

厨余沼渣与物流垃圾混合燃烧特性研究

叶海天¹, 张鹏飞², 卢骏营², 金则陈², 郑晓园^{1*}

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2025年4月3日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘要

厌氧消化是厨余垃圾处置的有效方法, 但面临沼渣消纳不畅的问题, 目前主要以掺烧为主。沼渣含水率高、灰分高、热值低, 易出现燃烧不稳定及结焦结渣问题。快递服务业的快速发展产生大量纸板和聚乙烯等快递物流垃圾, 回收价值低, 但热值高。因此, 厨余沼渣与快递物流垃圾混合燃烧是实现其能源化利用的重要方式。采用热重分析仪研究了沼渣和物流垃圾的混合燃烧特性和燃烧动力学。结果表明: 添加纸板和聚乙烯可以改善沼渣燃烧特性, 综合燃烧指数(CCI)是沼渣单独燃烧的8.3倍。纸板还能提高燃烧稳定指数 C_{st} , 纸板添加比为30%时, C_{st} 是沼渣单独燃烧的7.75倍, 聚乙烯添加比超过20%会导致燃尽温度提高约30℃。动力学计算表明, 沼渣和纸板能降低挥发分燃烧活化能, 而聚乙烯则提高了反应指前因子, 加速反应进行。沼渣、纸板和聚乙烯混合燃烧可以获得较好的燃烧特性, 可为城市有机固废协同处置提供理论参考。

关键词

聚乙烯, 纸板, 交互作用, 动力学, 混合燃烧

Co-Combustion Performance of Food Wastes-Derived Anerobic Digestates and Waste Logistics Packaging

Haitian Ye¹, Pengfei Zhang², Junying Lu², Zechen Jin², Xiaoyuan Zheng^{1*}

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Apr. 3rd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 叶海天, 张鹏飞, 卢骏营, 金则陈, 郑晓园. 厨余沼渣与物流垃圾混合燃烧特性研究[J]. 物理化学进展, 2025, 14(2): 274-284. DOI: 10.12677/japc.2025.142026

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is an effective method for treating food waste; however, the disposal of digestate remains a challenge, with co-combustion being the primary approach. Digestate has a high moisture content, high ash content, and low calorific value, making combustion unstable and prone to slagging and fouling. The rapid development of the express delivery industry has generated a large amount of low-value but high-calorific waste logistics packaging, primarily comprising cardboard (CB) and polyethylene (PE). The co-combustion of AD with waste logistics packaging holds significant potential as an efficient energy recovery strategy. In this study, thermogravimetric analysis (TGA) was employed to investigate the co-combustion characteristics, combustion kinetics. The results showed that adding CB and PE improved the combustion performance of digestate, with the comprehensive combustion index (CCI) being 8.3 times higher than that of digestate alone. CB also enhanced the combustion stability index (C_{si}), and at a 30% cardboard addition, C_{si} was 7.75 times higher than that of digestate alone. However, when the polyethylene ratio exceeded 20%, the burn-out temperature increased by approximately 30°C. Kinetic calculations revealed that digestate and cardboard reduced the activation energy of volatile matter combustion, while polyethylene increased the pre-exponential factor, accelerating the reaction. The blends of AD, CB, and PE have good combustion characteristics, this research providing reference for the collaborative disposal of food wastes-derived anerobic digestates and waste logistics packaging.

Keywords

Polyethylene, Cardboard, Interaction, Dynamics, Co-Combustion

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国从 2019 年开始实行强制垃圾分类,厨余垃圾分出量急剧增加。2021 年,厨余垃圾产量约为 1.27 亿吨[1]。厌氧消化因有机负荷高、占地少、周期短、环境影响小等优点,逐渐成为厨余垃圾主要的处理方式。厌氧消化过程通常会产生约 20%~47%的沼渣(AD) [2],主要由有机物、矿物质、微生物、碳水化合物、脂质和蛋白质组成[3]。由于沼渣含水率和灰分高,单独燃烧效率低,目前主要依托现有的垃圾焚烧设施进行[4]。随着互联网和电子商务的快速发展,快递服务业保持每年超过 20%增长速度[5],同时产生了大量的快递物流垃圾。据统计,2022 年快递物流垃圾产生量达到 2000 万吨[6]。其中,瓦楞纸板(以下简称纸板, CB)和塑料袋是其主要成分,分别占 46.5%和 30.4% [7],聚乙烯(PE)是塑料包装的主要组成[8],大约 5%~15%的纸板和 30%的塑料与城市生活垃圾掺烧[8]。塑料是一种高热值的燃料,回收潜力大[9]。但塑料的熔融性导致其在燃烧过程中会附着在燃烧器表面,影响燃烧效率和造成安全隐患[10]。而纸板是一种高挥发分、低灰分的优质燃料,在燃烧过程中易点火且燃烧速率快,在混合燃烧中添加纸板能改善燃烧特性,提高燃烧效率[11]。纸板、聚乙烯和沼渣协同处置有望减缓熔融塑料对燃烧设备的危害[12],提高处置效率。

沼渣含水率高,通常需要干化处理,干厨余沼渣热值约为 $23 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,有学者认为将低含水率、高热值的燃料与沼渣进行掺烧是改善燃烧特性、提高能源转化率的有效途径[13]。Guo 等通过 TG-FTIR 探究

