

# 市政污泥与餐厨沼渣共热解制备生物炭的工艺优化及重金属固化机制

张磊<sup>1</sup> 马东兵<sup>2</sup> 冯曜<sup>3</sup> 郭修智<sup>4</sup>

1, 3, 4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 天津 300074

2. 天津精创家工程设计咨询有限公司 天津 300202

**摘要:** 市政污泥与餐厨沼渣作为城市固体废弃物的重要组成部分, 具有高含水率、高有机质和潜在污染性等特征, 若处置不当将对环境造成严重影响。近年来, 热解技术因其减量化、无害化和资源化的优势被广泛应用于污泥与有机废弃物处理领域。本文以市政污泥与餐厨沼渣为主要原料, 研究其共热解制备生物炭的工艺优化及重金属固化机制。通过对热解温度、原料配比、升温速率等因素的系统分析, 探讨其对生物炭产率、孔隙结构及元素组成的影响。结果表明, 合理的混合比例与适宜的热解温度可显著提高炭化产物的比表面积及固定碳含量, 同时有效降低重金属的生物有效性。通过XRD、FTIR和XPS等手段对热解产物进行结构与元素形态表征, 发现重金属主要以硫化物、氧化物和碳酸盐等稳定形态存在, 显示出较强的固化能力。该研究为污泥与餐厨废弃物协同处置及资源化利用提供了新思路, 也为生物炭在环境修复领域的推广奠定了理论基础。

**关键词:** 市政污泥; 餐厨沼渣; 共热解; 生物炭; 重金属固化

## 引言

随着城市化水平的不断提高, 市政污泥和餐厨废弃物的产生量呈持续增长趋势。据统计, 我国城市污泥年产量已超过6000万吨(以含水率80%计), 而餐厨垃圾的沼渣产量也在快速上升。本文围绕市政污泥与餐厨沼渣共热解制备生物炭的关键技术参数与机理展开研究, 分析不同工艺条件下的产物特性及重金属固化机制, 为城市固废协同资源化利用提供科学依据。

## 一、污泥与餐厨沼渣共热解的可行性与反应特征

### (一) 物料特性与互补性分析

市政污泥与餐厨沼渣是两类典型的有机固体废弃物, 其物理化学特性存在显著差异, 但在共热解过程中却具有良好的互补性。市政污泥主要来源于污水处理过程, 成分复杂, 含有较高比例的有机质、矿物颗粒以及多种重金属元素。其灰分含量高、热值较低, 同时含氮量大, 属于低可燃性的固废材料。单独对污泥进行热解时, 由于灰分含量高、无机成分比例大, 易导致热解产物的碳化效率低, 生物炭的孔隙结构发育不良, 影响其后续的吸附性能与应用价值。

相较之下, 餐厨沼渣是餐厨垃圾厌氧消化后的固体残渣, 富含脂肪、蛋白质、淀粉和纤维素等可燃性有机

物, 碳氢比高, 具有较强的热反应活性和可燃性。单独热解餐厨沼渣虽然热值高、反应速率快, 但易产生过度挥发现象, 导致炭收率低、生物炭结构不稳定。将市政污泥与餐厨沼渣按一定比例混合热解, 可以在元素组成和反应特性上实现有效互补: 一方面, 餐厨沼渣中的高有机碳含量为污泥中的金属氧化物提供了碳还原条件, 使得部分重金属由高价态还原为低价稳定形态, 从而提高重金属的固定效果; 另一方面, 污泥中丰富的无机矿物组分(如 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )在热解过程中可作为骨架支撑, 促进炭体孔隙结构形成, 增强生物炭的机械强度与结构稳定性。这种“有机—无机互补”机制不仅改善了产物的理化性质, 也有助于实现资源化与无害化的协同转化。

### (二) 热解反应机理与物质转化路径

污泥与餐厨沼渣共热解的过程是一个多阶段、多反应并行的复杂热化学转化过程。其主要反应包括脱水、裂解、缩合和碳化四个阶段。在 $300^\circ\text{C}$ 以下, 体系主要经历物理脱水和部分低分子有机物的挥发, 样品质量显著下降但结构变化较小; 当温度升至 $400 \sim 600^\circ\text{C}$ 时, 进入主要裂解阶段, 大分子有机物如蛋白质、纤维素和脂类发生断链反应, 生成大量可燃气体( $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等)和焦油, 此阶段同时伴随碳骨架的初步形成。随着

温度进一步升高至700℃以上，体系进入深度碳化阶段，芳香族结构逐步增多，碳化程度提高，生物炭的比表面积和孔隙结构显著改善，表现出更好的吸附性能与热稳定性。

在共热解过程中，污泥中的金属氧化物（如 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$ 、 $\text{ZnO}$ ）与餐厨沼渣释放的还原性气体（ $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ ）发生气固反应，使部分金属由氧化态转变为稳定的低价形态或金属态，并被固定在炭基结构中。同时，污泥中的硅铝矿物在高温下重排，形成多孔的骨架结构，为重金属的吸附、包埋与固定提供了大量位点。此外，部分有机组分与金属离子之间可能发生配位反应，进一步增强重金属的稳定化效果。

