

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 13. 001

温度与碳基骨架协同调控污泥热干化效能与燃料特性

赵 智¹, 刘金鑫², 黄昭玮³, 李 红³, 高林霞¹, 刘 欢²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉天源集团股份有限公司, 湖北 武汉 430090)

摘 要: 在污泥热干化过程中,水分蒸发消耗大量能量,污泥黏附设备内壁后传热效率下降,甚至引发运行中断,存在高能耗与运行不稳定的问题。为此,在80~250℃宽温度区间内进行污泥热干化实验,探究温度与碳基骨架对污泥热干化效能与燃料特性的协同调控机制。结果表明,温度升高会加速水分蒸发,碳基骨架通过构建多孔“水分通道”与提供“刚性支撑”使污泥初始内聚应力和黏附应力分别降低43%和37%,提高了运行稳定性,在130℃条件下实现干化时间缩减53.5%、干化效果提升17%、干化能耗降低77.8%。温度超过190℃将引发脂类与蛋白质的显著热分解,导致C、H元素损失,使燃料热值下降高达44%。因此,对污泥进行碳基骨架调质并在130℃下进行热干化,可实现污泥的高效脱水和能源化利用的双重目标。

关键词: 污泥; 碳基骨架; 热干化; 水分释放; 燃料特性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0001-08

Synergistic Regulation of Sludge Thermal Drying Efficiency and Fuel Properties by Temperature and Carbon-based Skeleton

Zhao Zhi¹, Liu Jinxin², Huang Zhaowei³, Li Hong³, Gao Linxia¹, Liu Huan²

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Tianyuan Group Co. Ltd., Wuhan 430090, China)

Abstract: In the sludge thermal drying process, water evaporation consumes a large amount of energy, and the sludge adheres to the inner wall of the equipment, which reduces the heat transfer efficiency and even triggers the interruption of operation, resulting in high energy consumption and unstable operation. To this end, sludge thermal drying experiments were carried out in a wide temperature range of 80–250℃ to investigate the synergistic control mechanism of temperature and carbon-based skeleton on the sludge thermal drying efficiency and fuel properties. The results showed that the temperature increase accelerated water evaporation, and the carbon-based skeleton reduced the initial cohesive stress and adhesion stress of sludge by 43% and 37% respectively through the construction of porous water channels and the provision of rigid support, and improved the stability of the operation. The drying time was reduced by 53.5%, the drying efficiency was increased by 17%, and the drying energy

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2023BEB009)

通信作者: 高林霞 E-mail: 15623901790@163.com

consumption was reduced by 77.8% under the condition of 130 °C. Temperatures exceeding 190 °C will lead to significant thermal decomposition of lipids and proteins, resulting in the loss of C and H elements and a decrease in the calorific value of the fuel by up to 44%. Therefore, carbon-based skeleton conditioning of sludge and thermal drying at 130 °C can achieve the dual goals of efficient dewatering and energy utilization of sludge.

Keywords: sludge; carbon-based skeleton; thermal drying; water release; fuel properties

根据2025年发布的城乡统计年鉴,我国污泥产量已经达到了 $7\,540\times 10^4$ t(以80%含水率计),其处理处置面临着重大挑战。剩余污泥含水率高达97%~99%,传统机械脱水仅能将其降至80%,不仅贮运负担重,也无法满足焚烧或土地利用等后续处置要求^[1-2]。污泥热干化作为一种高效的深度脱水技术,通过高达250 °C的热处理使水分蒸发,可实现污泥彻底干化与减容,为能源化利用奠定了基础。然而,该技术面临能耗高与运行稳定性差等问题,水分蒸发能耗大、污泥在干化中表现出的强黏附性与内聚性易导致设备结垢与传热效率下降,是主要瓶颈。因此,通过调质改善污泥传质特性、降低能耗已成为研究重点。

利用来源广泛、成本低廉且环境友好的农业废弃物制备碳基骨架材料,是一种颇具应用潜力的调质方案。Liu等^[3]发现添加锯末碎片可提升污泥脱水性能和干燥速度。Li等^[4]在80 °C干化条件下,研究了添加比例为10%~40%的木屑对污泥对流干化的影响,发现干燥速率随木屑量的增加而提高。颜莹莹等^[5]研究了多种农林废弃物对污泥太阳能干化的影响,结果表明玉米秸秆的干化效果最佳。

相关研究证实了农业废弃物添加剂对污泥干化的促进作用,但局限于单一温度点或狭窄的温度范围,且侧重于表观干化速率的观察,缺乏在宽温度区间内对干化机理的深入揭示。为此本研究系统探究干化温度(80~250 °C)与添加秸秆类碳基骨架对污泥干化过程及其产物燃料性能的耦合影响机制,为开发高效、低耗的污泥深度脱水与能源化利用技术提供理论依据和数据支撑。

