

# 有机固废热解工艺优化对土壤碳汇能力的提升探讨

韩雨晖 朱振宇

北京航天石化技术装备工程有限公司 北京 100176

**摘要:** 有机固废热解工艺在提升土壤碳汇能力方面展现出巨大潜力。本文首先阐述热解工艺核心机制,包括基本原理、产物特性及对土壤碳汇的潜在贡献。接着探讨工艺优化关键技术路径,如反应条件优化、反应器设计改进等。随后分析工艺优化对土壤碳汇能力的提升机制,涵盖生物炭改良效应、产物循环利用碳减排路径等。最后指出技术瓶颈与多学科交叉研究需求,为有机固废热解工艺优化及土壤碳汇提升提供全面参考。

**关键词:** 有机固废; 热解工艺优化; 土壤碳汇能力; 生物炭; 碳减排

**引言:** 随着全球气候变化加剧,提升土壤碳汇能力成为缓解温室效应的关键举措。有机固废作为丰富的碳资源,其合理处置与利用意义重大。热解工艺作为一种高效转化技术,能将有机固废转化为气、液、固三相产物,在实现废弃物资源化的同时,为土壤碳汇提升提供新途径。深入研究有机固废热解工艺优化及其对土壤碳汇能力的提升机制,有助于推动该技术在环保与农业领域的广泛应用,促进可持续发展。

## 1 有机固废热解工艺的核心机制

### 1.1 热解过程的基本原理

热解反应的本质是复杂有机物在无氧或低氧环境下通过热化学转化生成气、液、固三相产物的过程,其热力学特性表现为吸热与放热反应的动态平衡<sup>[1]</sup>。在热力学层面,反应焓变与吉布斯自由能变化共同决定反应方向,而动力学过程则受反应物分子活化能及传质效率制约。温度作为核心驱动因素,通过调控热解反应路径显著影响产物分布:低温条件下(300-500℃)以脂肪族化合物裂解为主,生成大量生物油;中段(500-700℃)促进芳香族结构形成,气体产物产率上升;高温环境(>700℃)则强化二次裂解反应,导致生物炭产率降低但石墨化程度提高。气氛条件通过改变反应体系氧化还原状态影响产物组成,惰性气氛(如氮气)可抑制氧化副反应,而还原性气氛(如氢气)能促进脱氧反应生成高氢碳比产物。停留时间对热解完整度具有决定性作用,过短的停留时间导致反应不完全,延长停留时间虽能提高转化率,但可能引发过度裂解降低产物品质。

### 1.2 热解产物的分类与特性

气体产物主要由CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等小分子烃类组成,其热值可达15-25MJ/m<sup>3</sup>,具备直接燃烧或作为化工原料的双重利用价值。通过催化重整技术可实现气体产物中氢气比例提升至60%以上,显著增强能源化利用效率。液

体产物生物油是含氧量15-30%的复杂有机混合物,包含数百种酚类、醛类、酸类化合物,其不稳定性源于高活性官能团引发的自聚合反应。通过加氢脱氧、酯化改性等手段可降低生物油腐蚀性并提高热稳定性,改性后产物热值可提升至35MJ/kg以上。固体产物生物炭呈现高度发达的孔隙结构,比表面积可达300-500m<sup>2</sup>/g,其碳骨架由芳香族片层堆叠形成,表面富含羧基、酚羟基等含氧官能团。这种结构特性赋予生物炭优异的吸附性能与离子交换能力,同时石墨化微晶结构使其在土壤环境中表现出极强的抗微生物分解能力。

### 1.3 热解工艺对土壤碳汇的潜在贡献

生物炭的碳封存效应源于其物理化学双重稳定性机制。微观层面,芳香族碳结构的共轭体系形成能量壁垒,有效阻隔微生物酶系攻击;宏观层面,多孔结构通过吸附土壤有机质形成保护性复合体,进一步延缓碳分解进程。研究表明,施入土壤的生物炭半衰期可达数百年,其碳封存效率是原始生物质的3-5倍。热解气体与液体的循环利用构建了闭环碳管理系统:气体产物经净化后可用于热解过程供能,替代传统化石燃料减少间接碳排放;液体产物通过催化转化生成高附加值化学品,避免传统焚烧处理导致的碳流失。这种物质循环模式使热解工艺整体碳减排效率提升至60%以上,形成从废弃物处理到碳资源化的完整价值链。

## 2 热解工艺优化的关键技术路径

### 2.1 反应条件优化

温度调控是影响热解产物碳分布的核心要素。低温热解阶段以脂肪族化合物分解为主导,生成的生物炭保留较多未完全裂解的有机质,碳结构呈现无定形态,这种状态虽有利于短期土壤改良,但长期稳定性相对较弱<sup>[2]</sup>。高温热解通过强化二次裂解反应,促使生物炭形成高度石墨化的碳骨架,显著提升抗分解能力,同时高

