

DOI: 10.19666/j.rlfed.202407184

污泥水热炭与生活垃圾混燃特性和交互作用研究

齐佳楠, 张瑛华, 蓝海鹏, 刘海威
(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 为考察掺混比例对污泥水热炭和生活垃圾混燃特性的影响规律, 揭示 2 种物料混燃的交互作用, 利用热重分析仪测试污泥水热炭、生活垃圾以及混合样品的燃烧特性, 并采用 Coats-Redfern 法对样品的燃烧动力学特性进行分析。基于混合样品实际燃烧特性与理论燃烧特性的差异, 揭示 2 种物料混燃过程中的交互作用。研究结果表明: 随着污泥水热炭掺混比例的增加, 混合样品的着火温度和燃尽温度降低, 但样品的燃烧速率也随之下落, 导致综合燃烧特性指数减小; 污泥水热炭的掺混比例从 0 增加到 80%, 样品的综合燃烧特性指数减小 71.8%; 污泥水热炭掺混比例的增加使混合样品挥发分燃烧阶段的活化能减小, 而焦炭燃烧阶段的活化能增加; 污泥水热炭与生活垃圾混燃存在显著的交互作用, 对挥发分的燃烧起到抑制作用; 在污泥水热炭掺混比例 20%~80%, 交互作用使混合物综合燃烧特征指数平均降低 12.9%。该结论可为生活垃圾焚烧厂掺烧污泥水热炭的工况调控以及 ACC 自控系统的设计, 提供数据参考和理论依据。

[关键词] 污泥水热炭; 生活垃圾; 混燃; 动力学; 交互作用

[引用本文格式] 齐佳楠, 张瑛华, 蓝海鹏, 等. 污泥水热炭与生活垃圾混燃特性和交互作用研究[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 154-160. QI Jianan, ZHANG Yinghua, LAN Haipeng, et al. Co-combustion characteristics and interaction of sludge hydrothermal carbon and municipal solid waste[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 154-160.

Co-combustion characteristics and interaction of sludge hydrothermal carbon and municipal solid waste

QI Jianan, ZHANG Yinghua, LAN Haipeng, LIU Haiwei
(China Enfi Engineering Group, Beijing 100038, China)

Abstract: To investigate the effect of blending ratio on co-combustion characteristics of sludge hydrothermal carbon and municipal solid waste, and reveal the interaction between the two materials, thermogravimetric analyzer is used to test the combustion characteristics of sludge hydrothermal carbon, municipal solid waste and mixed samples. The combustion kinetics of the samples were analyzed by Coats-Redfern method. Based on the difference between the experimental combustion characteristics and the theoretical combustion characteristics of the mixed samples, the interactions between the two materials was revealed. The results showed that, the ignition temperatures and burnout temperatures of the mixed samples decreased with the increase of sludge hydrothermal carbon blending ratio, but the combustion rate also decreased, resulting in a decrease of the comprehensive combustion characteristic index. As the blending ratio of sludge hydrothermal carbon increased from 0% to 80%, the comprehensive combustion characteristic index of mixed sample decreased by 71.8%. With the increase of sludge hydrothermal carbon blending ratio, the activation energy of volatile combustion stage decreased, while the activation energy of char combustion stage increased. There was a significant interaction between sludge hydrothermal carbon and municipal solid waste, which can inhibit the combustion of volatiles. In the blending

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 中国中冶重大研发项目 (YG2320)

Supported by: Major Research Project of China Metallurgical Group Corporation (YG2320)

第一作者简介: 齐佳楠 (1994), 男, 博士, 主要研究方向为有机固废处理和资源化利用技术, qijn@enfi.com.cn.

通信作者简介: 刘海威 (1968), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为垃圾焚烧发电与烟气净化技术, liuhw@enfi.com.cn.

ratio range of 20%~80%, the comprehensive combustion characteristic index of the mixture decreased by 12.9% on average. The research results can provide data reference and theoretical basis for the control of the working condition and the design of ACC automatic control system in the municipal solid waste incineration plant.