1 实验材料与方法

1.1 原料与性质

本研究所用污泥来源于安徽某污泥处置厂的脱水污泥,取样后于4 °C下保存。根据实验前期对当地碳基骨架原料购买成本和运输储藏成本的调

研,实验采用粒径在1~10 mm范围内的秸秆作为碳基骨架。样品的含水率采用重量法测定,将实验样品置于电鼓风干燥箱中于105 °C干燥至恒质量,对干样品进行工业分析和元素分析。其中,污泥的含水率为82.10%,热值为9.02 MJ/kg,挥发分、灰分、固定碳的质量分数(工业分析)分别为45.06%、54.75%、0.19%,C、H、O、N、S元素质量分数分别为20.42%、3.73%、16.84%、3.62%、0.66%;碳基骨架的含水率为6.40%,热值为19.58 MJ/kg,挥发分、灰分、固定碳的质量分数(工业分析)分别为76.15%、14.73%、13.01%,C、H、O、N、S元素质量分数分别为40.35%、4.96%、39.55%、0.32%、0.09%。

1.2 实验装置与过程

本研究在小型机械干化实验台架上进行,核心装置和流程如图1所示。

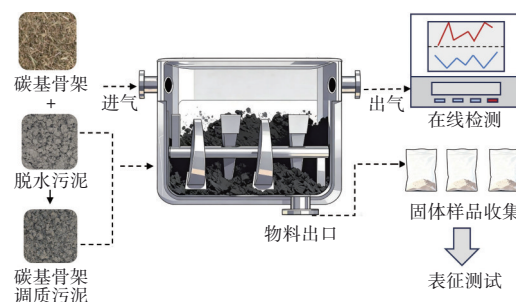


图1 干化实验装置和流程

Fig.1 Drying experimental setup and process

干化设备为桨叶式污泥干化炉,炉膛壁面和转轴均为双层空心结构,且内部通有导热油,通过调节导热油温度间接控制干化污泥温度,采用红外测温仪对内壁温度进行测量校准,干化温度分别设定为80、100、130、160、190、220和250 °C。将湿污泥干基质量10%的碳基骨架与湿污泥均匀混合获得碳基骨架调质污泥,待炉膛达到设定温度后,取4 kg原始污泥或碳基骨架调质污泥于干化设备炉膛内。干化过程中,炉内转轴对污泥进行持续搅拌使其均匀受热,同时进风口通入流量为1.6 m³/h的空气,及

时排出产生的水分与气体。出风口处连接红外烟气分析仪,实时监测水蒸气及气态产物的释放浓度。当出风口处水分释放浓度为当日空气中的水蒸气浓度,且 5 min 内无明显波动时,干燥过程结束。不同干化时期的污泥样品根据完全干化所需时间进行均匀划分并取前、中、后期的样品,取完样后重新放样干化,对取出的样品冷却密封保存。

1.3 分析项目与方法

采用 MCA10 红外烟气分析仪检测污泥样品干化生成的水蒸气和气体释放速率,以探究不同温度区间的水分和气体释放行为。采用 Diamond DSC 差示扫描量热仪检测干化过程中污泥的相变焓,定量分析干化过程中自由水和结合水含量的变化。采用 ZLGL-10 台式冷冻干燥机对污泥样品进行冷冻干燥,以保留其原始结构,再利用 EVO-15 扫描电镜检测冷冻干燥后污泥样品的表现形貌,探究碳基骨架的添加对污泥孔隙结构的影响。采用 Nicolet iS50R 傅里叶红外光谱仪检测污泥表面的官能团,从分子层面阐释干化过程发生的物理化学作用。采用 Thermostep 工业分析仪检测干化产物的挥发分、灰分和固定碳,采用 EA3000 元素分析仪检测干化产物的 C、H 元素含量,采用 C6000 自动量热仪检测干化产物的热值,为评价其能源化利用潜力提供关键数据支撑。

在自主搭建的控温黏滞力在线测试系统上对污泥的黏附应力和内聚应力进行定量表征,装置结构如图 2 所示,该系统的核心功能包括基于电机的自动化测量流程以及借助力传感器实现的数字化信号输出,从而确保测量过程可控、结果可重复。测量原理是通过正交的机械动作将污泥的总黏滞力分解为黏附应力与内聚应力两个独立分量,并对其峰值力进行直接测量。操作步骤:①将污泥装入套筒内,并用铁块压实 5 min;②利用垂直向上的推力,使污泥与筒壁发生分离,其最大推力净值为黏附应力,记为 $F_{\text{黏附}}$,表征污泥与接触面的黏附强度;③利用水平方向的剪切力,将中部泥饼剪断,其最大拉力净值为内聚应力,记为 $F_{\text{内聚}}$,表征污泥自身内部的结合强度。污泥的黏附应力 $F_{\text{黏附}}$ 可由式(1)计算得到,内聚应力 $F_{\text{内聚}}$ 可由式(2)计算得到。

