

生活垃圾热解气化炉结构与污染物控制研究

任超峰^{1*}, 金金曼², 徐前蒙², 何苗苗², 黄卓慧²

(1. 温州一霖再生资源有限公司, 浙江 温州 325000; 2. 浙江中环检测科技股份有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 随着污染物排放要求的日益严格, 焚烧成本进一步提高, 热解气化技术以其投资小、运行成本低、污染物排放少的特点, 成为焚烧的有效补充并受到了广泛关注。主要通过介绍热解炉的结构特点、技术原理、生成物特性来研究生活垃圾热解炉的技术优势, 并通过分析生活垃圾热解炉产物的生成环境及生成量来研究生活垃圾热解工艺污染物的排放情况。

关键词: 生活垃圾; 热解气化; 可燃气; 污染物排放

中图分类号: X705; X933.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0030-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2024010030

Study on Structure and Pollutant Control of MSW Pyrolysis Gasifier / REN Chaofeng^{1*}, JIN Jinman², XU Qianmeng², HE Miaomiao², HUANG Zhuohui² / (1. Wenzhou Yilin renewable Resource Co Ltd, Wenzhou 325000, China; 2. Zhe Jiang Zhong Huan Detection Co Ltd, Wenzhou 325000, China)

Abstract: With the increasingly strict requirements of pollutant emission, the cost of MSW incineration has further increased. Pyrolytic gasification process has become an effective supplement to incineration and has received extensive attention due to its low investment cost, low operating cost and low pollutant emission. This paper mainly introduces the structure characteristics, technology principle and product characteristics of pyrolysis gasifier to study the technical advantages of domestic waste pyrolysis furnace. The emission of pollutants from MSW pyrolysis furnace is studied by analyzing the generation environment and production amount of MSW pyrolysis furnace products.

Key words: municipal solid waste; pyrolysis gasification; combustible gas; pollutant emission

2020年我国生活垃圾清运量达到2.35亿t, 无害化处理量为2.345亿t, 无害化处理率为99.7%, 因此生活垃圾基本上可实现无害化处置。目前垃圾无害化处置主要分为焚烧、填埋。2020年我国生活垃圾填埋量为33.8万t·d⁻¹, 焚烧处理能力为56.8万t·d⁻¹。2020年我国现存填埋场644座, 相较于2019年减少了8座, 并呈逐年递减趋势, 2020年我国现存运行焚烧厂463座, 相较于2019年增加了74座, 并呈逐年递增趋势^[1]。2016年~2020年生活垃圾焚烧和填埋的变化趋势如图1所示。

焚烧锅炉主要包含机械炉排炉、循环流化床锅炉、热解气化炉等, 机械炉排炉主要焚烧原生垃圾, 垃圾中不可燃烧物较多, 使炉排炉燃烧不彻底。流化床锅炉和热解炉由于对燃烧物的品质要求高(如热值高、灰分低、粒径小等), 原生垃圾成分复杂不

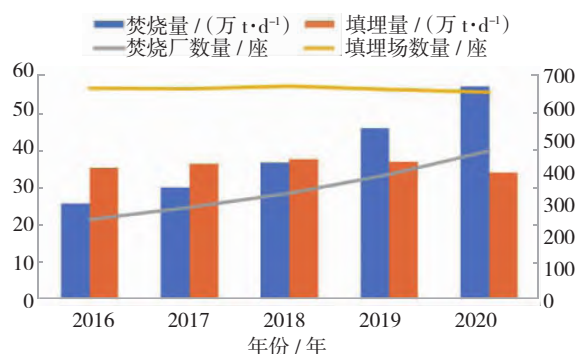


图1 2016年~2020年生活垃圾焚烧和填埋的变化趋势

利于炉子的持续稳定运行, 在现阶段环保要求十分严格的情况下, 流化床和热解炉技术的推广也遇到了新的挑战, 最根本的因素是我国生活垃圾具有混合收集、水分高和热值低等特点。而热解气化可以将城市生活垃圾转化为可燃气体加以利用, 可有效