### （三）混合比例与工艺协同效应

原料配比是影响共热解产物性质与反应效率的关键因素。研究表明，当污泥与餐厨沼渣的质量比为7:3时，生物炭的得率、孔隙结构及重金属固化效果达到较优平衡。此比例下，餐厨沼渣提供了足够的有机碳源以增强放热反应并提升热解速率，而污泥中的无机矿物则保证了炭体的骨架强度与结构稳定性。若餐厨沼渣比例过高，体系中可燃组分过多，易导致气化反应剧烈，炭收率下降，炭体疏松且稳定性不足；相反，若污泥比例过大，灰分含量偏高、热值不足，将抑制碳化反应，造成能耗增加、炭化不完全。

因此，合理的配比应兼顾热值平衡与碳骨架形成，既要确保有机碳的有效利用，又要充分发挥污泥无机组分的结构支撑与重金属稳定作用。在此基础上，通过优化升温速率、保温时间与气氛条件等工艺参数，可进一步强化协同效应，实现能源回收与环境治理的双重目标。综合来看，污泥与餐厨沼渣的共热解不仅是一种资源化利用路径，更是一种基于物质互补与热化学协同的绿色循环技术，对推动固废处理的减量化、无害化与高值化具有重要意义。

## 二、工艺参数优化与产物特性分析

### （一）热解温度对生物炭特性的影响

热解温度是影响生物炭理化性质的最关键参数之一，它直接决定了有机质的裂解程度、芳香化水平以及孔隙结构的发育情况。随着热解温度的升高，原料中的挥发分逐渐释放，生物炭中碳质组分相对富集，芳香结构比例增加，导致炭体的碳含量提高、氢氧含量降低，表现出更高的热稳定性和疏水性。实验结果表明，在500 ~ 600℃范围内制备的生物炭综合性能最佳，既具有

较高的比表面积和发达的孔隙结构，又能保持较好的结构稳定性和重金属固定能力。当温度低于400℃时，生物炭保留较多含氧官能团（如羧基、羟基、羰基），表面极性较强，有利于离子交换与极性分子的吸附，但孔隙结构尚未充分形成，吸附容量有限。若温度超过700℃，部分含氧官能团被热解破坏，炭体的化学活性下降，碳骨架趋于惰性化，不利于后续活化或吸附性能的提升。XRD与拉曼光谱分析均表明，随温度升高，生物炭中的碳质结构由无序向石墨化方向演变，结晶程度增强，碳层排列更加有序。

### （二）升温速率与保温时间的作用

升温速率与保温时间是影响热解反应动力学与炭体形成的重要工艺参数。升温速率过快时，原料内部热传导不均匀，易造成有机物剧烈裂解与气体快速释放，从而引发微孔塌陷或堵塞，导致比表面积下降；而过慢的升温则有利于气体缓慢逸出和结构重排，形成规则的多孔网络。综合考虑热解效率与产物性能，实验表明升温速率控制在约10℃/min时较为适宜，可兼顾炭化反应速率与孔结构发育。保温时间影响碳化反应的完全程度与结构稳定性，保温过短会使部分有机物裂解不完全，生成炭体含有较多残余官能团；保温过长虽然可进一步提高碳化程度，但会增加能耗且对结构改善有限。研究发现，当在目标温度下恒温保持60分钟时，生物炭的碳化程度、结构均匀性与孔隙发育均达到较优状态，实现了产率与能效的平衡。

## 三、生物炭中重金属固化机制研究

### （一）重金属形态变化与迁移规律

市政污泥中通常富含Cu、Zn、Pb、Cd、Cr等多种重金属元素，这些金属在污水处理及污泥积累过程中以不同形态存在，对环境具有潜在风险。热解过程中，随着温度的升高，重金属的存在形态和分布规律发生显著变化。低温阶段（<400℃），重金属主要以离子态、可交换态或碳酸盐结合态形式存在，易被植物吸收或随水体迁移，环境风险较高。随着热解温度升至中高温（400 ~ 700℃），金属离子与污泥中无机矿物组分（如 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）发生固相反应，生成稳定的氧化物、硅酸盐或硫化物等难溶相。例如，Cd和Pb倾向于与硫、碳酸根反应生成 $\text{CdS}$ 、 $\text{PbCO}_3$ 等低溶解度化合物；Cr则多以 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 或Cr—Si复合氧化物的形式存在，迁移性大幅降低。高温下金属与矿物基质的结合增强，使其由活性态逐渐转变为惰性态，实现从可迁移向稳定固定的转变。

