

# 微波加热下生活废纸和PE塑料共热解产气特性

林雪彬, 张晓东, 黄元波, 何宏舟

(集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 以可燃生活垃圾中的主要成分——生活废纸和聚乙烯 (polyethylene, PE) 塑料为原料, 采用微波加热, 对纸张/PE 共热解中产气释放过程、产气成分和产气率等特性的影响规律进行研究。实验结果表明: 在 600 °C 热解终温下, 产气成分以 CO、CO<sub>2</sub> 为主, 约为 35%~40%, 其次为 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>, 其他气体含量较低。随着微波功率的增加, 热解产气各成分的产量都明显增加, 且各产气析出温度及峰值温度向高温方向移动。随着物料中 PE 的混合比例增加, 纸张/PE 共热解产气率降低明显, 焦油产率则明显增加, 表明 PE 热解产物以焦油为主。在定热解终温的情况下, 添加热解碳对热解产气成分的体积分数影响不大, 但可有效提高热解产气量。

**[关键词]** 可燃生活垃圾; 废纸; PE 塑料; 微波; 共热解; 产气特性

**[中图分类号]** TK 6

## Co-pyrolysis of Waste Paper and PE Plastic for Gas Production by Microwave Heating

LIN Xuebin, ZHANG Xiaodong, HUANG Yuanbo, HE Hongzhou

(College of Marine Equipment and Mechanical Engineering of Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Municipal solid waste (MSW) mainly consists of waste paper and polyethylene (PE) plastic. The gas release process, the composition of the produced gases, and the gas production rate during the co-pyrolysis of paper and PE from MSW by microwave heating have been investigated. It is show that, at 600 °C final temperature, the main product gas components of pyrolysis are CO and CO<sub>2</sub> (both about 35%–40%), followed by CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>, and other gases are less. As the microwave power increased, the production of each pyrolysis gas increases significantly. Gas initial and the peak evolution temperature of each gas moved in the direction of high temperature. With the increase of PE ratio, gas yield decreased significantly, while the liquid product yield increased significantly. This indicates that the pyrolysis products of PE are primarily composed of tar. At a constant pyrolysis final temperature, the addition of pyrolysis carbon has little effect on the composition of pyrolysis gas production, but it can effectively increase the pyrolysis gas production.

**Keywords:** municipal solid waste; waste paper; polyethylene(PE) plastic; microwave heating; co-pyrolysis; gas production characteristics

**[收稿日期]** 2024-08-14

**[基金项目]** 福建省自然科学基金项目“可燃生活垃圾微波共热解反应机理和高效产气机制研究”(2020J05141); 福建省教育厅科技类资助项目“可燃生活垃圾微波热解产气机理研究”(JAT190312); 集美大学科研启动金“可燃生活垃圾微波热解产气机理研究”(ZQ2019004)

**[作者简介]** 林雪彬 (1982—), 博士, 讲师, 主要研究方向为废弃物热转化应用。E-mail:linxuebin82@163.com

0 引言

近年来,随着我国大力推广垃圾分类和回收,城市可燃固废中的可燃成分比例明显提高。这为除焚烧之外的其他“多元化”热处置技术包括(包括热解、气化、气化熔融)的商业应用发展提供了可能。微波热解技术是一个具有潜力的研究领域,近年来受到学者的广泛关注。与传统加热方式相比,微波加热具有加热均匀、速率快、能耗低等优点,可以提高热解产气率和产气品质<sup>[1]</sup>。不同研究者在玉米秸秆<sup>[2]</sup>、小麦秸秆<sup>[3]</sup>、毛竹<sup>[4]</sup>、藻类<sup>[5-6]</sup>、褐煤<sup>[7]</sup>的实验中都发现类似的结果。因此,发展可燃垃圾的微波热解产气技术可实现分布式清洁燃气生产的目标,具有巨大应用发展前景。

目前已有诸多的生物质和塑料微波共热解研究表明:影响产气特性的主要因素包括物料种类、微波功率、热解温度、催化剂、停留时间、反应气氛等<sup>[3,8]</sup>。其中,前4个因素最为重要。由于微波加热的选择性,热解温度主要受微波功率和物料自身的吸波能力影响。吸波能力比较差的物料,实验时通常需要添加适量的微波吸收剂/催化剂,以改善加热特性。目前常用的吸收剂/催化剂主要有金属氧化物、分子筛、碳基材料等。其中,微波热解产物碳因其经济性、来源的便利性,及作为热解产物所固有的均匀混合特性,越来越受到重视<sup>[9-10]</sup>。研究的生物质也通常以木材<sup>[11]</sup>、秸秆<sup>[12]</sup>、稻草、稻壳、甘蔗渣、花生壳<sup>[13]</sup>等农林业废弃物为主,而对于可燃生活废弃物的研究则相对较少。此外,现有研究关注微波加热热解产气特性主要包括产气率、成分等<sup>[2-7,11-13]</sup>,但对产气的生成过程机制研究较少,需进一步探索。

综上,本文以城市可燃生活垃圾中的主要成分——纸张和PE塑料为研究对象,旨在探究微波功率、物料混合比例以及添加热解碳对纸张/PE微波共热解过程中的影响规律,包括产气释放过程、产气成分和产气率等特性。研究成果可为城市可燃固废的多样化热处理技术的商业化应用提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