收稿日期: 2022-06-24 修回日期: 2023-08-04

项目来源: 国家重点研发计划资助(2018YFD1100600)

作者简介: 任超峰(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事固废无害化处理等方面的工作, E-mail: 916210633@qq.com

通信作者: 任超峰, E-mail: 916210633@qq.com

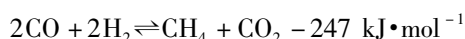
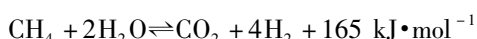
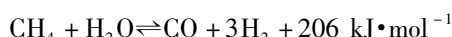
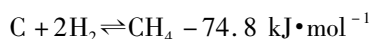
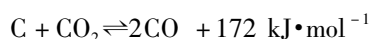
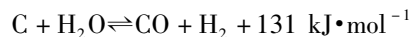
提高有机废物的能源利用效率,降低运行成本;从降低污染物排放角度来看,热解气化过程主要发生的是还原反应,是在缺氧条件下进行的,从源头上避免了二噁英的产生,由此可见,热解气化技术的应用和推广是对现有焚烧技术的重要补充,同时也是实现城市生活垃圾无害化、资源化、减量化利用的又一重要途径^[2-3]。

1 热解技术原理

在热解炉内,物料经历了干燥、热解气化、高温氧化3个过程,具体反应如下^[4-8]:

(1) 干燥阶段: 常温 ~ 200 °C, 湿物料加入气化炉后, 由于物料与热气流之间的热交换, 燃料中的水分得以蒸发。

(2) 热解气化阶段: 200 °C ~ 650 °C, 物料在缺氧的状态下发生热解反应, 主要产生 CH₄、CO、H₂、NH₃、其他碳氢化合物等可燃气体, 同时产生有机酸、芳香烃、焦油等。气化阶段的反应主要包括:



在整个热解气化过程中, 各反应阶段相互依存, 没有明显的分界线。

(3) 高温氧化阶段: 650 °C ~ 900 °C, 该阶段温度较高, 物料热解殆尽, 形成炉渣和其他熔融物排出。

2 热解反应器

热解反应器是垃圾热解气化系统中的主要设备, 热解反应器按照设备运行方式可分为固定床、流化床、旋转床等。

固定床反应器的优点是结构简单、制造成本低、操作方便, 其缺点是炉内容易架空、处理量小。

流化床反应器具有热效率高、处理量大等优点, 循环流化床悬浮的固体颗粒经旋风分离器分离后返回至流化床炉内继续焚烧, 其热灼减率较高。

旋转床反应器具有气化效率高、布料均匀等特点, 同时避免了炉膛内垃圾内部搭桥、架空的问题, 在旋转状态下也减少了炉膛内结焦的频率。

本文主要介绍旋转床热解气化炉, 以温州市某

生活垃圾热解处理厂为例。

3 热解技术工艺

3.1 热解燃料要求

不同性质的物料的热解反应时间不同, 热解性也不同。有机物含量高的, 热值也高、可热解性较好, 形成的炉渣较少。物料成分不同, 其热解效果也不同, 塑料热解的放热效应最好, 热解速度较快, 放出的热量对后续反应的组分的热解过程也有一定的促进作用。

物料的粒径也影响着热解效果, 物料粒度小的物料, 其热解产气速度明显高于粒度大的物料, 小颗粒的物料能优化热解炉内传热条件, 提升炉膛温度, 减少各区域温度差, 使产气量增加^[9-11]。

温州市某生活垃圾热解处理厂热解的燃料为生活垃圾固体回收燃料, 主要采用“MBT”技术, MBT全称为“Mechanical Biodrying Treatment”, 即机械生物处置。“MBT”技术主要实现垃圾的破碎、干化、和分类。工艺流程图如图2所示。原生垃圾经过MBT技术处置后, 可有效去除垃圾中的不可燃成分。分类出的可燃物成分经一级或多级破碎可达到物料粒径均匀, 原生生活垃圾经生物干化或物理干化可有效将垃圾含水率降低至30%以下。垃圾热值高, 入料稳定, 可有效促进垃圾热解过程的发生, 使热解处理量增大、能源利用率提高、可燃气热值更稳定。热解燃料参数如表1所示。

