

Research Article

Experimental Study on Fixed-Bed Pyrolysis of Municipal Solid Waste

Xiaoxu Fan¹ , Liguang Yang^{1,*} , Hongjian Chen² 

¹Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, China

²Shandong Environmental Protection Industry Research Institute Co., Ltd., Jinan, China

Abstract

To investigate the gas product evolution characteristics and heating value variation of typical municipal solid wastes during fixed-bed pyrolysis, this study selected waste tires and municipal sewage sludge as research objects. Pyrolysis experiments were conducted in an externally heated fixed-bed reactor under nitrogen atmosphere. The composition, distribution characteristics of gas products, and their heating value variations with pyrolysis temperature were systematically examined for both materials, followed by a comparative analysis of their pyrolysis product properties. The results showed that the pyrolysis gas from waste tires was mainly composed of CH₄, H₂, and CnHm, accounting for more than 70% of the total gas, with CH₄ reaching up to 47%, H₂ up to 22%, and CnHm up to 15%. Each gas component began to evolve noticeably at approximately 400°C, and the CnHm content reached its peak around 530°C before declining due to intensified secondary cracking reactions. The heating value of tire pyrolysis gas increased significantly with the rising final temperature, reaching approximately 6800 kcal/m³ at 650°C, which is comparable to that of natural gas. For municipal sewage sludge, the pyrolysis gas was mainly composed of CO₂, CH₄, and H₂. At final temperatures ≤500°C, CO₂ accounted for the highest proportion, while CH₄ became dominant above 500°C. The onset temperature for significant gas evolution was about 480°C, approximately 80°C higher than that of waste tires. The heating value of sludge pyrolysis gas approached 3000 kcal/m³ at 600°C, which was only about 40%–50% of that from waste tires. The differences in pyrolysis gas characteristics between the two materials originated from their intrinsic compositional distinctions: waste tires are rich in carbon and hydrogen with low ash and oxygen contents, favoring the generation of high-quality fuel gas, while sludge possesses high ash and oxygen contents, resulting in higher CO₂ proportion and lower heating value in its pyrolysis gas. This study provides fundamental experimental data for the graded pyrolysis treatment and differentiated energy utilization of municipal solid wastes.

Keywords

Waste Tires, Municipal Sewage Sludge, Fixed-bed Pyrolysis, Pyrolysis Gas, Heating Value, Waste Resource Utilization

*Correspondence: Liguang Yang (ylg_1978@163.com)

Received: 19 July 2026; Accepted: 26 August 2026; Published: 4 September 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

城市固体废弃物固定床热解实验

范晓旭¹, 杨立国^{1,*}, 陈红健²

¹ 山东省科学院能源研究所, 济南, 中国

² 山东环保产业研究院有限公司, 济南, 中国

摘要

为探究典型城市固体废弃物在固定床热解过程中的气体产物析出特性及热值变化规律, 本文以废轮胎和城市下水污泥为研究对象, 采用外热式固定床热解实验台, 在氮气气氛下进行热解实验, 系统考察了两种物料在热解过程中的气体产物组成、分布特征及热值随热解温度的变化规律, 并对二者的热解产物特性进行了对比分析。结果表明: 废轮胎热解气以 CH_4 、 H_2 和 CnHm 为主要组分, 三者合计占比超过 70%, CH_4 最高可达 47%, H_2 最高达 22%, CnHm 最高达 15%; 各气体组分在约 400°C 时开始明显析出, CnHm 在 530°C 附近达到峰值后因二次裂解反应加剧而下降; 热解气热值随终温升高而显著增加, 650°C 时可达约 6800 kcal/m³, 与天然气热值相当。城市下水污泥热解气以 CO_2 、 CH_4 和 H_2 为主要组分, $\leq 500^\circ\text{C}$ 时 CO_2 占比最高, $> 500^\circ\text{C}$ 后 CH_4 逐渐居首; 气体析出起始温度约为 480°C, 较废轮胎滞后约 80°C; 600°C 时热解气热值接近 3000 kcal/m³, 约为废轮胎热解气的 40%~50%。两种物料热解气特性的差异源于其本征组成的不同: 废轮胎富碳富氢、灰分和氧含量低, 有利于生成高品质燃气; 污泥高灰分、高含氧量导致其热解气中 CO_2 占比较高、热值偏低。本研究可为城市固体废弃物的分质热解处理和差异化资源化利用提供基础实验依据。

