

碳中和目标下有机固废热解技术的减排潜力分析

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: 碳中和目标下,有机固废减排处置成为重要课题,传统处理方式存在温室气体排放量大等局限。本文聚焦有机固废热解技术,剖析其替代化石能源、控制处理过程排放及生物炭固碳的减排机理,构建减排潜力评估框架,探究原料特性、工艺参数等关键影响因素并提出优化策略,为有机固废低碳处置提供技术支持,助力碳中和目标实现。

关键词: 碳中和目标;有机固废;热解技术;减排潜力分析;优化策略

引言:全球气候变暖背景下,碳中和已成为各国发展共识,减少温室气体排放是实现该目标的核心任务。有机固废产量庞大,其传统处置方式易引发碳排放问题,加剧环境压力,亟需探索低碳高效的处理技术。热解技术因兼具固废减量化、资源化与减排优势,成为有机固废处置的重要方向。但当前关于热解技术减排机理的系统研究不足,评估框架与优化策略尚不完善。基于此,本文深入研究有机固废热解技术的减排相关问题,为技术推广应用提供理论依据。

1 核心概念与理论基础

1.1 碳中和目标核心内涵与减排核算标准

碳中和目标的核心内涵在于通过各类技术与管理手段,实现特定周期内人为产生的二氧化碳排放量与吸收量的动态平衡,最终推动全球气候系统的稳定发展。其本质是构建低碳发展模式,从源头上减少温室气体排放,同时强化碳汇能力的培育。减排核算标准是支撑碳中和目标落地的关键技术基础,核心在于明确排放源的界定逻辑、核算范围与计量方法。核算过程需遵循全生命周期理念,覆盖从排放源产生到末端处置的完整链条,确保核算结果的系统性与准确性。当前主流的核算逻辑以排放因子法为核心,通过明确不同排放环节的基准排放参数,结合物料平衡与能量平衡原理,实现对减排量的定量测算,为减排技术的效果评估提供统一的技术依据。

1.2 有机固废的分类与特性

有机固废是指含有机质成分的固体废弃物,根据其产生来源可分为农业有机固废、市政有机固废与工业有机固废三大类。农业有机固废主要包括农作物秸秆、畜禽养殖废弃物等;市政有机固废以餐厨垃圾、园林废弃物、生活垃圾中的有机组分为主;工业有机固废则涵盖工业生产过程中的有机残渣、废弃生物质材料等。

有机固废的核心特性体现在有机质含量高、组分复杂且具有可降解性与能量回收潜力。不同类型的有机固废在含水率、挥发分含量、固定碳含量等关键参数上存在显著差异,这些特性直接决定了其热解处理的可行性与效率。此外,有机固废的粒径分布、灰分含量等物理特性也会对热解过程产生重要影响,是热解技术选择与工艺参数设计的核心依据。

1.3 有机固废热解技术原理与工艺类型

有机固废热解技术的核心原理是在无氧或缺氧的环境下,通过高温加热使有机固废中的大分子有机质发生热裂解、聚合、重整等一系列化学反应,最终转化为气态(热解气)、液态(生物油)和固态(生物炭)三种产物的过程。该过程可分为干燥、热解、炭化三个阶段,干燥阶段去除物料中的水分,热解阶段实现有机质的大分子断裂,炭化阶段则完成固态产物的稳定化。根据加热速率、反应温度和停留时间的差异,热解工艺可分为慢速热解、快速热解和闪速热解三类。慢速热解以生产生物炭为主要目标,反应温度较低、停留时间较长;快速热解侧重于生物油的制备,加热速率快、停留时间短;闪速热解则以热解气为主要产物,需在极高的加热速率和反应温度下完成^[1]。

2 有机固废热解技术的减排机理分析

2.1 替代化石能源的减排效应

有机固废热解产生的热解气、生物油等产物具有较高的能量密度,可作为清洁能源替代煤炭、石油、天然气等化石能源,从而降低化石能源燃烧过程中的二氧化碳排放。热解气富含氢气、一氧化碳、甲烷等可燃组分,可直接用于供热或发电;生物油经过精制处理后,可作为液体燃料应用于工业窑炉或内燃机。这种替代效应的核心逻辑在于,有机固废中的有机质来源于生物质的光合作用,其燃烧过程中释放的二氧化碳属于自然界

的碳循环范畴，而化石能源燃烧释放的是长期封存于地下的碳，属于额外新增的碳排放。通过热解产物替代化石能源，可实现从“碳新增”向“碳循环”的转变，进而降低整体碳排放强度。

