



梁森,雷添,占小林,等. 烘焙处理对烟草废弃物热解和燃烧特性的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(3): 65-74.
LIANG M, LEI T, ZHAN X L, et al. Influence of torrefaction treatment on the pyrolysis and combustion characteristics of tobacco waste[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(3): 65-74.
DOI: 10. 12187/2025. 03. 008

烘焙处理对烟草废弃物热解和燃烧特性的影响

梁森¹, 雷添¹, 占小林², 刘思奎², 张兴全³, 邹恩凯², 刘语煊¹, 周瑞芳²

1. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 江西中烟工业有限责任公司 技术中心, 江西 南昌 330096;
3. 湖北中烟工业有限责任公司 襄阳卷烟厂, 湖北 襄阳 441000

摘要: 以烟草废弃物为对象, 利用结构组成分析及热重分析方法研究烘焙处理对其微观形貌、元素组成、热解和燃烧特性的影响规律。结果表明: 烘焙处理可降低样品平衡含水率和氧元素含量, 提升碳元素含量, 高位热值由原始的 17.15 MJ/kg 提升至 19.05 MJ/kg; 烘焙过程中烟草废弃物发生明显的脱水和脱羧反应, 随着烘焙温度的升高, 样品色泽逐渐加深, 且高温烘焙后的烟草废弃物表面出现气孔, 微观结构被破坏。烘焙温度对烟草废弃物的热解过程影响明显, 表现为降低挥发性成分析出阶段的失重率, 热解残余质量由原始的 27.00% 提升至 40.13% (240 °C 烘焙), 随着烘焙温度升高, 起始分解温度和终止分解温度均向高温方向偏移, 综合热解指数逐步提高至 $2.07 \times 10^{-4} \% / (\text{min} \cdot ^\circ\text{C}^2)$, 主要热解失重阶段的高斯分峰拟合能够较好地反映样品中各组分的变化; 高烘焙温度可提升烟草废弃物的引燃温度和燃尽温度, 210 °C 烘焙样品的综合燃烧特性指数最高, 为 $11.87 \times 10^{-7} \% / (\text{min}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3)$ 。各样品的热分解过程均符合化学反应控制模型, 烘焙处理可改变样品主要失重阶段的反应活化能。烘焙处理可作为烟草废弃物的预处理手段以提升其能量密度, 改善其热解燃烧特性。

关键词: 烘焙处理; 烟草废弃物; 热解特性; 动力学; 热重分析

中图分类号: TS452 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)03-0065-10

0 引言

我国烟草的种植面积和产量均居世界首位。而在烟草生产及加工过程中, 会不可避免地产生大量烟秆、废弃烟末、烟梗等烟草废弃物, 目前常见的烟草废弃物处理方式包括直接丢弃、填埋、焚烧等, 这不仅造成生物质资源的浪费, 还会带来环境污染问题^[1]。与其他木质纤维素类生物质类似, 烟草废

弃物主要含有纤维素、半纤维素和木质素; 另外, 烟草废弃物吸湿性强, 挥发性成分含量高, 其高值化多用途利用吸引了行业内外科技工作者的广泛关注^[2]。

热化学特性技术可将包括烟草在内的生物质资源转化为液体燃料、碳材料、高值化学品等。例如, H. P. Chen 等^[3]利用热解多联产途径将烟草废弃物转化为焦炭、生物油、可燃气等产品, 发现

收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-09-04; 出版日期: 2025-06-15

基金项目: 中国烟草总公司重点研发项目(110202402037); 江西中烟工业有限责任公司科研项目(赣烟工科计 2022-04)

作者简介: 梁森(1987—), 河南省南阳市人, 郑州轻工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为卷烟热分析技术。E-mail: liangmiaozu@163.com

通信作者: 周瑞芳(1977—), 江西省瑞昌市人, 江西中烟工业有限责任公司农艺师, 主要研究方向为烟叶质量评价。E-mail: 103770161@qq.com

650 ℃ 是烟草废弃物较优的热解温度,此时各相态产品之间的平衡性较好。B. C. Yan^[4]等利用流化床热解反应器将烟片和烟梗转化为富含芳香化合物的生物油,该生物油的最高得率为 67.47%。生物质的热解和燃烧特性是影响热转化工艺条件和产品性能的关键因素,包括笔者在内的多位研究者已开展了烟草废弃物的热解和燃烧特性分析^[5-7],发现酸洗等预处理能够降低烟草废弃物的灰分含量,提高烟草废弃物的热解特性,并改变热解产物分布。烘焙作为一种改善生物质原料品质的预处理方式,能够在原料热解前去除其中的大部分水分及部分含氧挥发性成分,提升生物质原料的能量密度、易磨性、疏水性和存储稳定性,已被应用于玉米秸秆、中药渣、方竹、松木、草本植物等生物质的预处理中^[8-10]。

针对烟草废弃物,烘焙是一种较适宜的热转化预处理方式,但烘焙处理对烟草废弃物热解和燃烧特性的影响尚未引起业界关注。基于此,本文拟在不同温度条件下对烟草废弃物进行烘焙处理,利用有机元素分析、微观形貌分析、热重分析等方法研究烘焙处理对烟草废弃物热解和燃烧特性的影响,以期对烟草废弃物的热化学特性及高值化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

许昌产废弃烟叶,实验前将样品打成粉末并过 100 目筛,低温备用;木浆纤维(纯度 $\geq 98\%$),大连扬润贸易有限公司;丙二醇、丙三醇,均为分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

Vario macro cube 型元素分析仪,德国 Elementar 公司;SU-8010 型扫描电子显微镜(SEM),日本 Hitachi 公司;Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪,美国 Thermo-scientific instrument 公司;STA 449F3 型热重分析仪,德国 Netzsch 公司;ASCI-60-C 型测色色差仪,北京辰泰克仪器技术有限公司;OTF-1200X 型程序控温管式炉,合肥科晶材料技术有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 烘焙处理 利用程序控温管式炉进行烟草废弃物的烘焙处理。将 10 g 烟草废弃物粉末均匀装入石英舟并放入管式炉内,用 500 mL/min 高纯氮气将管式炉中的空气排空,通过程序控温平台升温至烘焙温度,烘焙温度分别设置为 150 ℃、180 ℃、210 ℃ 和 240 ℃,在对应烘焙温度下保持 30 min 再降至室温。未烘焙的烟草废弃物命名为 TW,烘焙后烟草废弃物分别命名为 TT-150、TT-180、TT-210 和 TT-240。