Key words: sludge hydrothermal carbon; municipal solid waste; co-combustion; combustion kinetics; interaction

随着环保意识的不断加强, 市政污泥的处置受到越来越多关注, 其资源化利用也成为减少对化石能源依赖程度的新兴手段^[1]。水热碳化是一种可直接利用污泥等高含水率废弃物的清洁转化技术^[2-3]。在水热碳化过程中, 污泥发生水解、脱羟基、脱碳酸基、聚合以及芳构化等反应, 可改善污泥脱水性能, 提高燃料品质, 降低有害元素的含量^[4-5]。水热碳化在污泥的减量化和能源化应用方面体现出较大优势^[6]。

近年来我国生活垃圾焚烧厂协同处置其他有机固体废弃物的理念越来越受到认可^[7], 在当前生活垃圾分类和源头减量背景下, 为补充焚烧处理量, 越来越多焚烧厂进行服务区域内其他有机固体废弃物的协同处置^[8]。利用生活垃圾焚烧厂处理污泥水热炭, 可充分利用水热炭中的能量, 完善的烟气处置设备可确保燃烧烟气的达标排^[9-10], 同时也能解决垃圾焚烧厂投入生活垃圾不足而长期低负荷运行的问题^[9]。由于污泥水热炭相对于污泥具有更低的水分、更低的有害元素含量和更高的热值, 垃圾焚烧厂掺烧污泥水热炭在能量利用效率、运行工况稳定性和污染物减排方面有显著优势。

在生活垃圾中掺入其他燃料会影响生活垃圾的燃烧过程。刘晶晶等^[11]发现将煤炭掺入生活垃圾会导致生活垃圾着火温度升高, 综合燃烧指数降低。李永华等^[12]研究了生活垃圾与生物质混燃过程, 发现加入生物质会增加混合物燃烧活化能。邹骑鸿等^[13]发现厨余沼渣掺入生活垃圾会降低灰渣的熔融温度, 增加结渣性。污泥水热炭的掺入也对其他燃料的燃烧造成影响。庄修政等^[14]考察污泥水热炭掺混比对煤炭-污泥水热炭混合物燃烧性能的影响, 发现污泥水热炭中的碱土金属对煤炭燃烧起到催化作用, 可降低燃烧活化能, 但混合物综合燃烧性能指数和燃烧稳定系数随污泥水热炭掺混比例的增加而降低。

然而, 目前关于污泥水热炭与生活垃圾混燃性能的研究鲜有报道, 尚不明确掺混比例对生活垃圾与污泥水热炭混燃性能的影响规律以及两者之间的交互作用。本文以污泥水热炭和生活垃圾作为研

究对象, 通过热重燃烧实验考察 2 种物料的配比对其混燃特性的影响, 分析混合物料的燃烧特性和动力学参数, 并基于混合物料燃烧特性实验值与理论值之间的差异分析混燃过程中的交互作用。本研究旨在为生活垃圾焚烧厂的污泥水热炭协同焚烧设备运行和调控提供数据支持和理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料与设备

实验用污泥水热炭 (SC) 样品来自于山东某污水处理厂的水热碳化工艺, 生活垃圾 (MSW) 采样于北京。2 种样品均在 105 °C 下烘干后破碎至粒径 0.2 mm 以下。2 种原料的工业分析和元素分析见表 1 和表 2。样品工业分析和元素分析检测分别参照国家标准《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012) 和《煤的元素分析》(GB/T 31391—2015)。

表 1 原料工业分析 单位: %
Tab.1 Proximate analysis of the raw materials

样品	$w_{ar}(M)$	$w_d(V-)$	$w_d(FC)$	$w_d(A)$
SC	38.04	24.45	15.02	60.53
MSW	6.08	72.54	9.64	14.26

表 2 原料元素分析 单位: %
Tab.2 Ultimate analysis of the raw materials

样品	$w(C)$	$w(H)$	$w(N)$	$w(S)$	$w(O)^*$
SC	22.82	3.04	2.83	4.52	6.26
MSW	57.40	8.64	1.34	0.27	18.10

