余波, 李箫宁, 马娇, 等. 市政污泥热解特性分析及资源化应用[J]. 净水技术, 2026, 45(10): 110-118.
Yu B, Li X N, Ma J, et al. Analysis of pyrolysis characteristics and application of resource utilization for municipal sludge[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(10): 110-118.

市政污泥热解特性分析及资源化应用

余 波[1,2],李箫宁[1,2,*],马 娇[1,2],廉 珂[1,2],沈鹏飞[2,3],李光锋[1,2]
(1. 中铁水务集团有限公司,陕西西安 712000;2. 中国铁工投资建设集团有限公司,北京 101300;3. 中国中铁生态环境专业研发中心,北京 101300)

摘 要 **【目的】** 污泥作为污水处理副产物,具有高含水率、高有机质含量的特性,同时还含有细菌、重金属等有害物质,需进行合理处置以防止其对生态环境和动植物造成潜在的危害。污泥热解被认为是污泥高效处置与资源化利用的有效途径之一。因此,系统分析污泥热解特性对污泥处置和资源化利用至关重要。**【方法】** 本文利用热重分析仪分析了市政污泥在 5、10 ℃/min 和 20 ℃/min 不同升温速率下的热解特性,结合 Flynn-Wall-Ozawa(FWO)和 Kissinger-Akahira-Sunose(KAS)动力学模型揭示了相关热解机理,同时探究了污泥与核桃壳、秸秆和竹粉等不同生物质间的共热解特性,为污泥资源化应用提供参考。**【结果】** 研究结果表明,随着升温速率的增加,污泥综合热解性能越来越优异;当转化率 $\alpha \leqslant 0.7$ 时,FWO 和 KAS 模型计算得到的好活化能分别为 59.8~257.9 kJ/mol 和 55.2~259.9 kJ/mol,均随着转化率的增加而增加,并表现出较好的一致性。此外,污泥与生物质共热解特性行为揭示了两者间的协同效应。基于上述特性,污泥与生物质共热解合成生物炭对水中染料表现出 97.9%的吸附效果,同时对水中重金属也具有 80%以上的吸附效果,显示出优异的实际应用潜能。**【结论】** 本文以市政污泥为原料,通过分析热解特性和热解机理,为污泥的高效热解处置和资源化回用提供了理论基础,同时为行业内污泥与生物质共热解处置提供参考。

关键词 市政污泥; 生物质; 热解特性; 资源化利用; 水处理
中图分类号: X705 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2026)10-0110-09
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.10.013

Analysis of Pyrolysis Characteristics and Application of Resource Utilization for Municipal Sludge

Yu Bo[1,2], Li Xiaoning[1,2,*], Ma Jiao[1,2], Lian Ke[1,2], Shen Pengfei[2,3], Li Guangfeng[1,2]
(1. *China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an* 712000, *China*;
2. *China Tiegong Investment & Construction Group Co., Ltd., Beijing* 101300, *China*;
3. *Eco-Environmental Research and Development Center of China Railway Group, Beijing* 101300, *China*)

Abstract [**Objective**] As a by-product of sewage treatment, sludge is characterized by high water content and high organic matter content, and is also accompanied by harmful substances such as bacteria and heavy metals. It needs to be properly disposed of to prevent potential harm to the ecological environment, animals and plants. Sludge pyrolysis is regarded as one of the effective ways for efficient disposal and resource utilization of sludge. Therefore, a systematic analysis of sludge pyrolysis characteristics is crucial for sludge disposal and resource utilization. [**Methods**] In this paper, thermogravimetric analysis was employed to investigate the pyrolysis characteristics of sludge at different heating rates of 5, 10 ℃/min, and 20 ℃/min. The Flynn-Wall-Ozawa (FWO) and Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) models are applied to elucidate the pyrolysis mechanisms. Meanwhile, the co-pyrolysis behavior of sludge and walnut shells, straw, bamboo powder is also explored to provide insights for sludge resource utilization. [**Results**] The result indicate that the overall pyrolysis performance of sludge improves with increasing heating rates. When $\alpha \leqslant 0.7$, the activation energy calculated by both FWO and KAS models are 59.8-257.9 kJ/mol and 55.2-259.9 kJ/mol respectively, both increasing with

[**收稿日期**] 2025-07-23
[**作者简介**] 余波(1987—),男,高级工程师,主要从事水处理设计及研发工作,E-mail:591172718@qq.com。
[**通信作者**] 李箫宁(1991—),女,高级工程师,主要从事水污染控制工作,E-mail:lixiaoning92@163.com。

the increase of conversion rate, demonstrating good consistency. Furthermore, the co-pyrolysis of sludge and biomass reveals a synergistic effect. Based on the above findings, biochar derived from sludge-biomass co-pyrolysis exhibits an adsorption effect of 97.9% on dyes, and also had an adsorption effect of more than 80% on heavy metals, showing great potential for practical applications. [**Conclusion**] This paper takes municipal sludge as the raw material, and provides a theoretical basis for the efficient pyrolysis disposal and resource reuse of sludge by analyzing the pyrolysis characteristics and pyrolysis mechanism. At the same time, it provides a reference for the efficient disposal of sludge pyrolysis in the industry.