关键词

废轮胎, 城市下水污泥, 固定床热解, 热解气, 热值, 废弃物资源化

1. 引言

随着我国城市化进程的持续加快和居民生活水平的不断提高, 城市固体废弃物的产生量呈现逐年增长态势。据统计, 2024年我国仅纳入统计的317个城市产生各类固体废物96.5亿吨[1], 其中废轮胎和城市下水污泥是两类产生量大、处理难度高的典型代表。大量废轮胎的堆积不仅占用土地资源, 还极易引发火灾并释放有毒气体; 而城市下水污泥作为污水处理过程中的副产物, 含有大量有机质、重金属及病原微生物, 若处置不当将对土壤和水体造成严重二次污染。在此背景下, 如何实现这两类废弃物的减量化、无害化和资源化处置, 已成为我国生态文明建设进程中亟待解决的重要课题。

目前, 废轮胎的处理方式主要包括翻新、再生胶生产、胶粉制备、焚烧和热解等, 其中热解技术因其能够在惰性气氛下将废轮胎转化为热解油、热解炭和热解气三相产物, 二次污染小、资源回收率高, 被公认为最具发展前景的处理途径之一[2-4]。围绕废轮胎热解, 国内外学者已在热解动力学与机理[5-7]、产物分布与工艺优化[8, 9]、热解油催化提质及工程应用[10, 11]等方面开展

了较为系统的研究, 涉及多种动力学模型解析、梯级热解装置开发以及热解产物高值化利用等方向[12-15]。城市下水污泥的处置则以填埋、堆肥、焚烧和热解为主, 考虑到污泥热值偏低、含水率高的特点, 热解技术同样因其可实现污泥的显著减容及资源化回收而受到广泛关注, 已有研究对污泥热化学处理的基本特性进行了实验探索[16-19]。值得注意的是, 两种废弃物的热化学转化行为均受热解温度、升温速率、物料特性等因素的显著影响, 其中热解气体产物的组成、分布及热值直接决定了其后续资源化利用的途径与价值。

近年来, 围绕废轮胎和污泥的热解研究虽已取得丰富成果, 但现有工作多集中于单一物料的热解特性分析, 对废轮胎和城市下水污泥这两种性质迥异的固体废弃物在相同实验条件下的热解气体产物特性进行系统对比的研究仍相对较少, 尤其缺乏对二者气体析出规律、组分演变及热值差异的横向比较。基于此, 本文采用外热式固定床热解实验台, 以废轮胎和城市下水污泥为研究对象, 在氮气气氛下开展热解实验, 系统考察两种物料热解气体的析