注: *通过差减计算得到。

采用德国 Netzsch STA409PC 热重分析仪进行样品的热重燃烧实验, 考察不同掺混比例样品的燃烧特性。每次实验使用约 10 mg 样品, 通入空气流量为 100 mL/min, 以 20 °C/min 的升温速率将样品从室温加热到 850 °C。采用德国 Elementar VarioEL cube 元素分析仪对污泥水热炭和生活垃圾进行元素分析, 测定样品中的 C、H、N、S 元素的含量, 其中 O 元素含量采用差减法计算。

1.2 分析方法

着火温度 T_i 通过 TG-DTG 切线法^[15]获得, 定义燃尽温度 T_b 为样品质量损失占总质量损失的 98% 时

的温度。为分析污泥水热炭掺混比例对样品燃烧性能的影响,采用综合燃烧特性指数 S 评价燃料的燃烧性能^[16]。该指数综合考虑了燃料的着火及燃烬过程,全面地反映燃料品质的优劣。

$$S = \frac{(dm/dt)_{\max} (dm/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_b} \quad (1)$$

为描述样品燃烧过程中的动力学过程,采用阿伦尼乌斯方程对样品燃烧动力学参数进行求解。非均相固体的燃烧反应可描述为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)^n \quad (2)$$

式中: n 为反应级数; t 为时间; k 为反应速率常数; α 为转化率,表示已燃烧样品的质量在样品可燃物总质量中的百分比; n 为反应级数。

在热重燃烧实验中,样品的转化率根据式(3)计算:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f} \quad (3)$$

式中: m_0 为样品的原始质量; m_t 为 t 时刻样品的质量; m_f 为样品燃尽后的质量。

反应常数 k 遵循阿伦尼乌斯方程,其表达式为:

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中: A 为频率因子, min^{-1} ; E 为表观活化能, J/mol ; R 为气体常数,通常取 $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ 。

取 $n=1$,采用 Coats-Redfern 法^[17]对式(4)进行积分,得到:

$$\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right) - \frac{E}{RT} \quad (5)$$

式中: β 为升温速率。通常固体燃料燃烧表观活化能 E 远远大于 RT ,因此式(5)可简化为:

$$\ln\left(-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

根据式(6),以 $1/T$ 为自变量,以公式左边为因变量进行线性拟合,则拟合线的斜率为 $-E/R$,由此获得样品燃烧的表现活化能 E 。

2 结果与讨论

2.1 生活垃圾与污泥水热炭的混燃特性

不同生活垃圾掺混比例样品的 TG 曲线如图 1 所示。由于污泥水热炭的灰分高于生活垃圾,随污泥水热炭掺混比例的增加,样品燃尽残余物的质量

分数增加。

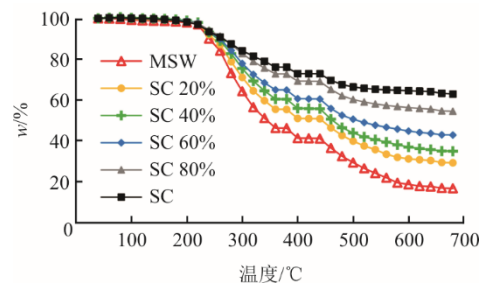


图 1 不同污泥水热炭掺混比例样品 TG 曲线
Fig.1 TG curves of the samples with different SC proportions

图 2 为样品的 DTG 曲线。由图 2 可见,随着样品中污泥水热炭掺混比例的增加,样品的最大失重速率下降。污泥水热炭、生活垃圾和混合样品的 DTG 曲线均存在 2 个明显的失重峰,分别对应样品的挥发分燃烧阶段^[18]和焦炭燃烧阶段^[19-20]。污泥水热炭的挥发分燃烧阶段和焦炭燃烧阶段的失质量相当,而生活垃圾的挥发分燃烧阶段的失质量明显大于焦炭燃烧阶段的失质量。不同阶段的失质量与样品的挥发分含量相关。生活垃圾相对于污泥水热炭的挥发分更高,生活垃圾挥发分在可燃物(挥发分与固定碳之和)中占比达到 88.3%,而污泥水热炭挥发分可燃物中占比仅 61.9%(表 1)。因此,生活垃圾在挥发分燃烧阶段的失质量显著高于污泥水热炭。

