



## 城市生活垃圾热解气化技术研究进展

袁浩然<sup>1</sup>, 鲁涛<sup>1</sup>, 熊祖鸿<sup>1</sup>, 黄宏宇<sup>2</sup>, 小林敬幸<sup>2</sup>, 陈勇<sup>3</sup>, 黎志强<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; <sup>2</sup>名古屋大学环境友好型社会研究所, 日本 名古屋 464-8603;

<sup>3</sup>中国科学院广州分院, 广东 广州 510070; <sup>4</sup>江西省吉安市永新县市政园林管理所, 江西 吉安 510070)

**摘要:** 从城市生活垃圾热转化方式的比较入手, 简要阐明了热解气化过程, 讨论了各类热解气化反应器的优缺点, 概述了城市生活垃圾热解、气化实验研究进展以及热解气化技术中试及应用情况。通过比较各类实验研究, 明确了热解温度、加热速率对热解产物产量及产物分布的影响, 气化温度、氧气当量比 (RO) 对含氧气化反应的影响, 气化温度、水蒸气与城市生活垃圾质量比 (S/M) 对水蒸气气化反应的影响。指出了城市生活垃圾热解气化实验研究热点在于优化控制参数, 提高反应速率, 促进目标产物高值化, 抑制其它产物及污染物的生成, 以及城市生活垃圾热解气化技术的发展方向。

**关键词:** 城市生活垃圾; 热解; 气化

中图分类号: X 705 文献标志码: A 文章编号: 1000-6613(2012)02-0421-07

## Advance in pyrolysis and gasification of municipal solid waste study

YUAN Haoran<sup>1</sup>, LU Tao<sup>1</sup>, XIONG Zuhong<sup>1</sup>, HUANG Hongyu<sup>2</sup>,  
KOBAYASHI Noriyuki<sup>2</sup>, CHEN Yong<sup>3</sup>, LI Zhiqiang<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Japan Nagoya University EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan;

<sup>3</sup>Guangzhou Division Academy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, Guangdong, China;

<sup>4</sup>City Landscape Management Office of Yongxin, Ji'an 343400, Jiangxi, China)

**Abstract:** Pyrolysis and gasification process of municipal solid waste was briefly clarified in this paper starting with various ways of municipal solid waste thermal conversion. The advantages and drawbacks of pyrolysis and gasification reactors were discussed. The research progress in municipal solid waste pyrolysis and gasification and the pilot test of pyrolysis and gasification technology together with their application status were all introduced. The effects of pyrolysis temperature and heating process on the yields and distribution of pyrolysis products, the effects of gasification temperature and oxygen equivalence ratio (RO) on the oxygen gasification reaction and the effects of gasification temperature, water vapor and the municipal solid waste mass ratio (S/M) on the steam gasification reaction were all illustrated clearly by comparing various experimental studies. It was found that the research on municipal solid waste pyrolysis and gasification focused on optimizing control parameters, improving reaction rate, promoting high-value target product and inhibiting the formation of other products and contaminants. Finally the research direction of municipal solid waste pyrolysis and gasification technology in the future was proposed that current research on municipal solid waste pyrolysis and gasification involved few research on the migration of pollutants during pyrolysis and gasification process and lagging study of the mechanisms of

收稿日期: 2011-08-02; 修改稿日期: 2011-08-28。

基金项目: 国家 973 计划 (2011CB201501)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-EW-G-1-5) 及广东省-中国科学院全面

战略合作项目 (2010A090100035)。

第一作者: 袁浩然 (1981—), 男, 博士, 讲师。联系人: 陈勇, 研究员。E-mail: chenrong@ms.giec.ac.cn。

pyrolysis and gasification.

**Key words:** municipal solid waste; pyrolysis; gasification

城市固体废物包括工业固体废物、城市生活垃圾、危险废物 3 类, 其中城市生活垃圾主要是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物<sup>[1]</sup>。城市生活垃圾的收集、运输和处理过程会产生大量的有害成分, 从而对大气、土壤、水源等造成污染, 是我国和世界各国面临的重大环境问题之一<sup>[2]</sup>。世界各国都把城市生活垃圾的减量化、无害化和资源化作为综合解决城市生活垃圾问题的原则, 我国颁布的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》提出对固体废物防治应实行减量化、资源化、无害化的发展方向。目前, 城市生活垃圾的处理技术主要有填埋、堆肥、热处置三大技术。