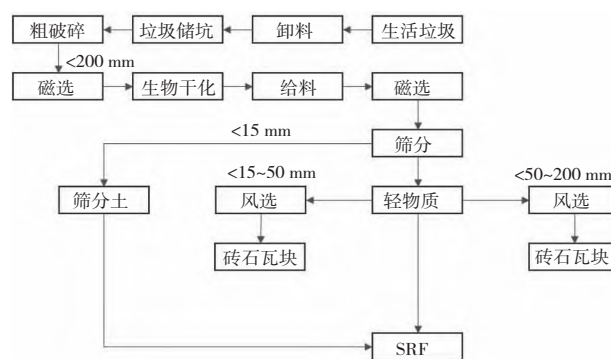


图2 固体回收燃料工艺流程图

表1 热解燃料参数

燃料名称	粒径	含水率/%	热值/(kJ·kg ⁻¹)
SRF	≤200	30	8313

3.2 热解炉

热解气化技术是有机物在缺氧条件下, 吸收热量使化合物的化合键断裂, 由大分子有机物转化成

小分子可燃气体和残渣的过程。该技术可以有效实现垃圾减量化,有效避免二噁英的生产,具有能源利用率高、投资少、运行成本低等优点。热解炉结构图如图3所示。

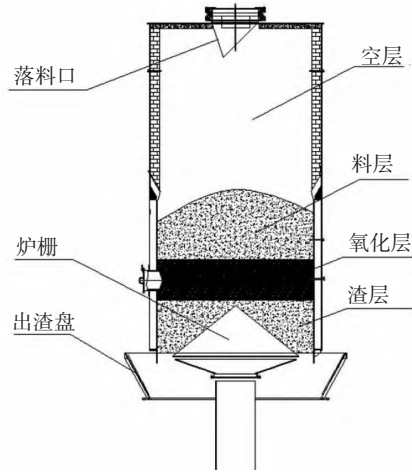


图3 热解炉结构图

落料口: 热解炉的落料口一般设在炉顶,通过垂直落料或者旋转落料的方式,使燃料进入炉内,落料的方式决定着热解炉处理的均匀性。落料方式一般包括垂直落料和旋转落料。垂直落料的优点是垃圾直接落入炉膛中部,加料简单方便,缺点是炉膛周围垃圾层较薄,容易烧穿,导致炉膛波动大,热解效果较差。旋转落料方式优点是使垃圾能均匀分散到炉膛各部分,炉膛波动较小,热解效果更好,缺点是操作麻烦,设备需要做好密封和降温。

空层: 空层的高度是衡量热解炉气化的一个重要指标,空层高度较低,说明垃圾投入太多,炉底压实,氧化层温度降低,不利于热解气化。空气高度较低,说明料层不够需要加料,低到一定位置后,可能造成料层完全烧透,变成氧化层,热解炉将不再产气。空层的高度一般确保在4.0~4.5m左右。

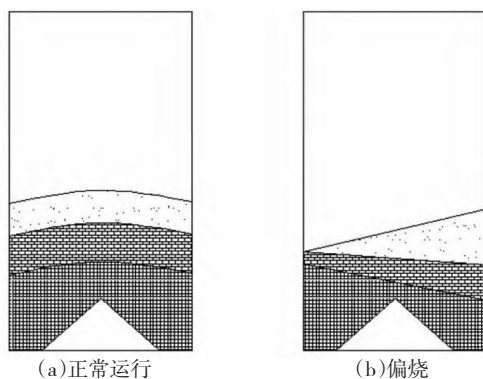


图4 正常运行和偏烧对比图

料层: 一般料层为控制在500mm左右,尽量做到均匀平铺,料层的均匀能促进氧化层和渣层的均匀,确保稳定产气。料层不均匀则会出现偏烧现象。正常炉况和偏烧炉况对比如图4所示。