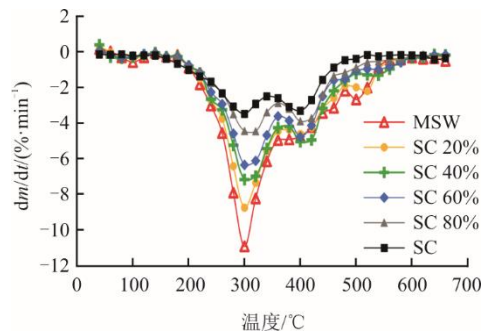


图 2 不同污泥水热炭掺混比例样品的 DTG 曲线
Fig.2 DTG curves of the samples with different SC proportions

为了量化污泥水热炭掺混比例对样品燃烧性能的影响,采用着火温度、燃尽温度和综合燃烧特性指数评价样品的燃烧性能。样品着火温度和燃尽温度如图 3 所示。由图 3 可知,污泥水热炭的着火温度和燃尽温度均低于生活垃圾。随着样品中污泥水热炭占比的增加,样品的着火温度和燃尽温度均有所下降,表明污泥水热炭掺混能够改善生活垃圾的着火和燃尽性能。

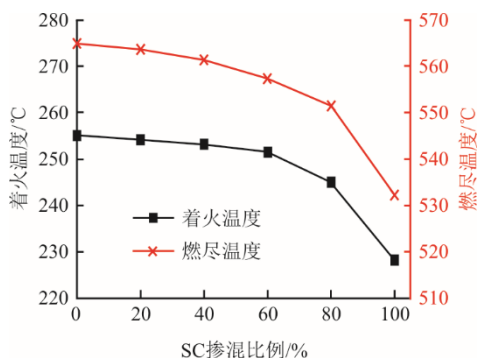


图 3 污泥水热炭掺混比例样品的着火温度和燃尽温度
Fig.3 Effect of SC proportion on ignition temperature and burnout temperature of the samples

但随着样品中污泥水热炭份额的增加，样品综合燃烧特性指数降低，具体结果如图 4 所示。原因在于污泥水热炭的燃烧速率较小（图 2），样品的失重速率随污泥水热炭含量的增加而降低。污泥水热炭的掺混比例从 0 增加到 80%，样品的综合燃烧特性指数减小 71.8%。

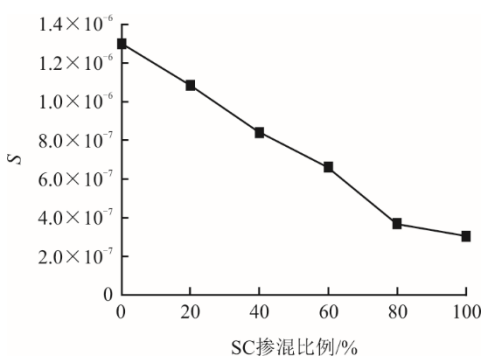
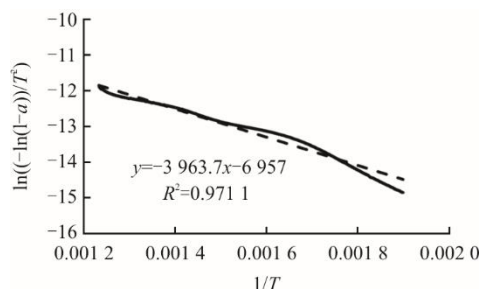


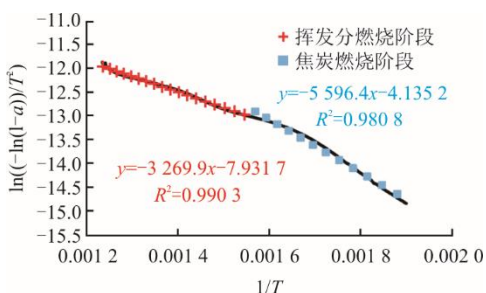
图 4 不同污泥水热炭掺混比例样品的综合燃烧特性指数
Fig.4 Change of the comprehensive combustion characteristic index of the samples with the SC proportion