聚丙烯添加对生物质燃料燃烧的影响，发现聚丙烯加快了点火过程，提高燃烧效率，提高综合燃烧指数(CCI) [14]。Guo 等用 CR 法研究生物质与烟煤、褐煤的混合燃烧，将燃烧过程分为挥发分的脱出、燃烧和固定碳的燃烧两个阶段[15]。在厨余沼渣和城市生活垃圾混合燃烧研究中发现，当沼渣占比为 90%时，活化能平均值最低，为 125.5 kJ·mol⁻¹ [16]，少量添加城市垃圾能克服沼渣的传热传质阻力。此外，沼渣与可燃垃圾混合燃烧时能降低挥发分燃烧阶段的活化能[17]。目前，有关沼渣的混合燃烧研究主要集中于城市生活垃圾，与生活垃圾混合燃烧可以利用现有垃圾焚烧设施，降低运行和建设成本[18]。但是，厨余沼渣和城市生活垃圾的高灰分会导致燃烧过程中严重的结渣、结焦问题[1]。快递物流垃圾中的聚乙烯和纸板具有低灰分、高热值的特性，沼渣和快递物流垃圾的混合燃烧有望改善燃烧特性同时减少结渣、结焦现象的出现。因此，研究混合燃烧特性、燃烧动力学可为构建厨余厌氧沼渣和快递物流垃圾高效、稳定协同焚烧设施提供理论参考。

2. 实验装置与方法

2.1. 实验材料

实验所用沼渣来自上海市某环保基地，纸板和聚乙烯通过网购获得。将原料于 105℃鼓风干燥箱中烘干至恒重，研磨筛分至 60~200 目，按照设定的比例混合，充分搅拌后置于塑封袋内保存备用。实验中根据沼渣-纸板-聚乙烯的质量分数对混合燃料进行命名，例如，0.5-0.3-0.2 表示该混合燃料中，沼渣、纸板和聚乙烯占混合燃料质量的 50%，30%和 20%。沼渣、纸板和聚乙烯的工业分析、元素分析如表 1 所示。将样品置于马弗炉中 550℃下灼烧 2 h 制得沼渣、纸板的灰样，采用 X 射线荧光光谱分析法(XRF)测定灰样中的元素组成，XRF 分析结果如表 2 所示。

Table 1. Industrial and elemental analysis results
表 1. 工业、元素分析结果

样品	工业分析				
	M _{ar} /%	A _d /%	V _d /%	FC _d /%*	Q _{net,d} (J/g)
沼渣	69.99	48.04	46.72	5.25	7413
纸板	7.71	12.56	75.87	11.57	14302
聚乙烯	0.03	-	99.99	0.01	43552

样品	元素分析					
	C _d /%	H _d /%	N _d /%	S _d /%	O _d /%*	C _i /%
沼渣	26.27	2.61	2.59	0.42	20.08	0.48
纸板	41.82	4.30	0.63	0.94	39.74	0.14
聚乙烯	86.11	10.47	0.59	2.81	0.02	0.04

: 固定碳，% = 100 - 水分 - 灰分 - 挥发分，: O，% = 100 - 水分 - 灰分 - C-H-N-S。

Table 2. XRF analysis results
表 2. 灰渣 XRF 分析结果

样品	w (Na ₂ O)	w (MgO)	w (Al ₂ O ₃)	w (SiO ₂)	w (P ₂ O ₅)	w (SO ₃)	w (K ₂ O)	w (CaO)	w (TiO ₂)	w (Fe ₂ O ₃)
沼渣	2.64	1.5	6.8	8.53	11.53	2.7	1.35	60.92	0.16	2.39
纸板	1.49	3.48	11.35	17.64	0.428	1.74	0.521	58.91	1.34	2.65

2.2. 热重分析

采用 Netzsch TG 209 F3 Tarsus 型热重分析仪(TGA)对沼渣、纸板和聚乙烯的燃烧特性进行研究, 空气气氛, 流速设置为 $80 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, 温度范围为 30°C 至 900°C , 升温速率为 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。每次实验取约 10 mg 样品, 记录升温过程中样品质量的变化规律。

采用着火温度(T_i)、燃尽温度(T_h)来表征样品的燃烧特性[18]。着火温度越低, 表明样品的着火性能越好; 燃尽温度越低, 表明燃尽性能越好。着火温度通过 TG-DTG 切线法确定[19], 燃尽温度定义为样品转化率达到 98%时的温度。峰值温度(T_p)是 DTG 曲线中最大质量损失速率点对应的温度。此外, 进一步引入综合燃烧指数(CCI)和燃烧稳定指数(C_{si})作为燃烧特性的评价参数, 分别由式(1)和式(2)计算得到[20]

$$CCI = \frac{(dw/dt)_{\max} \times (dw/dt)_a}{T_i^2 T_h} \quad (1)$$

$$C_{si} = 8.5875 \times 10^7 \times \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_i T_{\max}} \quad (2)$$

其中, $(dw/dt)_{\max}$ 和 $(dw/dt)_a$ 分别代表燃烧过程中最大失重速率和平均失重速率, $\% \cdot \text{min}^{-1}$; $T_{\max}$ 代表最大失重速率峰处所对应的燃烧温度, $^\circ\text{C}$ 。

2.3. 燃烧动力学分析方法

采用 Coats-Redfern 方法来确定反应机理[21]。CR 法的燃烧过程可以用式(3)表示

$$\ln \left[\frac{g(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

其中, α 是转化率; T 是热力学温度, K; β 是升温速率, $\beta = 10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$; A 是指前因子, min^{-1} ; E 是活化能, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为摩尔气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

由于生物质类燃料的燃烧活化能 E 通常很大, 取 $1 - 2RT/E \approx 1$ 。活化能 E 和指前因子 A 可以通过拟合直线的斜率和截距计算得到。燃烧反应通常被描述为化学反应, 可以根据拟合结果确定最佳反应级数 n [22]。