1.3.2 理化特性检测 根据 YC/T 31—1996 对烘焙前后烟草废弃物的平衡含水率进行测定^[11]。采用元素分析仪对烘焙前后烟草废弃物进行有机元素分析,氧元素含量采用差减法计算得到,高位热值根据元素分析结果计算得到^[12-13]。采用扫描电子显微镜分辨烘焙前后烟草废弃物的微观形貌。采用傅里叶变换红外光谱仪测定烘焙前后烟草废弃物的红外光谱图,红外扫描 4000~400 cm^{-1} ,扫描次数共 32 次,分辨率 4 cm^{-1} 。采用测色色差仪对烘焙前后烟草废弃物色差进行分析。

1.3.3 热解、燃烧特性及反应动力学分析 参考文献[14-15]中的方法,对不同烟草样品分别进行热解和燃烧实验,每次样品量约为 15 mg,温度范围为 40~800 ℃,升温速率为 20 ℃/min,载气流量为 40 mL/min,热解实验气氛为氮气,燃烧实验气氛为合成空气。同步记录热重(TG)、微商热重(DTG)曲线。TG-DTG 曲线的绘制方法:以加热温度($\theta/\text{℃}$)为横坐标,TG 曲线以样品的质量变化率($w/\%$)为纵坐标,DTG 曲线以样品的质量变化率与时间的微商($(dw/dt)/(\% \cdot \text{min}^{-1})$)为纵坐标,绘制 TG-DTG 曲线,并根据热解、燃烧参数进行相应动力学分析。由 TG-DTG 切线法获得的反应起始温度 T_i 和终止温度 T_f ,计算综合热解指数(Comprehensive Pyrolysis Index, CPI)和综合燃烧特性指数(S)。

1.4 数据处理

使用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 烘焙温度对烟草废弃物化学组成的影响

烘焙处理前后烟草废弃物平衡含水率、有机元

素含量和高位热值见表 1。平衡含水率是固体疏水性的重要指标。由表 1 可知,TW 的平衡含水率为 13.47%,随着烘焙温度的升高,平衡含水率呈下降趋势,TT-240 的平衡含水率降至 5.40%,这可能与烘焙处理破坏了生物质的纤维素类结构,导致烟草废弃物吸附水的能力减弱有关。烘焙后烟草废弃物的疏水性能提高,有利于生物质的储存运输,这也与陈勇等^[9]发现的烘焙秸秆疏水性提高结果一致。

C 和 O 元素为烟草废弃物中含量最多的元素,且随着烘焙温度的升高,烟草废弃物中主要有机元素含量变化趋势不一。TW 中 C 元素含量为 42.24%,随着烘焙温度的升高,C 元素含量稳步提升至 50.04%,表明烘焙过程中有一定程度碳化,这有利于生物质热值提升;H 和 O 元素含量随着烘焙温度的升高逐步降低,TT-240 的 H 和 O 元素含量分别为 4.98%和 41.53%,这与烘焙过程中样品结合水脱除及半纤维素、纤维素成分的部分分解与脱羧过程有关^[6]。各样品中 N 和 S 元素含量相对较低,分别 2.26%~2.96%和 0.39%~0.50%,并随着

烘焙温度的升高有增加趋势。

TW 的高位热值为 16.09 MJ/kg,随着烘焙温度的升高,高位热值稳步增加至 19.05 MJ/kg,产物能量密度得以提高,样品的质量产率和能量产率均有所降低,这与废弃烟梗生物质燃料水热提质效果类似^[16]。另外,各样品与相同烘焙温度的玉米秸秆、方竹等生物质燃料的能量产率和高位热值差异不大^[9-10]。

2.2 烘焙温度对烟草废弃物微观形貌及表面官能团的影响

烘焙前后烟草废弃物粉末压片色泽直观图如图 1 所示。烘焙温度对烟草废弃物色泽的影响见表 2。由图 1 可知,随着烘焙温度升高,烟草废弃物颜色逐渐转变为黑色,且逐渐向炭转化。由表 2 可知,烘焙处理所得烟草废弃物的色泽与烘焙前数据间具有显著差异($P<0.05$)。随着烘焙温度的升高, L^* 和 b^* 均呈逐渐减小的趋势,说明烘焙后烟草废弃物明度和黄色程度均显著降低,这可能是因为烟草废弃物中的还原糖、多酚和氨基酸在烘焙过程中发生棕色化反应,使样品褐变,导致样品亮度降低。

表 1 烘焙前后烟草废弃物平衡含水率、有机元素含量和高位热值

Table 1 Equilibrium moisture content, organic element content, and higher heating value of tobacco waste before and after torrefaction

样品	平衡含水率/%	有机元素含量/%					高位热值/(MJ·kg ⁻¹)	质量产率/%	能量产率/%
		C	H	O	N	S			
TW	13.47	42.24	5.49	49.62	2.26	0.39	16.09	100.00	100.00
TT-150	10.13	43.59	5.32	48.24	2.43	0.42	16.50	94.17	96.59
TT-180	7.00	45.62	5.20	46.16	2.58	0.44	17.29	85.28	91.64
TT-210	5.87	47.96	5.13	43.70	2.74	0.47	18.27	76.86	87.28
TT-240	5.40	50.04	4.98	41.53	2.96	0.50	19.05	68.70	81.34