2.2 燃烧动力学分析

利用 Coats-Redfern 模型对污泥水热炭、生活垃圾及两者混合样品进行燃烧动力学分析，以生活垃圾样品为例，线性拟合方法如图 5 所示。 R^2 低于 0.98，样品整个燃烧过程的拟合偏差较大。由图 5a) 可以发现数据曲线在 $1/T=0.0016$ （温度 $360\text{ }^\circ\text{C}$ ）附近有 1 个明显的拐点。对比 DTG 曲线发现，该温度范围是样品挥发分燃烧阶段和焦炭燃烧阶段的过渡区域，可见样品燃烧挥发分燃烧阶段和焦炭燃烧阶段活化能差异较大。为了考察样品不同燃烧阶段的动力学特性差异，借助 Coats-Redfern 模型对样品燃烧数据的挥发分燃烧阶段和焦炭燃烧阶段分别进行拟合，结果如图 5b) 所示。2 个燃烧阶段的拟合效果优于对整个燃烧过程的拟合效果。



a) 单段拟合



b) 2段拟合

图 5 生活垃圾样品 Coats-Redfern 模型线性拟合
Fig.5 Coats-Redfern model linear fitting for MSW

不同掺混比例样品的整体燃烧活化能以及分阶段燃烧活化能如图 6 所示。由图 6 可见，样品的挥发分燃烧活化能高于整体燃烧活化能，样品的焦炭燃烧活化能低于整体燃烧活化能。对比 2 种物料的燃烧活化能发现，生活垃圾的挥发分燃烧活化能高于污泥水热炭，而生活垃圾的焦炭燃烧活化能低于污泥水热炭。随着样品中污泥水热炭含量的增加，样品的整体燃烧活化能降低。

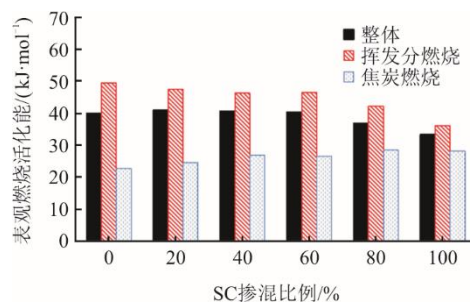


图 6 污泥水热炭掺混比例对样品的燃烧活化能的影响
Fig.6 Effect of SC proportion on combustion activation energy of the samples

燃料的组成对于表观活化能有显著影响。大量研究表明^[21-22]，挥发分的燃烧活化能高于焦炭燃烧的活化能。挥发分含量的降低还会减少焦炭中孔道的形成，减少暴露于空气的燃烧位点^[23]，增加焦炭燃烧能垒，灰分在燃烧过程中则不断形成灰壳，阻碍焦炭与空气的接触^[22]。因此，随着污泥水热炭掺混比例的增加，混合物整体挥发分含量减少而灰分

增加,造成样品挥发分燃烧活化能降低而焦炭燃烧活化能升高。从燃烧全过程的活化能变化趋势来看,相较于灰分的变化,混合样品挥发分含量的变化对样品整体燃烧活化能的影响更为显著。

2.3 污泥水热炭和生活垃圾混燃交互作用

为分析污泥水热炭和生活垃圾混燃中的交互作用,对比混合样品燃烧过程中的实际质量与理论质量。混合样品在燃烧过程的理论质量为同一温度下各组分质量的算术加权平均^[24],计算公式为:

$$m_{cal} = \lambda_{SC} \times m_{CS} + \lambda_{MSW} \times m_{MSW} \quad (7)$$

式中: m_{cal} 为理论混合样品质量; m_{CS} 、 m_{MSW} 分别为混合样品中污泥水热炭和生活垃圾的质量; λ_{SC} 和 λ_{MSW} 分别为混合样品中污泥水热炭和生活垃圾的质量分数。

由不同温度下混合样品的理论质量可得混合样品理论 TG 曲线。图 7 为污泥水热炭 40% 混合样品的实验 TG 曲线和理论 TG 曲线。由图 7 可见,在燃烧温度 200~400 °C 相同温度下混合样品质量的实验值大于理论值,表明混合样品的燃烧失质量并非污泥生物炭和生活垃圾失质量的简单叠加,而是存在交互作用^[25],对混合样品的燃烧产生了抑制效果,降低了混合样品的燃烧速率。