$$F_{\text{黏附}} = X_2 - X_1 \quad (1)$$

$$F_{\text{内聚}} = Y_2 - Y_1 \quad (2)$$

式中: X_1 为垂直剪切力传感器的测量值,Pa; X_2

为垂直剪切力传感器读数的最大值,Pa; Y_1 为水平剪切力传感器的测量值,Pa; Y_2 为水平剪切力传感器读数的最大值,Pa。

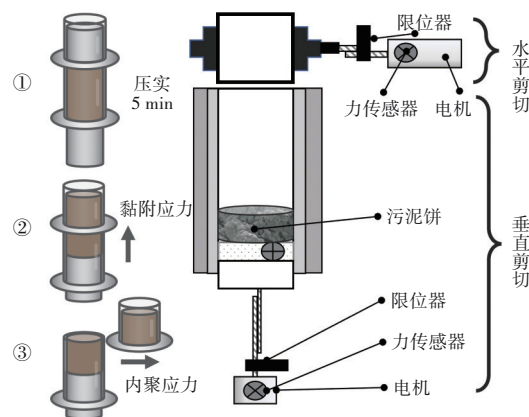


图2 黏滞力测试台架

Fig.2 Viscous force test stand

高含水率是污泥处理的挑战,污泥焚烧前的干化需要消耗大量的能量。本研究以污泥焚烧的能量回收率为指标,分析污泥样品干化的能耗。碳基骨架自身的干化能耗远低于污泥^[6],可忽略不计,参考相关文献计算污泥样品的干化能耗^[7-10]。

2 结果与讨论

2.1 干化温度和碳基骨架对水分释放过程的影响

2.1.1 对污泥水分释放速率和干化时间的影响

在不同干化温度下,污泥水分释放速率随时间的变化如图3所示(以80、130、190、250℃为代表),呈现出一致的三个阶段特征,即预热阶段、高速释放阶段和减速释放阶段^[11]。预热阶段:该阶段从干化开始,至水分释放达到峰值为止。其主要特征是干化炉膛对污泥进行快速加热,使表层及近壁区域的水分迅速蒸发,导致水分释放速率在短时间内急剧攀升至最大值。温度的升高会提高水分释放速率的峰值,从80℃提升至250℃时,水分释放的最高速率从0.48 kg/t提高至2.78 kg/t,提升幅度为479%。高温下水的饱和蒸气压急剧升高,大幅强化气液相传质驱动力^[12],还可能导致污泥表面微孔结构瞬间扩张,降低了水分释放的阻力。高速释放阶段:该阶段始于峰值点,止于速率下降至峰值的一半时。温度升高会显著降低高速阶段的持续时间,高温加速了污泥内部的导热速率,使内部的水分更快地达到沸点。减速释放阶段:以水分释放速率降至峰值的1/2为起点,至干化过程结束。在此阶段

水分释放速率降低,继续加热污泥中的自由水将尽,污泥颗粒破碎,微生物胞体破裂,存在于污泥颗粒和微生物细胞膜内的结合水脱离。温度升高会

降低减速阶段的持续时间,且会加快水分降低的速率。碳基骨架的添加主要强化了高速释放阶段和减速阶段前期的水分释放,从而缩短了干化时间。

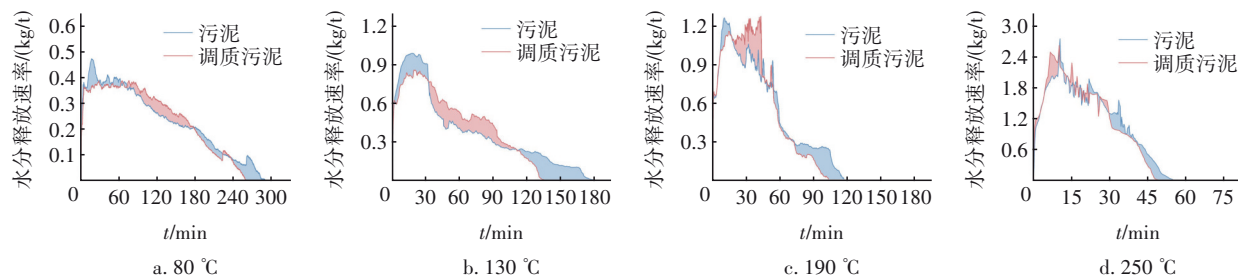


图3 不同干化温度下水分释放速率随时间的变化

Fig.3 Variation of water release rate with time at different drying temperatures

温度和碳基骨架对污泥干化时间和干化能耗的影响如表1所示,随着温度从80 °C升高至250 °C,污泥干化时间不断缩短,碳基骨架的添加进一步强化了这一效果,其通过促进水分释放有效提升了干化效率。干化时间的降低比例是以80 °C下污泥的干化时间为基准,碳基骨架调质污泥的降幅是以同温度条件下污泥的干化时间为基准。在130 °C条件下,碳基骨架调质污泥的干化时间降低53.5%,干