温环境促进挥发分中碳元素的固定,使生物炭碳含量提高。气氛条件对生物炭结构演化具有定向引导作用,惰性气氛下热解生成的生物炭表面含氧官能团丰富,亲水性强,而还原性气氛通过脱氧反应减少表面极性基团,增强生物炭的疏水性与化学稳定性。停留时间通过调控热解反应进程影响产物特性,短停留时间促使挥发分快速释放,但可能因反应不充分导致生物炭孔隙结构发育不良;延长停留时间可促进炭化反应深度进行,使生物炭形成更发达的微孔结构,同时减少残留挥发分含量。

## 2.2 反应器设计改进

固定床反应器通过物料分层布置实现热解过程的梯度控制,但传热效率受限于固体颗粒间的接触面积,易导致局部过热或反应不均。流化床反应器利用气固两相的剧烈混合强化传热传质,使热解反应在均匀温度场中进行,产物碳分布一致性显著提升,尤其适用于大规模连续化生产。新型反应器技术通过引入外场能量输入突破传统热解限制,微波辅助热解利用电磁波直接作用于物料分子,实现体加热效应,缩短反应时间并降低能耗;等离子体热解通过高温等离子体产生的高活性粒子促进有机物快速裂解,生成富含氢气的气体产物与高碳含量生物炭。

## 2.3 催化剂与添加剂的应用

在热解过程中,催化剂与添加剂发挥着至关重要的作用。金属催化剂通过降低反应活化能改变热解路径,为反应开辟新的通道。例如,铁基催化剂可促进大分子有机物开环裂解,提高小分子气体产率,让反应朝着更有利的方向进行;镍基催化剂则对脱氢反应具有选择性,增强气体产物中氢气比例,提升气体品质。生物质添加剂通过调节原料碳氢比优化热解过程,添加秸秆类高挥发分物料可增加生物油产率,为生物油的获取提供便利;而木屑类高纤维素原料则有利于生物炭孔隙结构发育,提升生物炭性能。矿物质添加剂通过物理吸附与化学催化双重作用改善生物炭性能,黏土矿物提供模板效应促进微孔形成,沸石类添加剂的酸性位点可催化脱氧反应,提升生物炭的阳离子交换容量与养分保持能力,全方位优化热解产物。

## 2.4 产物后处理技术

产物后处理技术是提升热解产物品质与价值的关键环节。生物炭活化旨在通过创造新孔隙或扩展原有孔道来提升其吸附性能,物理活化是利用氧化性气体腐蚀碳骨架,进而形成大量介孔结构,有效增强生物炭对物质的吸附能力;化学活化则借助强酸强碱的刻蚀作用,产生丰富的微孔,大幅提高比表面积,让生物炭在吸附等

诸多领域能够发挥更大作用。生物油提质技术聚焦于降低含氧量以提升能源品质,加氢脱氧反应通过让氢气与含氧官能团反应生成水,有效减少生物油中的腐蚀性成分,从而延长其使用寿命;催化裂解技术利用固体酸催化剂促进大分子有机物断链,生成小分子烃类以提高热值,进一步提升生物油的能源利用价值。气体净化技术通过脱除硫化物、氮氧化物等杂质来减少二次污染,吸附法利用分子筛选择性捕获酸性气体,催化转化法通过氧化还原反应将污染物转化为无害物质,提升气体产物利用价值。

## 3 热解工艺优化对土壤碳汇能力的提升机制

### 3.1 生物炭的土壤改良效应

生物炭通过多维度作用机制显著改善土壤碳汇功能。物理层面,生物炭的微孔结构与高比表面积可重构土壤孔隙体系,增加大孔隙比例以促进水分渗透,同时形成大量微孔储存水分,这种双重效应使土壤持水能力提升<sup>[3]</sup>。生物炭颗粒作为土壤团聚体的核心,通过吸附黏粒与有机质促进团聚体形成,增强土壤结构稳定性,减少风蚀与水蚀导致的碳流失。化学层面,生物炭表面碱性官能团可中和酸性土壤,调节pH值至适宜微生物活动的范围,其表面负电荷通过静电吸附固定重金属离子与带正电的有机污染物,降低污染物生物有效性。生物炭的碳骨架为土壤微生物提供栖息场所,其多孔结构形成局部微环境,促进好氧与厌氧微生物协同作用,增强微生物群落多样性。生物炭诱导的微生物群落结构变化可提升碳固定相关酶活性,如磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶与核酮糖二磷酸羧化酶的表达量增加,加速有机碳向稳定态转化。

### 3.2 热解产物循环利用的碳减排路径

热解产物的梯级利用构建了闭环碳管理系统。气体产物经净化后可作为清洁能源替代煤炭或天然气,其燃烧过程仅产生CO<sub>2</sub>与水蒸气,相比化石燃料可减少硫化物与氮氧化物排放,且生物质原料的碳中性特性使整体碳排放趋近于零。液体产物通过加氢脱氧或催化裂解转化为烃类燃料,其分子结构与石油基燃料高度相似,可直接用于内燃机或作为化工原料生产塑料、纤维等材料,减少对石油资源的依赖。生物炭的长期封存效应是碳减排的核心环节,其芳香族碳结构在土壤中可稳定存在数百年,每年每公顷农田施用生物炭可固定数吨碳,这种碳封存方式避免了生物质自然分解或焚烧导致的碳快速释放,显著延长碳循环周期。