其中主要的热处置技术分为直接焚烧和热解气化两种。相较于两种处理技术, 从资源化、能源化利用的角度, 直接焚烧是固态非均相燃烧, 存在燃烧不充分、温度分布不均等问题, 导致效率较低, 而热解气化可以将城市生活垃圾转化为成分较为稳定的气、液、固 3 种类型产品加以利用, 可有效提高其利用效率、利用范围和经济性; 从污染物排放角度, 由于直接焚烧的不充分性所引起的二次污染, 特别是二噁英的排放问题, 制约着该技术的广泛应用<sup>[3-4]</sup>, 而热解气化过程是在贫氧或缺氧气氛下进行, 从原理上减少了二噁英的生成, 同时大部分的重金属在热解气化过程中溶入灰渣, 减少了排放量<sup>[5-6]</sup>。由此可见, 发展热解气化技术是实现城市生活垃圾无害化、资源化、能源化利用的重要途径。

本文作者从热解气化原理出发, 简要阐述了城市生活垃圾热解气化实验研究进展以及热解气化技术中试及应用情况, 并通过比较各类实验研究, 明确了热解温度、加热方式对热解产物产量及产物分布的影响, 以及气化温度、氧气当量比、水蒸气与城市生活垃圾质量比对气化反应的影响。

## 1 热解气化原理

热解是指在无氧或缺氧气氛下, 利用高温使固体废物有机成分发生裂解, 从而脱出挥发性物质并形成固体焦炭的过程, 热解工艺主要产物有热解油

和固体炭, 气体产率相对较低。气化是指反应物在还原性气氛下与气化剂发生反应, 生成以可燃气为主的热转化过程, 在这里气化剂主要包括空气、富氧气体、水蒸气、二氧化碳等。在实际过程中, 热解、气化往往同时存在于反应过程中。

## 2 热解气化反应器

反应器是城市生活垃圾热解气化系统中的核心设备, 按照设备运行方式可分为固定床、流化床、回转窑及其它类型的反应器。

### 2.1 固定床反应器

固定床反应器的最大优点是制造简单、成本低、运动部件少、操作简单, 但同时存在炉内易形成空腔、物料处理量较小的缺点。典型的固定床反应器分为下吸式、上吸式两种。下吸式热解气化炉适用于含水率不高的物料(含水率低于 30%), 突出优点是生成气通过高温区, 故生成气中焦油含量较低<sup>[7]</sup>。熊祖鸿等<sup>[8]</sup>通过扩大上吸式热解气化炉高温区的直径延长气相停留时间, 进一步降低了气相中的焦油含量, 同时增加机械搅拌装置, 解决了炉内物料架空的问题。上吸式热解气化炉的生成气不通过高温区, 焦油含量较高, 但物料被向上流动的热空气烘干, 可用于含水率较高(含水率可达 50%)的物料。

### 2.2 流化床反应器

流化床反应器具有传热传质效率高、反应强度大、原料适应性广、处理量大的优点, 可进一步分为单流化床、循环流化床、双流化床、携带床。单流化床生成气直接送入净化系统; 循环流化床生成气中夹带的固体颗粒经旋风分离器分离后返回至流化床, 碳转化率较高; 双流化床具有两级反应器, 热解反应主要在一级反应器进行, 气化反应主要在二级反应器进行, 碳转化率也较高; 携带床要求原料破碎为细小颗粒, 采用气化剂直接吹动原料, 运行温度高达 1100~1300 °C, 气相中焦油含量很低, 碳转化率可达 100%, 其缺点是对炉体材质有一定要求。

### 2.3 回转窑反应器

回转窑反应器根据加热方式分为外热式和内

热式,对物料具有很强的适应性,适用于各种尺寸及形状的固体和液体、气体废弃物,同时具有控制方便、操作简单的优点,缺点是热解反应不够充分,回转窑出口处易产生燃气泄漏<sup>[9]</sup>。

## 2.4 其它反应器

在固定床、流化床反应器的基础上,针对其使用过程中的缺点形成一些改进型反应器,如旋转床反应器、多级循环流化床。旋转床反应器克服了固定床原料内部搭桥、架空的问题。多级循环流化床每段圆锥体首尾相连,锥体底部形成流化床,气体和固体间的回混被有效地阻止,气滞留时间的比例比一般流化床的高很多,气化效率相应提高<sup>[10]</sup>。但同时,改进后的反应器结构更为复杂,操作难度加大,实际应用不多。