化降幅为15.8%,湿污泥的干化能耗为7.6 MJ/kg,碳基骨架调质污泥的干化能耗为1.6 MJ/kg,相较于原泥的能耗降低78.8%;当温度继续升至160 °C以上时,干化时间的降幅逐渐平缓,碳基骨架对水分释放的促进作用也相应减弱,同时能耗降低幅度下降,反映出其在高温阶段调质效果的局限性。综合考虑干化时间降幅和能耗降低的情况,确定碳基骨架调质污泥的最佳热干化温度为130 °C。

表1 温度和碳基骨架对污泥干化时间和干化能耗的影响

Tab.1 Effect of temperature and carbon-based skeleton on sludge drying time and drying energy consumption

温度/°C	污泥		碳基骨架调质污泥				
	干化时间/min	降低比例/%	干化时间/min	降低比例/%	降幅/%	干化能耗/(MJ/kg)	降低能耗/%
80	291.2	0	261.5	10.2	10.2	3.8	50.2
100	259.5	10.9	221.8	23.8	12.9	3.2	58.5
130	181.3	37.7	135.4	53.5	15.8	1.6	78.8
160	123.9	57.5	116.3	60.1	2.6	4.4	41.5
190	117.9	59.5	103.8	64.4	4.8	3.5	53.4
220	76.4	73.8	72.7	75.0	1.3	4.5	40.7
250	55.4	81.0	50.1	82.8	1.8	4.0	47.9

2.1.2 对污泥黏滞特性的影响

污泥的黏滞特性表现为与其他物质或接触面产生黏附或结团的现象,污泥与接触面间的黏附应力以及污泥颗粒间的内聚应力是导致黏滞现象的基础。在自制黏滞力测试台架上对不同干化温度和时间的污泥样品进行测试,内聚应力的测试结果如图4(a)所示,其呈现相似变化趋势,温度升高会加快内聚应力的降低。污泥初始的内聚应力为1 257 Pa,碳基骨架调质污泥初始的内聚应力为712 Pa,碳基骨架的添加能够降低污泥的内聚应力,降低幅度为43%。随着干化的进行,污泥的内聚应力与含水率呈正相关并持续下降,说明水分的脱除与

内部结构强度的减弱同步发生,碳基骨架分散于污泥颗粒之间,增加了污泥颗粒间的物理距离^[13],有效地削弱了污泥颗粒间的结合力,从而降低了水分从内部迁移至表面的阻力,进而促进了水分的顺畅释放。

污泥的黏附应力测试结果如图4(b)所示,干化过程中黏附应力呈现先升后降的趋势。随着干化温度从80 °C升高到250 °C,黏附应力的峰值从3 043 Pa增至3 976 Pa,且峰值出现的时间提前。黏附应力受污泥中碳水化合物和蛋白质的影响^[14],升高温度可能通过加强美拉德反应导致蛋白质变性形成黏附化合物^[15],从而引起干化过程中黏附应力

的增加。与此同时,碳基骨架的添加有效地改善了污泥的黏附特性。碳基骨架不仅将污泥的初始黏附应力从 1 692 Pa 降低至 1 065 Pa,降幅达 37%,而且能在整个干化过程中将黏附应力峰值抑制在较低的水平,降幅超过 25%。这表明碳基骨架通过构建孔隙结构,有效抑制了峰值强度,从而在高温条件下仍能维持良好的水分传输通道与传热界面,保障了干化过程的持续高效。