### 3.3 热解工艺与土壤碳汇的协同优化

原料选择需兼顾热解特性与土壤需求,农业废弃物

如秸秆富含纤维素与木质素,热解生成的生物炭孔隙发达且含氧官能团丰富,适用于酸性土壤改良;污泥类原料因含较多矿物质,热解产物生物炭的阳离子交换容量高,更适合重金属污染土壤修复。工艺参数调控可实现生物炭功能化设计,低温慢速热解促进生物炭表面含氧官能团保留,增强对重金属的吸附能力;高温快速热解提升生物炭石墨化程度,延长碳封存时间。系统集成层面,热解工艺可与土壤修复技术耦合,将污染土壤经热解处理后,生物炭直接回填实现原位修复;在农业系统中,热解产生的气体产物用于温室供能,液体产物作为生物农药载体,生物炭作为土壤改良剂,形成“废弃物-能源-土壤”三位一体的可持续模式。

#### 4 挑战与未来研究方向

##### 4.1 技术瓶颈与科学问题

热解工艺规模化应用面临能耗与成本双重制约。现有热解技术需在500℃以上高温条件下运行,维持反应温度需消耗大量化石能源,而生物质原料能量密度低,进一步推高单位产品能耗<sup>[4]</sup>。成本结构中,原料预处理、设备折旧与产物分离环节占比过高,导致热解产品市场竞争力不足。生物炭长期环境行为研究亟待深化,现有监测手段多聚焦于实验室模拟,缺乏对田间尺度下生物炭老化、迁移及分解过程的动态追踪,对重金属吸附后可能释放的风险评估体系尚未完善。复杂有机固废热解存在反应路径不清晰问题,塑料与橡胶等人工合成高分子含卤素、硫等杂质元素,热解过程中易生成二噁英、多环芳烃等二次污染物,且裂解产物分布受原料分子结构影响显著,现有反应动力学模型难以准确预测产物组成。

##### 4.2 未来技术发展方向

智能化技术将重塑热解工艺范式。基于机器学习的参数优化系统可实时分析原料特性与产物需求,动态调整温度、气氛等关键参数,实现能耗与产率的精准平衡。过程监控技术通过光谱分析与传感器网络,可在线检测热解气体组成与生物炭孔隙发育情况,为工艺调控提供实时数据支撑。生物炭功能化设计成为研究热点,纳米结构生物炭通过调控孔径分布与表面电荷,可实现对特定污染物的靶向吸附;负载金属氧化物的功能化生物炭在催化降解有机污染物方面展现优异性能。热解工

艺与碳交易市场的衔接机制需加快探索,建立从生物质收集、热解生产到碳封存的全链条碳计量标准,开发基于区块链的碳足迹追踪系统,提升热解产品碳汇价值的可信度与可交易性。

##### 4.3 多学科交叉研究需求

热解化学与土壤科学的融合将推动生物炭应用从经验走向科学。通过分子动力学模拟揭示生物炭表面官能团与土壤有机质的相互作用机制,结合同位素示踪技术量化生物炭对土壤碳库的贡献率,可为生物炭施用标准制定提供理论依据。材料科学与环境工程的协同创新可突破产物高值化利用瓶颈,开发基于生物炭的复合吸附材料用于水体净化,设计热解气体催化重整装置生产合成气,构建“废弃物-能源-材料”闭环系统。全球碳循环模型需纳入热解工艺的碳流动参数,通过耦合生物炭生长、热解转化与土壤封存过程,评估不同区域热解技术推广对全球碳预算的潜在影响,为气候政策制定提供科学支撑。

##### 结束语

有机固废热解工艺优化对提升土壤碳汇能力具有显著作用。通过优化反应条件、改进反应器设计、应用催化剂与添加剂以及完善产物后处理技术等路径,可有效改善热解产物性能,增强生物炭的土壤改良效应与碳封存能力,实现热解产物的循环利用与碳减排。然而,该技术仍面临能耗成本高、生物炭环境行为研究不足等挑战。加强多学科交叉研究,攻克技术瓶颈,将推动有机固废热解工艺在土壤碳汇提升领域发挥更大作用,助力生态环境改善。

##### 参考文献

- [1]杨建志,陈海涛,祝星,等.有机固废热解气化催化剂研究进展[J].能源环境保护,2025,39(3):113-123.
- [2]张子杭,邢博,马中青,等.多源有机固废热解特性研究与预测分析[J].能源环境保护,2024,38(5):135-146.
- [3]李茜茜,冯俊小.有机固废热解动力学的研究进展[J].环境工程,2022,40(10):215-223.
- [4]关应元,阮斌,冯少山,等.300MW机组锅炉内煤粉与有机固废热解气混燃特性的模拟研究[J].应用化工,2022,51(z1):274-279.