# 3 热解技术研究进展

## 3.1 塑料类废弃物热解

废塑料约占我国城市生活垃圾中的 10%~15%,是城市生活垃圾中的主要有机组分之一,众多实验研究表明热解温度和加热方式直接影响废塑料热解产物产量、产物分布及污染物浓度。左禹等<sup>[11]</sup>在小型固定床聚乙烯(PE)热解实验中发现,提高热解温度可以促进分子链的断裂以及二次反应的进行,进而提高产气率、碳转化率和热效率,800℃时,产气率达到 56.04%,碳转化率达到 51.26%,热效率达到 57.18%;热解气热值开始随温度的升高而升高,在 700℃时达到最大值 38712 kJ/m<sup>3</sup>,随后又随着温度的升高而有所下降。张研等<sup>[12]</sup>通过热重法(TG)和差示扫描量热法(DSC)研究了低密度聚乙烯(LDPE)的热解过程,同样发现提高热解温度有利于促进分子链的断裂,可提高热解产物中乙烯等小分子的含量,在 800℃时热解产物中 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 的浓度已接近 80%。

对于各种废塑料混合物,目前研究重点为热解过程中的各物质间的相互影响作用。Chowlu 等<sup>[13]</sup>发现聚丙烯(PP)含量达到 40%以上时,PP 与 LDPE 热解相互影响作用加强,PP 与 LDPE 质量比为 65%:35%时,热解活化能较小,热解产物中 C<sub>10</sub> 及以下产物含量明显提高。Ciliz 等<sup>[14]</sup>发现在 PP、PE 混合物中增加 PP 含量,热解产物中 C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 烃类含量会升高,PP、PE 混合物以及 PP、PS(聚苯乙烯)混合物热解产物中 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 会增加,C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 会减少。Aguado 等<sup>[15]</sup>发现萘烷可改变高密度聚乙烯(HDPE)的降解机理,在低温快速(350~375℃、1~3 h)热解条件下促进气态烃的生成,在慢速中温热解(400~425℃、5~7 h)条件下促进 C<sub>5</sub>~C<sub>32</sub> 大分子烃的生成。随着热解温度和停留时间的增加,气态烯烃和 C<sub>5</sub>~C<sub>32</sub> 中  $\alpha$  型烯烃含量都会增加,5 h、375℃条件下烯烃含量最高,占气态产物的 96.5%;5 h、425℃条件下  $\alpha$  型烯烃含量最高,占 C<sub>5</sub>~C<sub>32</sub> 产物中的 76%。Bhaskar 等<sup>[16]</sup>发现热解温度为 430℃时,PP、PE、PS、聚氯乙烯(PVC)、高抗冲击聚苯乙烯(HIPS-Br)(质量比为 3:3:2:1:0.5)塑料混合物热解产物中液态产物、气态产物、焦炭含量分别为 71%、17%、12%,热解原料中加入 0.5 mol/L 的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)后,热解产物中液态产物、气态产物、焦炭含量分别为 60%、12%、25%,另外出现了 2%的石蜡。

在污染物排放方面,王志等<sup>[17]</sup>的 PVC 固定床热解实验发现,HCl 析出过程可分为 3 个阶段,首先是析出少量 HCl 的活化阶段,接着是析出大量 HCl 的等温分解阶段,最后是仍有少量 HCl 析出的二次裂解阶段;快加热方式下析出的 HCl 量几乎是慢加热方式的 2 倍。Brebun 等<sup>[18]</sup>研究了催化剂对 PP、PE、PS、PVC、ABS-Br 混合物热解油中溴、氯的去除效果,发现 FeOOH、Fe-C 对溴的去除效果较好,可达到 90%~95%,CaCO<sub>3</sub>、Ca-C 对氯的去除效果较好,可达到 93%~98%。Bhaskar 等<sup>[19]</sup>研究了 Ca-C、Fe-C、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-C 催化剂对 PVC 热解过程中析出 HCl 的吸收效果,发现 Ca-C 的吸收效果最好,最优条件下,可达到理论吸收值的 63%。

## 3.2 纸类废弃物热解

废纸约占我国较发达城市生活垃圾总质量的 4.5%~6.5%,实验发现热解温度同样是影响热解过程的重要因素。温俊明等<sup>[20]</sup>在热重实验中发现,废纸的热解失重波段分别是 160~570℃、380~800℃,失重率分别为 81%、19%。Wu 等<sup>[21-22]</sup>在废纸热重实验中发现,随着热解温度的提高,热解气中碳氢化合物和非碳氢化合物分别增加,665℃时,热解气占热解产物的 80.73%,其中非碳氢化合物达到 79.10%。肖刚等<sup>[23]</sup>在流化床热解实验中发现,废纸的最佳热解温度为 600~700℃,此时,热解产物中热解气占 55%~65%,热解油占 25%~30%,焦炭占 15%~20%。