Keywords municipal sludge; biomass; pyrolysis characteristics; resource utilization; water treatment

随着我国城镇化发展和工业化进程加快,污水处理量日益增加,污泥作为污水处理副产物,也同步激增[1]。据统计,我国城镇污水处理规模已位居世界第一,2022 年我国市政污泥日产量已突破 22.6 万 t,年总量超过 8 000 万 t,预计 2025 年我国污泥年产量将突破 9 000 万 t[2]。2022 年,国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部联合发布了《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》,明确提出:实施污泥无害化处理,推进资源化利用,是深入打好污染防治攻坚战,实现减污降碳协同增效,建设美丽中国的重要举措[3]。因此,如何实现污泥绿色低碳处理和资源化利用已成为污水处理可持续发展的重要研究方向。

目前,污泥热解技术因其减量化显著、二次污染风险低、资源化程度高、碳排放低等优势,成为污泥处理处置的有效途径[4-5]。热解技术通过无氧或缺氧条件下的高温热分解,将污泥转化为生物炭、热解油和可燃气等可利用产物,实现污泥的高效能源回收与稳定化处理,同时有效避免二噁英等有害物质的生成,符合绿色可持续发展的要求[4,6]。污泥热解特性和污泥热解动力学研究是分析污泥热解机理的重要手段,通过揭示污泥热解行为、产物分布和能量变化,为反应条件优化、工艺设计及产物调控提供理论基础,推动污泥高效低碳处置和资源化应用[7]。但是,由于污泥热解是一个复杂多变的过程,现有研究多集中在单一热解特性分析,针对通过热解特性指导污泥资源化应用的探索仍较为匮乏,严重制约了污泥热解技术的高效推广应用。

陕西省西安市某污泥处置项目采用污泥热解技术对周边污泥进行处理处置,减量化可达 90%。但是,由于对污泥热解机理研究不足,项目运行过程中存在可燃气回收、资源化利用率低等问题。基于此,本文以该项目污泥为研究对象,利用热重和热解动力学分析污泥的热解特性,同时探究污泥与生物质共热解行为,探明污泥热解机理和协同效应,以期为污泥高效热解和资源化应用提供理论指导。

1 试验方法

1.1 试验样品

试验所用市政污泥样品取自陕西省西安市某污泥处置项目,核桃壳、秸秆和竹粉购自保定市友八方商贸有限公司。根据《城镇污泥标准检验方法》(CJ/T 221—2023)、《固体生物质燃料全水分测定方法》(GB/T 28733—2012)和《固体废物 有机质的测定 灼烧减量法》(HJ 761—2015)等标准检测污泥和生物质的理化特性:市政污泥含水率为 80%、有机质含量为 58%~65%、含碳量为 22%~30%;核桃壳、秸秆、竹粉的含水率为 5%~10%、含碳量为 45%~55%、灰分为 5%~10%。

1.2 热重分析

样品在高纯氮气氛围下,测试其分别在 5、10、20 ℃/min 升温速率下的热重曲线。同时,根据已有研究,取市政污泥与不同生物质以 6∶4 的质量比共混,在 10 ℃/min 升温速率下测试热重曲线。

1.3 热解特性指数

根据式(1)计算污泥热解特性指数 D[8]。

$$D = \frac{(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max} \cdot (\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}} \cdot V_{\infty}}{T_{\max} \cdot T_i \cdot \Delta T_{1/2}} \quad (1)$$

其中:$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max}$——热解过程中最大失重速率,微商热重(DTG)曲线中峰值,%/min;

$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}$——挥发分平均失重速率,热解的失重率与时间的比值,%/min;

V_{∞}——热解最大失重率;

$T_{\max}$——最大失重速率对应的峰值温度,℃;

T_i——初始热解温度,℃;

$\Delta T_{1/2}$——$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)/(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max} = 1/2$ 时对应的温度区间,℃。

1.4　热解动力学

采用非模型动力法进行动力学研究,通过 Flynn-Wall-Ozawa(FWO)和 Kissinger-Akahira-Sunose(KAS)两种模型分析污泥和混合物的热解过程[9]。

(1)FWO 简化公式

$$\lg\beta = \lg\frac{AE}{RG(\alpha)} - 2.315 - \frac{0.4567E}{RT} \quad (2)$$

(2)KAS 简化公式

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

其中:β——升温速率,℃/min;

R——气体常数,8.314 J/(mol·K);

T——热解温度,K;

E——反应活化能,kJ/mol;

α——转化率,当转化率 α 一定时,$G(\alpha)$为定值;

根据 $\ln(\beta/T^2)$ 和 $1/T$ 的关系进行线性拟合。

1.5　共热解协同效应

$$\Delta W = W_E - W_C \quad (4)$$

$$W_C = x_1W_1 + x_2W_2 \quad (5)$$

其中:W_E——污泥与生物质混合样品的热解失重值;

W_C——不同样品所占质量比和单独热解热重曲线加权平均计算理论值;

x_1、x_2——混合样品中生物质和污泥所占质量比例;

W_1、W_2——同一热解条件下,不同生物质和污泥单独热解时的热解失重值。

1.6　生物炭合成及应用

(1)生物炭制备

称取一定量干燥、研磨处理后的污泥和生物质,并以 6∶4 的质量比混合后置于管式炉中,在氮气氛围下进行污泥碳化试验。在试验过程中,改变温度条件(300、400、500、600 ℃)、升温速率(5、10、20 ℃/min)和炭化时间(15、30、60 min)。