热解炉正常运行时,炉内各物料的分布情况如图4(a)所示。偏烧现象,如图4(b)所示,若炉内偏烧不严重时,裂解炉还可以正常产气,则可按照正常运行状况对待,只要加强运行管理,使物料重新均匀分布即可。而裂解炉出现严重偏烧时,炉内一部分燃料呈现热运行状况,另一部分燃料呈现冷运行状况,使炉况更为复杂,热解气化过程被打断,恢复炉况时也更为困难。

氧化层: 氧化层是热解炉高温区域,温度可达到900℃,垃圾中有机物气化后的残余物在该区域内高温氧化,氧化层的厚度一般控制在300~500mm左右。

渣层: 渣层是热解炉最底层区域,垃圾中的残余物经高温氧化后形成炉渣,炉渣储存在该区域,定时外排。渣层厚度约为200~300mm,该厚度指的是炉栅顶部以上的炉渣厚度。

炉栅: 炉栅是热解炉的机械通风装置,多层炉栅片排列成锥形,风孔遍布炉栅每层。空气从风孔中流入,提供垃圾热解所需要的氧气。

出渣盘: 出渣盘是旋转出渣的装置,由液压缸提供旋转动力,出渣盘中布置倾斜灰刀,在旋转过程中将底层的炉渣铲出来,起到自动出渣的效果。

3.3 热解产物研究

热解炉的产物主要包括热解气、炉渣、焦油。现以温州市某生活垃圾热解处理厂为例,研究热解炉产物的性质。热解炉参数如表2所示:

表2 热解炉参数

处理量 (t·h ⁻¹)	过量空气系数	产气率 (Nm ³ ·kg ⁻¹)	燃气热值 (kJ·kg ⁻¹)
2.1	0.2~0.3	1.2~1.5	4600~5440

3.3.1 热解气成分与热值

热解气是在200℃~650℃温度区间产生的,主要包含CO、CH₄、H₂、CO₂等。烟气从测试点引出后,用滤筒过滤掉烟气中的杂质。过滤后的烟气通过树脂吸附仓,吸附烟气中的有机物。最后气体被收集到气袋中保存,共收集3L烟气。对气体样品直接采用气相色谱仪(GC)进行分析。

热值的检测方法是根据现场使用的SR-S2000

系列的热值分析仪实时测量结果,其原理是基于不同气体具有不同的热导率以及混合气体热导率随其

被测成分含量变化而变化的这一物理特性。热解气的成分如表 3 所示。

表 3 热解气成分

项目	H ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
成分/%	8.16	61.86	2.82	12.39	12.50	1.58	0.20	0.49
热值/(kJ·kg ⁻¹)	12.74	0	39.82	12.64	0	63.40	70.30	93.61
计算热值/(kJ·kg ⁻¹)	5330			测量热值/(kJ·kg ⁻¹)		5433		

由表 3 可知,热解气中的可燃成分主要以 H₂、CH₄、CO 等小分子气体为主,其中可燃气体的成分约占 25.64%,本文分别按照比例计算和热值测量仪两种方法测量热值,利用各组分比例计算的热值为 5330 kJ·kg⁻¹,利用 SR-S2000 系列的热值分析仪实时测量可燃气体热值为 5433 kJ·kg⁻¹。两者相差 103 kJ·kg⁻¹,说明热值测量相对较为准确。该热值的可燃气接通沼气燃烧器后可以直接燃烧。燃气燃烧图如图 5 所示。



图 5 燃气燃烧

3.3.2 热解焦油成分与热值

焦油是热解炉产生的副产物,是一种热值较高的有机物,呈黑色粘稠状半固态,其灰分较少、热值

较高。本文对热解炉产生的焦油进行检测分析,主要检测其成分和热值,检测结果如表 4 所示:

表 4 焦油成分分析

工业分析 / %				元素分析 / %				热值	
Mar	Aar	Var	FCar	Car	Har	Nar	Sar	Oar	(kJ·kg ⁻¹)
24.91	0.88	69.19	5.11	56.24	7.60	0.58	0.76	19.73	25335.20

如表 4 所示,而焦油热值为 25335.2 kJ·kg⁻¹,热值接近煤的热值,比较适合作燃料棒或焚烧处理。焦油中灰分的含量仅有 0.88%,因此焦油在燃烧过程后的残留物较少,燃烧较为充分,避免的飞灰的产生,同时降低了二噁英的形成。

化后的垃圾(热值为 8313 kJ·kg⁻¹),与焦油混合后做造粒实验。分别称量 72 kg 垃圾、8 kg 焦油和 40 kg 垃圾、10 kg 焦油进行人工掺混、混合均匀,焦油含量分别为 10% 和 20%,用于制造燃料棒,燃料棒的实物图如图 6 所示,燃料棒的成分如表 5 所示。

为测试焦油的价值,特选择现场的部分分选、干

表 5 10% 和 20% 焦油含量的燃料棒成分分析

样品	工业分析 / %				元素分析 / %				热值	
	Mar	Aar	Var	FCar	Car	Har	Nar	Sar	Oar	(kJ·kg ⁻¹)
10%	4.52	36.71	49.97	8.80	33.75	3.92	1.06	0.31	19.73	13053
20%	3.33	32.43	53.28	10.96	40.07	4.65	0.94	0.56	18.02	15004

由表 5 可知,随着焦油含量的增加,燃料棒更黑、更具有粘性,燃料棒的质地更软、更容易粉碎。由表 3 可知,10% 的焦油热值为 13053.34 kJ·kg⁻¹,20% 的焦油热值为 15004.71 kJ·kg⁻¹,可见焦油含量越高,热值越高。同时与垃圾混合后,整体的灰分

增加,由焦油 0.88% 的灰分到燃料棒 30% 以上的灰分。燃料棒的形状如图 6 所示。图中左边颜色较浅的燃料棒含 10% 的焦油,灰分含量为 36.71%; 右边颜色较深的燃料棒含 20% 的焦油,灰分含量为 32.43%。



图6 燃料棒

3.3.3 炉渣的产生

炉渣是热解燃尽的产物,垃圾中的有机物被热解气化,剩余的残渣则进一步的碳化,并在高温的环境中焖烧燃尽,形成炉渣后排出。热解炉中炉渣的含量约为入炉垃圾的10%~15%,与焚烧炉的情况基本相同^[12]。

热解物种类的不同,其产生的炉渣也不同,温州某垃圾热解项目热解对象为生活垃圾固体回收燃料,该燃料去除了大部分的腐殖土、无机物,燃料颗粒较小,燃料更为纯粹,较小的固体回收燃料颗粒可以减少焦炭的生成,同时导致炉渣量进一步的降低。

4 热解技术对二噁英的抑制作用

有C、H、O、Cl存在的合适的燃烧过程,都可能产生二噁英。焚烧炉系统是二噁英生成的重要来源,生成的二噁英可以存在于气相和固相中。高温气相产生(500℃~800℃,由氯酚、氯苯等前驱物反应生产二噁英)、低温异相产生(250℃~625℃,多环芳烃、氯酚等在铜、铁氯化物催化情况下产生)、低温从头生成(250℃~400℃,碳、氯、氧在铜、铁等氯化物催化情况下产生)。其中高温气相生成的二噁英占绝大多数。高温气相生产的条件主要是焚烧,即温度达到500℃~800℃,有充足的氧气供应的情况下,会大量的合成二噁英^[13-15]。

热解气是在200℃~650℃的缺氧环境下产生的还原性小分子气体,所需空气量较小,反应平缓,烟气流速较慢,避免了固态颗粒物质的流动,减少灰分的产生,热解炉气相区的温度为200℃~400℃,因此在低温和还原性氛围下,热解炉不具备二噁英产生的前提条件^[16]。