### 3.3 木料类废弃物热解

废弃木料是我国城市生活垃圾中的又一主要有机组分, 约占城市生活垃圾总质量的6%~12%。温俊明等<sup>[20]</sup>在木屑热重实验中发现, 木屑的两个失重段分别是130~570 °C、370~730 °C, 失重率分别为90%、10%。Ni等<sup>[24]</sup>进行了废木料流化床热解实验, 发现500 °C时废木料热解油达到热解产物的38%, 600 °C时热解气热值达到17 500 kJ/m<sup>3</sup>, 时热解气产率达到0.26 m<sup>3</sup>/kg。戴先文等<sup>[25]</sup>在木粉循环流化床实验中发现, 热解温度、停留时间对热解气的成分和热解油的产量及组分都有重要的影响, 中高温慢速热解会降低热解油的产量, 提高热解气产量, 低温快速热解会导致严重的炭化, 同样降低油产率, 500 °C左右、停留时间为0.8 s时热解油产率最高达到63%, 热解气产率达到16%。Demirbas<sup>[26]</sup>进行了山毛榉木料的变加热热解实验, 实验过程中60~90 s阶段平均加热速率高于6 °C/s, 170~350 s阶段平均加热速率开始降低, 450~600 s阶段温度基本恒定, 实验发现, 热解油在90~170 s阶段开始大量生成, 此时温度在400~600 °C。

在木料热解机理研究方面, Park等<sup>[27]</sup>认为木料热解过程首先是木料分解为焦油、气体、中间固体产物的并行吸热反应, 接着是中间固体产物分解为焦炭, 以及焦油分解为焦炭和气体的放热反应。Luo等<sup>[28]</sup>建立了用于预测流化床反应器中木料快速热解的动力学模型, 认为温度是最重要的影响因素, 粒径尺寸、进料速率也对木料快速热解过程具有一定影响, 500 °C或更低温度、小于500 μm木料颗粒比较符合快速热解的要求, 能保证木料的热解同时抑制热解油的二次裂解。

### 3.4 多组分城市生活垃圾热解

王艳等<sup>[29]</sup>利用外热式固定床进行了9种典型生活垃圾混合物的热解实验, 随着热解温度的提高, 热解时间缩短, 在300~350 °C缩短幅度最大; 热解气总产率、最大瞬时产率均增加, 热解气瞬时产率均在热解开始后10~20 min内达到最大值; 热解气中H<sub>2</sub>含量随着热解温度升高而增加, CO<sub>2</sub>含量随热解温度升高而降低, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>含量在600 °C最高, CO含量在600 °C最低, CH<sub>4</sub>含量在650 °C最高; 热解气热值在600 °C时达到最大值。江建方等<sup>[26]</sup>也进行了类似的实验研究, 取得了基本一致的研究结果。Luo等<sup>[30]</sup>利用固定床研

究了颗粒尺寸对RDF(垃圾衍生燃料)热解气化过程的影响, 较小的RDF颗粒可以产生更多的可燃气, 减少焦油和焦炭的生成, 可燃气中H<sub>2</sub>、CO成分更高, 但随着温度的提高, 这种效应弱化。Buah等<sup>[31]</sup>在RDF热重实验中发现, RDF存在240~380 °C、410~500 °C两个失重阶段, 分别对应RDF中纤维素成分和塑料成分的失重过程; 固定床热解实验发现, 随着热解温度的提高, 热解油和热解气产量增加, 焦炭产量降低; 焦炭的比表面积增加, 焦炭中灰分和固定碳比例升高, 热解油中芳香族组分增加, 脂肪族组分降低; RDF颗粒尺寸也对焦炭表面积、湿度、灰分和挥发分含量有重要影响。He等<sup>[32]</sup>研究了煅烧白云石在城市固态废弃物(MSW)热解过程中的催化效果, 发现煅烧白云石在提高MSW热解气产量、降低焦油和焦炭产量方面具有良好的催化效果; 900 °C、无催化条件下, 热解气中CO、H<sub>2</sub>总含量仅为36.69%; 900 °C、催化剂作用下, CO、H<sub>2</sub>总含量增加到66.30%。