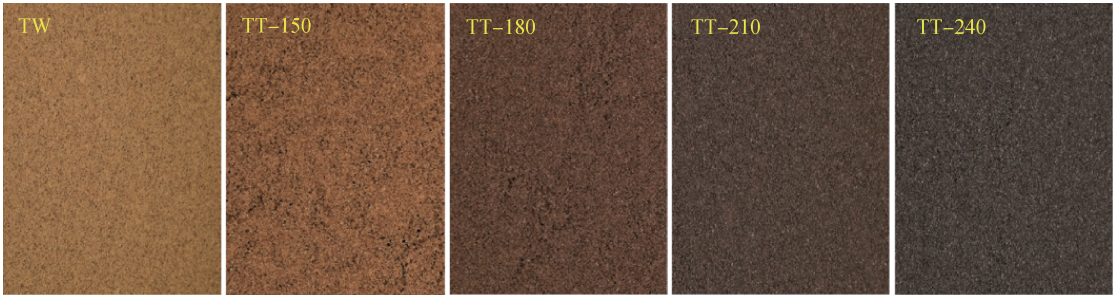


图 1 烘焙前后烟草废弃物粉末压片色泽直观图

Fig. 1 Color visualization of tobacco waste powder compacts before and after torrefaction

表 2 烘焙温度对烟草废弃物色泽的影响
Table 2 The effect of torrefaction temperature on the color of tobacco waste

样品	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	Δ <i>E</i>
TW	47.16±0.94 ^a	24.71±0.81 ^b	35.40±1.36 ^a	0.00±0.00 ^c
TT-150	37.28±0.71 ^b	27.97±0.91 ^a	33.72±0.48 ^b	10.48±0.46 ^d
TT-180	27.58±1.42 ^c	19.37±0.73 ^c	20.17±0.66 ^c	25.46±0.81 ^c
TT-210	20.50±1.22 ^d	14.80±0.54 ^d	14.53±0.79 ^d	35.51±0.94 ^b
TT-240	16.76±0.72 ^e	13.35±0.47 ^e	8.88±0.58 ^e	42.26±0.71 ^a

注:同一指标后不同小写字母表示差异达到 $P<0.05$ 显著水平。

由于温度差异较小时,样品的 SEM 图差别不大,因此选温度差异较大的两个样品(TT-150 和 TT-240)与 TW 样品进行对比分析。烘焙前后烟草废弃物扫描电镜图如图 2 所示。由图 2 可知,TW 表面光滑,微观形貌相对完整,符合木质纤维素生物质的典型结构。随着烘焙温度升高,样品部分结构被破坏,表面逐渐出现一些气孔,这可能是由烘焙过程中部分小分子物质析出所致。

烘焙前后烟草废弃物的红外光谱图如图 3 所示。由图 3 可知,各烟草样品呈现相似的光谱特征,表明烘焙过程中生物质样品木质纤维素类结构得到有效保留。烟草废弃物中有较多的含氧官能团, O 元素含量高是生物质热值低的主要原因,烘焙处理起到了脱氧的作用,改变了含氧官能团的红外吸收峰。随着烘焙温度的升高,3295 cm^{-1} 处的红外吸收峰降低,这与烘焙过程中结合水的脱除、半纤维素的脱羟基过程有关^[17]。1740 cm^{-1} 处的肩峰对应 C=O 的伸缩振动,随着烘焙温度的升高,肩峰逐渐减弱,表明烘焙过程中发生了半纤维素和纤维素的脱羧基过程^[18]。1620 cm^{-1} 处的吸收峰来源于芳香族骨架 C=C 的伸缩振动^[19]。1050 cm^{-1} 处的吸收峰对应半纤维素和纤维素中 C—O—C 的伸缩振

动,该峰强度随着烘焙温度升高逐渐减弱,也表明烘焙处理对烟草废弃物内纤维骨架结构有一定程度的影响^[20]。

2.3 烘焙温度对烟草废弃物热解特性的影响

烘焙前后烟草废弃物热解 TG 和 DTG 曲线如图 4 所示。由图 4 可知,各样品的热失重差异性和规律性明显。随着烘焙温度的升高,样品起始失重温度增加,且热解残余质量提升。根据 TW 的 DTG 曲线可将其热失重过程分为 4 个阶段,分别对应脱水阶段(阶段 I)、低沸点小分子挥发性成分析出阶段(阶段 II)、木质纤维素类成分分解炭化阶段(阶段 III)和无机盐分解阶段(阶段 IV)。烟草废弃物中挥发性成分含量高,其热失重特性与杉木等生物质的热失重过程区别明显^[21],但烘焙处理后,其热失重特性与杉木等生物质趋于一致。烘焙后烟草废弃物在阶段 II 和阶段 III 的 DTG 曲线明显区别与 TW,表明烘焙过程对烟草废弃物中挥发性成分含量及生物质主体结构成分的失重过程影响明显。

烘焙前后烟草废弃物热解失重阶段温度区间及失重率见表 3。由表 3 可知,各样品在阶段 I 的温度区间基本一致,介于 30~120 $^{\circ}\text{C}$ 之前,失重率介于 1.37%~1.68%之间。各样品在阶段 II 的失重率差异明显,TW 的失重率较高,为 10.49%,表明其内部含有较多的挥发性成分,TT-150 在该阶段的失重率明显降低至 4.55%,表明 150 $^{\circ}\text{C}$ 的烘焙温度下,样品中的挥发性成分损失较多,继续提升烘焙温度时,各样品在该阶段的失重率显著降低至 1%以下,表明在 180 $^{\circ}\text{C}$ 及以上温度时,烟草废弃物内挥发性成分已大部分损失。阶段 III 包含样品中半纤维素、纤维素和木质素分解与炭化过程,烘焙温度为 180 $^{\circ}\text{C}$ 及以下时,从 DTG 曲线可见半纤维素分解的

