

村镇生活垃圾热解处理技术综述

颜蓓蓓¹,杨学忠¹,侯林桐¹,马德刚¹,李健¹,孙昱楠²,程占军^{1*},陈冠益^{1,2} (1.天津大学环境科学与工程学院,天津 300072; 2.天津商业大学机械工程学院,天津 300134)

摘要: 村镇生活垃圾处理是关系环境生态、经济民生的重要问题,是我国发展生态文明、建设美丽乡村的重要环节.新形势下,村镇生活垃圾处理不仅要求减量化、无害化,同时应实现就近、就地处理,资源、能源回用.本文综述了我国村镇生活垃圾产量与分布特性,对比分析当前村镇生活垃圾的处理模式与常用技术.热解技术是一项新兴的村镇生活垃圾技术.针对村镇生活垃圾热解工艺,从过程控制、产物导向、装备设计、研究前沿等角度展开全方位分析,列举相关政策法规,并对现有应用示范进行梳理分析.

关键词: 村镇生活垃圾; 热解; 技术发展; 污染特征

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)08-3755-15

A review on pyrolysis of rural household garbage. YAN Bei-bei¹, YANG Xue-zhong¹, HOU Lin-tong¹, MA De-gang¹, LI Jian¹, SUN Yu-nan², CHENG Zhan-jun^{1*}, CHEN Guan-yi^{1,2} (1.School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University Tianjin 300072, China; 2.School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China). *China Environmental Science*, 2022,42(8): 3755~3769

Abstract: The clean disposal of rural household garbage is crucial to the environmental protection. It contributes a lot to the development of economic and the improvement of people's livelihood. Meanwhile, clean disposal of rural garbage is also one of the most important tasks for building the ecological civilization and beautiful country. Under this background, the rural household garbage should not only be reduced, but also achieve the resource utilization and energy recovery. In this paper, the production and distribution of Chinese rural household garbage are introduced, and the conventional treating models and technologies are discussed. Pyrolysis is an emerging technology for treating rural household garbage. A comprehensive evaluation on the pyrolysis of rural household technology is conducted with focusing on the process control, production utilization, design of reactor, and research frontier. Some related laws or regulations are introduced, and some demonstration plants are elaborated. Hopefully this paper can provide some insights to the pyrolysis of rural household garbage.

Key words: rural household garbage; pyrolysis; technology development; pollution characteristics

我国村镇生活垃圾产量与日俱增,“垃圾围村”的现象日趋严重.村镇生活垃圾露天堆积以及不当处理,造成严重的水体、土壤和大气污染,威胁村镇人居环境安全,给村镇居民带来严重的健康风险.此外,我国广大村镇也面临着能源短缺的情况,粗放、低效的能源获取和利用方式,不但限制了村镇经济的发展,也加重了村镇环境污染.顺应“碳达峰、碳中和”和“无废乡村”的要求,寻求适合于村镇条件垃圾处理技术,开展村镇生活垃圾的资源化、能源化利用,具有重要的环境、经济和民生意义.

传统的垃圾处理技术主要包括:焚烧、卫生填埋、堆肥、厌氧发酵等.这些传统技术应对村镇条件体现出一定的不适应性.热解技术作为近年来备受关注的新兴村镇生活垃圾处理技术,能够一定程度上克服传统处理方法的不足,在村镇生活垃圾迅速减量化、多元资源化、高效无害化方面取得显著成

效.在国家相关政策支持下,村镇生活垃圾热解示范工程逐渐增多,热解系统技术也日趋完善.

1 我国村镇生活垃圾现状

1.1 村镇生活垃圾产量与基本属性

村镇生活垃圾主要是指村镇中日常生活或为日常生活提供服务的活动产生的固体废物^[1].我国村镇生活垃圾产量巨大,且呈现逐年递增的趋势.据《2020年城乡建设统计年鉴》^[2]报道,我国现有村庄236.3万个,村庄户籍人口达7.77亿.其中常住人口将近5亿^[3].据此测算,我国村镇人均垃圾日产量为0.7~1.1kg/(人·d)^[4],垃圾年产量达3亿t.