## 4 气化实验研究进展

### 4.1 含氧气化实验

含氧气化主要是指城市生活垃圾与空气、富氧气体的气化反应。含氧气化的热量来自原料自身燃烧放热, 因此, 氧气当量比(过量空气系数)和气化温度是比较重要的参数, 可影响气化气的产量、成分及热值。空气气化得到的可燃气因含有大量氮气, 热值较低, 富氧气化得到的可燃气热值较高, 但成本较高。李延吉等<sup>[33]</sup>的城市生活垃圾富氧气化实验表明, 气化气中CO、CO<sub>2</sub>的含量较高, CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>的含量较低; 随气化温度的提高, 气化气中CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>含量逐渐增加, 而CO<sub>2</sub>含量逐渐减少; 随氧气流量的增加, CO含量有所增加, H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>略有下降, 而CO<sub>2</sub>含量开始逐渐降低, 后又升高。肖刚等<sup>[23]</sup>的废纸空气气化实验表明, 最佳气化工况为600~700 °C、过量空气系数为0.4~0.6, 此时, 气化气热值为2500 kJ/m<sup>3</sup>左右, 产率为1.5~2.3 m<sup>3</sup>/kg, 气化效率为30%左右, 固定碳转化率为80%左右。Ni等<sup>[24]</sup>的废木料流化床实验表明, 最佳空气气化工况为600 °C、过量空气系数为0.4, 气化效率达到73%, 气化气热值为5800 kJ/m<sup>3</sup>, 气化气产率为2.01 m<sup>3</sup>/kg。蒋剑春等<sup>[34]</sup>的原生态城市生

活垃圾流态化气化炉空气气化实验同样表明, 气化温度对 CO、CO<sub>2</sub> 的含量影响不大, 对 CH<sub>4</sub> 和 C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> 的影响较大。朱颖等<sup>[35]</sup>的 PP 气化实验表明, CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 均能促进 PP 的碳转化率, 气化气热值在 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 比例为 7:2:1:1 下达到最大值 12.8 MJ/m<sup>3</sup>。

#### 4.2 水蒸气气化实验

城市生活垃圾水蒸气气化得到的可燃气中因含有大量氢气, 引起了研究人员的广泛兴趣, 但需要其它设备提供热量维持气化反应的进行。He 等<sup>[36-37]</sup>蒸汽催化气化制取富氢燃气的实验表明, S/M (水蒸气与城市生活垃圾质量之比) 对气化气组分分布有重要影响, 随着 S/M 的增加, H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 含量增加, CO、CH<sub>4</sub> 含量急剧减小, 提高气化温度可以增加气化气组分中的 H<sub>2</sub>、CO。曲金星等<sup>[38]</sup>发现水蒸气对城市生活垃圾热解气化过程中失重情况影响十分微弱, 而对气化气重整和二次裂解影响比较明显。朱颖等<sup>[35]</sup>的气化实验表明, H<sub>2</sub>O 气氛有利于 H<sub>2</sub> 的生成和产气量的提高, 但对大分子烃类的二次裂解具有一定的抑制作用。焦永刚等<sup>[39]</sup>通过向热解炉内喷入雾状水而强化水煤气反应, 增加了热解气产量并提高热解气中 H<sub>2</sub>、CO 的含量, 700 °C 时热解气产量由无喷水条件下的 187 L/kg 增加到喷水条件下的 215 L/kg。Gao 等<sup>[40]</sup>采用多孔陶瓷介质作为裂解反应器, 配合上吸式蒸汽热解气化炉制取富氢燃气, 燃气中 H<sub>2</sub> 的含量达到 50% 以上。Guan 等<sup>[41]</sup>介绍了 MSW 首先在气化炉中气化, 燃气以及焦油在催化反应炉中再次催化裂解的蒸汽催化工艺, 最终可得到的几乎不含焦油的富氢燃气, 燃气中 H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 含量分别达到 50.8%、9.32%、13.3%。

### 5 城市生活垃圾热解气化技术中试及应用

目前国际上实现应用的垃圾热解气化技术主要是通过热解气化焚烧炉产生高温蒸汽发电, 例如日本的藤泽市城市垃圾发电厂、界市垃圾焚烧发电厂、东京墨田垃圾发电厂, 其采用的热解气化焚烧炉单台处理量分别为 130 t/d、230 t/d、600 t/d。这些热解气化焚烧炉的共同特点是具有两个燃烧室: 在第一燃烧室 (也可称为热解气化室) 为缺氧气氛, 温度控制在 600~800 °C, 实现垃圾的热解气化, 生成热解气化气, 然后进入二燃室; 二燃室氧气供

给充足, 温度可达到 1000 °C 左右, 产生高温烟气用于加热蒸汽实现发电。Baggio 等<sup>[42]</sup>介绍了位于威尼斯的城市生活垃圾发电厂能量利用及污染物排放情况。此系统包括燃气轮机和蒸汽轮机, 燃气轮机排出的废气在锅炉中再次燃烧产生蒸汽, 推动蒸汽轮机发电。整个系统的热效率为 28%~30%, SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、粉尘的排放量非常轻微, 而 CO 的排放量要多于常规火电厂。Choy 等<sup>[43]</sup>介绍了处理量为 10 t/d 的城市生活垃圾气化热电联产项目, 项目运行情况表明, MSW 热能回收率为 23.4%, 60% 热量用于供热时投资回收率为 14.8%, 75% 的热量用于供热时, 投资回收率达到 36.1%。