随着我国日常生活垃圾分类和回收的进一步推广,一次性快餐盒、饮料杯、塑料袋等被进一步划分为可回收垃圾。可燃垃圾中塑料份额进一步减少,主要以污染的纸张为主。因此,实验时,生活废纸和PE塑料的混合比例设为三种:9:1、8:2、7:3。本文生活废纸采用维达集团生产的日常生活纸巾,PE塑料购自东莞市樟木头瑞祥高分子材料经营部的30目PE颗粒。由于纸巾比较蓬松,装样质量有限,容易导致实验误差大。此外,纸巾和PE颗粒密度差别也较大。为了物料的混合均匀性及减小实验误差,实验前将纸巾剪成尺寸大小均匀的纸片,用来包PE颗粒,并捏成直径5 mm左右的小纸团,每次实验的总质量为3 g。纸巾和PE塑料的工业分析和元素分析结果见表1。可以看出,纸张(纸巾)的主要成分为挥发分,且含氧量较高,高达42.68%。PE几乎全部为挥发分,由C和H组成。

表1 生活废纸和PE塑料的工业分析和元素分析  
Tab.1 Industrial analysis and elemental of waste paper and PE plastic

材料	工业分析/%				元素分析/%				
	Aad	Mad	Vad	FCad	Cad	Had	Nad	Sad	Oad
纸张	0.03	7.38	84.35	8.24	41.41	6.71	1.72	0.08	42.68
PE	0	0.20	99.80	0	81.77	16.34	1.62	0.07	0

注: Aad、Mad、Vad、FCad 分别表示空气干燥基下的灰分、水分、挥发分、固定碳的质量分数; Cad、Had、Nad、Sad、Oad 分别表示空气干燥基下的C、H、N、S、O元素的质量分数。

1.2 实验设备与方法

实验设备如图1所示,主要包括转子流量计、微波热解炉、功率温度控制面板、产物冷凝和过滤装置,以及采气装置。其中,微波热解炉输出频率为(2.45±0.025) GHz。炉管材质为石英,微波

泄露强度  $\leq 0.01 \text{ mW/cm}^2$ （国标  $\leq 5 \text{ mW/cm}^2$ ）。由于纸张和 PE 微波吸收能力差<sup>[14]</sup>，实验采用碳化硅反应器以提高反应过程中的物料吸波能力。反应物料的温度采用热电偶插入物料内部进行测量，控温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。采用氮气作为热解反应气，流量为  $(100 \pm 5) \text{ mL/min}$ 。实验之前，先通入氮气 10 min，以去除反应器内的残留空气。反应开始后，热解产物经过冷凝和除尘装置后，采用气体质量流量计测试其产气量，达到采样温度采样后，用 50 L 采气袋进行收集。反应达到热解终温为  $600^\circ\text{C}$  后保持 10 min。研究表明：纸张/PE 热解的主要析出温度区间分别为  $294 \sim 387$  和  $400 \sim 500^\circ\text{C}$ <sup>[15]</sup>。为了观察产气过程，分别在  $300 \sim 600^\circ\text{C}$  温度区间，每间隔  $50^\circ\text{C}$  对热解产气采样一次。气体成分采用安捷伦 7890 型气相色谱仪进行分析。实验结束后，收集称重热解残碳。

1.3 产物分析

产物产率分析、气体质量产率可通过总产气体积、成分浓度推算得出，固体产率直接称重获得，液态产率则采用差减法获得。相关计算如下：1) 气体总质量  $m_g = \sum \frac{\varphi_i \times V_0}{22.4} M_i$ ；2) 气相产物产率  $X_g = \left(\frac{m_g}{m_0}\right) \times 100\%$ ；3) 固相产物产率  $X_s = \left(\frac{m_s}{m_0}\right) \times 100\%$ ；4) 液相产物产率  $X_l = 100\% - X_g - X_s$ 。其中： $\varphi_i$  表示各气体在总气袋中的体积分数； $V_0$  为总产气体积 (L)； $M_i$  为各气体的摩尔质量 (g/mol)；22.4 为标准状况下的气体的摩尔体积 (L/mol)； $m_g$ 、 $m_s$ 、 $m_0$  为产气质量、固态残渣质量，以及样品质量 (g)； $X_g$ 、 $X_s$ 、 $X_l$  分别代表热解气、液、固的质量产率 (%)。

2 结果与讨论

2.1 微波功率对纸张/PE 共热解产气析出的影响规律

图 2 给出纸张和 PE 质量比例为 8:2 时，微波功率对共热解的反应温度和升温速率的影响规律。与文献 [16-17] 研究结果类似，即不同微波功率下升温大致可以分成两个阶段，第一个阶段从室温至  $350^\circ\text{C}$  左右（加热时间 6~8 min），反应温度快速增加； $350^\circ\text{C}$  之后进入第二个阶段升温速率放缓。同时，功率越高，升温速率越快。在 500、600、700 W 微波功率下，反应温度从室温到  $600^\circ\text{C}$  所需时间分别为 60、40、25 min；对应最快升温速率分别为 41.8、52.3、 $59.0^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

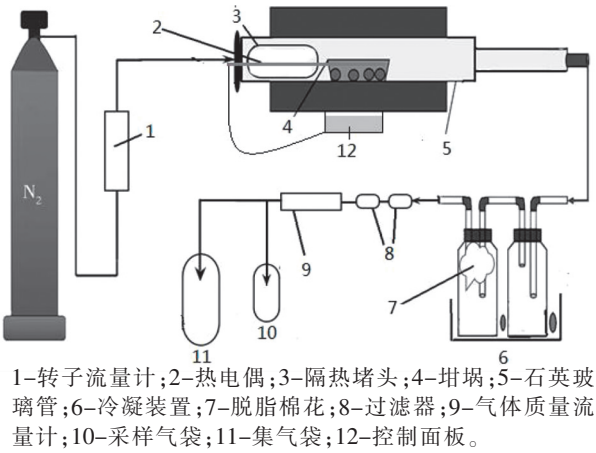


图 1 微波热解实验装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of microwave heating pyrolysis experimental setup