我国不同地区村镇生活垃圾的组成成分如表1

收稿日期: 2022-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1100305)

* 责任作者, 副教授, zjcheng@tju.edu.cn

所示,可以看出垃圾成分受地域影响较大.村镇生活垃圾中纸类、塑料、织物等含量呈现南方多北方少的趋势;而灰土类成分则呈现相反趋势.总体来看,厨余/果皮等易腐有机垃圾在我国村镇生活垃圾中占比较高,可达 40%~50%,其余有机组分主要包括纸类、塑料类、织物类与竹木类.无机垃圾包括灰土、砖瓦、玻璃、金属等,可占村镇生活垃圾总量的 15%左右.据李丹等^[5]调研分析,我国村镇生活垃圾平均容重为 256.25kg/m³.晏卓逸等^[6]对我国 12 个省份共 72 个村镇的生活垃圾采样调查结果表明全国村镇

生活垃圾平均含水率为 40.1%左右,北方省份的村镇生活垃圾的含水率普遍低于南方省份村镇.蔡杰^[7]对全国 40 个村镇垃圾采样点的生活垃圾取样分析显示,其湿基低位热值最高可达 16202.2kJ/kg,最低为 3703kJ/kg,由此计算村镇生活垃圾的低位热值在 8000~13000kJ/kg 范围内.

由此可见,我国村镇生活垃圾具有显著的能源属性,借助预处理脱除水分后,其热值有望进一步提升.因此,村镇生活垃圾的处理应不局限于无害化处置,更应因地制宜推广能源化转化利用.

表 1 我国各地区村镇生活垃圾组成成分(%)
Table 1 Composition of rural household garbage in China(%)

地区	厨余	纸类	塑料	织物	木竹	灰土	砖瓦	玻璃	金属	其他	参考文献
北京	51.16	19.11	16.19	0.98	4.79	5.19	0.4	1.59	0.59	0	[8]
华东	47.19	8.02	9.54	3.24	3.85	13.29	6.93	2.53	1.06	4.34	[9]
华南	55.75	10.9	15.02	4.05	1.05	4.42	0.43	3.51	0.67	4.14	[9]
西南	43.02	11.02	8.89	2.82	2.6	21.3	1.3	2.33	1.18	5.76	[9]
西北	59.73	6.74	8.2	2.21	0.52	16.47	0.59	1.08	1.53	2.92	[9]
华北	40.36	3.5	7.3	1.34	1.38	34.55	1.86	1.51	0.81	5.93	[9]
东北	29.64	3.4	4.16	1.83	0.81	49.08	1.9	2.37	2.11	4.81	[9]
华中	43.43	5.99	8.54	1.88	0.94	31.06	3.79	1.81	0.93	1.11	[9]

1.2 村镇生活垃圾处理模式

靳琪等^[4]对全国 21 个省份、114 个乡镇、224 个村和 1451 户农户进行大规模数据调研,统计结果表明全国范围内,89%的村庄设有垃圾基础处理设施,92%的村庄对生活垃圾采取了不同程度的最终处置,但仅有 34%的村庄实现了垃圾的规范处置.目前,我国村镇生活垃圾的处理模式主要为集中处理和分散处理两种.在经济发达的地区,有较为成熟的垃圾收集处理系统,通常由县(区)以上已建成的垃圾终端处理设施向周边的各个村镇辐射,建立“村收集、镇中转、县处置”的村镇生活垃圾处理网络.此种处理模式往往有较高的成本.何晶晶等^[10]对我国南方发达地区村镇(浙江余杭)垃圾处理成本进行调研,结果表明余杭地区村镇生活垃圾处理总成本为 253.5 元/t,而其中收集、运输和转运成本分别占总成本的 32.3%、13.7%、32.3%,最终处置成本仅占 21.7%.由此可见,如能实现就地处理,可节省近 50% 的处理成本.

在经济水平较低地区或距离处理终端较远的村镇地区,一般采用分散处理模式^[11].此种模式实现了垃圾收集和就地处理的直接衔接,处理成本较低,

但受到规模效应的限制,无害化水平也较低.与此同时,就地简易填埋或就近露天焚烧过程缺乏规范,极易造成二次污染.