出规律、组分分布及热值随热解温度的变化特征，并对二者的热解产物特性进行对比分析，以期为城市固体废弃物的分质热解处理和差异化能源化利用提供基础实验数据和理论依据。

2. 实验概述

实验采用外热式固定床热解实验台，主要由热解炉本体和辅助系统（氮气吹扫系统、温度控制系统、油水冷凝及收集系统、气体收集系统和气体成分测量系统）组成，如图1所示。

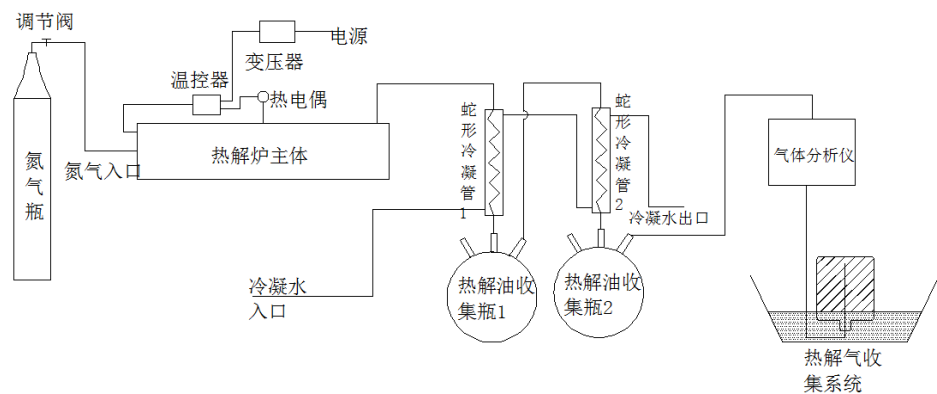


图1 实验系统示意图。

实验采用的固体废弃物为废轮胎、城市下水污泥。废轮胎用细挫磨成粉末，城市下水污泥自然晾干后经60目筛分，如图2所示。表1为式样的元素分析和工业分析。由表可知，废轮胎具有高挥发分、高含碳量和高热值，其灰含量和氧含量低，城市污水污泥具有高挥发分、高灰分和高含氧量，热值相比废轮胎较低。



(a) 轮胎 (b) 污泥

图2 试样照片。

表1 试样元素分析和工业分析。

项目	轮胎	污泥
元素分析（收到基，%）	C	26.55
	H	3.73
	O	21.53
	N	2.67
	S	2.57

项目	轮胎	污泥
工业分析（干燥基，%）	M	5.13
	A	39.49
	V	47.24
	FC	8.14
热值（kJ/kg）	33595.49	10820.53

3. 实验结果与分析

3.1. 废轮胎热解气体产物特性

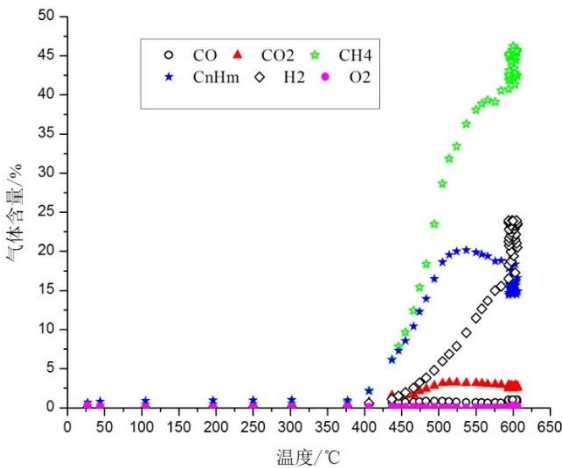


图3 轮胎热解气体析出随温度变化。

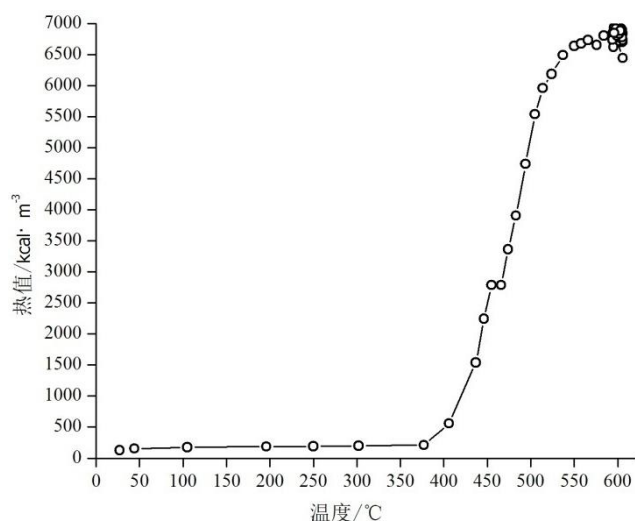


图4 热解气热值变化。

以600℃终温为例,图3展示了轮胎热解过程中各热解气体析出随温度的变化情况。废轮胎热解产生的燃气主要由CH₄、H₂、CnHm、CO、CO₂组成,温度达到约400℃时,各气体开始明显析出,并随着温度的升高含量增加,其中,CnHm在530℃时含量达到最大,其后随温度升高含量下降,其余各气体含量随温度一直增加。热解过程中热解气热值变化见图4。