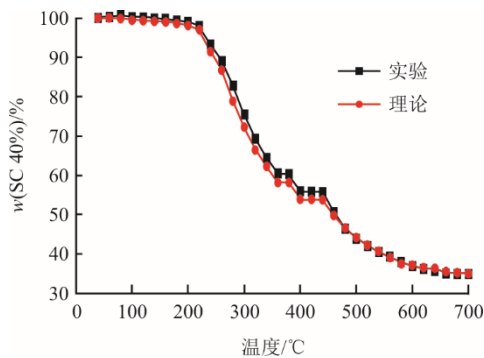


图 7 不同污泥水热炭掺混比例样品的燃烧活化能
Fig.7 Change of combustion activation energy of the samples with the SC proportion

将混合样品质量的实验值 m_{exp} 与理论值 m_{cal} 之差定义为差异质量 Δm , 由此得混合样品的 ΔTG 曲线。

$$\Delta m = m_{exp} - m_{cal} \quad (8)$$

不同污泥水热炭掺混比例样品的 ΔTG 曲线如图 8 所示。由图 8 可见,在燃烧温度 200~300 °C ΔTG 曲线均存在明显的上升趋势, ΔTG 曲线的峰值出现在 300 °C 附近。对照图 2 中样品的 DTG 曲线,发现 ΔTG 曲线的峰值与 DTG 的挥发分燃烧阶段的失重峰值接近。由此可以判断,2 种燃料交互作

用对混合物燃烧过程的抑制主要发生在挥发分燃烧阶段。

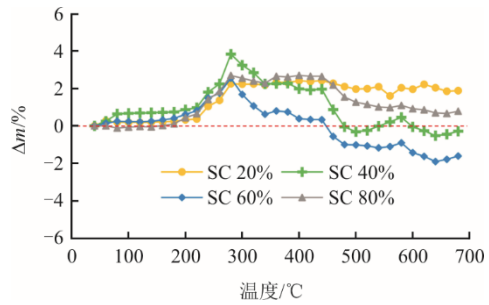


图 8 不同污泥水热炭含量样品 ΔTG 曲线
Fig.8 ΔTG curves of the samples with different SC proportions

采用相同的分析方法考察交互作用对混合物着火温度、燃尽温度和综合燃烧指数的影响,结果如图 9 所示。由图 9 可见:不同污泥水热炭掺混比例下,差异着火温度 ΔT_i 和差异燃尽温度 ΔT_b 均为正值,即混合样品的实际着火温度和燃尽温度均高于理论值;差异综合燃烧特性指数 ΔS 均为负值,即混合样品的实际综合燃烧性能低于理论值。污泥水热炭掺混比例在 20%~80%,交互作用使混合物着火温度平均升高 9.3 °C,燃尽温度平均升高 9.8 °C,综合燃烧特征指数平均降低 12.9%。 ΔT_i 、 ΔT_b 和 ΔS 的计算结果说明,生活垃圾和污泥水热炭之间的交互作用阻碍了混合样品的着火和燃尽,降低了其综合燃烧性能。随着污泥水热炭掺混比例的增加, ΔT_i 和 ΔT_b 整体呈现上升趋势, ΔS 整体呈现下降趋势,表明生活垃圾与污泥水热炭之间交互作用对混合样品燃烧的抑制随污泥水热炭掺混比例的增加而增加。

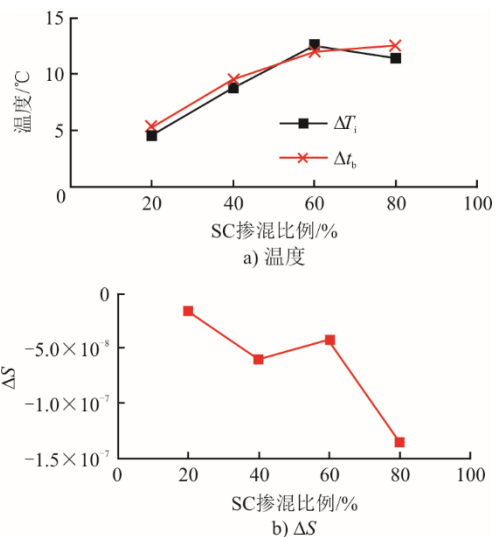


图 9 污泥水热炭掺混比例对 ΔT_i 、 ΔT_b 和 ΔS 的影响
Fig.9 Effects of SC proportion on ΔT_i , ΔT_b and ΔS