2.2 固废处理过程的碳排放控制机理

传统有机固废处理方式如填埋、好氧堆肥等，易产生大量温室气体。填埋过程中，有机固废在厌氧环境下会缓慢降解产生甲烷，甲烷的温室效应潜能远高于二氧化碳；好氧堆肥过程中，有机质的氧化分解会直接释放二氧化碳，同时堆肥过程中的能量消耗也会间接增加碳排放。有机固废热解技术通过无氧或缺氧环境下的高温处理，可有效抑制甲烷的生成，同时将大部分有机质转化为能量产物和稳定的生物炭，大幅降低处理过程中的直接碳排放。此外，热解过程的能量消耗相对较低，且可通过自身产生的热解气实现能量自给，进一步减少间接碳排放，形成闭环的低排放处理模式^[2]。

2.3 生物炭固碳与碳封存效应

热解过程产生的生物炭是一种富含碳的稳定固体物质，其核心固碳机理在于将有机固废中的活性有机质转化为惰性碳结构，大幅降低碳的生物可降解性，从而实现碳的长期封存。生物炭中的碳主要以芳香族碳键形式存在，化学稳定性强，在自然环境中可保存数百年甚至上千年，避免了有机质在自然降解或传统处理过程中快速释放二氧化碳。生物炭还可通过土壤改良等方式进入土壤碳库，进一步提升碳封存效果。这种固碳效应不仅减少了大气中的二氧化碳含量，还能提升土壤肥力，实现固碳与资源利用的协同增效，是热解技术减排的重要补充路径。

3 有机固废热解技术减排潜力评估框架构建

3.1 减排潜力评估边界与范围界定

减排潜力评估边界的合理界定是确保评估结果科学性与准确性的前提，需基于全生命周期理念，明确评估的时间范围与系统范围。时间边界应覆盖热解技术从原料接收、预处理、热解反应到产物利用的完整周期，避免因边界过窄导致减排量低估或高估。系统边界需明确纳入的环节，核心包括有机固废预处理过程（如破碎、干燥）、热解反应过程、产物分离与利用过程，同时合理界定能源输入与输出的核算范围，对于外部能源输入需计入其隐含碳排放，对于热解产物的能源替代效益需纳入减排量核算。此外，还需区分直接减排与间接减排的边界，直接减排包括热解过程自身的碳排放减少，间接减排则涵盖产物替代化石能源带来的减排效益。

3.2 减排潜力评估指标体系

减排潜力评估指标体系需围绕热解技术的减排机理，构建多层次、多维度的指标框架，确保全面反映减排潜力的核心影响因素。核心指标包括直接减排指标、间接减排指标和固碳指标三大类。直接减排指标用于衡量热解处理过程相较于传统处理方式的碳排放减少量，主要包括单位质量固废处理的碳排放强度差、甲烷减排量等；间接减排指标聚焦于热解产物替代化石能源的减排效果，包括单位热解产物的能源替代量、替代化石能源对应的碳减排量等；固碳指标则用于评估生物炭的碳封存能力，主要包括单位质量固废的生物炭产量、生物炭碳含量、碳封存周期等。指标体系需明确各指标的计算方法与数据来源要求，确保指标的可操作性与可比性，为减排潜力评估提供标准化的技术支撑^[3]。

3.3 减排潜力评估模型构建

基于评估边界与指标体系，构建减排潜力评估模型，核心在于实现对各类减排路径的定量测算与整合。模型构建需以物料平衡与能量平衡为核心逻辑，结合减排机理建立数学计算框架。模型主要包括基础参数模块、排放核算模块、减排量计算模块和结果输出模块四个核心部分。基础参数模块用于输入有机固废特性、热解工艺参数、产物特性等基础数据；排放核算模块基于排放因子法，完成热解过程及传统处理方式的碳排放核算；减排量计算模块通过对比分析，分别计算直接减排量、间接减排量和固碳量，最终整合得到总减排潜力；结果输出模块用于输出不同场景下的减排潜力评估结果，为技术优化提供数据支撑。模型需具备一定的灵活性，可适应不同类型有机固废与热解工艺的评估需求，同时简化复杂的计算过程，提升模型的实用性。

4 热解技术减排潜力的关键影响因素及优化策略

4.1 关键影响因素

热解技术的减排效果受原料特性、工艺参数及反应氛围等多因素综合影响，而非单一因素决定。（1）热解原料特性：作为减排潜力的基础影响因素，原料组分构成直接决定污染物生成倾向，不同组分反应路径差异显著，对应气态污染物种类和数量不同；过高含水率会增加热解能耗、抑制有效反应，导致污染物分解不充分，削弱减排效果；颗粒度分布影响热传递效率与反应均匀性，颗粒过大易造成局部热解不完全、污染物增多，过小则可能提升物料输送难度，破坏反应体系稳定性。（2）热解工艺参数：温度、升温速率、停留时间是调控反应的核心参数，对减排潜力起决定性作用。热解温度直接决定产物形态与组分，不同温度区间对应不同主导反应路径，适宜温度可促进污染物分解转化，温度过高或过低均会增加污染物生