(2)生物炭吸附试验

称取合成不同生物炭分别与 50 mg/L 亚甲基蓝和不同重金属溶液混合,在常温下振荡 2 h,结束后取上清液过滤并检测,计算生物炭吸附效果,如式(6)所示。

$$Q = \frac{C - C_0}{C} \times 100\% \quad (6)$$

其中:Q——吸附效率;

C——污染物的初始浓度,mg/L;

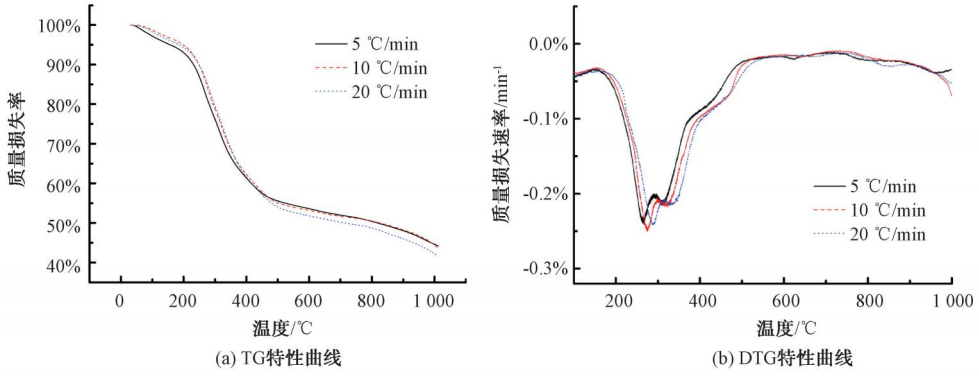
C_0——生物炭吸附后的剩余污染物浓度,mg/L。

2　结果与讨论

2.1　污泥热解特性分析

2.1.1　热解特性分析

如图 1 所示,考察了市政污泥在 5、10 ℃/min 和 20 ℃/min 不同升温速率下的热重-微商热重(TG-DTG)特性曲线。市政污泥热解主要分为 3 个阶段[10]。在 25~100 ℃,主要为水分析出和结合水的分解,同时为污泥下一阶段的热解进行能量储备;100~600 ℃为热解反应过程中主要质量损失阶段,此阶段污泥中的纤维素、蛋白质、脂肪酸等物质发生分解并析出,也是生物炭主要产生阶段。同时可以发现,污泥在此阶段的 TG 曲线急速下降,相应的



(a) TG特性曲线　　(b) DTG特性曲线

图 1　不同升温速率下污泥热解特性曲线

Fig. 1　Characteristic Curves of Sludge Pyrolysis at Different Heating Rates

DTG 峰值温度也逐渐增加，在 5、10 ℃/min 和 20 ℃/min 不同升温速率下，污泥分别在 265、275、290 ℃左右失重率最大。同时，在 310~330 ℃之间出现 1 个肩峰，这一现象可能与污泥热解过程中简单碳水化学物和脂质分解温度接近导致两者分解峰叠加有关[11]。在 600~1 000 ℃范围，污泥进入二次裂解阶段，主要为残余灰分和含碳物质的分解。同时，污泥的失重台阶随着升温速率的增加逐渐向高温偏移。

为了进一步分析污泥的燃烧情况，在不同升温速率下分析污泥的 D。如表 1 所示，在不同升温速率下，污泥热解的初始温度发生波动，同时最大失重速率的峰值温度向高温方向偏移，这一现象主要是由于随着升温速率的升高，热解气化炉与污泥的温差逐渐增加，从而出现较强的热滞后现象，并提高了传质效率[12]。同时，由于市政污泥较低的导热系数和较差的热传导性能，其在升温速率提高时，污泥加热时间缩短，而外表面热解产物扩散速率不变，污泥内部温度不均匀性加剧[13]。此外，可以发现污泥 D 值随着升温速率的增加而增加，这表明污泥热解反应越容易，其综合热解性能越佳。