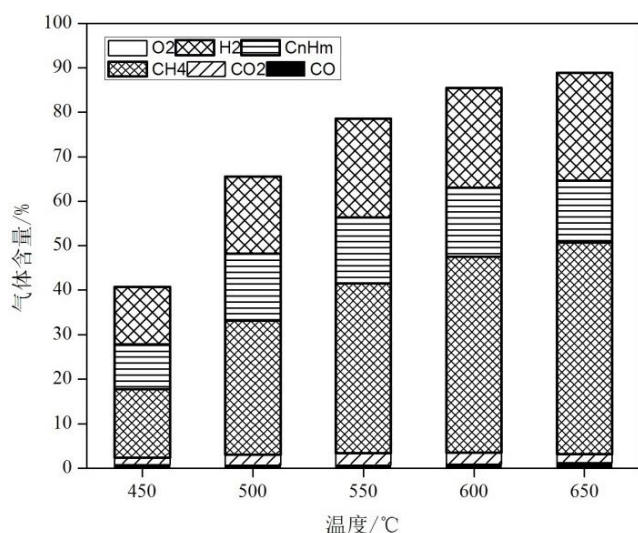


图5 不同终温度废轮胎热解气成分。

图5为不同热解终温下热解气中各气体成分的含量,由于实验前进行氮气吹扫,因此热解气中仍含有部分N₂,图中未达100%的部分即为热解气中N₂含量。由图可以看出,轮胎热解气中CH₄、H₂和CnHm占很大比例,按含量由高到低依次是CH₄、H₂和CnHm,含量最高时分别达47%、22%和15%。

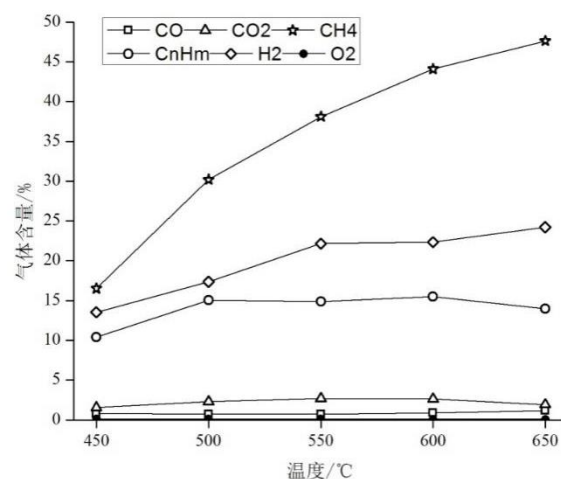


图6 废轮胎热解气成分随热解终温的变化。

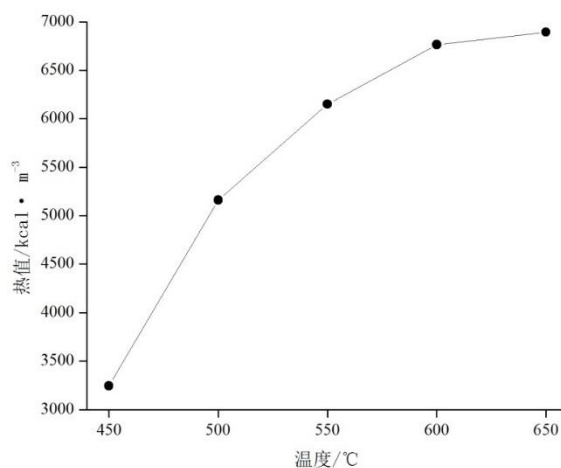


图7 废轮胎热解气热值随热解终温的变化。

热解终温对热解燃气成分和产率有直接影响。图6为不同热解终温时热解气中各气体含量的变化情况。随着热解终温的升高,CH₄含量明显上升,CO含量略有增加。H₂和CnHm含量先随热解终温的升高而增加,在550℃及以后呈现相反的变化趋势,即H₂含量在550℃时最高,而CnHm含量在550℃时最低,之后H₂含量降低然后又上升,而CnHm含量上升后又下降。热解温度高于550℃后由于热解析出的烃类CnHm发生二次裂解反应的程度加剧,因此CnHm的含量有所下降。不同热解终温下热解气的平均热值见图7。低温时热解尚未完全,因此热解气的热值较低,随着热解程度加深热解气体中CH₄、H₂、CO逐渐增加,热解气热值增加。轮胎热解气具有很高的热值,650℃热解终温下的燃气热值达6800kcal/m³。

3.2. 污泥热解气体产物特性

以550℃热解终温为例,图8展示了污泥热解过程中热解气体析出随温度的变化情况。污泥热解产生的燃气主要由CH₄、H₂、CnHm、CO、CO₂组成,温度达到约480℃时,各