综合来看,目前现有的村镇生活垃圾处理模式,很难兼顾清洁达标、成本控制和能源回收.而垃圾热解技术运行成本较低,无害化、减量化水平高、可实现能源回收,且其处理规模适应村镇场景(小于 50t/d)^[5].因此,在我国全面推行垃圾分类、以及“碳达峰、碳中和”的政策背景下,开发基于热解技术的垃圾处理新模式,有望成为村镇生活垃圾处理的有效途径.

1.3 村镇生活垃圾处理技术

目前我国主要的生活垃圾处理技术包括:焚烧、卫生填埋、堆肥、厌氧发酵等^[12-18].这些技术在应对村镇生活垃圾处理场景时,存在着一定的优势与不足.

焚烧是我国垃圾处理的重要技术.据全国能源信息平台统计,截止到 2019 年,我国建有城镇垃圾焚烧发电项目共 278 个,垃圾焚烧处理占比达到 35.30%.垃圾焚烧处理效率较高,减量效果显著,具有规范化的污染物控制手段,同时能实现一定程度的能源回收.然而,焚烧技术也面临运行不稳定、工艺

复杂、尾气处理成本高等问题^[19]。应对村镇生活垃圾处理场景,焚烧技术体现出显著的规模不适应性。据分析^[5],稳定的垃圾焚烧工艺一般需匹配 500t/d 以上的处理量,否则单位垃圾处理成本过高。而村镇生活垃圾产量远达不到此标准。

卫生填埋是我国目前应用最广泛的垃圾处理方式。规范的卫生填埋需要对生活垃圾进行分拣,排除有毒有害成分。生活垃圾填入人工构筑的地下空间,并压实、覆盖,同时设置排气口,以及渗滤液处理设施^[20]。据中国统计年鉴^[2]报道,2020 年我国现有生活垃圾卫生填埋厂 644 座,占生活垃圾无害化处理总厂数的 50%。卫生填埋具有工艺简单、投资少、处理量大等优点。但也存在占用土地、释放有毒物质、危害土壤和地下水等缺点。应对村镇生活垃圾处理条件,卫生填埋同样体现出规模不适应性。村镇生活垃圾处理规模很难匹配卫生填埋的技术要求,同时村镇土地资源有限,经济和技术发展水平较低,系统规范的卫生填埋很难实现。

堆肥与厌氧发酵可归类为生物处理。生物法具有工艺简单、处理成本低、对易腐有机垃圾无害化效果好、可制备燃气、有机肥产品等优点,但同时也具有占地面积大,过程不易控制,反应周期长、效率低等问题。针对村镇生活垃圾处理,生物法具有一定的优势,体现在其处理规模较为匹配、处理工艺的技术、设备、投资要求较低,同时村镇生活垃圾经过生物法制备得有机肥、沼气等产品,在村镇环境下也具有一定的适用性。何品晶^[21]认为,对村镇生活垃圾中的可降解类物质(食品和植物残余、卫生用纸等)进行就地生物处理,是一种行之有效的处理模式。然而,生物法对村镇生活垃圾的减量化效果差,对塑料、布匹等垃圾成分降解效率较低,无法实现对无机组分的无害化处理。因此,应用生物法处理村镇生活垃圾,必须依赖科学、高效的垃圾分类,同时与其他处理技术相结合(如填埋、焚烧等)。

2 村镇生活垃圾热解技术

2.1 村镇生活垃圾热解技术概述

热解气化是在绝氧或者缺氧的环境中对有机物质进行热化学处理,使得有机物质的化学组成与物理状态发生变化的一种不可逆过程^[22]。有机物质在 200~400℃ 的温度段发生初步热解,温度达到 400