2.4. 交互作用分析

通过分析理论和实验 TG 曲线的相对误差来评价混合燃烧过程可能存在的交互作用, 理论 TG 曲线和相对误差 ΔTG 分别通过式(4)和式(5)确定[23]。其中, $\Delta TG < 0$, 表明交互作用促进混合燃烧过程。

$$TG_{\text{cal}} = (xTG_{\text{AD}}) + (yTG_{\text{CB}}) + (zTG_{\text{PE}}) \quad (4)$$

$$\Delta TG = \frac{TG_{\text{exp}} - TG_{\text{cal}}}{TG_{\text{exp}}} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, x , y 和 z 分别代表混合物中沼渣、纸板和聚乙烯混合比, $x + y + z = 1$; TG_{SS} , TG_{SD} 和 TG_{PE} 分别是沼渣、纸板和聚乙烯实验 TG 曲线; TG_{exp} 和 TG_{cal} 分别代表混合燃料的实验和理论失重量。

通过比较理论 CCI 和实验 CCI 的相对误差, 量化不同成分间产生的交互作用对混合燃烧性能的影响, 式(6)是理论 CCI 的计算方程[24]:

$$CCI_{\text{cal}} = (xCCI_{\text{AD}}) + (yCCI_{\text{CB}}) + (zCCI_{\text{PE}}) \quad (6)$$

式(6)中, CCI_{AD} , CCI_{CB} 和 CCI_{PE} 分别代表沼渣、纸板和聚乙烯单独燃烧所得实验 CCI 值。

3. 结果与讨论

3.1. 燃烧特性

图 1 展示了升温速率为 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 空气氛围下沼渣、纸板和聚乙烯的热分解过程。其中, 沼渣和纸板的燃烧过程由四个阶段组成, 分别是: 1) 水分蒸发($30^{\circ}\text{C}\sim 186^{\circ}\text{C}$), 由于本实验中对样品进行预干燥处理, 该阶段的峰值较低; 2) 挥发分的释放和燃烧($186^{\circ}\text{C}\sim 373^{\circ}\text{C}$), 这一阶段出现的失重峰与沼渣和纸板中的纤维、半纤维素的释放与燃烧有关, 这些物质具有多糖的支链结构, 在燃烧过程中容易被释放[25]; 3) 焦炭燃烧($373^{\circ}\text{C}\sim 628^{\circ}\text{C}$); 4) 无机物热分解和碱土金属($628^{\circ}\text{C}\sim 806^{\circ}\text{C}$)的释放。石灰作为缓冲剂被广泛地用于厌氧消化过程中[26]。在沼渣燃烧残余灰分中观察到大量的 Ca 元素(表 2), 主要以 CaCO_3 形式存于沼渣中[27]。沼渣和纸板的燃烧行为与典型生物质类似[28]。厌氧消化后大量多糖和木质素保留在沼渣中[29]。聚乙烯的热分解过程略有不同, 挥发分高, 在 $240^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 区间内迅速释放, 造成急剧失重[30]。在 $500^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 出现的失重峰可能是聚乙烯固相热解产物的燃烧导致[20]。样品的燃烧特性参数如图 2 和图 3 所示, 相对于沼渣, 纸板和聚乙烯具有更好的燃烧特性参数, 是更优质的燃料。沼渣燃烧特性差且燃烧过程不稳定。