气体开始明显析出,并随着温度的升高含量增加。热解过程中热解气热值变化见图9,随着热解气体不断析出,热解气热值不断上升,达到热解终温时热解气热值约2550kcal/m³。

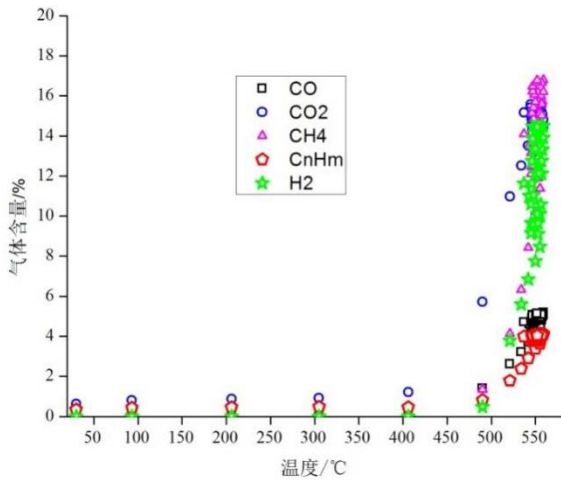


图 8 污泥热解气体析出随温度变化。

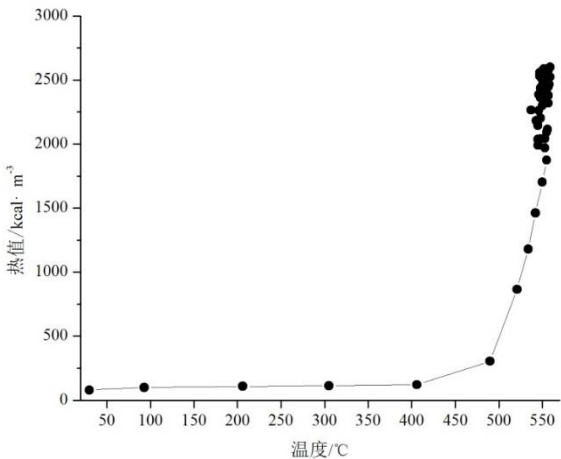


图 9 污泥热解气热值随温度变化。

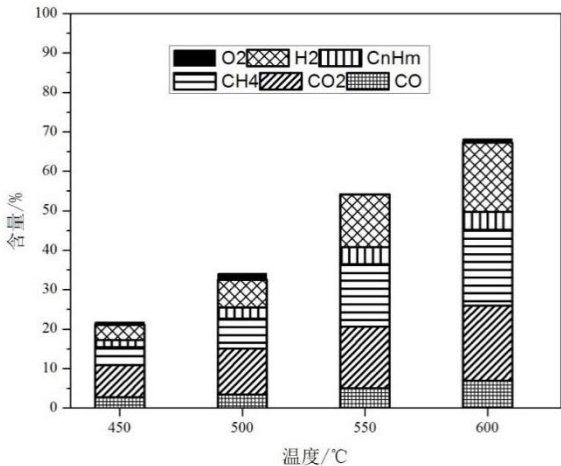


图 10 不同终温污泥热解气成分。

图10为不同热解终温下污泥热解气中各气体成分的含量,图中未满足100%的部分为热解气中N₂含量。由图可以看出,污泥热解气中CH₄、H₂、CO₂占很大比例,按含量由高到低依次是:≤500℃时,CO₂>CH₄>H₂; >500℃时,CH₄>CO₂>H₂。热解气中CH₄、CO₂、H₂含量最高时分别为19.27%、19.04%、17.53%。随着热解终温提高,热解气中CO含量增加明显,600℃终温时,热解气中CO含量上升到6.89%。

