是固定碳的燃烧,主要是由于去除了挥发分后残留的焦炭被氧化所致<sup>[10]</sup>,此阶段 TG 曲线继续下降,下降幅度小于前一阶段,质量进一步损失,失重量占样品质量的 26.25%,DTG 曲线出现明显的峰,但峰值低于前一阶段,原因是 SS 的固定碳质量分数较少。与 SS 的热重曲线相比,TSS 燃烧过程也可以分为 3 个阶段,在前 2 个阶段中 TSS 的 DTG 曲线峰值明显小于 SS,原因是在烘焙过程中已经释放了部分水分和挥发分,这与表 1 的结果符合。而在第 3 个阶段,因为 TSS 的固定碳质量分数高于 SS,且烘焙过程中形成的多孔且高度无序的碳结构可能导致高反应性<sup>[11]</sup>,这样随着燃料中固定碳质量分数的增加,焦炭氧化会更容易且更快速的发生,所以 TSS 在该阶段呈现出比 SS 峰值更高、范围更宽的 DTG 曲线<sup>[12]</sup>。

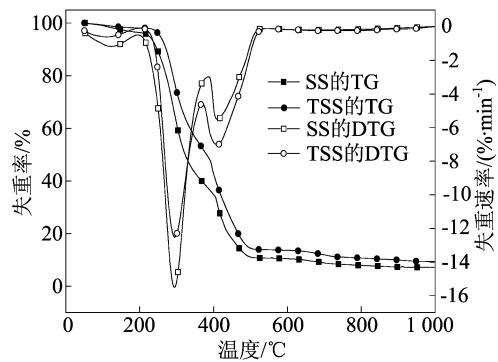
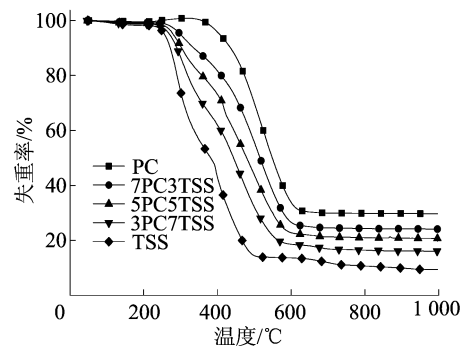


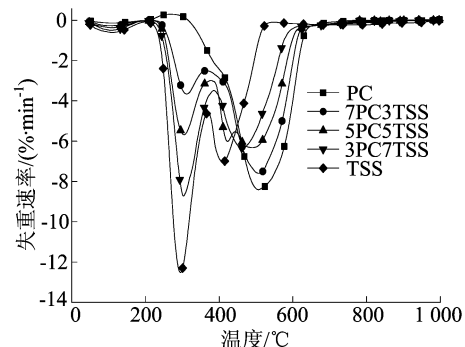
图2 SS和TSS的热重曲线

### 2.1.2 不同掺混比对燃烧的影响

20 °C/min 升温速率下 TSS、PC 及不同掺混比混合物的 TG 与 DTG 曲线如图 3 所示。



(a) TG曲线



(b) DTG曲线

图3 不同掺混比样品的热重曲线

从图 3a 可以看出,混合物样品的 TG 曲线处于 PC 与 TSS 之间,随着 TSS 的掺混比例不断增加,混合物样品的 TG 曲线逐步下移,总失重量逐渐增大,混合物样品 7PC3TSS、5PC5TSS 和 3PC7TSS 燃烧反应完成后,失重量占样品总重的比例分别为 75.45%、78.71%、83.13%。从图 3b 可以看出,随着 TSS 的不断掺入,挥发分析出峰不断增大,固定碳燃烧峰不断减小且逐渐往低温区移动,这主要是由于随着 TSS 的掺混增大了混合物样品挥发分的质量分数,挥发分燃烧所产生的热量对固定碳的燃烧起到了预加热的作

用,使混合物样品的燃烧向低温区移动,缩短了燃烧时间,从而改善了混合物样品的燃烧性能<sup>[13]</sup>。值得注意的是 5PC5TSS 的 DTG 曲线出现了 2 个固定碳燃烧峰,这是因为 TSS 和 PC 单独燃烧时固定碳燃烧峰的温度不同,所以在两者质量相同时产生了 2 个峰。

### 2.1.3 不同升温速率对燃烧的影响

10、20、40 °C/min 升温速率下 5PC5TSS 的 TG 与 DTG 曲线如图 4 所示,从图 4 可以看出,样品在不同升温速率下燃烧的 TG 和 DTG 曲线变化趋势相似。