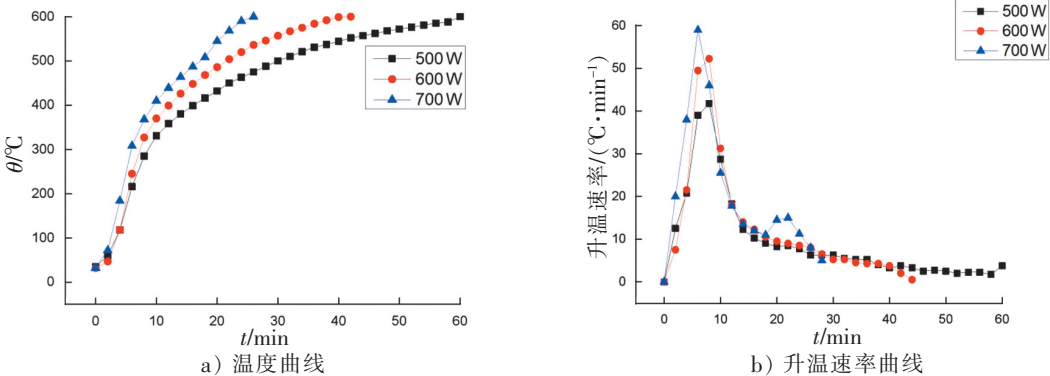


图 2 不同微波功率下的共热解的温度和升温速率曲线  
Fig.2 Temperature profile and heating rate under different microwave powers

图 3 为纸张和 PE 的质量比例为 8:2 时, 在不同微波功率下共热解过程中热解产气成分 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>随着温度的变化规律。可以看出, CO、CO<sub>2</sub> 在 300 ℃ 左右开始析出, H<sub>2</sub> 的析出则主要发生在 400 ℃ 以后, CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 碳氢类气体都在 350 ℃ 左右开始析出, 这与彭好义<sup>[16]</sup>和 Zhao 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。这是因为 CO、CO<sub>2</sub> 主要来源于混合物料中纸张的分解, 其主要成分为纤维素, 含氧量高 (42.68%), 有大量的羟基 (—OH)、羰基 (—C=O)、羧基 (—COOH) 和醚基 (C—O—C), 这些功能团在低温条件下发生脱水、脱醚、脱羟基和脱羧基等平行裂解反应, 会重组产生 CO、CO<sub>2</sub><sup>[16,18-19]</sup>。当微波功率从 500 W 提高到 600 W, CO、CO<sub>2</sub> 的析出温度范围往高温方向移动, 其峰值析出温度也由 400 ℃ 左右提高到约 450 ℃。这是因为随着微波功率的增加, 加热速率加快, 由于热传导的限制, 产物析出温度出现滞后, 这与常规加热的变化趋势一致。同时, 当功率提高时, CO、CO<sub>2</sub> 的体积分数也明显增加, 这与文献 [16-17] 的结果一致。这是因为微波功率增加, 物料吸收的能量密度增加, 整体热解温度提高。H<sub>2</sub> 在 400 ℃ 以后开始析出, 并 500 ℃ 之后急剧增加。可预见, 进一步提高热解温度, H<sub>2</sub> 产出将明显提高。这是因为 H<sub>2</sub> 的生成主要来自于纸张深入热解的开环反应以及 PE 塑料中 (—CH<sub>2</sub>—CH<sub>2</sub>—)<sub>n</sub> 的裂解和变形。产物中的焦油在较高温度条件下进一步裂解, 以及热解碳、CO、CO<sub>2</sub> 的二次反应也可进一步促使 H<sub>2</sub> 的生成。其主要反应式如下: 1) Tar→C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>+H<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O; 2) CO+H<sub>2</sub>O→CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>; 3) C+CO<sub>2</sub>→2CO; 4) C+H<sub>2</sub>O→CO+H<sub>2</sub>; 5) C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>+mCO<sub>2</sub>→2mCO+(n/2)H<sub>2</sub>; 6) C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>+mH<sub>2</sub>O→mCO+((n/2)+m)H<sub>2</sub>。

CH<sub>4</sub> 少量来自纸张纤维素中键能较低的甲氧基 (CH<sub>3</sub>O—) 的裂解重组, 其中一部分来自纤维素热解过程中碳氢化合物的裂解<sup>[17]</sup>, 另一部分来自 PE 的 β 位断裂<sup>[20]</sup>。C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的析出规律和 CH<sub>4</sub> 比较相似, 即整体上体积分数随着温度先增加后减小。二者来源于碳氢化合物的裂解和 PE 的键断裂。另外, CH<sub>4</sub> 析出峰值温度随着微波功率的增加向高温方向移动, 从 500 ℃ 提高到 550 ℃。C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 析出峰值温度则随功率变化不大, 为 500 ℃ 左右。此外, 这 3 种气体的体积分数也随着功率呈先增高再减小的趋势。