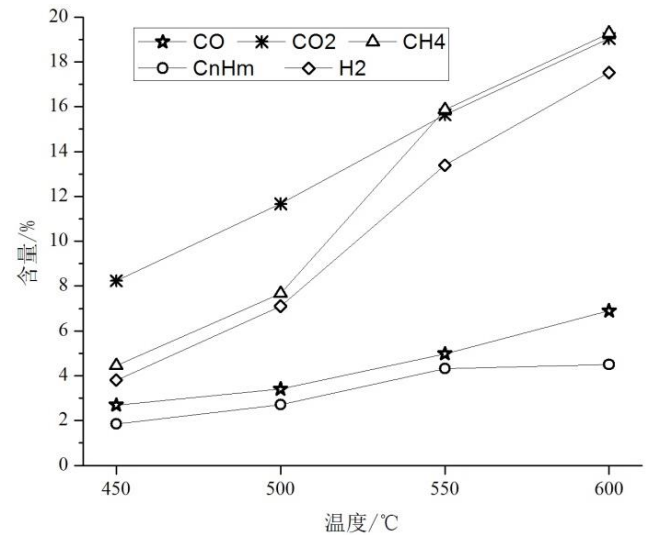


图 11 污泥热解气体成分随热解终温的变化。

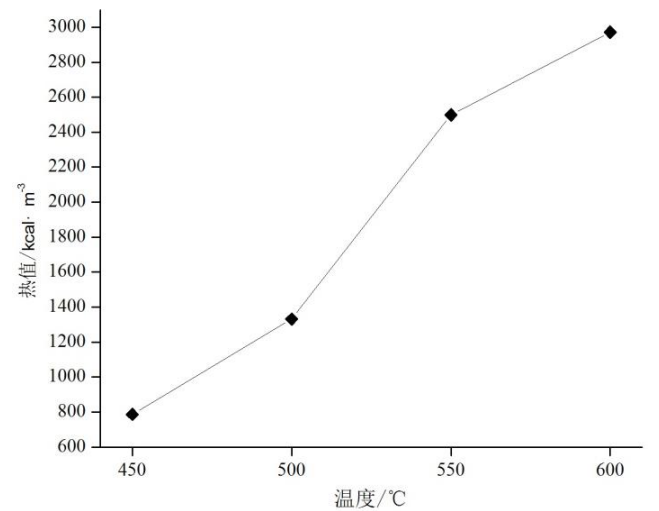


图 12 污泥热解气热值随热解终温的变化。

图11为不同热解终温时污泥热解气中各气体含量的变化情况。随着热解终温的升高,热解气中各气体含量增加,其中,CO₂、CH₄、H₂含量增加较快,CO含量增加较平缓,CnHm含量在600℃时较550℃时下降,说明热解温度高于550℃后由于热解析出的烃类CnHm发生二次裂解反应的程度加剧,因此CnHm的含量有所下降。不同热解

终温下污泥热解气热值见图12。低温时热解尚未完全,因此热解气的热值较低,随着热解程度加深热解气体中 CH_4 、 H_2 、 CO 逐渐增加,热解气热值增加。相较于废轮胎热解气,污泥热解气热值较低,600℃热解终温下的燃气热值接近3000kcal/m³。

3.3. 废轮胎、污泥热解产物特性对比

废轮胎与城市污水污泥在工业分析和元素组成上存在显著差异(表1),这是导致二者热解产物特性不同的根本原因。废轮胎具有高挥发分(59.98%)、高固定碳(30.37%)和高热值(33595.49 kJ/kg)的特点,灰分含量仅为7.56%,且氧含量低(4.44%),属于典型的富碳富氢有机废弃物;而污泥则呈现高灰分(39.49%)、高氧含量(21.53%)、低固定碳(8.14%)和低热值(10820.53 kJ/kg)的特征,其挥发分虽达47.24%,但其中相当部分来源于含氧官能团和结合水分的析出。这种本征差异直接决定了二者热解产物的组成分布与能量品质。

在热解气成分方面,两种物料差异尤为突出。废轮胎热解气以 CH_4 、 H_2 和 CnHm 为主要组分,三者合计占比通常超过70%(图5),其中 CH_4 最高可达47%, H_2 可达22%, CnHm 可达15%,而 CO 和 CO_2 含量相对较低。这归因于轮胎橡胶中大量的C—C键和C—H键在热裂解过程中优先断裂生成低碳烃和氢气,同时轮胎中的芳香烃结构(如苯乙烯、丁二烯共聚物)也有利于 CH_4 的生成。相比之下,污泥热解气中 CO_2 占比显著偏高,尤其是在较低热解终温($\leq 500^\circ\text{C}$)时, CO_2 含量甚至超过 CH_4 和 H_2 居于首位(图10),这主要源于污泥中丰富的含氧基团(如羧基、羰基)在热解初期发生脱羧和脱羰反应释放大量的 CO_2 。随着热解温度升高至550℃以上,污泥热解气中 CH_4 和 H_2 含量逐步增加, CO_2 比例相对下降,说明高温有利于含氧官能团的深度裂解和二次反应向小分子可燃气体转化。