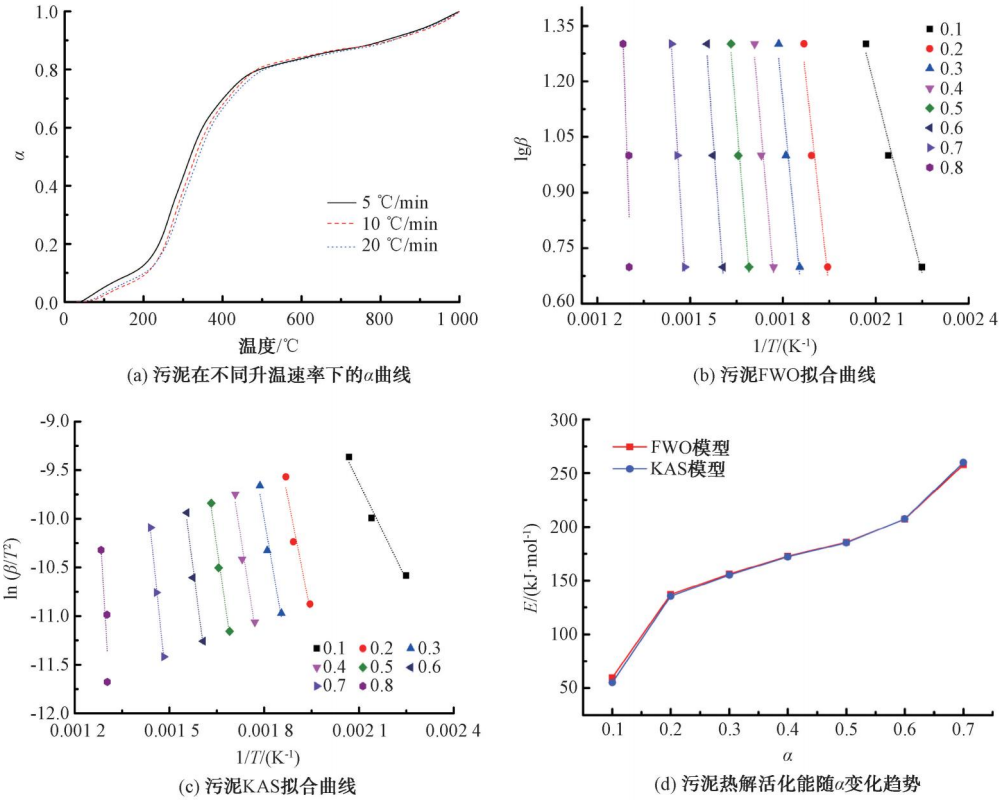
表 1　不同升温速率下市政污泥热解特性指数

Tab. 1　Pyrolysis Characteristic Indices of Municipal Sludge at Different Heating Rates

样品	升温速率/(℃·min^{-1})	T_i/℃	T_{max}/℃	$\Delta T_{1/2}$/℃	V_∞	$(dw/dt)_{max}$/(%·min^{-1})	$(dw/dt)_{mean}$/(%·min^{-1})	D
市政污泥	5	176	265	133	55.4%	−0.236	−0.11	2.32×10^{-7}
	10	190	275	136	55.6%	−0.247	−0.13	2.51×10^{-7}
	20	184	290	144	57.8%	−0.245	−0.13	3.66×10^{-7}

2.1.2　热解动力学

热解动力学是分析污泥热解特性的重要手段，通过 FWO 和 KAS 法对污泥热解进行动力学分析。如图 2(a)所示，污泥转化率 α 随着热解温度的增加



(a) 污泥在不同升温速率下的α曲线　(b) 污泥FWO拟合曲线

(c) 污泥KAS拟合曲线　(d) 污泥热解活化能随α变化趋势

图 2　污泥热解动力学分析

Fig. 2　Analysis of Pyrolysis Kinetics for Sludge

逐渐增加,并且随着升温速率的增加整体呈现下降趋势。在不同转化率 α 下进行 FWO 和 KAS 拟合,拟合结果如图 2 和表 2 所示。可以发现,在 α 为 0.1~0.7 时,FWO 和 KAS 模型拟合的相关系数均在 0.9 以上,表现出很好的线性关系。当 α 为 0.8 时,两种模型的相关系数均在 0.5 以上,线性相关性较差,因此可忽略该转化率下的 E 值。由表 2 可知,通过 FWO 模型拟合计算得到的 E 值为 59.8~257.9 kJ/mol,平均值为 168.1 kJ/mol;KAS 模型拟合计算 E 值为 55.2~259.9 kJ/mol,平均值为 167.3 kJ/mol。由图 2(d)可知,在 α 为 0.1~0.7 时,FWO 和 KAS 两种模型计算得到的 E 值均随转化率 α 的增加而增加,并呈现相同的趋势,误差范围小于 8%,这也进一步验证了两种模型活化能计算的准确性和一致性。

表 2　污泥在不同转化率 α 下的 FWO 和 KAS 模型拟合计算结果

Tab. 2　FWO and KAS Model Fitting Results of Sludge at Different Conversion Rates α

α	FWO 模型		KAS 模型	
	E/(kJ·mol^{-1})	R^2	E/(kJ·mol^{-1})	R^2
0.1	59.8	0.970 9	55.2	0.963 3
0.2	137.2	0.911 1	135.6	0.900 2
0.3	156.2	0.936 2	155.2	0.928 9
0.4	172.8	0.945 2	172.2	0.939 3
0.5	185.7	0.973 2	185.3	0.970 4
0.6	207.2	0.955 4	207.4	0.951 0
0.7	257.9	0.989 6	259.9	0.988 7
0.8	445.5	0.590 6	455.6	0.572 2

研究发现,污泥热解活化能变化主要与蛋白质、脂肪、碳水化合物等有机组分和化学键稳定性有关,随着转化率的增加,污泥热解过程也表现出从简单到困难的趋势[7]。当 α 为 0.1 时,两种模型计算活化能均低于 100 kJ/mol,主要是水分、脂肪族化合物等易分解组分的挥发,反应阻力较小、能耗低。随着 α 的增加(α = 0.2 ~ 0.5),E 值增加至 100 ~ 200 kJ/mol,对应温度为 200~600 ℃,主要是进行纤维素、蛋白质等大分子有机物的分解,该部分有利于重质油、生物炭等高附加值产品的合成。当 α 进一步增加时(α>0.5),E 值跃升至 200 kJ/mol 以上,残留焦炭的深度脱氧和矿物质分解为主导反应,需要消耗更高的能量,该部分以产气为主。因此,可在污泥热解过程中调控污泥热解温度、停留时间、与生物质共热解和催化剂活化等条件,改善污泥热解环境,降低整体能耗,同时可依据资源化利用目标灵活调整工艺参数,实现污泥处理与能源回收的协同优化。