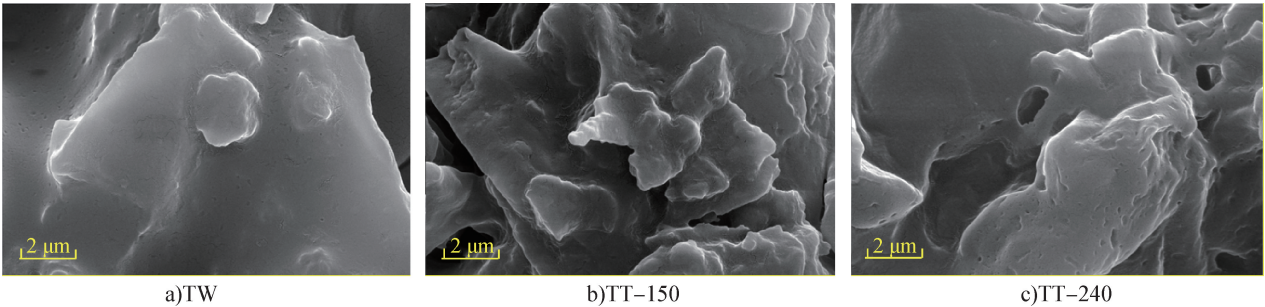


图 2 烘焙前后烟草废弃物 SEM 图

Fig. 2 SEM images of tobacco waste before and after torrefaction

肩峰,但烘焙温度为 210 ℃ 及以上时,半纤维素分解峰不明显。烘焙时半纤维素的分解有利于降低烟草废弃物热解油中乙酸等酸性成分含量,提高热解油的抗腐蚀性^[10]。TW 在阶段Ⅲ的失重率为 41.29%,随着烘焙温度升高至 180 ℃ 时,失重率提升至 43.07%,这与烘焙过程中挥发性成分损失导致木质纤维素类成分含量增加有关,但随着烘焙温度进一步提升至 240 ℃ 时,失重率又大幅降低至 28.60%,这与过高的烘焙温度会导致样品中纤维素

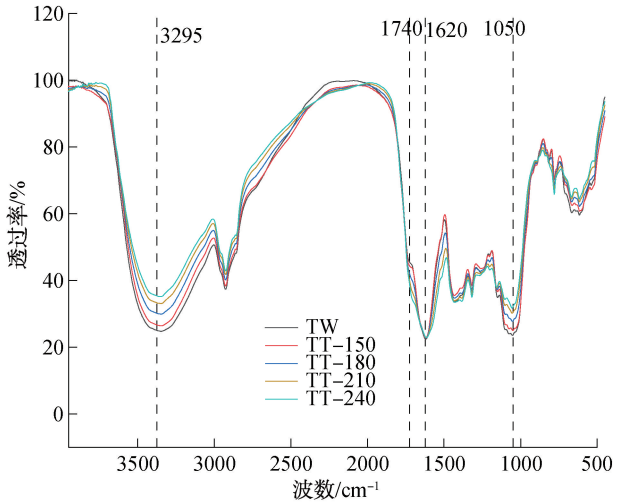


图3 烘焙前后烟草废弃物的红外光谱图
Fig.3 FTIR spectra of tobacco waste before and after torrefaction

类成分部分分解有关。各样品在阶段Ⅳ的失重率随着烘焙温度升高逐步增加,残余质量(热解炭)由 TW 的 27.00% 逐步提升至 40.13%,这与烘焙过程提升了样品中 C 元素含量相对应,可能是由于烘焙过程改变了纤维素类成分分解路径,使其向生成焦炭的热解方向发展有关,表明烘焙处理可提升烟草废弃物热解炭的生成产率^[22]。

烘焙前后烟草废弃物的热解特性参数见表 4。由表 4 可知,烘焙后烟草废弃物的热分解反应起始

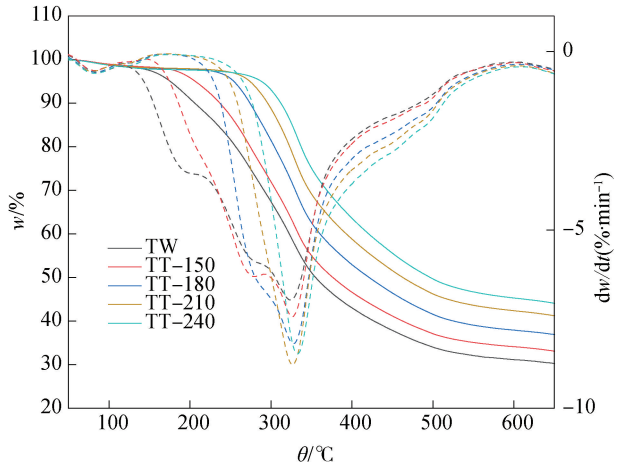


图4 烘焙前后烟草废弃物热解 TG 和 DTG 曲线
Fig.4 TG and DTG curves of the pyrolysis of tobacco waste before and after torrefaction

表 3 烘焙前后烟草废弃物热解失重阶段温度区间及失重率

Table 3 Temperature range and weight loss rate during the weight-loss stage of pyrolysis of tobacco waste before and after torrefaction								
样品	阶段Ⅰ		阶段Ⅱ		阶段Ⅲ		阶段Ⅳ	
	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%
TW	30~117	1.51	117~218	10.49	218~372	41.29	372~800	15.74
TT-150	30~122	1.37	122~218	4.55	218~371	43.16	371~800	16.74
TT-180	30~123	1.60	123~218	0.80	218~375	43.07	375~800	19.19
TT-210	30~118	1.48	118~218	0.73	218~372	33.81	372~800	21.54
TT-240	30~120	1.68	120~218	0.83	218~374	28.60	374~800	23.55

表 4 烘焙前后烟草废弃物的热解特性参数

Table 4 Pyrolysis characteristic parameters of tobacco waste before and after torrefaction

样品	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_r/^\circ\text{C}$	$\frac{DTG_{\max}}{(\% \cdot \text{min}^{-1})}$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$	$\frac{DTG_{\text{mean}}}{(\% \cdot \text{min}^{-1})}$	$\frac{CPI \times 10^{-4}}{(\% \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-2})}$	残余质量/%
TW	222.1	394.4	6.96	324	1.90	1.25	27.00
TT-150	237.0	395.2	7.43	327	1.81	1.44	30.26
TT-180	253.4	397.1	8.19	328	1.73	1.74	33.52
TT-210	263.9	399.8	8.78	327	1.62	1.98	37.52
TT-240	280.2	403.3	8.48	333	1.55	2.07	40.13