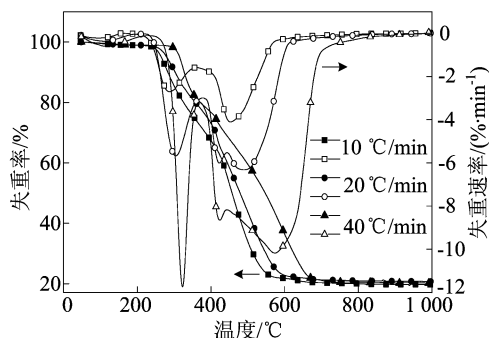


图 4 不同升温速率下样品的热重曲线

由图 4 可知,随着升温速率的增大,热重曲线向高温区域移动,说明燃烧过程出现热滞后现象,

这主要是由于在较低的加热速率下,样品颗粒的加热速度较慢,样品颗粒各区域的温度较均匀,而较高的加热速率会导致颗粒表面的温度迅速升高,使颗粒内外产生较大的温度差,增加了从表面到内部热传递所用的时间,从而导致了热滞后现象的出现<sup>[14-15]</sup>。从 TG 曲线可以看出,样品在不同升温速率下的最终失重率基本一致,说明升温速率对样品燃烧的总失重影响不大。由 DTG 曲线可知,样品在不同升温速率下失重速率变化明显,随着升温速率的增大,失重速率显著增大,原因可能是颗粒表面和内部较大的温度差,升温速率的增大会增强脱挥发分的惯性作用<sup>[16]</sup>。

### 2.2 燃烧特性分析

为分析 PC、TSS 及其混合物样品的燃烧特性,引入综合燃烧特性指数  $S_N$ <sup>[17]</sup>,  $S_N$  是衡量样品燃烧特性的指标之一,其数值越大,表明样品的燃烧特性越好。 $S_N$  的计算公式如下:

$$S_N = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_i^2} \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}}{T_f} \quad (1)$$

其中:  $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}$  为最大燃烧速率;  $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mean}}$  为平均燃烧速率;  $T_i$  为着火温度;  $T_f$  为燃尽温度。

样品的燃烧特性参数见表 2 所列。

表 2 样品的燃烧特性参数

样品	升温速率/ (°C · min <sup>-1</sup> )	着火温度/ °C	燃尽温度/ °C	最大燃烧速率/ (°C · min <sup>-1</sup> )	平均燃烧速率/ (°C · min <sup>-1</sup> )	综合燃烧特性指数/ 10 <sup>-7</sup>
TSS	10	243.84	490.16	5.76	3.28	6.48
	20	256.29	509.08	12.50	6.35	23.74
	40	271.37	599.66	25.69	9.53	55.44
3PC7TSS	10	253.62	593.04	4.21	2.30	2.54
	20	260.93	636.68	8.71	4.18	8.40
	40	289.34	675.00	16.99	7.79	23.42
5PC5TSS	10	288.98	605.50	4.09	2.14	1.73
	20	293.77	650.39	6.32	4.05	4.56
	40	301.81	718.63	11.67	6.92	12.34
7PC3TSS	10	348.61	611.02	4.49	2.35	1.42
	20	369.85	660.14	7.59	4.16	3.50
	40	378.70	737.01	9.97	7.87	7.42
PC	10	410.70	629.52	5.47	2.72	1.40
	20	425.78	681.03	8.41	4.86	3.31
	40	461.75	757.72	13.35	8.62	7.12

由表 2 可知,各个升温速率下的 TSS 综合燃烧特性指数均最高,说明 TSS 有很好的燃烧特性。随着升温速率的增大,各个样品的着火温度

和燃尽温度均增加,与图 4 中样品在不同升温速率下的热重曲线向高温区移动符合,进一步定量地阐释了热滞后的现象,同时综合燃烧特性指数

也随之增加,说明燃烧性能逐渐变好。在同一升温速率下随着 TSS 的掺混比不断增大,混合物样品的综合燃烧特性指数增加,着火温度降低,燃尽温度降低,原因是 TSS 中的 H、O 含量较高,使混合物样品更容易燃烧,同时 TSS 中含有大量的挥发分,挥发分的析出会造成样品表面产生大量的孔隙,加快了反应速率,且产生的热量对固定碳的燃烧起到了预加热的作用。