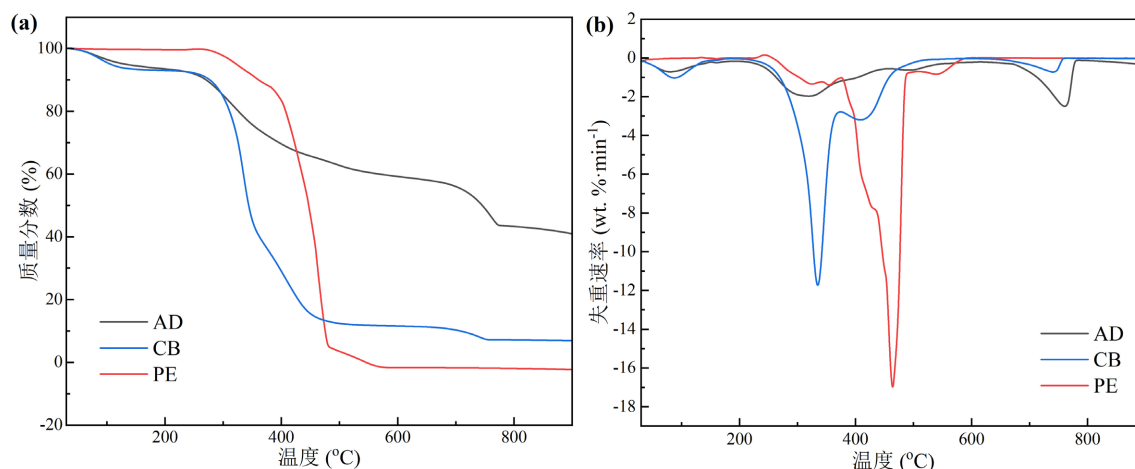


Figure 1. TG-DTG of AD, CB, and PE

图 1. 沼渣、纸板和聚乙烯 TG-DTG 曲线

3.1.1. 纸板混合比

图 2 展示了纸板混合比对燃烧特性的影响。从图 2(a)中可知, 当未添加纸板时, 在 $385^{\circ}\text{C}\sim 580^{\circ}\text{C}$ 范围内, 出现两个失重峰; 而在沼渣、纸板和聚乙烯混合燃烧中两个失重峰合并, 在燃烧的过程中, 首先发生半纤维素的分解, 然后是纤维素, 最后是木质素[31], 高热值成分的掺入使木质素分解的提前发生, 与纤维素分解的峰难以区分。在 580°C 以上的无机物分解段, T_b 随纸板混合比上升呈现出先升后降的趋势, 沼渣在这一阶段的 T_p 要低于纸板, 高沼渣含量混合燃料中无机物在更低的温度分解, 而纸板热值高于沼渣, 燃烧释放的热量会加速无机物分解, 高纸板添加比的混合燃料具有更快的分解速度, 两种作用共同影响造成了这一变化。 ΔTG 热力图(图 2(b))表明, 沼渣、纸板和聚乙烯混合燃烧过程中呈现出强烈的交互作用, 在整个挥发分释放和燃烧阶段促进反应进行。在固定碳燃烧阶段和无机物分解阶段, 仅当纸板添加比为 10% 时表现为抑制, 随添加比上升转变为促进燃烧。值得注意的是, 混合比为 0.8-0.0-0.2 时 C_{si} 值最低, 为 $2801.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-2}$ (图 2(a)), 表明沼渣和聚乙烯混合燃烧过程稳定性较低, 掺入纸板后, C_{si} 提高, 燃烧稳定性得到改善。综合以上考虑, 纸板添加比大于 20% 更利于稳定和促进燃烧, 图 2(c)中 CCI

实验值和理论值的对比也证实了这一观点, 纸板添加比为 30% 时, 混合燃料具有最高 CCI 值, 为 $18.5 \times 10^8 \text{ g}^2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{C}^{-2}$, 且高于理论值。

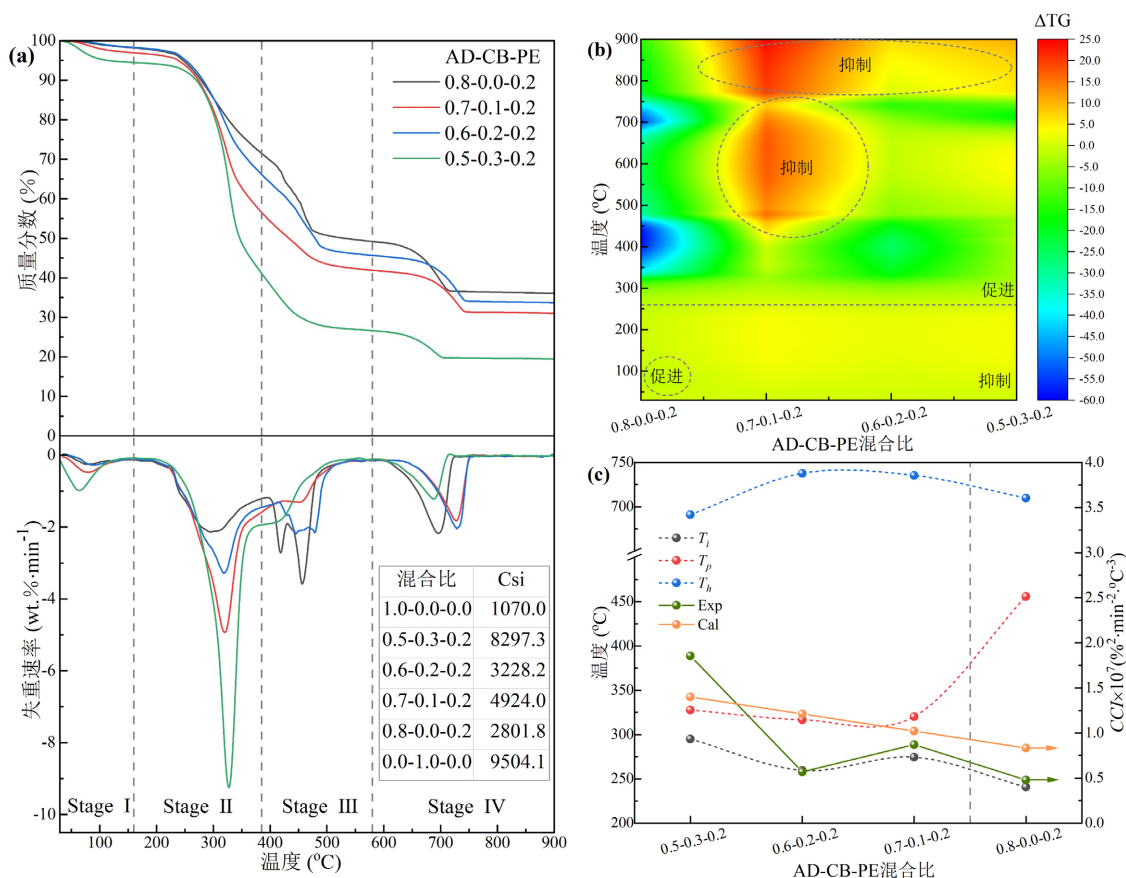


Figure 2. The effect of CB blending ratio on combustion characteristics

图 2. 纸板混合比对燃烧特性的影响

3.1.2. 聚乙烯混合比

图 3 展示了聚乙烯混合比对燃烧特性的影响。从图 3(a) 中发现, 混合燃烧 DTG 曲线峰与沼渣和纸板单独燃烧时各峰的温度区间保持一致, 表明在混合燃烧过程中沼渣、纸板保持了各自的燃烧行为。图 3(b) 的 ΔTG 热力图表明, 除脱水阶段外, 在整个混合燃烧过程中都表现为促进燃烧的作用, 在 400°C 附近的挥发分燃烧段和 700°C 附近的无机物分解段的促进作用较强, 由图 1(b) 可知, 聚乙烯挥发分释放峰值在 460°C; 在混合燃烧时, 沼渣和纸板的挥发分首先释放并燃烧, 放出的热量使聚乙烯挥发分释放提前, 而高热值的聚乙烯燃烧加快了燃烧反应速度。聚乙烯改善燃烧特性主要体现在着火特性、燃烧特性和综合燃烧指数的提升三个方面[30]。但根据本文的实验结果, 聚乙烯的添加量不宜过高。从图 3(c) 可以看出, 添加 30% 聚乙烯会导致无机物分解延后, T_h 提高约 30°C, 燃尽延后对 CCI 造成影响, 比较理论 CCI 和实验值可知, 仅在混合比为 0.4-0.3-0.3 时, 实验值低于理论值, 聚乙烯添加比小于 20% 可以有效改善燃烧特性。