温度升高,并随着烘焙温度升高呈逐渐上升的趋势,终止温度也呈略微升高的趋势。随着烘焙温度升高, $T_{\max}$ 向高温方向偏移,这与郭秀娟等^[23]报道的烘焙对纤维素热解特性影响趋势不同,可能与烘焙温度区间选择有关,但 $DTG_{\max}$ 呈先增加后降低的变化趋势与其报道一致。进一步采用 *CPI* 对烟草废弃物的热解特性进行综合评价,各样品 *CPI* 介于 $1.25 \times 10^{-4} \sim 2.07 \times 10^{-4} \% / (\text{min} \cdot ^\circ\text{C}^2)$, 且 *CPI* 随烘焙温度升高而增大,表明烘焙处理提升了 TW 的综合热解性能。

烟草废弃物作为一种生物质原料,其内在组成复杂,各组分的反应活性也不同,导致各组分的失重过程存在相互交叉。为进一步了解烘焙处理对烟草废弃物各组分热失重的影响,利用高斯分峰拟合方法对烟草废弃物在主要失重温度区间(150~600 $^\circ\text{C}$)的 DTG 曲线进行分峰拟合。烘焙处理后烟草废弃物热解 DTG 曲线的分峰拟合结果及拟合峰面积占比分别如图 5 和表 5 所示。

由图 5 和表 5 可知,热解 DTG 曲线由 5 个失重峰叠加而成,各峰值温度分别为 204 $^\circ\text{C}$ 、269 $^\circ\text{C}$ 、328 $^\circ\text{C}$ 、350 $^\circ\text{C}$ 和 468 $^\circ\text{C}$,其中 204 $^\circ\text{C}$ 的失重峰对应于样品中挥发性成分分析出,拟合峰面积占比为 5.32%,当烘焙温度继续升高时,该失重峰消失,表明挥发性成分已在烘焙过程中释放完全。有研究^[24]表明,生物质内有机组分半纤维素、纤维素、木质素的分解温度分别集中在 220~315 $^\circ\text{C}$ 、315~400 $^\circ\text{C}$ 和 250~500 $^\circ\text{C}$,半纤维素热稳定性最差。因此,TT-150 在 269 $^\circ\text{C}$ 的失重峰可能是由半纤维素分解所致,拟合峰面积占比为 40.08%;随着烘焙温度的升高,拟合峰面积占比逐步降低至 6.21%,表明在 240 $^\circ\text{C}$ 烘焙温度下,半纤维素绝大部分已分解。328 $^\circ\text{C}$ 附近的失重峰对应纤维素的分解过程,拟合峰面积占比由 TT-150 的 10.35%增加至 TT-210 的 20.60%,再降低至 TT-240 的 16.06%,表明该温度下纤维素分解开始变得明显。TT-150 在 350 $^\circ\text{C}$ 的失重峰对应木质素分解,而木质素分解温度相对较

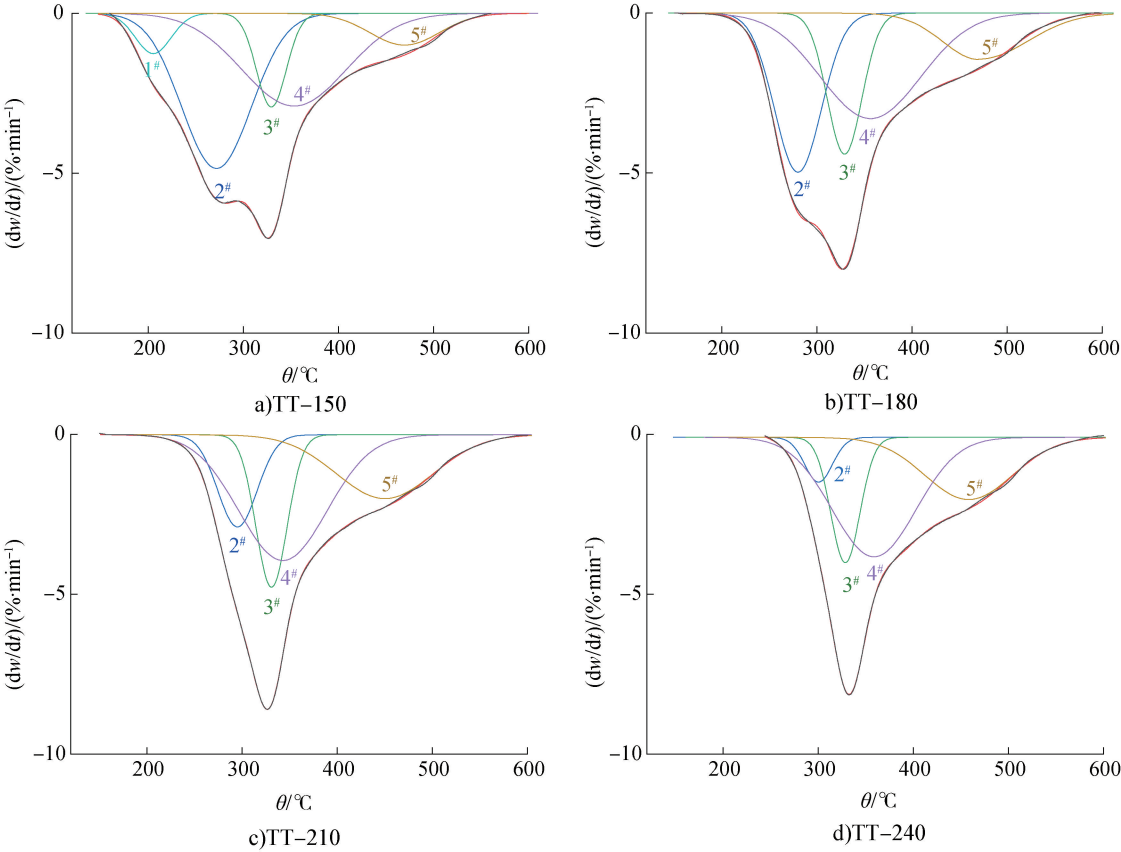


图 5 烘焙处理后烟草废弃物热解 DTG 曲线的分峰拟合结果
Fig. 5 Peak fitting results of DTG curve for pyrolysis of tobacco waste after torrefaction