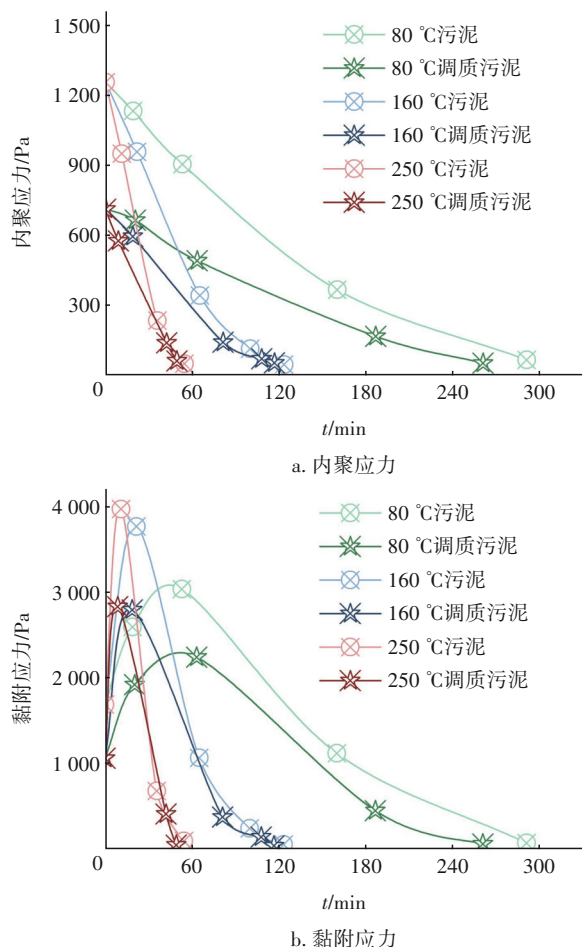


图 4 不同温度污泥样品黏滞特性随时间的变化

Fig.4 Variation of viscous characteristics of sludge samples at different temperatures over time

2.1.3 对污泥样品颗粒表面形貌的影响

通过环境扫描电镜对不同干化条件下污泥样品的微观形貌进行表征,结果见图 5。对于污泥而言,在 80 °C 的条件下,随着水分的蒸发,在表面张力的作用下,污泥发生收缩并逐渐靠拢,形成低孔隙率的密实结构,水分释放受阻,干化时间长;在 160 °C 的条件下,污泥表层与内部形成温度梯度和含水率梯度,导致不均匀收缩,产生局部性裂纹,且

部分破碎成小块,降低了水分向污泥表面扩散的难度,提升了干化效率;在 250 °C 的条件下,污泥本身发生热分解反应,气体从污泥表面逸出,形成了逃逸孔道,水分也可以从逃逸孔道逃逸,促进了水分的释放。对于碳基骨架调质污泥而言,碳基骨架的添加使得污泥表面呈现颗粒状,为污泥提供刚性支撑^[16],形成孔道,有利于水分的释放。同时,碳基骨架的存在降低了污泥间的黏滞力,转轴搅拌破碎部分块状污泥,减少污泥的团聚现象,减少与干化设备的黏附,使污泥受热更加均匀,从而进一步促进水分的释放。

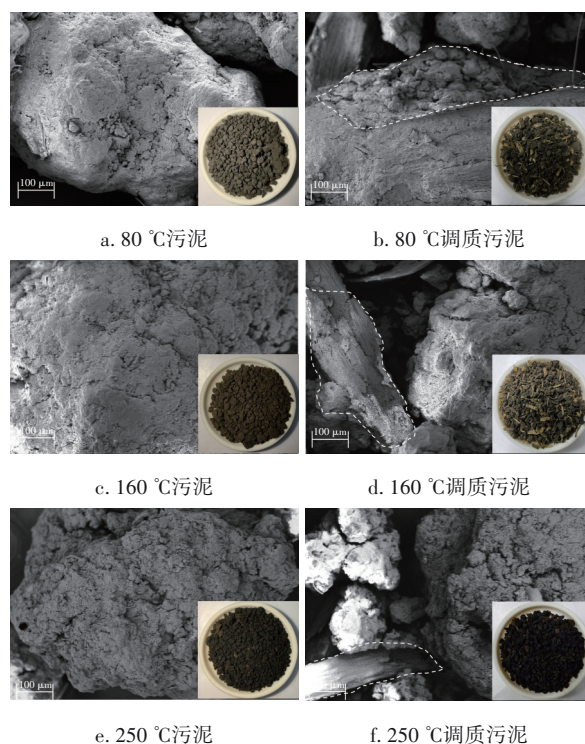


图 5 污泥样品形貌随温度的变化

Fig.5 Changes in morphology of sludge samples with temperature

2.1.4 对污泥水分形态的影响

为了探究干化过程中污泥水分形态的演变规律,以 80 °C 干化温度条件下的污泥样品为例,对于干化过程前、中、后期的污泥样品进行差示扫描量热 (DSC) 冷冻法测试,根据得到的自由水融化焓计算样品中自由水与结合水的含量,结果如图 6 所示。随着干化的进行,污泥中自由水的含量从 70.8% 降至 5.4%,碳基骨架调质污泥的自由水含量从 68% 降至 0,两者变化趋势一致,但后者的自由水降低速率更快,表明碳基骨架有助于促进污泥中自由水的