我国目前的垃圾热解气化项目多处于中试阶段, 其技术特点总结于表 1<sup>[8, 44-46]</sup>, 具有自主知识产权, 并投入运行的垃圾热解气化焚烧发电厂位于东莞厚街镇, 其主要技术参数如表 2 所示<sup>[47]</sup>。

表 1 国内城市生活垃圾热解气化中试项目

出处	运行温度/°C	热解气热值/kJ·m <sup>-3</sup>	技术特点
熊祖鸿等 <sup>[8]</sup>	750~900	4600	焦油含量很低, 不超过 2.0 g/m <sup>3</sup>
李新禹等 <sup>[44]</sup>	700	7546.4	内热源与外热源联合拱热
包向军等 <sup>[45]</sup>	900~1000	16000~18000	多室蓄热式燃烧供热
肖波等 <sup>[46]</sup>	850~950	12598	燃烧生物质粉体加热炉体, 气化剂为水蒸气

表 2 东莞厚街垃圾热解气化焚烧发电厂主要技术参数<sup>[47]</sup>

项目	技术参数
焚烧炉处理能力	4×150 t/d
焚烧炉型式	前置回转炉排炉
回转炉床	φ3.32 mm×15 m
窄炉排余热锅炉	2.5 MPa, 350 °C, 蒸发量 28 t/h, 带 1 m×6 m 窄式移动炉排和二燃室
汽轮发电机组	2.35 MPa, 340 °C, 5×3000 kW
发电功率	12000~15000 kW
上网电压	10.5 kV
烟气处理	炉内 850 °C 以上, 停留时间大于 2 s, 半干法净化+布袋除尘
废水处理	渗沥水回喷炉内焚烧
灰渣处理	炉渣热灼减率≤5%, 填埋、制砖综合利用, 飞灰水泥固化处理

深圳垃圾热气化焚烧发电厂的 3 台热解气化焚烧炉为加拿大 CAO 技术, 单台处理量为 100 t/d。佛山南海市的垃圾热解气化焚烧发电厂拥有两台美国 Basic 抛式炉排热解气化焚烧炉, 单台处理量为 200 t/d。

## 6 结 语

城市生活垃圾热解气化实验研究热点在于优化控制参数, 提高反应速率, 促进目标产物高值化, 抑制其它产物及污染物的生成。主要有以下因素影响城市生活垃圾热解气化反应的进行: ①城市生活垃圾中含有塑料、废纸、木料等组分的比例是决定热解气化产物产量、产物分布以及反应速率的本质因素; ②对于任何物料, 温度是热解气化反应的重要因素, 通常提高热解气化温度, 会促进热解气化反应的进行, 增加气态产物的产量, 同时提高气态产物中小分子物质的含量, 减少液态产物及残渣的产量; ③RO (氧气当量比) 和 S/M 分别是氧气气化和水蒸气气化反应的另一重要因素, 通过调节 RO 或 S/M, 可以控制氧气气化或水蒸气气化反应的进行。

目前, 城市生活垃圾热解气化实验研究对热解气化过程中污染物的迁移问题研究相对较少, 热解气化机理研究相对滞后。而对污染物的有效防控是保证城市生活垃圾热解气化技术能够大规模推广应用的必要条件, 通过热解气化机理的探究可以明确高值化产物以及污染物的形成。另一方面, 我国在垃圾热解气化技术推广方面明显落后于发达国家, 目前投入运行的垃圾热解气化焚烧发电厂多是引进国外技术。因此, 需要大力开展城市生活垃圾热解气化机理及过程污染物防治方面的研究, 同时做好自有技术的推广应用工作。