℃ 以上会发生二次热解,热解的终温能够达到 700~800℃^[23]。根据操作条件的不同,热解过程可以分为常规热解(又称为慢速热解)、快速热解和闪速热解,3 种热解过程有着不同的反应温度、升温速率、反应压力、物料停留时间以及原料尺寸要求^[24]。常规热解是历史较为悠久的一种热解方式,其反应温度通常较低(300~650℃),升温速率也较慢(0.1~1℃/s)。较长的停留时间使得物料可以发生多次裂解,产生较多的热解气,同时也需要较多的外部能量输入^[25]。快速热解与闪速热解通常需较高的温度(高于 700℃)、较高升温速率、以及较短的停留时间,热解产物以热解油为主^[22]。

热解气化技术起源于煤和生物质等能源物质的转化利用过程,随着技术的不断发展,其逐渐被引入垃圾处理领域,发展成为一种兼具能源化与无害化特点的垃圾处理方式。垃圾热解是将垃圾中的有机质在无氧的条件下加热,使有机物的化学键发生断裂,生成热解炭、热解油和热解气的过程^[26]。相较于前述传统垃圾处理技术,垃圾热解具有污染物释放量少、能源回收率高、处理规模灵活的特点。热解处理过程中垃圾成分及含水率对反应有较大影响,不同组分的垃圾热解特性不同。当垃圾中有机成分占比较大时,热解产生的产品热值高、可回收性好、废渣也较少^[27]。

依据我国村镇现状,热解技术或许是我国村镇生活垃圾处理破局的关键。我国幅员辽阔,部分村镇与县城存在天然的地理阻隔,其产生的垃圾更适宜采用就近处理的方式。且我国人口分布、经济发展不平衡,村镇生活垃圾产量规模存在一定的差异,这就要求垃圾处理技术须适应灵活的规模变化。热解技术适应于中小规模垃圾处理,且设备占地少、投资小,符合我国广大地区村镇生活垃圾处理的应用需求,发展潜力巨大。其次,垃圾热解处理产生的固、液、气三相产物,在村镇条件下皆有应用的需求。如热解产生的热解气与热解油可用作能源产品,而热解炭可以用作土壤改良剂、炭基缓释肥以及建筑材料^[28]。合理的产物消纳以及广阔的应用市场为村镇生活垃圾热解技术提供发展的基础。此外,相比于其他传统垃圾处理技术,热解产生的污染物较少,且控制技术较为成熟可靠,可实现对村镇生活垃圾的减量化、无害化和稳定化。

在“中国知网”文献系统中检索发现,“垃圾热解”相关研究文献发表数量由2000年的14篇增长至2020年的103篇,表明垃圾热解技术逐渐成为我国垃圾处理领域的热门研究内容.刘红盼等^[29]运用文献计量法对“垃圾热解”相关研究论文进行可视化分析,发现关于垃圾热解的文献数量在逐年剧增的同时,也出现研究热点多元化、研究范围由实验室探索向工业化技术示范发展的趋势,进一步证明垃圾热解技术可观的研究潜力.袁国安^[30]对近年来我国各级别垃圾热解气化科技项目的立项与实施情况进行了统计分析,发现我国垃圾热解气化项目由

2013年的1项急剧增长至2017年的34项,这也表明垃圾热解技术正在从实验研究逐步走向产业化推广应用.

2.2 垃圾热解反应器

热解反应器是热解系统的核心,反应器的选择与优化是热解技术研究的热点^[24].常规的垃圾热解反应器包括固定床、流化床(鼓泡和循环)和回转窑反应器,每种反应器都有其独特的反应特性(表2).不同的传热面积、物料停留时间影响了垃圾热解过程中热解炭、生物油、热解气的产率与品质^[31],同时也影响污染物形成与释放.

表2 常规热解反应器及其优劣势
Table 2 Conventional pyrolysis reactor and its advantages and disadvantages

热解炉型		适用规模	优势	劣势
固定床		实验室研究与小规模垃圾处理	技术简单易操作;气流速度低,飞灰携带少	焦油难去除,加热速度慢,温度场不均匀
流化床	鼓泡流化床	2~6mm的破碎垃圾,大规模连续进料垃圾处理	温度控制效果好,传热效率高,固气分离容易,有效避免热解炭二次裂解	存在焦油与飞灰问题
	循环流化床		气流速度快,物料吞吐量高,嵌入的热解炭易分离	
回转窑		城市生活垃圾处理,垃圾成分要求低	旋转使垃圾高效混合,生产效率较高,停留时间易控制,垃圾无需预处理	仅由炉壁传热,传热效率低