释放。结合水的变化趋势则有所不同,污泥中的结合水从11.3%持续上升至19.7%,其原因是污泥干化过程优先脱除易于释放的自由水,导致污泥表面结壳团聚,阻碍水分释放,部分自由水转换成了结合水。碳基骨架调质污泥中的自由水含量从12.8%升至18.5%,随后降低至17.6%,其初始结合水含量较高,原因可能是调质过程中碳基骨架的添加在污泥内部形成支撑结构,构建出多尺度孔隙:小孔道促进水分传输与释放,大孔则可能滞留部分水分,将少量自由水转化为结合水^[17],随着干化的进行,多尺度孔隙展现出优势,自由水率先脱除完毕,随后开始脱除部分结合水。

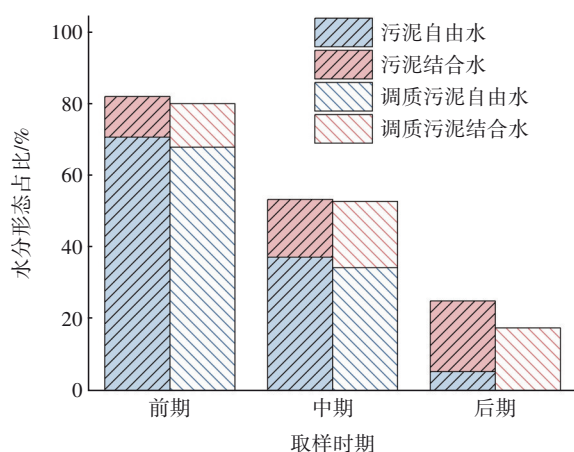


图6 水分形态随干化时期的变化

Fig.6 Changes in water morphology with drying periods

2.2 干化温度对污泥燃料性能的影响

2.2.1 热值与工业分析

评价污泥燃料性能的关键指标主要包括热值、工业分析组分和元素分析组分。干化温度不仅影响水分脱除效率,而且会改变污泥中有机组分的含量,从而决定其燃料回收的潜力。当干化温度为80~100、130~190、220、250℃时,污泥的热值分别为8.8~9.1、8.9~9.1、5.0、4.6 MJ/kg,碳基骨架调质污泥热值分别为9.8~10.2、9.8~10.5、6.0、4.8 MJ/kg。可见,在80~190℃的干化温度范围内,污泥样品的热值波动较小,介于8.8~9.1 MJ/kg之间,表明此阶段水分的脱除以物理蒸发为主,污泥中的有机质未发生明显的损耗;碳基骨架的添加能够使热值提升至9.8~10.5 MJ/kg,增幅约为11%,热值的提升主要缘于碳基骨架本身含有较高挥发分。然而,当温度升高至220℃时,污泥热值显著下降,降幅达44%;碳基骨架调质污泥的热值降至6.0 MJ/kg左右。温

度升高至250℃时,两者热值继续下降,但降幅趋缓。

工业分析结果显示,污泥主要是由灰分和挥发分组成,固定碳含量极低。在80~190℃的干化温度范围内,污泥中挥发分占比在45.2%左右,碳基骨架调质污泥则在49.3%左右;当温度升高至220℃时,污泥中挥发分降至27.2%,碳基骨架调质污泥挥发分降至30.6%;温度升高至250℃时,挥发分进一步下降,两者分别为24.4%和26.9%。该变化趋势表明,在温度高于220℃时,热值的降低是由于挥发分降低,污泥有机组分中的不稳定脂肪化合物和含碳官能团开始断裂,生成CO、CO₂等小分子逸出^[18],显著削弱了产物的能源回收潜力。

2.2.2 元素分析

为了进一步探究污泥热值损失的原因,对样品进行了元素分析。当温度从80℃升高至190℃时,污泥的C和H元素含量分别稳定在20.0%~21.2%和3.6%~3.8%,碳基骨架调质污泥的C和H元素含量提升至21.6%~22.5%和3.7%~4.0%,提升幅度分别在7%和4%左右,这表明碳基骨架的添加会增加污泥中C和H元素比例,从而提高其热值。当温度升高至220℃时,污泥的C和H元素含量分别降低至15.6%和1.7%,碳基骨架调质污泥的C和H元素含量降低至17.2%和2.1%。当温度升高至250℃时,两者的C和H元素占比进一步降低,污泥的C和H元素含量分别为12.5%和1.4%,碳基骨架调质污泥的C和H元素含量分别为13.3%和1.5%。污泥热值本质上是有机质分子中的化学键(C—C、C—H等)断裂时释放的能量,C和H元素对污泥的热值影响较大,污泥样品热值在高温下的降低归因于含C和H挥发分的热分解。