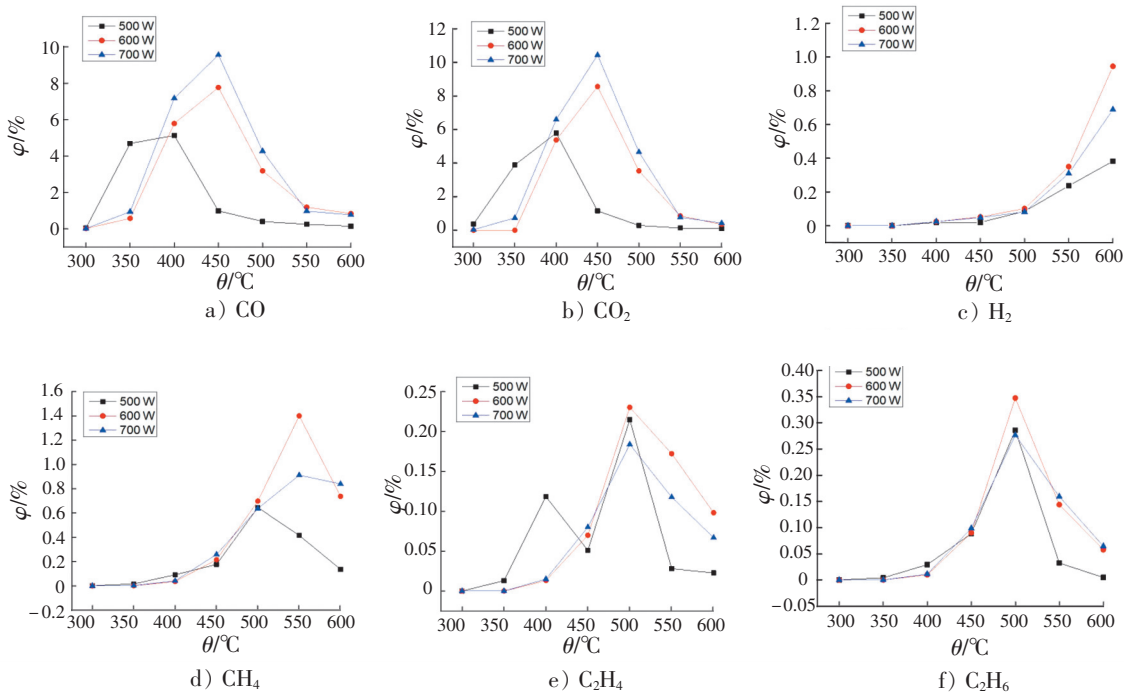


图 3 微波功率对共热解产气过程的影响规律  
Fig.3 Effect of microwave power on gas production process during co-pyrolysis



从图 4 可以看出，纸张和 PE 的质量比例为 8:2，热解终温为 600 ℃ 时，热解产气以 CO、CO<sub>2</sub> 为主，占 35%~40%；CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 次之，分别占 9%~12% 和 4%~8%；C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 最低，这与物料中纸张的混合比例为 80%，且其含氧量高达 42% 有关。其中比较特殊的是，在 500 W 功率时，C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 产率为 11.5%；功率增加至 600 W，C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的产率反而降低明显。这表明 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 主要来自于 PE 的 β 位断裂，与文献 [20] 一样。CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 则与 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的变化趋势相反，因为二者在较高温度才能析出。当微波功率从 600 W 进一步提高至 700 W 时，除了 CO<sub>2</sub>，其他产气成分的变化不大。这是因为提高功率后，一方面提高了整体热解温度，有利于产气的析出；另一方面，热解时间由 40 min 缩短至 25 min，不利于热解产物进一步裂解成小分子气体。

从图 5 中可以看出，在 600 ℃ 热解终温下，500~700 W 微波功率下纸张/PE 共热解产物以液体为主，达到 70% 以上，而固体产物和气体都较低（在 500、600、700 W 微波功率下，每克物料的产气体积分别为 71、107、103 mL）。液体产率比较高，一方面和实验采用的开放式反应器结构有关，导致热解气、液产物停留时间短，大分子焦油来不及进一步分解成小分子气体。另一方面，文献 [18, 20-21] 表明：生物质和塑料共热解时产生的交互作用，即 PE 裂解产生的 H 自由基和碳氢基团等与纸张的酚等物质发生二次反应，也会导致液体产率增加，以及产气率的减少。此外，随着功率的增加，气体产率先增加后略有减小，这和文献 [10] 木屑的微波热解结果一致，即由微波功率增加促使物料的吸热量增加，同时反应时间缩减的原因共同导致。

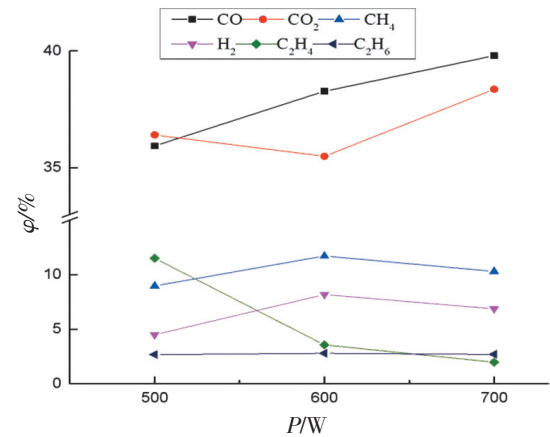


图 4 微波功率对产气成分体积分数的影响规律  
Fig.4 Effect of microwave power on gas composition

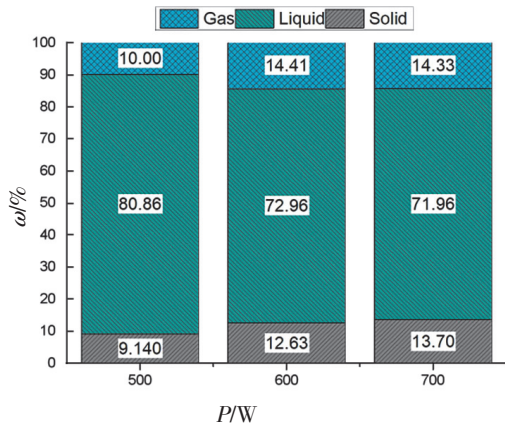


图 5 微波功率对纸张/PE 共热解产物分布的影响规律  
Fig.5 Effect of microwave power on co-pyrolysis yield