3.2. 动力学特性

如表 3 所示是沼渣、纸板和聚乙烯及其混合燃料的燃烧动力学参数。根据决定系数 R^2 确定最佳反应

模型和反应级数, R^2 越接近 1 则越匹配。在大部分工况下, 采用化学反应级数模型描述燃烧过程时决定系数 R^2 均大于 0.97, 且大部分大于 0.99, 表明计算的可信度极高。采用一维扩散模型描述聚乙烯单独燃烧过程, R^2 为 0.983。在各样品单独燃烧时, 聚乙烯挥发分最高, 且根据 TG-DTG 曲线可知, 聚乙烯挥发分释放温度更高。因此, 在挥发分释放阶段, 它的活化能最高, 达到了 $136.71 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。而相对于纸板, 沼渣虽然固定碳含量低, 灰分含量却远高于纸板, 在固定碳燃烧阶段的活化能更高, 为 $269.53 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 指前因子较低, 灰分增加了燃烧阻力, 氧气向颗粒内部扩散和反应产物向外扩散受到阻碍[32]。沼渣需要更多的能量维持燃烧, 同时燃烧反应速率慢。而无机成分热分解过程, 纸板的指前因子大于沼渣, 纸板的指前因子大于沼渣, 纸板中无机物分解速度快, 分解持续时间短。

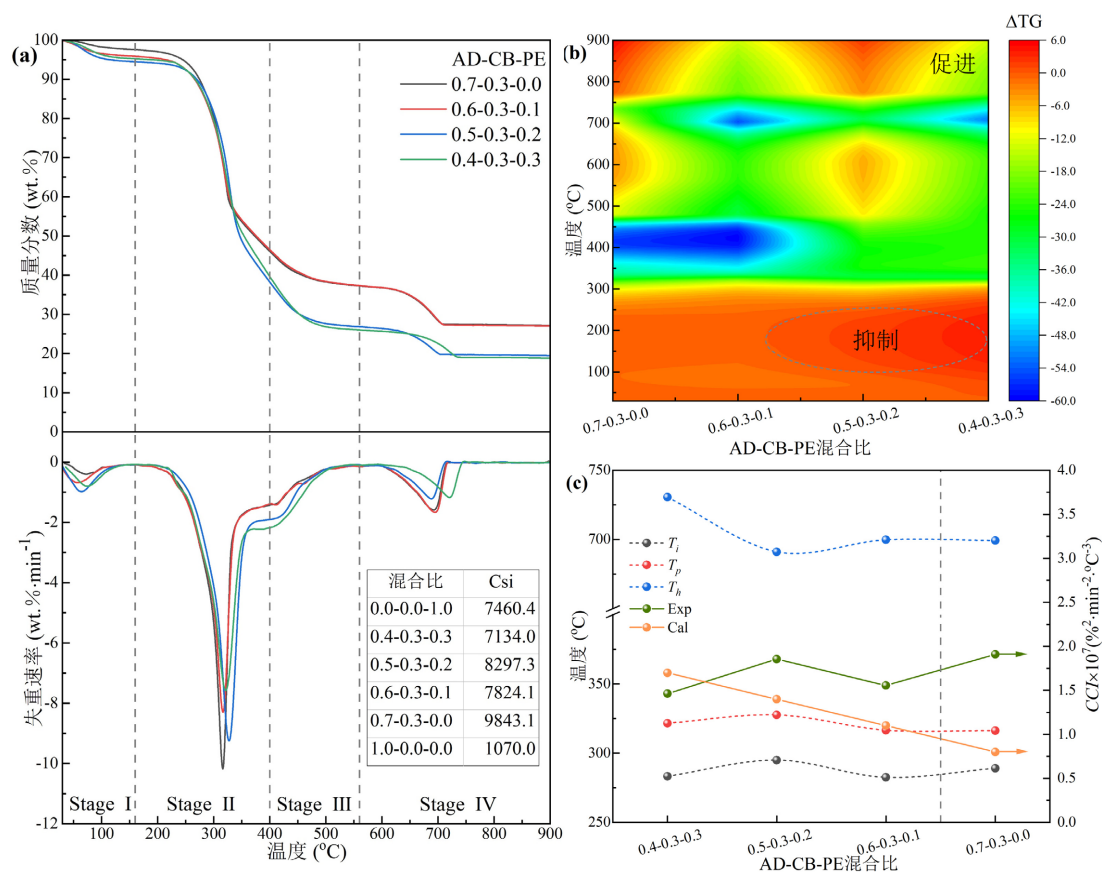


Figure 3. The effect of PE blending ratio on combustion characteristics
图 3. 聚乙烯混合比对燃烧特性的影响

Table 3. Calculation of activation energy and pre-exponential factor for SS-SD-PE
表 3. 沼渣 - 纸板 - 聚乙烯燃烧活化能及指前因子计算

样品	模型	温度区间	拟合方程	$E \text{ (kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$A \text{ (min}^{-1})$	R^2
0.0-0.0-1.0	D1	249~611	$y = -16443.9x + 7.66$	136.71	3.50×10^8	0.983
0.4-0.3-0.3	F3.5	188~570	$y = -15246.5x + 12.98$	126.76	6.62×10^{10}	0.991
	F1	570~746	$y = -28945.7x + 15.86$	240.65	1.87×10^{12}	0.976
0.5-0.3-0.2	F3.5	210~560	$y = -17848.4x + 17.26$	148.39	5.59×10^{12}	0.987
	F1	560~710	$y = -30404.6x + 18.23$	252.78	2.52×10^{13}	0.984