表 5 烘焙处理后烟草废弃物的拟合峰面积占比
Table 5 Proportion of fitting peak area
for tobacco waste after torrefaction

峰编号	TT-150	TT-180	TT-210	TT-240
1 [#]	5.32	—	—	—
2 [#]	40.08	27.75	13.74	6.21
3 [#]	10.35	18.25	20.60	16.06
4 [#]	36.03	39.44	42.05	50.24
5 [#]	8.22	14.56	23.60	27.49

注:—表示无具体值。

宽,且分解速度慢,随着烘焙温度升高,其对应拟合峰面积占比由 36.03% 逐步升高至 50.24%。TT-150 样品 468℃ 的失重峰是纤维素类分解成焦的炭化所致,其拟合峰面积占比也随烘焙温度的升高逐步升高,这也与图 4 中热解残余质量逐步提高相一致。

2.4 烘焙温度对烟草废弃物燃烧特性的影响

烘焙前后烟草废弃物燃烧 TG 和 DTG 曲线如图 6 所示。由图 6 可知,可以将燃烧失重过程分为水分散失(阶段 I)、挥发性成分析出(阶段 II)、半纤维素、纤维素和木质素分解(阶段 III)及固定碳燃烧(阶段 IV)4 个过程^[25]。烘焙前后烟草废弃物燃烧失重温度区间及失重率见表 6。由表 6 可知,各样品在阶段 III 和阶段 IV 的失重率差异较大,阶段 III 的

失重率随烘焙温度升高而降低,而阶段 IV 的失重率随烘焙温度升高而升高,这与烘焙过程促进了半纤维素和部分纤维素分解成焦有关。另外,与热解过程相比,燃烧条件下纤维素类成分分解的峰值温度较低,表明氧气的参与促进了分解反应的发生^[26]。

烘焙前后烟草废弃物的燃烧特性参数见表 7。由表 7 可知,烘焙处理后烟草废弃物的 T_i 均高于 TW 的 238.0℃,且随烘焙温度升高由 245.9℃ 升高至 264.0℃,这与烘焙过程中样品内挥发性成分损失有关,各样品的 T_i 均低于秸秆粉、稻草等生物

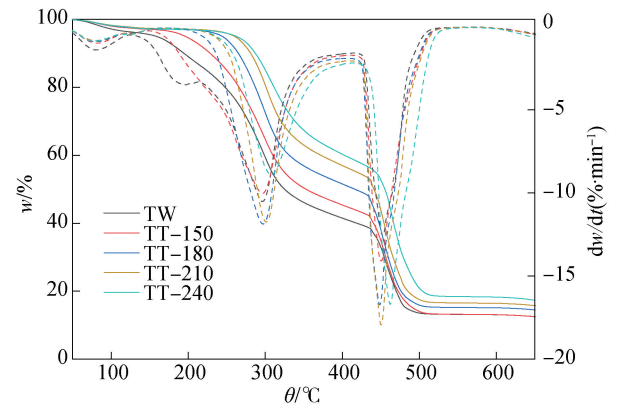


图 6 烘焙前后烟草废弃物燃烧 TG 和 DTG 曲线
Fig. 6 TG and DTG curves of tobacco waste
before and after torrefaction

表 6 烘焙前后烟草废弃物燃烧失重阶段温度区间及失重率
Table 6 Temperature range and weight loss rate during the weight-loss stage of combustion of tobacco waste
before and after torrefaction

样品	阶段 I		阶段 II		阶段 III		阶段 IV	
	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%	温度区间/℃	失重率/%
TW	30~125	3.71	125~214	9.60	214~416	46.42	416~564	27.05
TT-150	30~121	2.50	121~221	6.05	221~409	46.84	409~569	31.39
TT-180	30~123	2.40	123~218	0.96	218~405	45.55	405~602	35.87
TT-210	30~123	2.35	123~218	0.87	218~411	41.04	411~599	39.35
TT-240	30~123	2.24	123~218	0.81	220~414	37.94	414~601	40.43

表 7 烘焙前后烟草废弃物的燃烧特性参数
Table 7 Combustion characteristic parameters of tobacco waste before and after torrefaction

样品	T_i /℃	T_f /℃	$DTG_{max}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$		$DTG_{mean}/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S \times 10^{-7}/(\% \cdot \text{min}^{-2} \cdot \text{℃}^{-3})$
			阶段 III	阶段 IV		
TW	238.0	480.0	10.51	12.53	2.29	10.55
TT-150	245.9	483.3	10.02	14.09	2.31	11.14
TT-180	258.6	485.0	11.86	16.71	2.26	11.64
TT-210	262.9	487.2	11.74	17.92	2.23	11.87
TT-240	264.0	491.9	8.89	16.68	2.18	10.61

质的引燃温度^[10],可能与烟草中较丰富的挥发性成分有关,烘焙时随着挥发性成分的析出及形成的多孔且无序碳结构可能促进纤维素、木质素等生物质的快速反应^[27]。烘焙处理后烟草废弃物的 *S* 均高于 TW,其中 TT-210 的 *S* 最高,为 $11.87\times10^{-7}\%/(min^2\cdot^{\circ}C^3)$,*S* 越大表明样品的燃烧特性越好,即烘焙处理后烟草废弃物的燃烧特性有提升。

2.5 烘焙温度对烟草废弃物的热解、燃烧动力学影响

烘焙前后烟草废弃物热解、燃烧动力学拟合数据见表 8。由表 8 可知,各样品的热解与燃烧过程均符合化学反应控制模型,在氮气氛围下,TW 和 TT-150 在阶段Ⅲ的反应活化能(*E*)低于高温烘焙样品,这可能与高温烘焙促进了半纤维素和纤维素分支结构分解,保留了结构相对稳定的纤维素类成分有关。各样品在阶段Ⅳ的活化能差异不大,整体介于 94.84~98.03 kJ/mol,表明烘焙过程对木质素分解及炭化过程的影响不大。阶段Ⅲ的指前因子整体高于阶段Ⅳ,这与木质素分解及炭化过程相对较慢一致。燃烧条件下,各样品阶段Ⅳ的活化