综上，纸张和 PE 的质量比例为 8:2 时，在 500~700 W 微波功率及 600 ℃ 热解终温下，气体产物的析出顺序为：先是 CO、CO<sub>2</sub>，其次是 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 等碳氢气体，最后是 H<sub>2</sub>。同时，微波功率升高，各产气成分析出温度及析出峰值温度向高温方向移动，产气量增加。但热解产物以液体为主，整体产气率较小，且产气成分以 CO、CO<sub>2</sub> 为主。

2.2 纸张和 PE 的质量比例对微波共热解产气析出的影响规律

图 6 给出了在 700 W 微波功率下，纸张/PE 微波共热解产气随着 PE 的混合比例变化的析出规律。一方面，主要热解气成分 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 随着温度的变化与节 2.1 基本一致。另一方面，如节 2.1 所述，CO<sub>2</sub>、CO 来自于纸张中羟基（—OH）、羰基（—C—O）、羧基（—COOH）等官能团和醚键（C—O—C）的裂解重组，因此随着 PE 的混合比例的增加和纸张的混合比例的减少，产气中这 2 种气体的体积分数减少。CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 则相反，除了少量来自于纸张碳氢基的断裂和开环反应，主要来自于 PE 中聚乙烯的 β 位断裂<sup>[20]</sup>，因此，这 4 种气体的体积分数随着 PE 的混合比例的增加而增加。

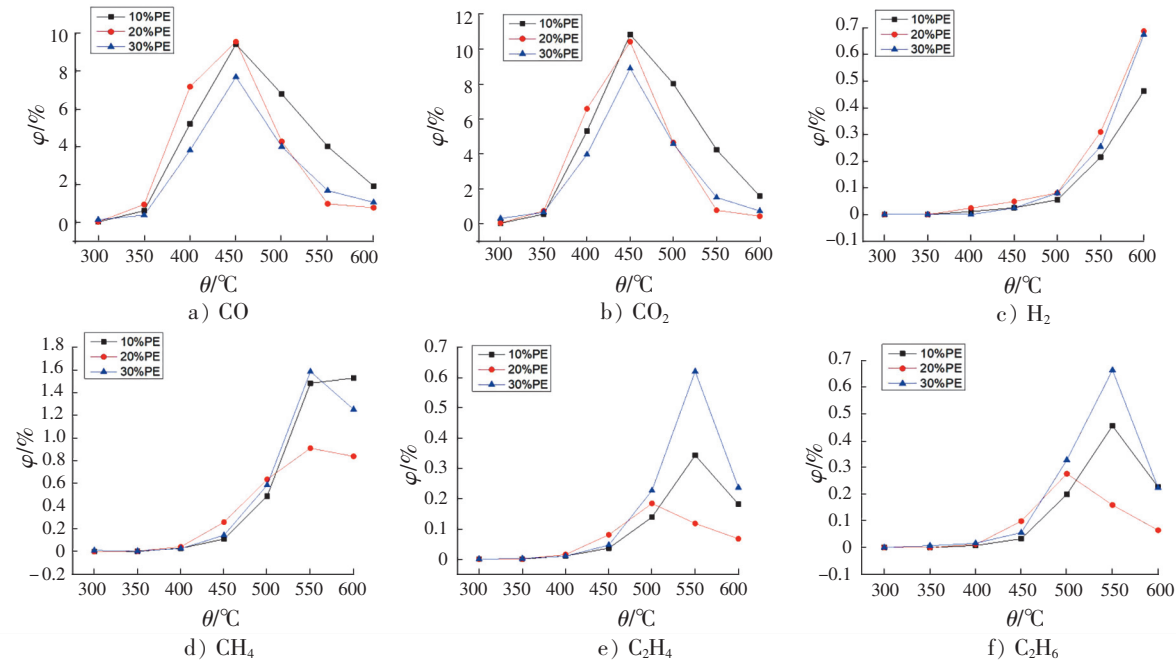


图 6 PE 的混合比例变化对微波热共解产气成分析出的影响规律  
Fig.6 Effect of blend ratio of PE on gas production process during co-pyrolysis

由图 7 可以看出, 随着 PE 的混合比例的增加, 产气中 CO、CO<sub>2</sub> 的体积分数略有减小, CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的体积分数则略有增加。这与样品中 C、H 元素增加, O 的含量减少有关。从图 8 中可以看出, 在 600 °C 热解终温下, 随着 PE 的混合比例从 10% 增加至 30%, 气体和热解残碳产率都随之减小, 焦油产率则增加。其中, 气体产率由 16.31% 减少至 10.00%; 热解残碳产率由 14.07% 减少至 11.10%; 液体焦油产率则由 69.62% 增加至 78.90%。这与文献 [18] 报纸和 PE 共热解的气液产物分布变化趋势一致, 即: 液体焦油产率随着 PE 的混合比例的增加而增加, 气体则相反。这是因为: 一方面, 相比于纸张, PE 的挥发分量 (99% 以上), 且热解温度区间小 (约 400 ~ 500 °C); 另一方面, 微波加热升温速率快, 且反应器出口为开式结构, 导致油气混合产物短时间内大量析出, 来不及进一步裂解成气体小分子。因此, 当混合物中的 PE 增加, 应考虑对油气产物进一步裂解以提高产气率。