值得注意的是,当 TSS 掺混比从 50% 增加到 70% 时,混合物样品的综合燃烧特性指数增幅显著,说明 70% 的 TSS 掺混比可能是较为合适的比例。

### 2.3 协同效应

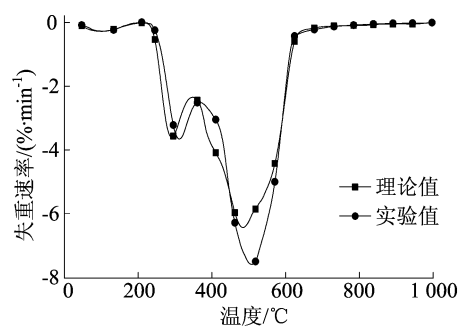
为了探索 TSS 与 PC 混合燃烧的协同作用,根据混合比计算混合物的理论失重速率<sup>[18]</sup>,计算公式如下:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{mix}} = w_{\text{TSS}}\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{TSS}} + w_{\text{PC}}\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{PC}} \quad (2)$$

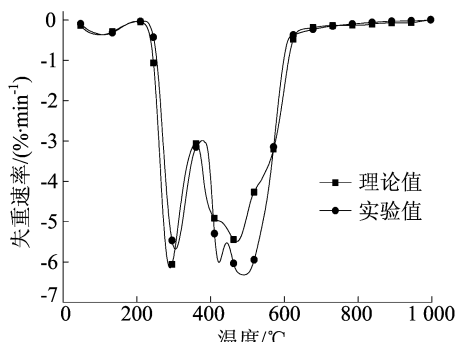
其中:  $w_{\text{TSS}}$  为 TSS 在混合物样品中的质量比;  $w_{\text{PC}}$  为 PC 在混合物样品中的质量比;  $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{TSS}}$  为 TSS 燃烧的实际失重速率;  $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{PC}}$  为 PC 燃烧的实际失重速率。

将理论上的 DTG 曲线与实际 DTG 曲线进行比较,根据曲线的偏移情况来评估不同混合物样品在燃烧过程中的协同作用。

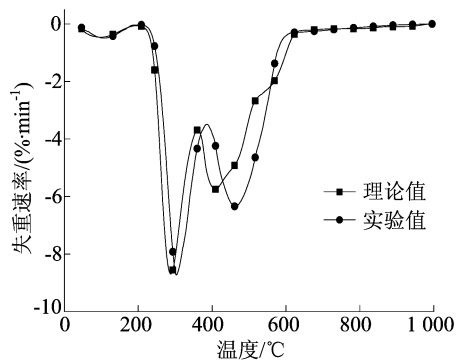
20 °C/min 升温速率下混合物样品 DTG 曲线实验值与理论值的比较如图 5 所示。从图 5 可以看出,3 种混合物样品在燃烧初期即温度低于 350 °C 时,实验 DTG 曲线与理论 DTG 曲线吻合较好,说明此阶段只有生物质炭被激活,没有发生特殊的相互作用<sup>[19]</sup>。随着反应继续进行,在 400~600 °C 之间,实验曲线与理论曲线偏差明显,且实验曲线峰值比理论峰值大,说明混合燃烧在此阶段产生了积极的协同作用。总体而言,高温燃烧阶段的协同作用比低温燃烧阶段的协同作用更为显著。造成这种协同效应的原因是 TSS 在脱挥发分阶段释放的大量热量可以促进 PC 的燃烧,此外生物质灰分中的无机组分,特别是碱金属和碱土金属物质(AAEM,即 K、Na、Mg、Ca 等)能够催化煤焦反应<sup>[20-21]</sup>。值得注意的是,3PC7TSS 的实际燃尽温度降低得最为明显,这表明 TSS 改善了 PC 的燃尽性能,意味着 3PC7TSS 的燃尽时间更短,从而最大限度地减少了未燃碳的损失<sup>[10]</sup>。



(a) 7PC3TSS



(b) 5PC5TSS



(c) 3PC7TSS

图5 混合物样品 DTG 曲线实验值与理论值的比较

## 3 动力学分析

SS 与 PC 在热重分析仪中的燃烧可简化为固体的非均相反应,其燃烧反应过程符合非等温曲线下的燃烧反应的动力学方程<sup>[22]</sup>,即

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} f(\alpha) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \quad (4)$$

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (5)$$

其中:  $E$  为活化能;  $A$  为指前因子;  $T$  为反应温度;  $\alpha$  为转化率;  $R$  为摩尔气体常数;  $m$  为样品的初始质量;  $m_t$  为样品在  $t$  时刻的质量;  $m_\infty$  为样品反应后残留物的质量;  $f(\alpha)$  为反应机理函数。