续表

0.6-0.3-0.1	F3.5	165~562	$y = -15510.2x + 13.97$	128.95	1.81×10^{11}	0.984
	F1	562~720	$y = -31875.3x + 19.59$	265.01	1.03×10^{14}	0.992
0.7-0.3-0.0	F3.5	186~545	$y = -16643.5x + 15.93$	138.37	1.38×10^{12}	0.976
	F1	545~714	$y = -29820.8x + 17.53$	247.93	1.23×10^{13}	0.989
1.0-0.0-0.0	F2	186~463	$y = -8701.5x + 1.54$	72.34	4.05×10^5	0.998
	F3.5	463~628	$y = -32418.5x + 28.13$	269.53	5.34×10^{17}	0.994
	F1	628~806	$y = -30513.7x + 15.44$	253.69	1.56×10^{12}	0.977
0.5-0.3-0.2	F3.5	210~560	$y = -17848.4x + 17.26$	148.39	5.59×10^{12}	0.987
	F1	560~710	$y = -30404.6x + 18.23$	252.78	2.52×10^{13}	0.984
0.6-0.2-0.2	F1.5	161~410	$y = -8621.4x + 1.64$	71.68	4.45×10^5	0.998
	F2	410~595	$y = -28425.2x + 25.64$	236.33	3.87×10^{16}	0.997
	F1	595~759	$y = -34339.6x + 20.78$	285.50	3.62×10^{14}	0.984
0.7-0.1-0.2	F3.5	175~580	$y = -12957.2x + 9.20$	107.73	1.29×10^9	0.994
	F1	580~764	$y = -31538.2x + 18.02$	262.21	2.10×10^{13}	0.977
0.8-0.0-0.2	F1.5	163~396	$y = -8074.9x + 1.00$	67.13	2.19×10^5	0.998
	F1.5	396~559	$y = -24724.7x + 20.10$	205.56	3.25×10^{14}	0.984
	F1	559~732	$y = -31926.1x + 19.44$	265.43	8.87×10^{13}	0.985
0.0-1.0-0.0	F1	235~380	$y = -14981.3x + 11.43$	124.55	1.37×10^{10}	0.996
	F2.5	380~605	$y = -28097.1x + 28.01$	233.60	4.09×10^{17}	0.998
	F1	605~770	$y = -33607.5x + 19.74$	279.41	1.25×10^{14}	0.989

3.2.1. 聚乙烯混合比

选取 0.4-0.3-0.3、0.5-0.3-0.2、0.6-0.3-0.1、0.7-0.3-0.0 作为分析聚乙烯添加比对燃烧动力学的影响对比组。各混合燃料在阶段 1 的反应级数均大于单独燃烧，添加聚乙烯使得挥发分析出、燃烧和固定碳得燃烧阶段逐渐合并，聚乙烯单独燃烧时脱挥发分和燃烧的温度区间与沼渣、纸板单独燃烧时固定碳燃烧区间存在重叠(图 1)，该过程中包含更多反应步骤，燃烧反应更为复杂。在混合比为 0.4-0.3-0.3 和 0.6-0.3-0.1 时，挥发分释放和燃烧阶段反应活化能低于聚乙烯单独燃烧，燃烧反应更容易进行。而混合比为 0.5-0.3-0.2 时具有最大的指前因子，燃烧反应性不仅受到活化能影响，还收到指前因子影响，相同活化能下有效碰撞次数越多，反应性越好，即补偿效应[33]。在高温燃烧阶段，主要涉及无机物分解。随着聚乙烯比例升高，活化能(265.01~240.65 kJ·mol⁻¹)和指前因子降低(1.03×10^{14} ~ 1.87×10^{12} min⁻¹)，聚乙烯降低燃烧活化能的作用在聚乙烯和生物质的混合燃烧实验中已有报导[14]，聚乙烯的高热值使无机物分解更容易进行，而无机物含量减少使分解速率降低。混合比为 0.4-0.3-0.3 时，两个阶段反应活化能最低，此时的混合燃烧显著改善燃烧特性[34]。这表明，增加聚乙烯有助于无机成分分解，而增加沼渣则有利于挥发分释放。

3.2.2. 纸板混合比

选取 0.5-0.3-0.2、0.6-0.2-0.2、0.7-0.1-0.2、0.8-0.0-0.2 作为分析聚乙烯混合比对燃烧动力学的影响对比组。混合比为 0.6-0.2-0.2 和 0.8-0.0-0.2 的工况下呈现出三个反应阶段，且脱挥发分阶段活化能低于各

组分单独燃烧,混合燃烧改善了该阶段的燃烧特性,指前因子与沼渣单独燃烧时处于同一数量级,沼渣添加比增加使得混合燃烧的脱挥发分速率更贴近沼渣单独燃烧。随着纸板增加,固定碳燃烧阶段活化能上升,指前因子上升(0.8-0.0-0.2 与 0.6-0.2-0.2, 0.7-0.1-0.2 与 0.5-0.3-0.2 相比),表明随纸板混合比上升,固定碳燃烧需要更多能量,但反应活性增强。在无机物高温分解阶段,混合燃料的活化能大多高于沼渣单独燃烧,纸板抑制了这一阶段的燃烧反应,这一现象与 ΔTG 热力图(图 2(b))一致。总体来看,沼渣和纸板有助于降低挥发分的燃烧活化能,这可能是由不同组分挥发分之间的相互作用引起的[35]。而聚乙烯能提高脱挥发分和燃烧阶段的反应速率。聚乙烯能有效降低反应活化能,塑料中甲基自由基和生物质中挥发分相互作用促进燃烧过程生成轻碳氢化合物,使燃烧反应易于进行[36]。