2.2.3 化学组成分析

通过FT-IR表征探究温度对污泥样品化学组分中官能团的影响,结果表明,添加少量的碳基骨架不会对污泥表面官能团产生显著影响。当温度从80℃升至160℃时,谱线差别不大;当干化温度提高至250℃时,污泥样品位于1452、1543和2924 cm⁻¹处的吸收峰强度略微降低。在1452 cm⁻¹处的特征峰是由羧基中的O—H伸缩振动导致^[19],在1543 cm⁻¹处的特征峰是由酰胺结构中的C—N和N—H伸缩振动导致^[20],在2924 cm⁻¹处的特征峰是由脂类物质中的C—H伸缩振动导致^[21],这表明在250℃机械热干化过程中,污泥中亚甲基、酰胺基减少,脂

类和蛋白质类物质发生了分解或重构。

2.2.4 气体产物含量

为了探究污泥中脂类和蛋白质类物质的热分解行为,对干化过程中含碳气体产物的特性进行了分析,结果如图7所示。在温度不高于190℃时,CO与CH₄的释放浓度均处于较低的水平,表明该温度范围尚未达到有机质明显分解的条件。当温度升至220℃时,含碳气体释放浓度显著上升,污泥的CO和CH₄释放浓度分别为58.4和1.3 kg/t,而碳基骨架调质污泥的释放浓度则达到了82.3和2.3 kg/t。碳基骨架的添加提升了CO与CH₄的释放量,这与其自身较高的C和H元素含量有关,在相同温度下更易发生热分解并生成更多含碳气体。当温度进一步升高至250℃时,两种气体的释放浓度继续升高,说明升温对脂质和蛋白质类有机组分热分解具有促进作用,从而生成更多的CO和CH₄。

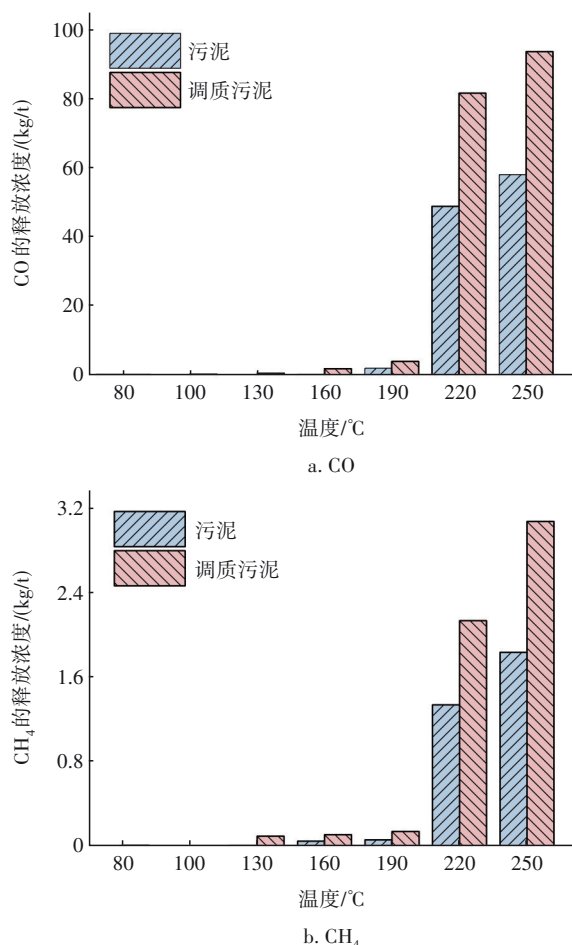


图7 CO和CH₄的释放浓度随温度的变化

Fig.7 Variation of CO and CH₄ release concentrations with temperature

3 结论

① 温度是强化污泥干化过程的核心驱动力,其作用机理贯穿干化全过程。在预热阶段,高温通过急剧提升水的饱和蒸气压来强化气液相传质,使水分释放峰值速率从80℃时的0.48 kg/t激增至250℃时的2.78 kg/t,提升幅度高达479%。进入高速与减速释放阶段后,高温显著加速了内部导热,缩短了各阶段的持续时间,从而整体上大幅提升了干化效率。

② 碳基骨架通过构建多孔结构、提供刚性支撑,有效改善污泥的力学性质与水分迁移通道,并且显著降低污泥内聚应力与黏附应力,缓解壁面黏附问题。在80~130℃范围内,其增效作用随温度上升而增强,并于130℃达到最佳干化效果,此时总干化时间缩短53.5%,干化效率提升15.8%,能耗较原泥降低78.8%,证实了碳基骨架调质与温度调节耦合可实现污泥干化过程的节能降耗。

③ 190℃是一个关键温度阈值。当干化温度超过此阈值时,污泥挥发分中的脂质和蛋白质类等物质发生热分解反应,主要是C—H、O—H、C—N、N—H等化学键断裂,以CO和CH₄气体形式损失大量C、H元素,导致固体产物的热值等燃料性能急剧劣化,从而系统揭示了热值损失的反应路径与机理,并为优化干化温度上限提供了关键数据支撑。