2.2　污泥与生物质共热解特性分析

2.2.1　热解特性分析

在同一升温速率下考察了不同生物质与污泥的共热解特性,分析生物质对污泥热解的影响。如图 3 所示,在添加核桃壳、秸秆和竹粉以后,混合样品的热解主要分为 3 个阶段:第一阶段是污泥引起的水分和部分挥发物的析出;第二阶段主要是混合物共同热解导致的蛋白质、多糖、脂肪等物质的分解;第三阶段进行有机物的二次裂解,完成最终的分解。由表 3 可知,混合样品的初始分解温度较纯泥发生了变化,其中核桃壳和秸秆的添加促进样品在较低温度下开始分解,竹粉的添加对初始温度基本无影响。在添加生物质后,混合样品的最大失重速率也

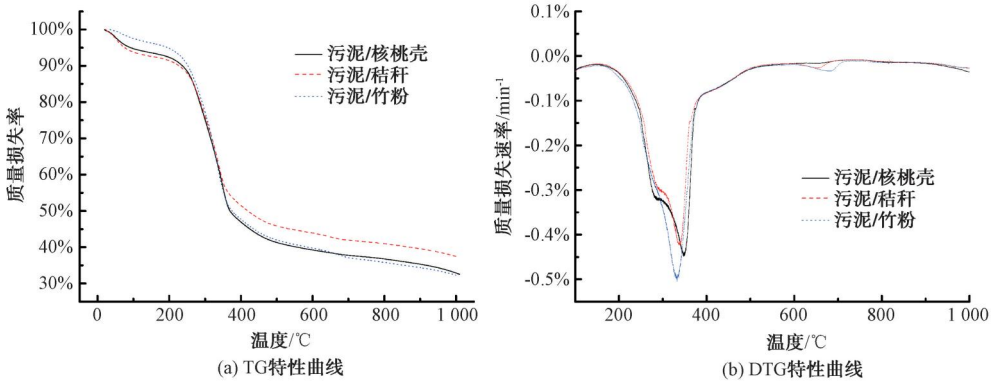


图 3　市政污泥与不同生物质掺杂的热解特性曲线

Fig. 3　Characteristic Curves of Municipal Sludge Doping with Different Biomass Materials

明显增加，相应最大失重速率温度也逐渐提高，同时最终质量损失率较纯泥（55.6%）提升至 62.8%～67.9%，表现出显著的热解特性变化。这一现象主要是由于生物质的添加可以弥补污泥中灰分含量高、挥发分含量低等缺点，从而提高了混合物的失重速率[14]。此外，污泥/核桃壳、污泥/秸秆、污泥/竹粉 3 种混合物的 D 值分别为 1.21×10^{-6}、1.28×10^{-6} 和 9.68×10^{-7}，较之纯泥均有明显增加，这也表明生物质的添加可使污泥热解更容易，热解性能更佳。

表 3　市政污泥与不同生物质共热解特性指数

Tab. 3　Characteristic Indices for Co-Pyrolysis of Municipal Sludge with Different Biomass Materials

样品	T_i/(℃)	T_{max}/(℃)	$\Delta T_{1/2}$/(℃)	V_∞	$(dw/dt)_{max}$/(%·min^{-1})	$(dw/dt)_{mean}$/(%·min^{-1})	D
污泥/核桃壳	89	349	104	67.5%	−0.445	−0.13	1.21×10^{-6}
污泥/秸秆	74	338	91	62.8%	−0.421	−0.11	1.28×10^{-6}
污泥/竹粉	194	332	92	67.9%	−0.497	−0.17	9.68×10^{-7}

2.2.2　污泥与生物质协同效应

通过对比污泥与不同生物质共热解过程的失重值和失重速率值，进一步分析污泥与生物质间的协同效应。如图 4 所示，核桃壳、秸秆、竹粉三种生物质与污泥间的协同值均未过零点，这说明在热解初始阶段两者就发生了一定的相互作用。在 300～400 ℃时，污泥/核桃壳和污泥/秸秆的失重协同值呈现先减小后逐渐增加的趋势，表明共热解过程中发生了促进焦产生的协同效应[15]。在高于 500 ℃时，失重协同值基本达到平稳状态，污泥/核桃壳、污泥/秸秆的失重协同值分别为−1.3%和−2.9%，表明污泥/核桃壳、污泥/秸秆存在协同效应。在 200～380 ℃之间，污泥/竹粉混合物质的失重协同值呈现先增加后减小的趋势，并在 320 ℃时达到最大值，且数值均大于零，这一现象主要与共热解过程中挥发物产生有关，相互作用先增加后逐渐减弱。当温度大于 380 ℃时，失重协同值随着温度的增加先缓慢增加后逐渐减小，在 380～650 ℃时失重协同值为 0%～1%，热解终温时失重协同值小于−1%，说明污泥/竹粉之间在热解过程中发生了一定程度的协同效应。此外，对纯泥和污泥/生物质共热解产物进行了 SEM 表征，以进一步分析污泥与生物质间的相互作用。如图 5 所示，纯泥热解后产物呈现粗糙且颗粒分散的状态。污泥/生物质共热解产物均表现出表面平滑且多孔结构，这可能与热解过程中生物质中的羟基、羧基等含氧活性基团与污泥产生的含氮、含硫组分发生交换作用有关，有效减少黏性熔融物质的产生，从而使得热解产物呈现多孔结构，这也进一步说明了污泥与生物质间的协同效应。