能均高于阶段Ⅲ,表明固定碳燃烧所需能量明显高于纤维素类成分分解过程,且阶段Ⅳ的活化能随烘焙温度升高而降低,表明烘焙处理降低了样品中焦炭燃烧反应的难度。

3 结论

本文以烟草废弃物为对象,利用结构组成及热重分析分析方法研究了烘焙处理对其微观形貌、元素组成、热解和燃烧特性的影响规律,得到如下结论:烘焙处理破坏了生物质的纤维素类结构,导致烟草废弃物吸附水的能力减弱,烘焙后烟草废弃物的疏水性能提高,有利于生物质的储存,C 元素含量增加而 O 元素含量降低,高位热值由原始的 17.15 MJ/kg 提升至 19.05 MJ/kg,提高了产物能量密度,有利于生物质的储存运输;烘焙过程中烟草废弃物发生了明显的脱水和脱羧反应,烘焙处理起到了脱氧的作用;随着烘焙温度升高,烟草废弃物表面颜色逐渐变黑,逐步向炭转化;高温烘焙后的烟草废弃物表明出现气孔,微观结构被破坏。烘焙温度对烟草废弃物热解过程影响明显,表现为降低了挥发性成分析出阶

表 8 烘焙前后烟草废弃物热解、燃烧动力学拟合数据

Table 8 Fitting data of pyrolysis and combustion kinetics for tobacco waste before and after torrefaction							
气氛	样品	阶段	控制机制	拟合方程	<i>R</i> ²	<i>E</i> /(kJ·mol ⁻¹)	<i>A</i> /min ⁻¹
氮气	TW	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -10 845.59 <i>x</i> +6.13	0.945 2	90.17	9.97×10 ⁷
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -11 407.71 <i>x</i> +2.47	0.935 4	94.84	2.70×10 ⁶
	TT-150	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -10 748.25 <i>x</i> +6.00	0.947 0	89.36	8.67×10 ⁷
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -11 420.82 <i>x</i> +2.52	0.934 4	94.95	2.84×10 ⁶
	TT-180	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -14 741.15 <i>x</i> +12.32	0.956 4	122.56	6.61×10 ¹⁰
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -11 790.43 <i>x</i> +2.91	0.937 0	98.03	4.33×10 ⁶
	TT-210	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -16 455.44 <i>x</i> +15.18	0.981 1	136.81	1.29×10 ¹²
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -11 650.29 <i>x</i> +2.80	0.936 3	96.86	3.83×10 ⁶
	TT-240	Ⅲ	F1	<i>y</i> = -15 230.93 <i>x</i> +12.06	0.985 1	126.63	5.26×10 ¹⁰
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -11 726.02 <i>x</i> +2.85	0.936 2	97.49	4.05×10 ⁶
合成空气	TW	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -9 498.39 <i>x</i> +3.70	0.952 5	78.97	7.68×10 ⁶
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -35 604.17 <i>x</i> +34.83	0.953 5	296.01	9.53×10 ²⁰
	TT-150	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -10 132.13 <i>x</i> +4.77	0.950 5	84.24	2.39×10 ⁷
		Ⅳ	F1.5	<i>y</i> = -33 201.82 <i>x</i> +31.61	0.971 5	276.04	3.55×10 ¹⁹
	TT-180	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -13 125.66 <i>x</i> +9.58	0.937 2	109.13	3.80×10 ⁹
		Ⅳ	F2	<i>y</i> = -25 617.04 <i>x</i> +23.45	0.952 0	212.98	7.83×10 ¹⁵
	TT-210	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -14 149.35 <i>x</i> +10.85	0.952 2	117.64	1.46×10 ¹⁰
		Ⅳ	F2	<i>y</i> = -27 141.90 <i>x</i> +25.33	0.956 0	225.66	5.44×10 ¹⁶
	TT-240	Ⅲ	F1.5	<i>y</i> = -13 993.99 <i>x</i> +10.33	0.959 7	116.35	8.57×10 ⁹
		Ⅳ	F2	<i>y</i> = -26 101.85 <i>x</i> +23.50	0.940 8	217.01	8.39×10 ¹⁵

段的失重率,热解残余质量由原始的 27.00% 提升至烘焙温度为 240 ℃ 时的 40.13%;随烘焙温度的升高,起始分解温度和终止分解温度均向高温方向偏移,综合热解指数提高至 $2.07 \times 10^{-4} \% / (\text{min} \cdot \text{C}^2)$,挥发性成分峰消失,半纤维素峰减少;烘焙温度升高提升了烟草废弃物的引燃温度和终止温度,TT-210 的综合燃烧特性指数最高,为 $11.87 \times 10^{-7} \% / (\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$,因此 210 ℃ 是较为理想的烘焙温度。各样品热解和燃烧主要失重阶段的分解过程符合化学反应控制模型,烘焙处理改变了样品主要失重阶段的反应活化能。本研究可为后续基于烘焙烟草的热解和燃烧产物分析与调控提供基础。

参考文献:

[1] 张峻松,朱鑫超,王姗姗,等. 基于水热碳化技术的废弃烟末制备水热炭和碳量子点研究[J]. 轻工学报, 2023,38(4):105-112.

[2] 王金棒,池哲翔,李源源,等. 烟草在燃料制备领域的研究现状与展望[J]. 轻工学报,2023,38(6):118-126.

[3] CHEN H P, LIN G Y, CHEN Y Q, et al. Biomass pyrolytic polygeneration of tobacco waste: Product characteristics and nitrogen transformation[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(3):1579-1588.

[4] YAN B C, ZHANG S P, CHEN W B, et al. Pyrolysis of tobacco wastes for bio-oil with aroma compounds[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 136:248-254.

[5] GAO W H, CHEN K F, XIANG Z Y, et al. Kinetic study on pyrolysis of tobacco residues from the cigarette industry [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44:152-157.

[6] LIANG M, YANG T, ZHANG G, et al. Effects of hydrochloric acid washing on the structure and pyrolysis characteristics of tobacco stalk [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 13(8):6817-6830.