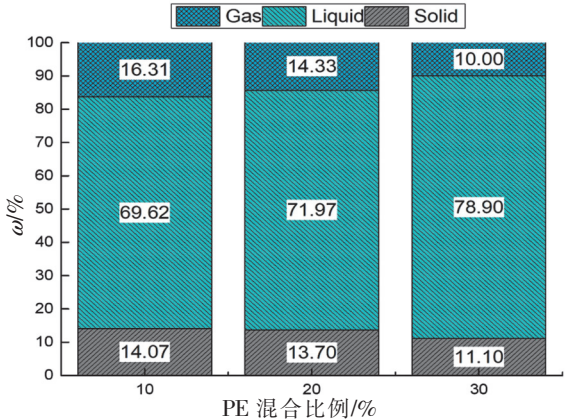
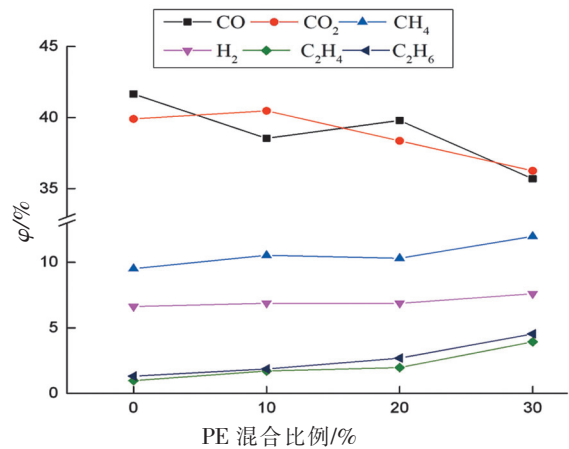


图 7 PE 的混合比例变化对产气成分的影响规律  
Fig.7 Effect of blend ratio of PE on gas composition

图 8 PE 的混合比例变化对纸张/PE 共热解产物分布的影响规律  
Fig.8 Effect of blend ratio of PE on co-pyrolysis yield

总之, 随着 PE 的混合比例的增加, 纸张/PE 共热解的产气中除了 CO、CO<sub>2</sub> 的体积分数有减小, 其他各成分的体积分数变化不大, 但产气率降低明显, 液态产物产率则明显增加。若要提高产气率, 需提高温度对产气进行进一步裂解。

2.3 热解碳对微波共热解产气析出的影响规律

通常，添加微波吸收剂可以显著提高微波热解温度，从而改善热解行为，并增加气/液产率。目前，微波吸收剂的种类繁多，其中微波热解产物碳因其经济性、来源方便性以及作为热解产物所具备的先天混合均匀性优势，愈发受到关注<sup>[10]</sup>。本文采用的微波吸收剂为同功率热解终温下的热解产物碳（Char），添加量分别为 10%、20%、30%。从图 9 可以看出，整体热解温度随着热解碳添加量的增加而提高，对应平均温度分别提高了 25、33、46 ℃。与文献 [10, 22] 相比，随着热解碳的添加量的增加，热解温度的增幅不大，与本文结果一致。然而，两文献中添加热解碳后，平均反应温度大幅提高，可达 300 ℃ 以上，而本实验的提高幅度则相对较小，这与本文采用碳化硅反应器，已大幅提高反应温度有关。

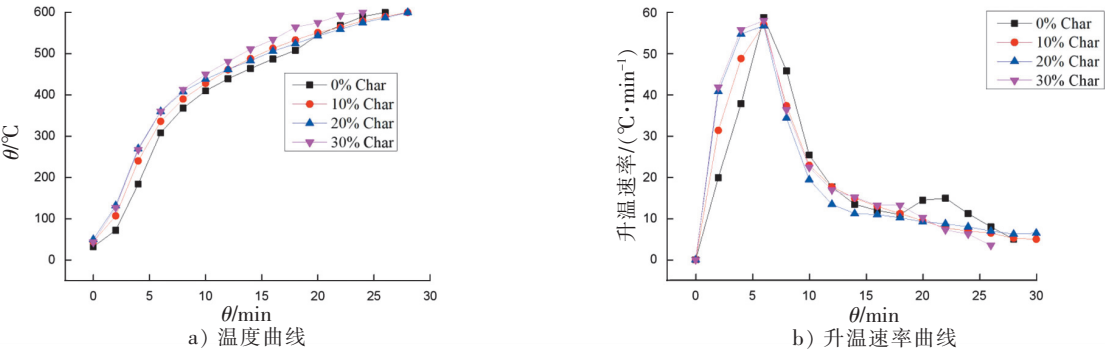


图 9 不同热解碳添加量下的共热解温度和升温速率曲线  
Fig.9 Temperature profile and heating rate under different char additions

图 10 中可以看出，纸张和 PE 的质量比例为 8:2 时，随着热解碳的加入，在  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  的析出初期起到抑制作用，且添加量越高，抑制愈明显。随着反应的进行，这两种气体的体积分数在 450 ℃ 时达到峰值，此后热解碳对产气的促进作用开始显现。当热解碳添加量为 30% 时，产气增加尤其明显。对于  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$  等气体的析出，热解碳则在 500 ℃ 后才起到明显的促进作用。这是因为热解碳的加入虽然可以提高反应物的整体反应温度，但由于纸张蓬松、密度较小且体积大，导致其热解碳也具有同样特性（当热解碳的添加量为 30% 时，其体积与物料体积相当），在早期低温条件下可能会吸附热解油气产物，从而延迟产气的析出。后期，热解碳作为微波吸收“热点”，促进液体产物的二次裂解，从而促进产气析出。