热解气热值的差异是上述成分差异的直接反映。废轮胎热解气热值在3200~7000 kcal/m³范围内(图7),并在650℃终温时可达约6800 kcal/m³,与天然气热值相当,具备良好的替代燃气潜力;而污泥热解气热值仅为780~3000 kcal/m³(图12),即使在600℃终温下也不足3000 kcal/m³,约为轮胎热解气的40%~50%。这种低热值特点限制了污泥热解气作为单一燃气的直接利用价值,通常需要与其他高品位燃气掺混或经过提质处理。

此外,两种物料在热解过程中的气体析出行为也存在差异。废轮胎各气体组分在约400℃时即开始明显析出(图3),而污泥的有效气体析出起始温度滞后至约480℃(图8),这可能与污泥中高灰分对热量的吸收及对挥发分扩散的阻碍作用有关。同时, CnHm 在高温段($>550^\circ\text{C}$)发生二次裂解的现象在两种物料中均有出现,但废轮胎中 CnHm 的裂解更为显著,这与其初始 CnHm 含量更高有关。

综上所述,废轮胎热解产物具有高品位燃气、高热值的特点,而污泥热解产物则以含氧气体和低热值燃气为主,

二者在热解气化利用路径上应采取差异化的技术策略。废轮胎热解气宜直接作为燃料或用于发电,污泥热解气则更适宜作为辅助燃料或经重整提氢后利用。

4. 结论

本文以废轮胎和城市下水污泥为研究对象,采用外热式固定床热解实验台,系统考察了两种典型城市固体废弃物在热解过程中的气体产物析出特性、成分分布及热值变化规律,并对二者的热解产物特性进行了对比分析。主要结论如下:

- (1) 废轮胎热解气体产物以 CH_4 、 H_2 和 CnHm 为主,三者占热解气总量的70%以上,其中 CH_4 最高可达47%, H_2 最高达22%, CnHm 最高达15%。热解气热值随终温升高而显著增加,650℃时可达约6800kcal/m³,与天然气热值相当,具备优良的燃料替代潜力。各气体组分在约400℃时开始明显析出, CnHm 在530℃附近达到峰值后因二次裂解反应加剧而有所下降。
- (2) 城市下水污泥热解气体产物以 CO_2 、 CH_4 和 H_2 为主要组分,在较低热解终温($\leq 500^\circ\text{C}$)时 CO_2 占比最高,超过 CH_4 和 H_2 ;随着温度升高至550℃以上, CH_4 和 H_2 含量逐步增加, CO_2 比例相对下降。热解气热值随终温升高而上升,600℃时接近3000kcal/m³,约为废轮胎热解气的40%~50%。污泥中各气体组分的明显析出起始温度约为480℃,较废轮胎滞后约80℃,这与污泥高灰分含量对热传导和挥发分扩散的抑制作用有关。
- (3) 两种废弃物热解气特性的差异源于其本征组成的不同。废轮胎富含挥发分和固定碳、灰分和氧含量低,有利于生成富氢富烃的高热值燃气;而污泥灰分和氧含量高、固定碳和热值低,热解过程释放大量的含氧气体(CO_2 、 CO),导致燃气热值偏低。上述结果表明,废轮胎热解气适合直接作为工业燃料或用于燃气发电,而污泥热解气由于热值较低,更适宜作为辅助燃料或经重整提质后用于氢气生产。
- (4) 两种物料热解气中的 CnHm 组分在热解温度超过550℃时均出现含量下降趋势,表明高温条件下大分子烃类发生二次裂解反应,转化为更稳定的 H_2 和 CH_4 等小分子气体。这一现象在废轮胎热解气中表现更为显著,与其初始 CnHm 含量较高有关。