[7] LIAO S, ZHU L J, XU J, et al. Study on the effect of different solvent pretreatment on the pyrolysis characteristics of tobacco [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 174:106142.

[8] KONSOMBOON S, COMMANDRÉ J M, FUKUDA S. Torrefaction of various biomass feedstocks and its impact on the reduction of tar produced during pyrolysis [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(4):3257-3266.

[9] 陈勇,陈登宇,孙琰,等. 烘焙脱氧预处理对生物质秸秆燃料品质的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(11):205-209.

[10] 张雨,徐佳佳,马中青,等. 烘焙预处理对方竹热解产

物特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 981-989.

[11] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 试样的制备和水分测定 烘箱法:YC/T 31—1996[S].

[12] SONG G H, XIAO J, ZHAO H, et al. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels[J]. Energy, 2012, 40(1):164-173.

[13] CHANNIWALA S A, PARIKH P P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels[J]. Fuel, 2002, 81(8):1051-1063.

[14] FAN Y Y, LI L W, TIPPAYAWONG N, et al. Quantitative structure-reactivity relationships for pyrolysis and gasification of torrefied xylan [J]. Energy, 2019, 188:116119.

[15] CHEN X F, MA X Q, PENG X W, et al. Conversion of sweet potato waste to solid fuel via hydrothermal carbonization [J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 900-907.

[16] LIANG M, ZHANG K, LEI P, et al. Fuel properties and combustion kinetics of hydrochar derived from co-hydrothermal carbonization of tobacco residues and graphene oxide[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2020, 10(1):189-201.

[17] MA Z Q, CHEN D Y, GU J, et al. Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89:251-259.

[18] CHEN C S, QU B Y, WANG W X, et al. Rice husk and rice straw torrefaction; Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 24:101872.

[19] MA Z Q, WANG J H, YANG Y Y, et al. Comparison of the thermal degradation behaviors and kinetics of palm oil waste under nitrogen and air atmosphere in TGA-FTIR with a complementary use of model-free and model-fitting approaches [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 134:12-24.

[20] 程辉,余剑,姚梅琴,等. 木质素慢速热解机理[J]. 化工学报, 2013, 64(5):1757-1765.

[21] 陈登宇,陈凡,岑珂慧,等. 烘焙预处理对杉木成型燃料理化性质及热解特性的影响[J]. 能源研究与利用, 2021(2):20-24.

[22] XIN S Z, YANG H P, CHEN Y Q, et al. Assessment of pyrolysis polygeneration of biomass based on major components; Product characterization and elucidation of degradation pathways[J]. Fuel, 2013, 113:266-273.

[23] 郭秀娟,王树荣,刘倩,等. 不同烘焙条件对纤维素热裂解机理的影响研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1246-1251.

[24] CARDOSO C R, MIRANDA M R, SANTOS K G, et al. Determination of kinetic parameters and analytical

pyrolysis of tobacco waste and *Sorghum* bagasse [J].
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 92
(2):392-400.

[25] YANG H P, YAN R, CHEN H P, et al. Characteristics of
hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis [J]. Fuel,
2007, 86(12/13):1781-1788.

[26] CONESA J A, DOMENE A. Biomasses pyrolysis and
combustion kinetics through n-th order parallel reactions
[J]. Thermochimica Acta, 2011, 523(1/2):176-181.

[27] 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.

**Influence of torrefaction treatment on the pyrolysis and combustion
characteristics of tobacco waste**

LIANG Miao¹, LEI Tian¹, ZHAN Xiaolin², LIU Sikui², ZHANG Xingquan³,
ZOU Enkai², LIU Yuxuan¹, ZHOU Ruifang²

1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Technology Center, China Tobacco Jiangxi Industrial Co., Ltd., Nanchang 330096, China;
3. Xiangyang Cigarette Factory, China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Xiangyang 441000, China

Abstract: Tobacco waste was selected as the research object, and structural composition analysis and thermogravimetric analysis methods were used to study the influence of torrefaction treatment on its micro-morphology, elemental composition, pyrolysis, and combustion characteristics. The results showed that torrefaction treatment reduced the equilibrium moisture content and oxygen content of the samples while increasing the carbon content. The higher heating value increased from the original 17.15 MJ/kg to 19.05 MJ/kg, which increased the energy density of the samples, facilitating storage, transportation, and thermochemical conversion and high-value utilization of tobacco waste. During torrefaction, tobacco waste underwent obvious dehydration and decarboxylation reactions. As the torrefaction temperature increased, the surface color of the samples gradually darkened, and it gradually turned charcoal-like. SEM observation showed that after high-temperature torrefaction, the tobacco waste had pores on its surface and its microstructure was destroyed. The effect of torrefaction temperature on the pyrolysis process of tobacco waste was significant. This was reflected in the reduction of the weight loss rate during the volatile component release stage. The pyrolysis residual mass increased from the original 27.00% to 40.13% at a torrefaction temperature of 240 °C. Both the onset and termination decomposition temperatures shifted to higher values with increasing torrefaction temperature. The comprehensive pyrolysis index gradually increased to $2.07 \times 10^{-6} \% / (\text{min} \cdot \text{C}^2)$. Gaussian peak fitting of the main pyrolysis weight-loss stages could better reflect the changes in the proportion of each component in the sample. An increase in torrefaction temperature raised the ignition and burnout temperatures of tobacco waste. The sample torrefied at 210 °C had the highest integrated combustion characteristic index of $11.87 \times 10^{-7} \% / (\text{min}^2 \cdot \text{C}^3)$. The decomposition kinetics analysis of the main weight-loss stages during pyrolysis and combustion showed that the decomposition process of each sample followed the chemical reaction control model, and torrefaction treatment altered the reaction activation energy during the main weight-loss stages of the samples. Torrefaction pretreatment can be used as a pretreatment method for tobacco waste to enhance its energy density and improve its pyrolysis and combustion characteristics.

Key words: torrefaction treatment; tobacco waste; pyrolysis characteristics; kinetics; thermogravimetric analysis

[责任编辑: 王晓波 刘春奎]