该项目二噁英原始排放浓度为0.0092 ngTEQ·Nm⁻³,即在不添加任何脱二噁英设备的前提下的测量结果,远低于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485—2014)关于二噁英排放限定值为0.1

ngTEQ·Nm⁻³的要求,也进一步佐证了本文的结论。

5 结论

生活垃圾热解气化技术具有投资规模小、运行成本低、污染物排放少等优势,主要适用于垃圾产生量为500 t·d⁻¹以下的县级城市或乡镇。影响生活垃圾热解气化速率的主要因素有以下几点: 1) 生活垃圾有机物含量。有机物含量越高,热值越高,热解气化的效果越好; 2) 生物垃圾的粒径。粒径越小,在热解炉中的分布越均匀,热解炉温度越均匀,温差越小,产气量越高; 3) 氧含量。氧气是热解气化的关键因素,一般热解炉过量空气系数在0.2~0.6,不同的炉型可选择不同的过量空气系数; 4) 温度。温度是促进热解气化反应的重要因素,提高热解炉内温度,会促使热解反应的加快进行,降低焦油及残渣的产生^[17]。

热解气化炉在降低污染物排放方面也有着很明显的优势: 1) 热解气化因为其低氧和低温反应,能有效降低NO_x的排放,同时由于热解反应比较缓慢,烟气量降低,减少了排烟热损失; 2) 热解气化过程的还原性气氛条件能够有效的抑制二噁英等有害污染物的生成与排放; 3) 热解气化的可燃气体是另一种储能形式,提供了其他的能源利用方式。因此,提升热解气化过程的转化效率,实现热解气化清洁高效利用尤其重要^[18]。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] 袁浩然, 鲁涛, 熊祖鸿, 等. 城市生活垃圾热解气化技术研究进展[J]. 化工进展, 2012(31) 2: 421-427.
- [3] 桂莉. 农村生活垃圾热解热解污染物排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [4] 刘康, 贾青竹, 王昶, 等. 生物质热解技术研究进展[J]. 化学工业与工程, 2008, 25(5): 459-464.
- [5] 赵颖, 刘建国, 岳东北, 等. 温度对生活垃圾可燃组分连续热解的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 53-57.
- [6] 张巍巍, 曾国勇, 傅海燕. 稻秆热解固体产物的性能. 华东理工大学学报[J]. 2007, 33(2): 219-222.
- [7] 温俊明, 池涌, 金余其. 垃圾热解实验研究及其神经网络预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 154-158.
- [8] 张强. 生活垃圾热解气化处理工艺开发与过程模拟分

- 析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] 李水清, 李爱民, 严建华, 等. 生物质废弃物在回转窑内热解研究-热解条件对热解产物分布的影响[J]. 太阳能学报, 2000, 21(4): 333-340.
- [10] 罗思义. 城镇生活垃圾破碎机的研制及粒径对垃圾热解气化特性的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [11] 朱胜. 垃圾粒径对城镇生活垃圾热解影响实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [12] 房科靖, 熊祖鸿, 鲁敏, 等. 分散式垃圾热解气化处理工程示范——乡村垃圾解决方案[J]. 新能源进展, 2021(9) 4: 288-293.
- [13] 曾东, 胡立琼, 雷鸣, 等. 生活垃圾热解气化污染物产生与排放控制技术综述[J]. 环境保护与循环经济, 2018; 38: 17-21.
- [14] 汤元君. 垃圾热解气化脱氯及其对二恶英控制研究与烟生命周期评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [15] 杨杰. 气氛和金属化合物对飞灰二恶英低温影响特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] 钱祖浴, 廖柏军, 孙强, 等. 热解技术在农村生活垃圾处理中的应用[J]. 农村经济与科技, 2021(32) 17: 14-16.
- [17] 唐利兰. 城市生活垃圾热解产物性质及元素分布规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [18] 罗亭. 城镇有机垃圾热解生物炭理化性质研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.