3 结 论

通过分析不同配比的生活垃圾与污泥水热炭混合样品的燃烧特性和动力学, 得到以下结论。

1) 污泥水热炭相对于生活垃圾具有更好的着火性能和燃尽性能, 在生活垃圾中掺混污泥水热炭可降低混合燃料的着火温度和燃尽温度。但污泥水热炭的燃烧速率较低, 掺混入生活垃圾会导致综合燃烧性能的恶化。污泥水热炭的掺混比例从 0 增加到 80%, 样品的综合燃烧特性指数减小 71.8%。

2) 污泥水热炭、生活垃圾及两者混合样品的燃烧过程可分为挥发分燃烧阶段和焦炭燃烧阶段。在挥发分燃烧阶段, 污泥水热炭具有更低的活化能; 而在焦炭燃烧阶段, 生活垃圾具有更低的活化能。随着污泥水热炭掺混比例的增加, 混合物整体燃烧活化能和挥发分燃烧活化能均降低, 而焦炭燃烧活化能升高。

3) 污泥水热炭与生活垃圾在挥发分燃烧阶段存在显著的交互作用, 阻碍挥发分的燃烧, 导致混合样品的着火温度和燃尽温度升高。污泥水热炭掺混比例在 20%~80%, 交互作用使混合物着火温度平均升高 9.3 °C, 燃尽温度平均升高 9.8 °C, 综合燃烧特征指数平均降低 12.9%。

4) 建议生活垃圾焚烧厂掺入污泥水热炭后可提升混合物料的着火和燃尽性能, 可适当减少物料在炉排上的停留时间; 污泥水热炭掺入后需增加焚烧系统的排灰量, 并根据灰渣热灼减率和温度情况调整污泥炭的掺烧比例, 防止物料燃烧不稳定和燃烧不充分。另外, 可适当增加一次风的通风量, 促进挥发分的扩散和燃烧。

[参 考 文 献]

[1] 姚建明, 高术杰. 热处理技术在市政污泥处置中的应用[J]. 有色设备, 2019(6): 45-59.
YAO Jianming, GAO Shujie. Application of heat treatment technology in municipal sludge disposal[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2019(6): 45-59.

[2] WANG L, CHANG Y, LI A. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 423-440.

[3] 王定美, 徐荣险, 秦冬星, 等. 水热炭化终温对污泥生物炭产量及特性的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1775-1780.
WANG Dingmei, XU Rongxian, QIN Dongxing, et al. Influence of final hydrothermal carbonization temperatures on the yields and characteristics of sludge biochars[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10): 1775-1780.

[4] RIJO B, NOBRE C, BRITO P, et al. An overview of the thermochemical valorization of sewage sludge: principles and current challenges[J]. Energies, 2024, 17(10): 2417.

[5] 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): 1-8.
CHEN Wei, ZHENG Xiaoyuan, JI Shasha, et al. Research progress on hydrothermal carbonization of sewage sludge[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 1-8.

[6] ZHANG X, LI X, LI R, et al. Hydrothermal carbonization and liquefaction of sludge for harmless and resource purposes: a review[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(11): 13268-13290.

[7] 刘海威, 刘诚, 张瑛华, 等. 基于“1+1+N”架构的智慧低碳型垃圾焚烧发电厂方案与实践[J]. 有色设备, 2021, 35(3): 1-3.
LIU Haiwei, LIU Cheng, ZHANG Yinghua, et al. Solution and practice of smart low-carbon waste incineration power plant based on “1+1+N” structure[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2021, 35(3): 1-3.

[8] 宋士丽, 冯楠, 石姗姗, 等. 餐厨垃圾协同生活垃圾焚烧厂处理工艺技术[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(1): 56-60.
SONG Shili, FENG Nan, SHI Shanshan, et al. Treatment technology of collaborative disposal of kitchen waste and domestic waste incineration plant[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2022, 38(1): 56-60.