## 参 考 文 献

- [1] 聂永丰. 三废处理工程技术手册 (固体废物卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [2] 方磊. 我国城市生活垃圾现状与对策 [N]. 科技日报, 北京: 1999-12-21.
- [3] Hjelmer O. Disposals strategies for municipal solid waste incineration residues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 47: 345-368.
- [4] Maken S, Hyun J, Park J W, et al. Vitrification of MSWI fly ash using Brown's gas and fate of heavy metals [J]. *Sci. Ind. Res. (India)*, 2005, 64: 198-204.
- [5] 闻望, 王宝生, 修同斌, 等. 城市垃圾气化处理法探索 [J]. 环境科学, 1988, 9 (2): 47-51.
- [6] 肖睿, 金保升, 仲兆平, 等. 基于低温气化和高温熔融焚烧方法处理城市生活垃圾 [J]. *能源研究与利用*, 2001 (3): 28-30.
- [7] Wu Z S, Wu C Z, Huang H T. Test results and operation performance analysis of 1MW biomass gasification electric power generation system [J]. *Energy & Fuels*, 2003, 17: 6192624.
- [8] 熊祖鸿, 李海滨, 吴创之, 等. 下吸式气化炉处理城市生活垃圾 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6 (8): 75-78.
- [9] Santoleri J J. In: Martin J P, Cheng S C, Susavidge M A. Symposium of Proceedings of the twenty-second Mid-Atlantic Industrial Waste Conference [M]. Lancaster, Pennsylvania, Technomic Publishing Company Inc., 1990: 743-758.
- [10] Kersten Sascha R A, Prins Wolter, van der Drift Bram, et al. Principles of a novel multistage circulating fluidized bed reactor for biomass gasification [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58: 725-731
- [11] 左禹, 丁艳军, 朱琳, 等. 小型固定床实验台条件下的聚乙烯热解 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45 (11): 1544-1548.
- [12] 张研, 汪亮, 孙得川, 等. 低密度聚乙烯的热解试验研究 [J]. *固体火箭技术*, 2006, 29 (6): 443-445.
- [13] Chowlu Aie Cheng King, Reddy P Karthik, Ghoshal A K. Pyrolytic decomposition and model-free kinetics analysis of mixture of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) [J]. *Thermochimica Acta*, 2009, 485: 20-25.
- [14] Ciliz Nilgun Kiran, Ekinci Ekrem, Snape Colin E. Pyrolysis of virgin and waste polypropylene and its mixtures with waste polyethylene and polystyrene [J]. *Waste Management*, 2004, 24 (2): 173-181.
- [15] Aguado J, Serrano D P, Vicente G, et al. Enhanced production of olefins by thermal degradation of high-density polyethylene (HDPE) in decalin solvent: Effect of the reaction time and temperature [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, 46: 3497-3504.
- [16] Bhaskar Thallada, Kaneko Jun, Muto Akinori, et al. Pyrolysis studies of PP/PE/PS/PVC/HIPS-Br plastics mixed with PET and dehalogenation (Br, Cl) of the liquid products [J]. *Anal. Appl. Pyrolysis*, 2004, 72 : 27-33.
- [17] 王志, 李爱民, 巴德纯, 等. 垃圾热解中 PVC 组分 HCl 的析出特性 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2002, 23 (7): 711-714.
- [18] Brebu Mihai, Bhaskar Thallad, Murai Kazuya, et al. Removal of nitrogen, bromine, and chlorine from PP/PE/PS/PVC/ABS-Br pyrolysis liquid products using Fe- and Ca-based catalysts [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 87: 225-230.
- [19] Bhaskar T, Matsui T, Nitta K, et al. Laboratory evaluation of calcium-, iron-, and potassium-based carbon composite sorbents for capture of hydrogen chloride gas [J]. *Energy Fuel*, 2002, 16: 1533-1539.
- [20] 温俊明, 池涌, 罗春鹏, 等. 城市生活垃圾典型有机组分混合热解特性的研究 [J]. *燃料化学学报*, 2004, 32 (5): 563-568.
- [21] Wu Chao-Hsiung, Chang Ching-Yuan, Tseng Chao-Heng. Pyrolysis products of uncoated printing and writing paper of MSW [J]. *Fuel*, 2002, 81: 719-725.
- [22] Wu Chao-Hsiung, Chang Ching-Yuan, Tseng Chao-Heng, et al.