4. 结论

本文利用热重分析仪研究了纸板和聚乙烯混合比对沼渣混合燃烧特性和动力学的影响,得到如下结论:

1) 添加瓦楞纸板和聚乙烯可以改善沼渣燃烧特性的作用,主要表现在挥发分释放、燃烧阶段和固定碳燃烧阶段。纸板在提高燃烧稳定性上发挥关键作用,能有效提高燃烧过程 C_{si} , 建议添加 30%以上的纸板。聚乙烯燃烧的高放热量会加速前期的燃烧,但超过 20%的添加量会导致无机物分解延后,燃料在更高的 T_h 达到燃尽。

2) 动力学计算结果证明,沼渣和纸板有助于降低挥发分的燃烧活化能,而聚乙烯能提高脱挥发分和燃烧的指前因子,加速反应,纸板提高固定碳燃烧和无机物分解的反应活化能,而聚乙烯能降低无机物分解的反应活化能,使热分解反应易于进行。

本文通过对沼渣-纸板-聚乙烯混合燃烧的研究,为沼渣与物流垃圾混合燃烧处置的工业应用提供了理论支持。但在本文的研究中,以纸板和聚乙烯作为物流垃圾的模化物,事实上,物流垃圾的成分和性质是复杂多变的,在后续的实验中应进一步开展沼渣和物流垃圾实物的混合燃烧实验,或者进一步开展中试规模的焚烧实验,以验证模化物实验结果的可行性。

基金项目

上海市住房与城乡建设管理委员会科研项目(沪建科 2022-002-001)。

参考文献

- [1] 邹骑鸿, 余昭胜, 韦琛, 等. 厨余沼渣与城市生活垃圾混合燃烧过程的灰熔融特性[J]. 环境工程, 2023, 41(5): 69-74, 178.
- [2] Ren, Y., Yu, M., Wu, C., Wang, Q., Gao, M., Huang, Q., et al. (2018) A Comprehensive Review on Food Waste Anaerobic Digestion: Research Updates and Tendencies. *Bioresource Technology*, **247**, 1069-1076. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>
- [3] Cesaro, A. (2021) The Valorization of the Anaerobic Digestate from the Organic Fractions of Municipal Solid Waste: Challenges and Perspectives. *Journal of Environmental Management*, **280**, Article ID: 111742. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111742>
- [4] Chen, T., Qiu, X., Feng, H., Yin, J. and Shen, D. (2021) Solid Digestate Disposal Strategies to Reduce the Environmental Impact and Energy Consumption of Food Waste-Based Biogas Systems. *Bioresource Technology*, **325**, Article ID: 124706. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124706>
- [5] Zhang, S., Hou, H., Wang, G., Yao, Y., Zhang, Y. and Xu, H. (2024) Exploring the Metabolic Characteristic of Express Packaging Waste to Promote the Synergy of Pollution and Carbon Reduction. *Environmental Impact Assessment Review*, **106**, Article ID: 107523. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107523>
- [6] Huang, S., Wang, M., Dai, Y., Deng, C., Xue, S., Qiu, F., et al. (2025) Waste to Treasure: Upcycling Waste Express Packing to Sustainable Packaging Materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 115016. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115016>