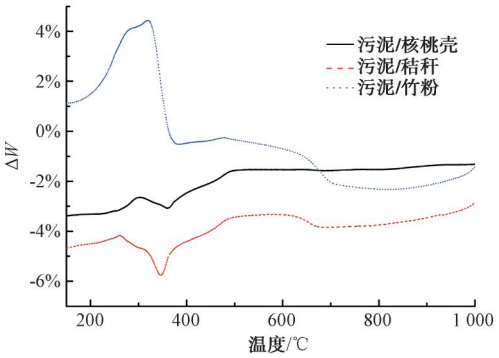


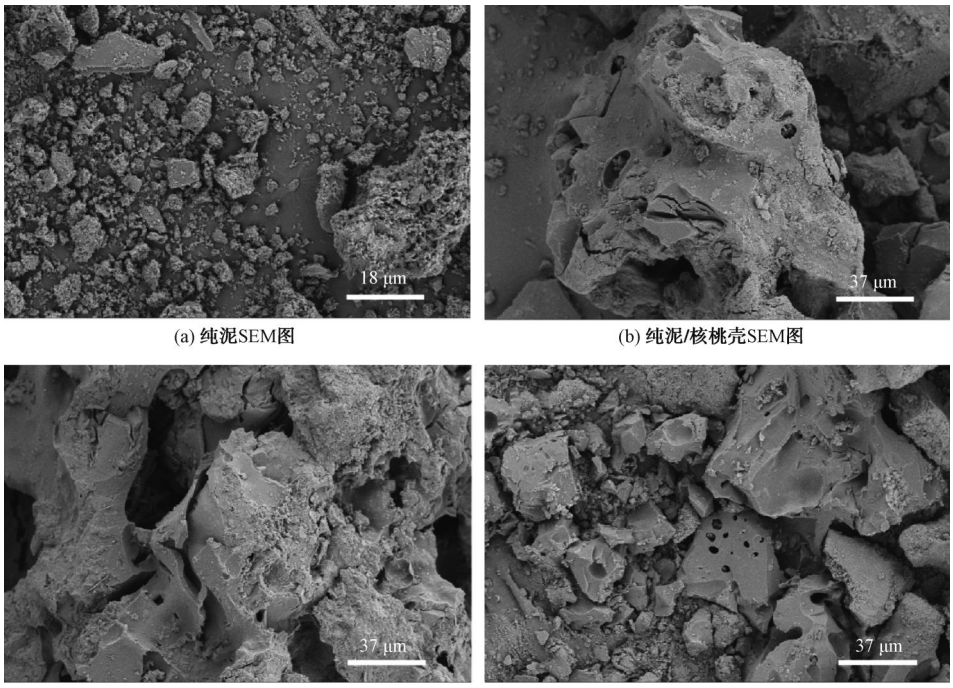
图 4　污泥与核桃壳、秸秆、竹粉共热解过程理论与试验结果对比

Fig. 4　Comparative Analysis of Theoretical and Experimental Results for Co-Pyrolysis of Sludge with Walnut Shell, Straw, and Bamboo Powder

综上所述，污泥与生物质共热解过程存在复杂的协同效应。生物质的添加可显著影响污泥热解过程，一方面通过改变热解动力学参数调控挥发性产物的释放特性，另一方面通过不同掺混比例调节体系中有机质含量，从而影响整体的反应活性及产物分布。这些作用机制表明，污泥与生物质混合热解可能产生协同效应，为污泥资源化为高价值产品及热解工艺优化提供了技术支撑，实现污泥的闭环处置。

2.3　生物炭合成及应用

研究发现，当添加一定量生物质时，不仅可通过协同效应增加产物的孔隙率，还可有效提高生物炭的含碳率。基于此，本文探究了污泥热解合成生物炭和污泥/生物质共热解合成生物炭，以及相关吸附性能。研究发现，纯泥在未添加活性剂合成的生物