综上所述,废轮胎在固定床热解条件下能够获得高品质的燃气产物,具有显著的能源化利用价值;城市下水污泥虽热解气热值偏低,但通过提高热解终温或与其他高品位燃料共热解/共气化,仍可作为辅助能源加以利用。本研究结果可为城市固体废弃物的分质热解处理和差异化能源化利用提供基础实验依据。

致谢

本文为山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目《废轮胎资源化循环利用关键技术研究》(2024TSGC0037)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心,《全国固体废物污染环境防治信息发布情况研究报告 (2025 年)》.
- [2] 唐丹宁, 徐英志, 张远文, 王晓东等. 废轮胎的资源化处理与热解技术研究进展 [J]. 弹性体, 2026, 36(2): 71-76. <https://doi.org/10.16665/j.cnki.issn1005-3174.2026.02.004>
- [3] 纪德强, 彭佳, 王玉迎, 苑丹丹等. 废旧轮胎热解理论与技术研究进展 [J]. 材料工程, 2026, 54(4): 176-190.
- [4] 郭怡君, 李军, 黄宏宇, 小林敬幸. 有机固体废弃物热解技术及热解气组成综述 [J]. 新能源进展, 2023, 11(2): 106-122.
- [5] 单体仑, 高晓东, 田晓龙, 边慧光等. 多种动力学模型应用于废旧轮胎的热解机理研究 [J]. 橡胶工业, 2024, 71(3): 197-203.
- [6] 夏勇, 阳宇, 朱聪, 欧阳少波等. 废轮胎热解过程中的动力学与热力学特性及热解油组分分析 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 36-45.
- [7] 陈亚娟. 废轮胎热解/气化特性及反应机理研究 [D]. 北京交通大学, 2024. <https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbfju.2024.001336>
- [8] 赵光杰, 金建龙, 金 亮, 毛宇炜等. 废轮胎与生物质共热解特性及产物分布研究 [J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(6): 74-80.
- [9] 严智慧. 废旧轮胎热解制备炭材料装备及工艺研究 [D]. 河南科技学院, 2023. <https://doi.org/10.27704/d.cnki.ghnkj.2023.000027>
- [10] 李伟, 杨程, 刘亚青, 王中天. 反应温度对废轮胎热解油催化加氢反应性能的影响 [J]. 石化技术与应用, 2025, 43(3): 187-191. <https://doi.org/10.19909/j.cnki.ISSN1009-0045.2025.03.0187>
- [11] 吴孟. 氧化钙添加下废旧橡胶轮胎热裂解产物特性研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023. <https://doi.org/10.27724/d.cnki.gnmkg.2023.000482>
- [12] 刘晓伟, 庞赞估, 吴孟, 杨辰等. CaO 原位催化废轮胎热解产气特性研究 [J]. 应用化工, 2026, 55(6): 1489-1494. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20260325.016>
- [13] 蒋好. 废轮胎高温热解特性及炭黑形成与调控机制研究 [D]. 华中科技大学, 2024. <https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2024.000436>
- [14] 张鑫. 高温烟气热解废轮胎过程中硫及重金属的转化特性研究 [D]. 山东大学, 2024. <https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2024.004263>
- [15] 郝东杰. 基于组分解析的废轮胎热解特性研究 [D]. 中北大学, 2025. <https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2025.000284>
- [16] 杨金国, 欧志明, 夏明贵, 邹灵松等. 城市化背景下污泥循环流化床气化能源化利用路径研究 [J]. 中国资源综合利用, 2026, 44(5): 113-115.
- [17] 史广宇, 沈新怡. 共热解技术对污泥中重金属的固定及资源化利用研究进展 [J]. 应用化工, 2026, 35(2): 323-332. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2026.02.015>
- [18] 李廉明, 潘煜, 宋焜, 李培等. 市政污泥与废塑料共热解特性及动力学研究 [J]. 可再生能源, 2026, 44(1): 8-16. <https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2026.01.008>
- [19] 姜锦山, 林熙宜, 吴汉军, 潘志权等. 污泥热解炭中持久性自由基的生成与调控研究 [J]. 环境科学与技术, 2026, 49(5): 31-39. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.1546.25.338>