FWO 法和 KAS 法是 2 种有代表性的计算活化能的等转化率法<sup>[22]</sup>。

FWO 法计算方程如下:

$$\ln \beta = \ln \left( \frac{AE}{Rg(\alpha)} \right) - 5.331 - 1.052 \frac{E}{RT} \quad (6)$$

当转化率  $\alpha$  确定时,根据  $\ln \beta$  与  $\frac{1}{T}$  做拟合直线求出斜率,可以计算出不同转化率下的活化能  $E$ 。

KAS 法计算方程如下:

$$\ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right) = \ln \left( \frac{AR}{Eg(\alpha)} \right) - \frac{E}{RT} \quad (7)$$

当转化率  $\alpha$  确定时,根据  $\ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right)$  与  $\frac{1}{T}$  做拟合直线求出斜率,可以计算出不同转化率下的活化能  $E$ 。

样品活化能与转化率之间的关系曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出,由 KAS 法和 FWO 法 2 种方法得出的活化能与转化率关系曲线的变化趋势大体类似。

SS 燃烧时,随着转化率的增大活化能呈现先升高后降低的趋势,当转化率为 0.6 时,活化能达到最大。SS 活化能在前期不断升高的原因是前期主要以挥发分析出燃烧为主,挥发分的分子反应活性较低,需要吸收较多能量促使反应进行,而后期的燃烧主要以固定碳为主,因为固定碳分子

反应活性较高,同时前期的燃烧反应起到了预加热的作用,所以活化能在后期呈现下降趋势。TSS 的活化能比 SS 降低明显,说明烘焙处理有利于燃烧反应的进行,可以在一定程度上降低燃烧的反应壁垒<sup>[23]</sup>。TSS 的活化能同样也呈现出先升高后降低的趋势,因为烘焙处理后挥发分减少,所以 TSS 的活化能升高幅度较小,值得注意的是 TSS 后期活化能急剧降低,可归因于烘焙产生的多孔结构更加有利于固定碳的燃烧。PC 燃烧时,因为 PC 中挥发分质量分数较少,固定碳质量分数较多,所以主要以固定碳的燃烧为主,活化能呈现出随转化率的增大而逐渐减小的趋势。

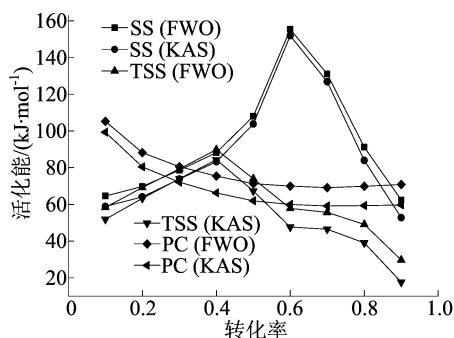


图 6 样品活化能与转化率之间的关系曲线

各个样品的表观活化能见表 3 所列。

表 3 样品的表观活化能

样品	FWO 法		KAS 法	
	表观活化能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	线性相关系数 R <sup>2</sup>	表观活化能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	线性相关系数 R <sup>2</sup>
PC	77.86	0.99	68.69	0.98
7PC3TSS	74.64	0.98	66.12	0.97
5PC5TSS	69.44	0.98	61.01	0.98
3PC7TSS	60.51	0.97	51.43	0.98
TSS	62.54	0.98	54.64	0.96

由表 3 可知,TSS 的表观活化能低于 PC 的表观活化能,混合物样品的表观活化能随着 TSS 掺混比的增加而不断减小,说明随着 TSS 的不断掺入混合物样品的燃烧反应更容易进行,当 TSS 的掺混比达到 70% 时,混合物样品的表观活化能最小,由 FWO 法和 KAS 法分别计算得到 3PC7TSS 的活化能值为 60.51、51.43 kJ/mol,值得注意的是,3PC7TSS 的表观活化能低于 PC 和 TSS 的表观活化能,这意味着在协同作用下混合物样品的表观活化能可以小于单独样品的表观活化能<sup>[1]</sup>。综合联系燃烧特性分析以及协同效应分析可以得到 TSS 掺混比为 70% 时混燃效果最好。

## 4 结 论

本文采用热重分析法研究了烘焙芝麻秸秆与煤混合燃烧的燃烧特性,通过建立动力学模型分析了两者单独燃烧和混合燃烧时的活化能,得出以下结论:

(1) 芝麻秸秆经过烘焙预处理后水分和挥发分减少,固定碳质量分数增多。因为煤粉的固定碳质量分数明显多于挥发分,所以其燃烧主要集中在高温区域。

(2) 随着烘焙芝麻秸秆掺混比的增加,混合物样品的总失重量增大,着火温度降低,燃尽温度

降低,综合燃烧特性指数增加,且当烘焙芝麻秸秆掺混比从50%增加到70%时,混合物样品的综合燃烧特性指数增幅显著。

(3) 升温速率对样品燃烧的总失重率影响不大,随着升温速率的增大,样品的着火温度和燃尽温度均增大,综合燃烧特性指数增加,热重曲线向高温区域移动,呈现热滞后现象。

(4) 烘焙芝麻秸秆与煤粉混合燃烧时会发生协同效应,高温燃烧阶段的协同作用比低温燃烧阶段的协同作用更为显著,其中3PC7TSS的实际燃尽温度降低得最为明显。

(5) TSS活化能比SS降低明显,烘焙预处理有利于燃烧反应的进行。随着TSS掺混比的增大,混合物样品的表观活化能减小,其中3PC7TSS的表观活化能最小。烘焙芝麻秸秆掺混比为70%可能是最佳混合比。

### [参 考 文 献]

- [1] CHEN L C, WEN C, WANG W Y, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal [J]. *Renewable Energy*, 2020, 161: 867-877.
- [2] PHANPHANICH M, MANI S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 1246-1253.
- [3] PARK S W, JANG C H, BAEK K R, et al. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products [J]. *Energy*, 2012, 45(1): 676-685.
- [4] YU D, CHEN M, WEI Y, et al. An assessment on co-combustion characteristics of Chinese lignite and eucalyptus bark with TG-MS technique [J]. *Powder Technology*, 2016, 294: 463-471.
- [5] LIU Z, GUO Y, BALASUBRAMANIAN R, et al. Mechanical stability and combustion characteristics of hydrochar/lignite blend pellets [J]. *Fuel*, 2016, 164: 59-65.
- [6] 叶聪, 邢献军, 张学飞, 等. 城市污泥与稻壳水热炭混合燃烧特性与动力学 [J]. *过程工程学报*, 2020, 20(3): 362-370.
- [7] 张学飞, 邢献军, 糜梦星, 等. 厨余垃圾及其水热炭燃烧特性与动力学研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(6): 128-135.
- [8] LIU Z G, QUEK A, HOEKMAN S K, et al. Thermogravimetric investigation of hydrochar-lignite co-combustion [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 646-652.
- [9] CHEN Z H, HU M, ZHU X L, et al. Characteristics and kinetic study on pyrolysis of five lignocellulosic biomass via thermogravimetric analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 441-450.
- [10] TOPTAS A, YILDIRIM Y, DUMAN G, et al. Combustion behavior of different kinds of torrefied biomass and their blends with lignite [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 177: 328-336.
- [11] SAHU S G, SARKAR P, CHAKRABORTY N, et al. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars [J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(3): 369-378.
- [12] LI J, ARTUR B, YANG W H, et al. Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching [J]. *Applied Energy*, 2012, 99(6): 344-354.
- [13] 张坡. 生物质焦和煤混合燃烧及排放特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [14] PENG X, MA X, XU Z. Thermogravimetric analysis of co-combustion between microalgae and textile dyeing sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 180: 288-295.
- [15] 曹红亮, 李国强, 黄思涵, 等. 基于等转化率法的牛粪热解动力学特性研究 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(7): 1773-1778.
- [16] SUN Y H, BAI F T, LU X S, et al. Kinetic study of Huadian oil shale combustion using a multi-stage parallel reaction model [J]. *Energy*, 2015, 82: 705-713.
- [17] HU S, MA X, LIN Y, et al. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of paper mill sludge and municipal solid waste [J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 99: 112-118.
- [18] ABOULKAS A, HARFI K E, BOUADILI A E. Pyrolysis of olive residue/low density polyethylene mixture: part I the thermogravimetric kinetics [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2008, 36(6): 672-678.
- [19] MUNDIKE J, COLLARD F X, GRGENS J F. Co-combustion characteristics of coal with invasive alien plant chars prepared by torrefaction or slow pyrolysis [J]. *Fuel*, 2018, 225: 62-70.
- [20] FARROW T S, SUN C, SNAPE C E. Impact of biomass char on coal char burn-out under air and oxy-fuel conditions [J]. *Fuel*, 2013, 114: 128-134.
- [21] OLADEJO J M, ADEGBITE S, PANG C H, et al. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass [J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 215-225.
- [22] ZOU S, WU Y, YANG M, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* using thermogravimetric analyzer [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1): 359-365.
- [23] 杜一帆. 非惰性气氛烘焙稻壳与煤的混燃特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

(责任编辑 张 镛)