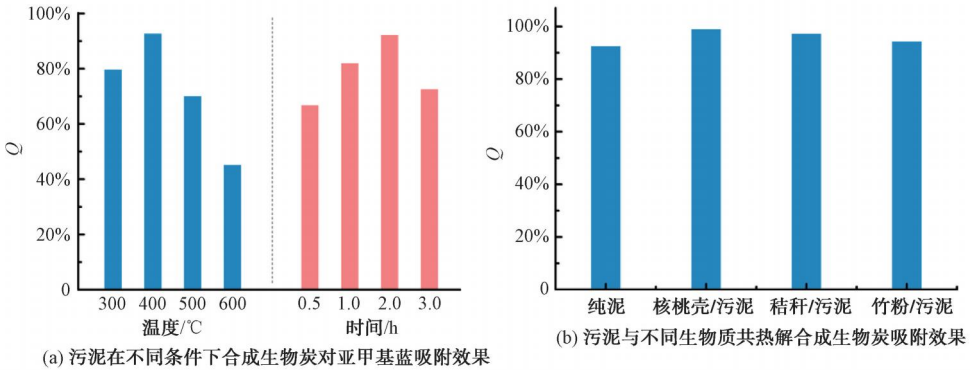
(a) 纯泥SEM图　(b) 纯泥/核桃壳SEM图

(c) 纯泥/秸秆SEM图　(b) 纯泥/竹粉SEM图

图 5　不同物质 SEM 图

Fig. 5　SEM Images of Different Substances

炭对亚甲基蓝仅有 75%的去除效率,而添加活性剂合成的纯泥生物炭表现出 92.1%的吸附效果。在生物炭合成过程中,活化剂的添加可降低热解反应活化能,促进生物炭孔隙结构的形成和发展,大幅提升生物炭的吸附性能[16]。同时,系统探究了污泥在不同温度和不同碳化条件下的吸附效果,如图 6 所示。在同一对比条件下,随着合成温度从 300 ℃升至 600 ℃,生物炭对亚甲基蓝的吸附效果呈现先增加后降低的趋势,这一现象主要是由于过高的温度可能会导致样品孔隙塌陷和表面官能团的分解,进而影响生物炭的比表面积和吸附效果。碳化时间对合成生物炭吸附性能的影响同样显著,当碳化时间从 0.5 h 延长至 2.0 h,生物炭内部碳骨架结构逐渐完善,对亚甲基蓝的吸附效率可达 92.3%;但继续延长至 3 h,已形成的微孔结构被破坏,影响生物炭的吸附效果[17]。随后,研究了污泥和不同生物质共热解合成生物炭的吸附性能。如图 6(b)所示,与纯泥合成生物炭相比,共热解生物炭对亚甲基蓝的吸附效果提升至 97.9%。该结果也表明生物质的添加可有效改善孔隙结构、增加含碳量及提高样品表



(a) 污泥在不同条件下合成生物炭对亚甲基蓝吸附效果　(b) 污泥与不同生物质共热解合成生物炭吸附效果

图 6　污泥在不同温度和不同碳化条件下的吸附效果

Fig. 6　Adsorption Effect of Sludge under Different Temperatures and Carbonization Conditions

面官能团含量等,进而提高生物炭的吸附性能,同时也证明了污泥与生物质间的协同效应。此外,可以发现合成生物炭对 Pb^{2+}、Cu^{2+}、Ni^{2+}、Zn^{2+}、Cd^{2+}等重金属具有 80%以上的吸附效果,展现出巨大的实际应用潜能(图 7)。

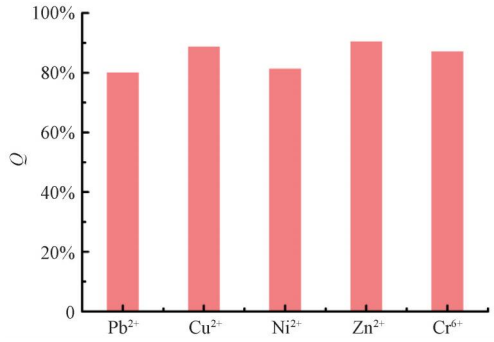


图 7 污泥与不同生物质共热解合成生物炭对不同重金属离子吸附效果

Fig. 7 Adsorption Performance for Different Heavy Metal Ions of Biochar Produced by Co-Pyrolysis of Sludge with Various Biomass Materials

3 结论

本文针对市政污泥进行了热重分析,探究其在不同升温速率下的热解和动力学特性,并分析了污泥与生物质间的相关特性,获得最佳生物炭合成条件,主要结论如下。

(1)随着升温速率的增加,污泥热解最大失重速率升高,峰值温度向高温方向偏移,表现出明显的热滞后性。同时,污泥的综合 D 值逐渐增大,有利于热解反应的进行。根据动力学模型分析,在转化率 $\alpha \leqslant 0.7$ 时,FWO 和 KAS 模型呈现很好的线性关系,并且活化能随着转化率的增加而增加,整体呈现前期热解容易,后期热解困难的特点。

(2)在污泥中掺入核桃壳、秸秆和竹粉等生物质进行共热解,可有效弥补污泥中灰分含量高、挥发分含量低的缺点,提高热解质量损失率,同时促进污泥在低温下热解,表现出明显的协同效应。

(3)基于污泥与生物质间的协同特性,在污泥与生物质质量比为 6∶4、温度为 400 ℃、碳化时间为 2 h 条件下可合成高效生物炭。该材料对染料表现出超 95%的吸附效果,同时对不同重金属离子具有 80%以上去除性能,表现出优异的水污染治理能力。

参考文献

[1] 王洋, 马克东, 崔玉波. 颗粒污泥生物炭活化过硫酸盐降解水中污染物效能研究[C]//中国环境科学学会. 2024 年亚洲低碳技术和创新大会暨第四届碳中和与绿色发展大会论文摘要集. [出版者不详], 2024:75. DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.061742.
Wang Y, Ma K D, Cui Y B. Degradation of pollutants in water by persulfate activated by granular sludge biochar[C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2024 asian conference on low-carbon technology and innovation & the 4th carbon neutrality and green development Conference. [Publisher unknown], 2024: 75. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2024.061742.

[2] 韦波, 张礼祥, 张克钻, 等. 低温污泥基生物炭对四环素吸附性能研究[J]. 广州化工, 2024, 52(6): 211-214, 222.
Wei B, Zhang L X, Zhang K Z, et al. Study on the adsorption performance of low-temperature sludge-based biochar for tetracycline[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(6): 211-214, 222.

[3] 华煜, 杨东海, 戴晓虎. 以无害化为目标、资源化为手段补齐污泥处理短板[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 85-89.
Hua Y, Yang D H, Dai X H. Harmlessness as the goal and recycling as the means to make up for sludge treatment shortcomings[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(1): 85-89.

[4] 陈培骜. 市政污水污泥热解特性及其氮排放控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
Chen P A. Study on municipal sewage sludge pyrolysis characteristics and its nitrogen emission control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[5] 孟江涛. 污泥热解氮迁移转化机制及定向调控策略[D]. 太原: 山西大学, 2024.
Meng J T. Mechanism of sludge pyrolysis nitrogen transformation and targeted regulation strategy[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024.