- [7] Duan, H., Song, G., Qu, S., Dong, X. and Xu, M. (2019) Post-Consumer Packaging Waste from Express Delivery in China. *Resources, Conservation and Recycling*, **144**, 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.037>
- [8] 程辉. 塑料快递包装引发的环境问题与应对措施[J]. 塑料助剂, 2022(3): 71-74.
- [9] Chen, Y., Awasthi, A.K., Wei, F., Tan, Q. and Li, J. (2021) Single-use Plastics: Production, Usage, Disposal, and Adverse Impacts. *Science of the Total Environment*, **752**, Article ID: 141772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>
- [10] Burgess, F., Lloyd, P.D.W., Fennell, P.S. and Hayhurst, A.N. (2011) Combustion of Polymer Pellets in a Bubbling Fluidised Bed. *Combustion and Flame*, **158**, 1638-1645. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.12.027>
- [11] Glushkov, D.O., Paushkina, K.K. and Shabardin, D.P. (2020) Co-Combustion of Coal Processing Waste, Oil Refining Waste and Municipal Solid Waste: Mechanism, Characteristics, Emissions. *Chemosphere*, **240**, Article ID: 124892. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124892>
- [12] Liu, M., Han, B., Bai, J., Ru, J., Wang, X., Xing, L., *et al.* (2025) Investigation on the Synergistic Effects and Thermo-kinetic Analyses during Co-Combustion of Corn Stalk and Polyethylene Plastic: Effect of Heating Rate and Placement Method. *Fuel*, **385**, Article ID: 134032. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134032>
- [13] 胡世梯, 姚赛, 易志刚, 等. 餐厨垃圾厌氧沼渣处理及资源化利用研究进展[J]. 四川环境, 2023, 42(4): 366-372.
- [14] Guo, S., Deng, X., Liu, L., Ge, L. and Lisak, G. (2024) Comprehensive Analysis of Combustion Behavior, Kinetics, and Gas Emissions of Fungus Bran Biofuel through Torrefaction Pretreatment and Polypropylene Addition. *Fuel*, **364**, Article ID: 131014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131014>
- [15] Guo, F., He, Y., Hassanpour, A., Gardy, J. and Zhong, Z. (2020) Thermogravimetric Analysis on the Co-Combustion of Biomass Pellets with Lignite and Bituminous Coal. *Energy*, **197**, Article ID: 117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>
- [16] 韦琛. 厨余沼渣与城市生活垃圾混合燃烧过程的特性[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [17] 拜苏平. 可燃垃圾与餐厨沼渣的燃烧特性及排放特性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
- [18] Wei, C., Yu, Z., Zhang, X. and Ma, X. (2021) Co-combustion Behavior of Municipal Solid Waste and Food Waste Anaerobic Digestates: Combustion Performance, Kinetics, Optimization, and Gaseous Products. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article ID: 106028. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106028>
- [19] Zhang, Y., Tang, Y., Tang, J., Wang, S. and Ma, X. (2022) A Study on the Co-Combustion of Excavated Waste and Municipal Solid Waste: Thermogravimetric Characteristics and Gaseous Pollutants Emission. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, Article ID: 108964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108964>
- [20] Xinjie, L., Singh, S., Yang, H., Wu, C. and Zhang, S. (2021) A Thermogravimetric Assessment of the Tri-Combustion Process for Coal, Biomass and Polyethylene. *Fuel*, **287**, Article ID: 119355. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119355>
- [21] Zheng, C., Ma, X., Yao, Z. and Chen, X. (2019) The Properties and Combustion Behaviors of Hydrochars Derived from Co-Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge and Food Waste. *Bioresource Technology*, **285**, Article ID: 121347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121347>
- [22] Zhou, C., Liu, G., Fang, T. and Lam, P.K.S. (2015) Investigation on Thermal and Trace Element Characteristics during Co-Combustion Biomass with Coal Gangue. *Bioresource Technology*, **175**, 454-462. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.129>
- [23] Wang, Y., Jia, L., Guo, B., Shen, X., Zheng, X., Xiang, J., *et al.* (2022) Investigation of Interaction Mechanisms during Co-Combustion of Sewage Sludge and Coal Slime: Combustion Characteristics and NO/SO₂ Emission Behavior. *Science of the Total Environment*, **851**, Article ID: 158166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158166>
- [24] Wang, Y., Liao, Y., Chen, Y., Bin, Y. and Ma, X. (2022) Co-combustion of Coal and Composite Board Sawdust: Combustion Behaviors, Ash Slagging Characteristics, and Gaseous Pollutant Emissions and Control. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 27159-27173. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03481-2>
- [25] Liu, H., Zhang, S., Feng, S., Jia, C., Guo, S., Sun, B., *et al.* (2020) Combustion Characteristics and Typical Pollutant Emissions of Corn Stalk Blending with Municipal Sewage Sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 9792-9805. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11463-y>
- [26] Zhang, J., Wang, Q., Zheng, P. and Wang, Y. (2014) Anaerobic Digestion of Food Waste Stabilized by Lime Mud from Papermaking Process. *Bioresource Technology*, **170**, 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.003>
- [27] Feng, Y., Bu, T., Zhang, Q., Han, M., Tang, Z., Yuan, G., *et al.* (2022) Pyrolysis Characteristics of Anaerobic Digestate from Kitchen Waste and Availability of Phosphorus in Pyrochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **168**, Article ID: 105729. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105729>
- [28] Hu, J., Yan, Y., Song, Y., Liu, J., Evrendilek, F. and Buyukada, M. (2020) Catalytic Combustions of Two Bamboo Residues with Sludge Ash, CaO, and Fe₂O₃: Bioenergy, Emission and Ash Deposition Improvements. *Journal of Cleaner Production*, **270**, Article ID: 122418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122418>

-
- [29] Santi, G., Proietti, S., Moscatello, S., Stefanoni, W. and Battistelli, A. (2015) Anaerobic Digestion of Corn Silage on a Commercial Scale: Differential Utilization of Its Chemical Constituents and Characterization of the Solid Digestate. *Biomass and Bioenergy*, **83**, 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.018>
- [30] Ding, Z., Chen, Z., Liu, J., Evrendilek, F., He, Y. and Xie, W. (2022) Co-Combustion, Life-Cycle Circularity, and Artificial Intelligence-Based Multi-Objective Optimization of Two Plastics and Textile Dyeing Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, **426**, Article ID: 128069. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128069>
- [31] Mao, W., Li, J., Yang, Y., Huang, B., Xu, S. and Gu, L. (2024) Co-Combustion of Organic Industrial and Municipal Solid Wastes in Shanghai: Evaluation Based on Energy Recovery, Thermal Behavior and Gases Pollutants Emissions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 114917. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114917>
- [32] 廖艳芬, 马晓茜. 城市污水污泥燃烧特性和动力学特性分析[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(3): 296-301.
- [33] Wang, Q., Wang, G., Zhang, J., Lee, J., Wang, H. and Wang, C. (2018) Combustion Behaviors and Kinetics Analysis of Coal, Biomass and Plastic. *Thermochimica Acta*, **669**, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.016>
- [34] Liang, W., Jiang, C., Wang, G., Ning, X., Zhang, J., Guo, X., *et al.* (2022) Research on the Co-Combustion Characteristics and Kinetics of Agricultural Waste Hydrochar and Anthracite. *Renewable Energy*, **194**, 1119-1130. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.157>
- [35] Galina, N.R., Romero Luna, C.M., Arce, G.L.A.F. and Ávila, I. (2019) Comparative Study on Combustion and Oxy-Fuel Combustion Environments Using Mixtures of Coal with Sugarcane Bagasse and Biomass Sorghum Bagasse by the Thermogravimetric Analysis. *Journal of the Energy Institute*, **92**, 741-754. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.02.008>
- [36] Boumanchar, I., Chhiti, Y., M'hamdi Alaoui, F.E., Elkhoulakhi, M., Sahibed-Dine, A., Bentiss, F., *et al.* (2019) Investigation of (Co)-Combustion Kinetics of Biomass, Coal and Municipal Solid Wastes. *Waste Management*, **97**, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.033>