[9] 马津麟, 张蒙雨. 生活垃圾焚烧厂协同处置污泥的技术研究[J]. 科技与创新, 2023(9): 14-19.
MA Jinlin, ZHANG Mengyu. Research on technology of collaborative disposal of sludge in domestic waste incineration plant[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(9): 14-19.

[10] 邓玲, 苏伟, 柴华, 等. 掺烧比对污泥与垃圾协同焚烧的影响[J]. 河北冶金, 2024(1): 74-77.
DENG Ling, SU Wei, CHAI Hua, et al. Effect of blending ratio on co-incineration of sludge and garbage[J]. Hebei Metallurgy, 2024(1): 74-77.

[11] 刘晶晶, 吴奇, 李倦生, 等. 生活垃圾与煤混合燃烧特性及动力学分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 915-921.
LIU Jingjing, WU Qi, LI Juansheng, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of living garbage and coal blends[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 915-921.

[12] 李永华, 胡小翠, 郭建, 等. 生活垃圾混烧生物质特性研究[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 323-326.
LI Yonghua, HU Xiaocui, GUO Jian, et al. Study of characteristics of MSW combustion with biomass[J]. East China Electric Power, 2009, 37(2): 323-326.

[13] 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.
ZOU Qihong, YU Zhaosheng, WEI Chen, et al. Ash fusion characteristic of food waste digestate and municipal solid waste during co-combustion process[J]. Environment Engineering, 2023, 41(5): 69-74.

[14] 庄修政, 宋艳培, 詹昊, 等. 水热污泥与煤在混燃过程中的协同效应特性研究[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(12): 1437-1446.
ZHUANG Xiuzheng, SONG Yanpei, ZHAN Hao, et al. Synergistic effects in co-combusting of hydrochar derived from sewage sludge with different-rank coals[J].

- Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2018, 46(12): 1437-1446.
- [15] 周英彪, 范杜平, 段权鹏, 等. 基于热天平着火温度的新方法[J]. 电站系统工程, 2007(3): 29-31.
ZHOU Yingbiao, FAN Duping, DUAN Quanpeng, et al. A new method based on thermal balance ignition temperature[J]. Power System Engineering, 2007(3): 29-31.
- [16] GUO F, HE Y, HASSANPOUR A, et al. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal[J]. Energy, 2020, 197: 117147.
- [17] YANG L, ZHANG Z, CHEN A, et al. Experimental and kinetic study on pyrolysis and combustion characteristics of pesticide waste liquid[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 111994.
- [18] 程诚, 黄亚继, 孙宇, 等. 高斯拟合在污泥热重曲线解析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(11): 4081-4086.
CHENG Cheng, HUANG Yaji, SUN Yu, et al. Application of Gaussian fitting in resolution of sludge thermo-gravimetric curves analyzing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014(11): 4081-4086.
- [19] SCHMIDT H, KAMINSKY W. Pyrolysis of oil sludge in a fluidised bed reactor[J]. Chemosphere, 2001, 45(3): 285-290.
- [20] ZHAO R, QIN J, CHEN T, et al. Experimental study on co-combustion of low rank coal semicoke and oil sludge by TG-FTIR[J]. Waste Management, 2020, 116: 91-99.
- [21] VAROL M, ATIMTAY A T, BAY B, et al. Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis[J]. Thermochemica Acta, 2010, 510(1/2): 195-201.
- [22] JIANG H, LU P, XUE Z, et al. Co-combustion characteristics of paper sludge and combustible construction and demolition waste[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 110: 101352.
- [23] QI J, FAN C, LI S. Characteristics of lignite char derived from oxy-pyrolysis[J]. Fuel, 2021, 291: 120261.
- [24] 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 and Management, 2015, 99: 112-118.
- [25] ZHANG R, LEI K, YE B, et al. Combustion characteristics and synergy behaviors of biomass and coal blending in oxy-fuel conditions: a single particle co-combustion method[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(11): 1723-1731.

(责任编辑 杨嘉蕾)

广告目次

《热力发电》	封三
南京常荣声学股份有限公司	后彩插 1
西安热工研究院有限公司	后彩插 4—27
《热力发电》 订阅宣传页	后彩插 28