[6] 吴烨杭, 唐霞, 李碧清, 等. 剩余污泥制备生物炭基磷酸盐吸附剂[J]. 环境科学学报, 2025, 45(7): 296-306.
Wu Y H, Tang X, Li B Q, et al. Preparation of biochar-based phosphate adsorbent from excess sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(7): 296-306.

[7] 陈泊林, 王域骁, 冉景煜, 等. 市政污泥的热解与燃烧特性及动力学[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 9866-9874.
Chen B L, Wang Y X, Ran J Y, et al. Pyrolysis and combustion characteristics and kinetics of municipal sludge[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(23): 9866-9874.

[8] 纪东骅, 李红岩, 雷振东, 等. 葵花杆的热解特性及热解产物分析[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(4): 1-6.
Ji D H, Li H Y, Lei Z D, et al. Pyrolysis characteristics and pyrolysis products of sunflower stem[J]. Biomass Chemical Engineering, 2021, 55(4): 1-6.

[9] 熊青安, 张玉明, 李家州, 等. 基于分布活化能模型法的重油热解动力学对比研究[J]. 过程工程学报, 2023, 23(10): 1421-1434.
Xiong Q A, Zhang Y M, Li J Z, et al. Comparative study on pyrolysis kinetics of different heavy oil based on distributed activation energy model[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(10): 1421-1434.

[10] 齐孝文. 污泥-浒苔共热解行为及热解残渣对水中 Cr(Ⅵ)吸附机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
Qi X W. Study on the co-pyrolysis behavior of sludge and enteromorpha prolifera and the adsorption mechanism of Cr(Ⅵ) in water by pyrolysis residue[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.

[11] 徐期勇, 章佳文, 刘虎, 等. 市政污泥与木屑共热解特性及动力学分析[J]. 可再生能源, 2021, 39(9): 1150-1156.
Xu Q Y, Zhang J W, Liu H, et al. Characteristics and kinetics analysis on co-pyrolysis of municipal sewage sludge and sawdust [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(9): 1150-1156.

[12] 郭晋荣, 贾里, 王彦霖, 等. 城市污泥热解特性及理化性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 2023-2031.
Guo J R, Jia L, Wang Y L, et al. Study on municipal sludge physical-chemical properties and pyrolysis characteristics [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6): 2023-2031.

[13] 肖懿, 王理明, 李东阳, 等. 市政污泥热解特性及含碳官能团演化过程分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1589-1598.
Xiao Y, Wang L M, Li D Y, et al. Pyrolysis characteristics of municipal sludge and transformation of carboncontaining functional groups during pyrolysis process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(5): 1589-1598.

[14] 却家俊. 污泥与生物质协同热解气化的实验研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
QUE J J. Study on synergetic pyrolysis and gasification of sludge and biomass[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2020.

[15] 王梦卓. 市政污泥与木质纤维素生物质共热解行为及热解焦结构演变规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
Wang M Z. Research on co-pyrolysis behavior of sewage sludge and lignocellulose biomass and the structure evolution of pyrolysis char[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.

[16] 裴轩瑗, 任宏宇, 任南琪, 等. 污泥生物炭处理水环境新兴污染物研究进展[J]. 给水排水, 2021, 47(增刊 2): 545-552.
Pei X Y, Ren H Y, Ren N Q, et al. Review on the application of sludge derived biochar in the treatment of emerging contaminants in water environment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S2): 545-552.

[17] 严云, 何强, 沙建雄, 等. 污泥-杏壳基生物质炭的制备工艺优化及对亚甲基蓝吸附研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(11): 278-282.
Yan Y, He Q, Sha J X, et al. Optimization of the preparation process of sludge-apricot shell-based biomass carbon and its adsorption towards methylene blue[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(11): 278-282.

(上接第 109 页)

参考文献

[1] 严晨. 基于 PLC 和物联网的分散式污水处理设备自动化控制系统研究[J]. 科技风, 2023(12): 7-9.
Yan C. Research on automatic control system of decentralized wastewater treatment equipment based on PLC and Internet of Things[J]. Technology Wind, 2023(12): 7-9.

[2] 陆贤文. 黎平县农村生活污水治理现状及成效分析[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(7): 108-110.
Lu X W. Present situation and effect analysis of rural domestic wastewater treatment in Liping County [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2024, 37(7): 108-110.

[3] 丁建军, 杨云波. 农村生活污水治理现状及技术应用比较研究[J]. 资源节约与环保, 2022(8): 141-144.
Ding J J, Yang Y B. A comparative study on the current status and technical applications of rural domestic wastewater treatment [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2022(8): 141-144.

[4] 柴喜林. 乡村振兴战略下农村生活污水治理模式优选之思考[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 106-110.
Chai X L. Insights into optimization of rural domestic wastewater treatment technology under rural revitalization[J]. Environmental Conformity Assessment, 2019, 11(1): 106-110.

[5] 刘堰杨, 唐启亮. 成都市乡镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 76-86.
Liu Y Y, Tang Q L. Characteristics of influent wastewater quality in township WWTPs in Chengdu City [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 76-86.

[6] 孙嘉瑄. 受益者付费原则下的生态补偿制度研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
Sun J X. Research on ecological compensation system under beneficiary pays principle [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2024.