参考文献:

- [1] Salamat R, Scaar H, Weigler F, et al. Drying of biogas digestate: a review with a focus on available drying techniques, drying kinetics, and gaseous emission behavior[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(1):5-29.
- [2] Shao L, Wang T, Zhao L, et al. The effect of adding straw on natural solar sludge drying [J]. *Drying Technology*, 2015, 33(4):414-419.
- [3] Liu H, Xiao H, Fu B, et al. Feasibility of sludge deep-dewatering with sawdust conditioning for incineration disposal without energy input[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 655-662.
- [4] Li J, Fraikin L, Salmon T, et al. Convective drying behavior of sawdust-sludge mixtures in a fixed bed[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(4):395-402.
- [5] 颜莹莹, 满高智, 何智, 等. 机械扰动与碳基骨架原位强化污泥太阳能干化[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(13):26-32.

- Yan Yingying, Man Gaozhi, He Zhi, et al. Enhanced solar drying of sewage sludge using mechanical disturbance and carbonaceous skeleton blending [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(13): 26–32 (in Chinese).
- [6] Wang T, Xue Y, Hao R, et al. Mechanism investigations into the effect of rice husk and wood sawdust conditioning on sewage sludge thermal drying [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 316–323.
- [7] Demirbas A. Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2007, 29(7): 649–655.
- [8] Kliopova I, Makarskiene K. Improving material and energy recovery from the sewage sludge and biomass residues [J]. Waste Management, 2015, 36: 269–276.
- [9] Wang T, Xue Y, Zhou M, et al. Comparative study on the mobility and speciation of heavy metals in ashes from co-combustion of sewage sludge/dredged sludge and rice husk [J]. Chemosphere, 2017, 169: 162–170.
- [10] Deng W, Li X, Yan J, et al. Moisture distribution in sludges based on different testing methods [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(5): 875–880.
- [11] 汤连生, 张龙舰, 罗珍贵. 污泥中水分布形式划分及脱水性能研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 309–314.
- Tang Liansheng, Zhang Longjian, Luo Zhengui. Water distribution and dewatering performance in sludge [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(2): 309–314 (in Chinese).
- [12] Lee K, You D B. Development of a low-pressure materials pre-treatment process for improved energy efficiency [J]. Metals and Materials International, 2017, 23(5): 1029–1036.
- [13] Bao P R, Du C Y, Li Y F, et al. Application of skeleton builders to sludge dewatering and disposal: a critical review [J]. Science of the Total Environment, 2023, 906: 167106.
- [14] Yoo J, Oshita K, Kusakabe T, et al. Adhesion behavior of dewatered sewage sludge during indirect thermal drying [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 381: 125203.
- [15] Ai J, Wang K, Fu Q, et al. Novel insights into the biopolymers transformation under wastewater sludge drying process at different temperatures in relation to drying behavior [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486: 150376.
- [16] Han X, Huan L, Ming J, et al. Process control for improving dewatering performance of sewage sludge based on carbonaceous skeleton-assisted thermal hydrolysis [J]. Chemosphere, 2022, 296: 134006.
- [17] Liu J, Liu H, He C, et al. Correlation between sewage sludge pore structure evolution and water filtration performance: effect of thermal hydrolysis with or without carbonaceous skeleton-assisted [J]. Water Research, 2025, 268: 122578.
- [18] 丁蕾, 陈方军, 任冠龙, 等. 制浆造纸厂污泥热分解特性及其动力学、热力学分析 [J]. 能源环境保护, 2024, 38(2): 180–189.
- Ding Lei, Chen Fangjun, Ren Guanlong, et al. Thermal decomposition characteristics, kinetics and thermodynamic analysis of pulp and paper mill sludge [J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(2): 180–189 (in Chinese).
- [19] Zhen G, Wang J, Lu X, et al. Effective gel-like floc matrix destruction and water seepage for enhancing waste activated sludge dewaterability under hybrid microwave-initiated Fe(II)-persulfate oxidation process [J]. Chemosphere, 2019, 221: 141–153.
- [20] Ge D, Zhang W, Yuan H, et al. Enhanced waste activated sludge dewaterability by tannic acid conditioning: efficacy, process parameters, role and mechanism studies [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118287.
- [21] Bian C, Ge D, Wang G, et al. Enhancement of waste activated sludge dewaterability by ultrasound-activated persulfate oxidation: operation condition, sludge properties, and mechanisms [J]. Chemosphere, 2021, 262: 128385.

作者简介: 赵智(2000—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为高水分有机固废能源化。

E-mail: 1799964803@qq.com

收稿日期: 2026-02-11

修回日期: 2026-04-01

(编辑: 李德强)