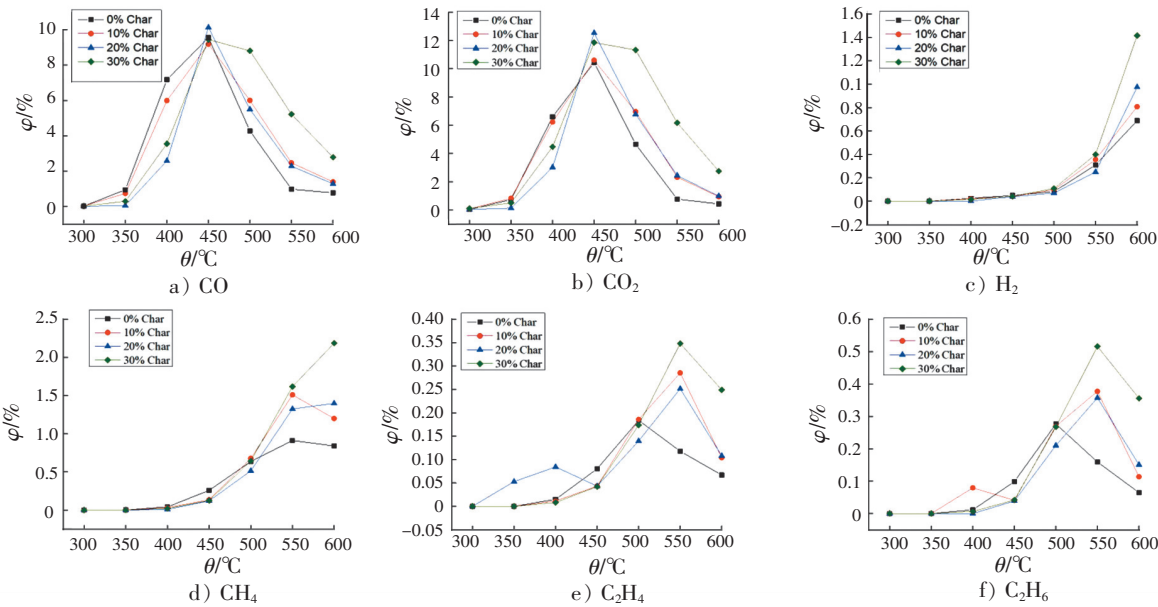


图 10 热解碳的添加量对微波热解产气的影响规律  
Fig.10 Effect of char addition on gas production process during co-pyrolysis



从图 11 中可以看, 随着热解碳的添加量的增加, 总产气中 CO 的体积分数逐渐减小, CO<sub>2</sub> 则增加, 其他气体则变化不明显。这与文献 [22] 添加热解碳可明显改善产气质量 (产气中 CO、H<sub>2</sub> 含量明显提高) 有所差异。这是因为本实验采用统一 600 ℃ 的热解终温, 而文献 [22] 不定热解终温, 添加热解碳后整体的热解温度较高, 导致产气品质提高明显。这说明热解碳成分本身对热解过程的二次催化作用 (水煤气反应) 影响不大, 但其所引起的热解温度变化对产气成分变化影响明显。从图 12 可以看出, 在 600 ℃ 热解终温下, 热解碳的添加对共热解产碳率的影响不大, 说明物料中的挥发分在此温度下已充分析出。随着热解碳的添加量增加, 焦油的产率变小, 产气率增加。这是因为热解碳的加入, 提高了整体的热解温度, 促进产物中的液体进一步裂解成气体。当热解碳的添加量为 30% 时, 每克物料的产气体积由 103.02 mL 提高至 136.66 mL。

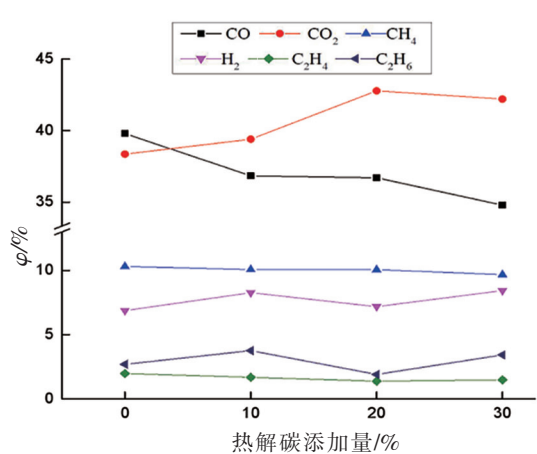


图 11 热解碳的添加量对产气成分的影响规律  
Fig.11 Effect of char addition on gas composition

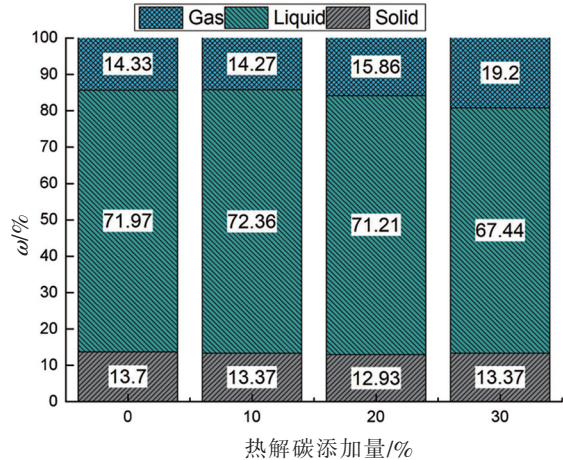


图 12 热解碳的添加量对共热解产物分布的影响规律  
Fig.12 Effect of char addition on co-pyrolysis yield

综上, 在定终温的情况下, 添加热解碳对纸张/PE 微波共热解的产气成分变化影响不大, 但可以提高热解反应的整体温度, 从而促进热解焦油裂解成小分子气体, 提高产气量。