## （二）固化机理分析

重金属的固化机制主要包括物理吸附、化学络合、矿物沉淀以及晶格包埋等多重作用。首先，生物炭表面的含氧官能团（如羧基、羟基、酚羟基）可与金属离子发生配位反应，形成稳定的有机配合物，提高金属结合能。其次，炭体中存在的无机矿物相（如 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ）在热解过程中可与金属离子反应生成难溶的金属氧化物或金属盐，如 $\text{PbO}$ 、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 等，从而实现化学沉淀与共沉积。此外，热解反应产生的还原性气体（ $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ ）可将部分金属氧化物还原为金属态或低价态化合物，进一步增强其稳定性。与此同时，炭体形成的多孔碳骨架在物理上对金属颗粒起到包埋与阻隔作用，减少其在外界环境中的再释放。XPS测试结果显示，Pb和Zn元素的结合能随热解温度升高而发生位移，说明其从自由离子态向化合物态的转变，表明化学键合在固化过程中起主导作用。

## （三）稳定性与浸出性能评价

为评估热解产物的环境安全性，采用TCLP（毒性特征浸出程序）对生物炭中重金属的浸出性能进行测试。结果显示，Cd、Pb、Zn等金属的浸出浓度均显著低于《危险废物鉴别标准（GB 5085.3）》规定的限值，表明热解处理后的生物炭具有较高的环境稳定性。随着热解温度的升高，金属浸出率呈下降趋势，这与高温促进晶体结构形成、金属与矿物结合增强密切相关。同时，餐厨沼渣的加入不仅提供了额外的碳源，还在热解过程中释放 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 等还原性气体，促进金属由高价态向低价态转变，从而提高了金属的固定化程度。整体而言，市政污泥与餐厨沼渣共热解所得生物炭在重金属稳定化方面表现出显著的协同效应，兼具环境安全性与资源化利用潜力。

## 四、工艺优化与环境应用前景

### （一）优化路径与综合评价

从经济与环境双重角度出发，最佳热解条件为污泥与餐厨沼渣质量比7:3、热解温度 $550^\circ\text{C}$ 、升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、保温时间60min。该条件下所得生物炭具有较高碳含量、良好孔隙结构及优异的重金属固化能力。结合LCA（生命周期评估）分析，该工艺能显著减少污泥与沼渣处置过程的碳排放，且能回收能源与养分，实现资源循环利用。

## （二）生物炭的潜在应用方向

所得生物炭具有较高的比表面积与吸附性能，可作为土壤改良剂、重金属吸附材料及脱硫脱硝催化剂载体。其在农业土壤中可增强保水保肥性能，同时降低土壤中重金属生物有效性。在环境治理方面，污泥基生物炭可用于污水重金属离子吸附与废气净化。未来还可通过掺入功能性组分（如 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）制备复合型生物炭，进一步拓展其在环境修复与能源储存领域的应用。

## 结语

市政污泥与餐厨沼渣共热解制备生物炭是一种兼具减量化、无害化和资源化优势的环境友好型技术。研究表明，通过合理控制热解温度、升温速率及原料比例，不仅可显著提升生物炭的结构性能与碳固定能力，还能有效实现重金属的稳定固化，降低潜在环境风险。该工艺在促进城市固体废物协同处置、推动绿色低碳发展方面具有广阔前景。未来研究应在机理层面进一步阐明重金属与碳矿物界面的作用机制，并结合工业化条件开展规模化应用验证。同时，可将该技术与能源回收、土壤修复及碳减排策略相结合，形成多维度循环利用体系。通过持续优化与创新，市政污泥与餐厨沼渣共热解制备生物炭将成为城市固废治理与资源化利用的重要方向，为生态环境保护提供坚实技术支撑。

## 参考文献

- [1] 林强, 刘梦莹, 刘丽英, 等. 不同热解温度下茶园地被植物积雪草生物炭理化特性及在水土保持中的应用[J]. 亚热带水土保持, 2024, 36(04): 8-13.
- [2] 代慧敏. 畜禽粪污处理过程中生物炭的制备与应用研究[J]. 北方牧业, 2024, (24): 19.
- [3] 王露璐, 陶威, 胡钊, 等. 硅酸盐生物炭吸附六价铬的研究[J]. 广州化工, 2024, 52(23): 136-138.
- [4] 康希恒. 纤维素基生物炭形成路径及Mg-炭基催化剂异构化葡萄糖研究[D]. 广西大学, 2024.
- [5] 滕鑫. Fe(0)在生物炭制备过程中的原位合成及其在Se(IV)和硝基苯去除中的应用[D]. 广西大学, 2024.
- [6] 吕志伟, 罗春红, 李冬梅, 等. 热解温度对生物炭物理及化学吸附能力的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(32): 68-76.