成；升温速率通过影响反应动力学改变产物分布，合理速率可优化反应进程、提升减排效能；停留时间不足会导致原料热解不完全，污染物未充分分解，过长则可能增加能耗并引发二次反应，生成新污染物^[4]。（3）热解反应氛围：作为重要外部因素，热解多在惰性氛围中进行，惰性气体的种类与纯度影响反应稳定性及污染物转化效率。若混入氧化性气体，可能引发部分氧化反应，改变产物组成并增加污染风险；惰性气体纯度不足时，杂质可能与热解产物反应生成新污染物。此外，反应氛围压力会改变热解反应的热力学与动力学特性，进而影响污染物分解与排放水平。

4.2 优化策略

基于热解技术减排潜力的关键影响因素，从原料预处理、工艺参数精准调控、反应氛围优化及技术协同强化等方面制定优化策略，可有效提升热解技术的减排效能，推动其高效应用。（1）原料预处理优化。通过原料预处理可改善原料特性，为提升减排潜力奠定基础。针对原料组分复杂的问题，可采用分选技术对原料进行分类处理，分离出不利于热解反应和污染物控制的组分，提高原料的均一性。对于含水率较高的原料，需进行干燥预处理，降低原料含水率，减少热解过程的能耗，同时保障热解反应的顺利进行。此外，通过破碎、研磨等技术优化原料的颗粒度分布，使原料颗粒大小均匀适中，提升热传递效率和反应均匀性，确保原料充分热解，减少污染物残留。（2）工艺参数精准调控。建立工艺参数与减排效果的关联机制，实现参数的精准调控，是提升热解减排效能的核心策略。通过系统研究不同原料特性下温度、升温速率和停留时间对减排效果的影响规律，确定各原料对应的最优参数区间。采用智能化调控技术，实时监测热解过程中的温度、压力等关键参数，根据反应进程动态调整参数设置，确保热解反应始终处于最优状态。同时优化参数组合方式，平衡各参数之间的相互作用，避免单一参数调整对减排效果产生负面影响，实现减排潜力的最大化。（3）反应氛围优化配置。优化热解反应氛围，可营造有利于污染物分解的反

应环境。选择纯度适宜的惰性气体作为热解氛围，避免杂质气体对反应过程的干扰，保障反应的稳定性。根据原料特性和热解目标，合理调控反应氛围的压力条件，优化热解反应的热力学和动力学环境，促进污染物的分解与转化。并可通过氛围气体循环利用技术，减少惰性气体的消耗，同时降低尾气排放压力，进一步提升整体减排效果。（4）技术协同强化。通过热解技术与其他减排技术的协同联用，可突破单一技术的减排局限，提升整体减排效能。将热解技术与催化转化技术相结合，在热解体系中加入适宜的催化剂，降低污染物分解的活化能，促进污染物的高效转化。采用热解与吸附技术联用的方式，对热解尾气中的残留污染物进行深度处理，减少污染物的最终排放。借助余热回收利用技术，回收热解过程中产生的余热，降低技术应用的能耗，实现节能减排的协同提升^[5]。

结束语：有机固废热解技术依托替代化石能源、控排及生物炭固碳的多元减排机理，是助力碳中和的重要路径。本文明确的技术理论基础、构建的减排潜力评估框架及提出的多维度优化策略，为技术高效应用提供系统支撑。未来，需深化原料与工艺适配机制研究，强化技术协同创新，提升规模化应用水平。通过持续技术攻关与产业转化，该技术将在固废资源化与低碳发展协同中发挥更大价值，为全球气候治理提供技术保障。

参考文献

- [1]李京京,李坤,徐军,等.碳中和背景下我国固废资源化利用产业发展研究[J].资源节约与环保,2025,(02):139-142.
- [2]黄诗冰,廖宜顺.加强固废资源化利用研究促进绿色低碳发展转型[J].武汉科技大学学报,2025,48(02):79-80.
- [3]路娟娟,金琼.城市固体废物处理及资源化利用的方法研究[J].资源节约与环保,2021(05):01-02.
- [4]杨东海,华煜,武博然,等.双碳背景下有机固废资源化处理处置技术发展思考[J].环境工程,2022,40(12):1-8+36.
- [5]彭晓为,李倬舫,钟日钢,等.城镇及工业有机固废热解气化技术研究进展[J].化工管理,2021(20):01-02.