3 结论

通过考察微波功率、纸张和 PE 的质量比例、添加热解碳对纸张/PE 微波共热解的产气过程、产率, 以及成分等特性的影响规律, 得到如下主要结论:

- 1) 纸张/PE 微波共热解时, CO、CO<sub>2</sub>最先析出, CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>等碳氢气体随之其后, 最后是 H<sub>2</sub>。随着微波功率增加, 各产气成分的产量均提升, 且析出温度向高温方向移动。
- 2) 在 600 ℃ 热解终温、700 W 功率下, 随着 PE 的混合比例从 10% 增加至 30%, 各产气成分产量均减小, 总产气率下降 (由 16.31% 减少至 10.00%), 而液体产率增加。这表明原料中的 PE 热解产物主要为液态。
- 3) 在 600 ℃ 热解终温、700 W 功率下, 热解碳的加入对产气成分的体积分数影响不大, 但可促使纸张/PE 微波共热解产物中的液体产物进一步热解成气体, 当热解碳的添加量为 30% 时, 每克物料的产气体积由 103.02 mL 提高至 136.66 mL。
- 4) 实验整体热解产气率低, 且 CO<sub>2</sub> 含量高, 后续研究考虑通过提高热解温度、改造实验设备以增加停留时间, 以及采用其他微波催化剂/吸收剂等手段以进一步提高热解产气率和产气质量。

[ 参考文献 ]

[1] DOMÍNGUEZ A, MENÉNDEZ J A, FERNÁNDEZ Y, et al. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 79(1/2):128-135.



- [2]符伦菁.微波诱导放电光谱分析及其在生物质热解气重整的应用[D].济南:山东大学,2018.
- [3]ZHAO X Q,WANG M,LIU H Z,et al. Effect of temperature and additives on the yields of products and microwave pyrolysis behaviors of wheat straw [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,2013,100:49-55.
- [4]DONG Q,NIU M M,BI D M,et al. Microwave-assisted catalytic pyrolysis of moso bamboo for high syngas production [J]. *Bioresource Technology*,2018,256:145-151.
- [5]HONG Y,CHEN W R,LUO X,et al. Microwave-enhanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for syngas production [J]. *Bioresource Technology*,2017,237:47-56.
- [6]BENEROSO D,BERMÚDEZ J M,ARENILLAS A,et al. Microwave pyrolysis of microalgae for high syngas production [J]. *Bioresource Technology*,2013,144:240-246.
- [7]ZHAO X Q,GUO B W,WANG W L,et al. Experimental study on microwave pyrolysis of three Chinese lignite [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,2017,124:303-309.
- [8]于颖,于俊清,严志宇.污水污泥微波辅助快速热裂解制生物油和合成气[J]. *环境化学*,2013,32(3):486-491.
- [9]LIN J H,MA R,LUO J,et al. Microwave pyrolysis of food waste for high-quality syngas production: positive effects of a CO<sub>2</sub> reaction atmosphere and insights into the intrinsic reaction mechanisms [J]. *Energy Convers Manage*,2020,206:112490.
- [10]ELLISON C R,HOFF R,MARCULESCU C,et al. Investigation of microwave-assisted pyrolysis of biomass with char in a rectangular waveguide applicator with built-in phase-shifting [J]. *Applied Energy*,2020,259:114217.
- [11]KUMAGAI S,ALVAREZ J,BLANCO P H,et al. Novel Ni-Mg-Al-Ca catalyst for enhanced hydrogen production for the pyrolysis-gasification of a biomass/plastic mixture [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,2015,113:15-21.
- [12]ABEDIN A,BAI X,SMITH M,et al. Microwave-assisted co-gasification of mixed plastics and corn stover: a synergistic approach to produce clean hydrogen [J]. *Energy Conversion and Management*,2023,280:116774.
- [13]SURIAPPARAO D V,VINU R. Biomass waste conversion into value-added products via microwave-assisted Co-Pyrolysis platform [J]. *Renewable Energy*,2021,170:400-409.
- [14]ZHANG Y N,CHEN P,LIU S Y,et al. Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis: a review [J]. *Bioresource Technol*,2017,230:143-151.
- [15]林雪彬.可燃固体废弃物热解气化的交互作用机理与过程优化研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [16]彭好义,李志晴,沈贞,等.杨木微波热解产气特性实验研究[J]. *太阳能学报*,2020,41(4):235-242.
- [17]ZHAO X Q,WANG W L,LIU H Z,et al. Microwave pyrolysis of wheat straw: product distribution and generation mechanism [J]. *Bioresource Technol*,2014,158:278-285.
- [18]CHEN W M,SHI S K,ZHANG J,et al. Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: synergistic effect and oil characterization [J]. *Energy Conversion & Management*,2016,112:41-48. DOI:10.1016/j.enconman.2016.01.005.
- [19]XU T,HUANG X M. Study on combustion mechanism of asphalt binder by using TG-FTIR technique [J]. *Fuel*,2010,89(9):2185-2190. DOI:10.1016/j.fuel.2010.01.012.
- [20]HASSAN H,HAMEED B H,LIM J K. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse and waste high-density polyethylene: synergistic effect and product distributions [J]. *Energy*,2020,191:116545. DOI:10.1016/j.energy.2019.116545.
- [21]GUNASEE S D,DANON B,GORGENS J F,et al. Co-pyrolysis of LDPE and cellulose: Synergies during devolatilization and condensation [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,2017,126:307-314. DOI:10.1016/j.jaap.2017.05.016.
- [22]董庆.基于微波加热的竹材生物质热解机理及特性研究[D].南京:东南大学,2015. DOI:10.7666/d.Y297697

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)