- Pyrolysis product distribution of waste newspaper in MSW [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 67: 41-53.
- [23] 肖刚, 池涌, 倪明江, 等. 纸类废弃物流化床热解气化研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28 (1): 161-164.
- [24] Ni Mingjiang, Xiao Gang, Chi Yong, et al. Study on pyrolysis and gasification of wood in MSW [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18 (2): 407-415.
- [25] 戴先文, 吴创之, 周肇秋, 等. 循环流化床反应器固体生物质的热解液化[J]. *太阳能学报*, 2001, 22 (2): 124-130.
- [26] Demirbas Ayhan. Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions [J]. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2005, 73: 39-43.
- [27] Park Won Chan, Atreya Arvind, Baum Howard R. Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157: 481-494.
- [28] Luo Zhongyang, Wang Shurong, Cen Kefa. A model of wood flash pyrolysis in fluidized bed reactor [J]. *Renewable Energy*, 2005, 30: 377-392.
- [29] 王艳, 张书廷, 张于峰, 等. 城市生活垃圾低温热解产气特性的实验研究 [J]. *燃料化学学报*, 2005, 33 (1): 62-67.
- [30] Luo Siyi, Xiao Bo, Hu Zhiqian, et al. Influence of particle size on pyrolysis and gasification performance of municipal solid waste in a fixed bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 6517-6520.
- [31] Buah W K, Cunliffe A M, Williams P T. Characterization of products from the pyrolysis of municipal solid waste [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85 (B5): 450-457.
- [32] He Maoyun, Xiao Bo, Liu Shiming, et al. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalysts [J]. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2010, 87: 181-187.
- [33] 李延吉, 李爱民, 李润东, 等. 固体废物富氧气化产气特性与灰色关联分析[J]. *太阳能学报*, 2005, 26 (4): 543-548.
- [34] 蒋剑春, 戴伟娣, 应浩, 等. 城市垃圾气化试验研究初探[J]. *可再生能源*, 2003 (2): 14-17.
- [35] 朱颖, 金保升, 肖刚, 等. 不同气氛下聚乙烯低温热解气化特性分析[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2007, 37 (5): 808-811.
- [36] He Maoyun, Xiao Bo, Liu Shiming, et al. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of steam to MSW ratios and weight hourly space velocity on gas production and composition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 2174-2183.
- [37] He Maoyun, Hu Zhiqian, Xiao Bo, et al. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 195-203.
- [38] 曲金星, 池涌, 郑皎, 等. 水分对城市生活垃圾热解气化特性影响的试验研究[J]. *电站系统工程*, 2007, 23 (5): 23-26.
- [39] 焦永刚, 尤占平, 王兰. 塑料垃圾的热解气化实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32 (7): 113-115.
- [40] Gao Ningbo, Li Aimin, Quan Cui. A novel reforming method for hydrogen production from biomass steam gasification[J]. *Bioresource Technology Journal*, 2009, 100: 4271-4277.
- [41] Guan Yanwen, Luo Siyi, Liu Shiming, et al. Steam catalytic gasification of municipal solid waste for producing tar-free fuel gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 9341-9346.
- [42] Paolo Baggio, Marco Baratieri, Andrea Gasparella, et al. Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 136-144.
- [43] Choy Keith K H, Porter John F, Hui Chi Wai, et al. Process design and feasibility study for small scale MSW gasification [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, 105: 31-41.
- [44] 李新禹, 张于峰, 牛宝联, 等. 城市固体垃圾热解设备与特性研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35 (12): 99-102.
- [45] 包向军, 蔡九菊, 罗光前, 等. 新型蓄热式城市垃圾热解技术[J]. *冶金能源*, 2003, 22 (3): 44-48.
- [46] 肖波, 汪莹莹, 苏琼. 垃圾气化处理新技术研究[J]. *中国资源综合利用*, 2006, 24 (10): 18-20.
- [47] <http://www.dbhred.com.cn/CX/BH6.htm>.

(上接第 416 页)

## 参 考 文 献

- [1] Turac E, Sahmetlioglu E. Oxidative polymerization of 4-[(4-phenylazophenylimino)-methyl]-phenol catalyzed by horseradish peroxidase [J]. *Synthetic Metals*, 2010, 160(5): 169-172.
- [2] Allen B L, Kotchey G P, Chen Y, et al. Mechanistic investigations of horseradish peroxidase-catalyzed degradation of single-walled carbon nanotubes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131 (47): 17194-17205.
- [3] Bilici A, Kaya I, Yildirim M, et al. Enzymatic polymerization of hydroxy-functionalized carbazole monomer [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2000, 64 (8): 89-95.
- [4] Sgalla S, Giancarlo F, Sandro C, et al. Horseradish peroxidase in ionic liquids. Reactions with water insoluble phenolic substrates [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2007, 44 (3-4): 144-148.
- [5] 刘均洪, 杨奉科, 邱龙辉, 等. 过氧化物酶催化聚合木素-酚树脂研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2001, 17 (2): 173-175.
- [6] 蔡智奇, 孙建中, 周其云, 等. 辣根过氧化物酶酶促体系引发丙烯酰胺聚合的研究[J]. *功能高分子学报*, 2004, 17 (1): 81-86.
- [7] Chul H L, Young J Y. Synthesis of ortho-directed polyaniline using horseradish peroxidase [J]. *Process Biochemistry*, 2000, 36: 233-241.
- [8] 靳丽强, 于婧, 张净. Poly (MAA-AN-DM) 两性聚合物复鞣剂的制备及性能[J]. *精细化工*, 2008, 25 (4): 380-383.
- [9] 刘岗, 吕生华, 马艳芬. HRP 催化淀粉与丙烯酰胺接枝共聚物的制备及性能研究[J]. *中国皮革*, 2010, 39 (5): 17-19.
- [10] 张华. 现代有机波谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 288-292.