固定床反应器是最常用的热解气化反应器,其具有设备规模小、结构简单、易于建造的特点^[32],较为适合村镇生活垃圾处理场景.固定床反应器在热解气化过程中,需通过外部加热的方式提供能量,也可以通过燃烧热解产物从反应系统自身获取能量.固定床反应器存在升温速度慢、停留时间长、炉腔内温度分布不均匀等特点^[33],对原料的粒径均一性也有一定的要求.利用固定床反应器热解村镇生活垃圾通常产生较多的热解炭,而热解油和气的产量较少.

流化床反应器因其较高传热、传质效率而常被应用于石油和化学品加工行业^[34].流化床反应器通常可以分为两种:鼓泡式和循环式.鼓泡流化床反应器中,经过初加工的粉碎垃圾被送入固体鼓泡床中,使用惰性气体或者氧气含量低的空气流化床体进行热解反应^[35].鼓泡流化床热解垃圾可产生较多的热解油,其产率可达50%~55%^[36].热解产生的少量生物炭需要快速分离,防止二次反应发生.循环流化床反应器的工作原理与鼓泡流化床反应器相似,区别在于循环型的床层是强烈膨胀的,床料在气旋作

用下连续循环^[24],能够保证垃圾原料均匀的混合以及更好的温度控制.这种反应器在处理垃圾过程中易实现热解炭的分离,提高固体产率,同时燃烧产生的热量转移到床层固体,提高循环过程中换热效率,减少能量消耗.

回转窑反应器最初被应用于水泥产业.后因其广泛的物料适应性(各种尺寸及形状的固体、液体和气体废弃物)和操作简单、控制方便等优点,成为垃圾热解的主要炉型之一^[37].回转窑最主要的特点是它的主体部分——圆筒可以旋转并且倾斜角度可以在一定范围内调节.通常倾斜角设定为1°~4°.在运行时,垃圾由给料机从斜上方入口处投入滚筒,在滚筒倾斜和转动的作用下,逐渐沿着轴线方向往出料口移动.在移动的同时,垃圾旋转并充分混合,实现热质交换.反应后,热解油、气、渣尾部出料口排出.回转窑反应器内垃圾停留时间较长,且充分旋转混合,其热解效率高于固定床反应器^[38].

2.3 垃圾热解制炭

在热解过程的低温阶段,垃圾经过初步的分解,形成稳定的固体热解炭.热解炭是由70%的炭以稳

定形式组成的黑色、多孔、轻质、固体化合物^[39]。在垃圾热解过程中,温度、升温速率和停留时间等条件都会对热解炭的产率和性质产生重要影响。热解炭的生成温度一般为 300~500℃,随着温度的升高其产率逐渐降低,但其比表面积和含炭量随着温度的升高呈增加趋势^[24]。较慢的升温速率($\leq 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$)有利于热分解后稳定基质的形成,抑制挥发性化合物的释放,从而提高热解炭的产率^[40]。在相同热解温度下,热解炭产率随停留时间的增加而降低^[41]。热解炭在村镇条件下具有很好的应用前景。热解炭可以直接用做燃料,补充村镇生活、生产所需的能源供应^[42]。通过对村镇生活垃圾的预处理(分拣、干燥等),结合热解工艺的优化控制以及产物提质技术,热解炭可被利用于村镇污水净化、土壤改良^[43],以及制备农用炭肥等。此外,由于热解炭具有比表面积大、孔隙率高的特点,也有学者开发利用垃圾热解炭制备催化剂载体^[44]。

国内外目前对垃圾热解制炭的研究主要集中于对特定垃圾组分的热解工艺探索,以及热解炭的优化提质。王菁等^[45]探究不同温度下垃圾基础组分——纤维素热解制炭反应特性。当热解温度为 350℃ 时,热解炭产率可高达 54.06%。随着热解温度的提高,热解炭产率持续降低,同时热解炭中的碳元素含量逐渐升高,氢和氧元素含量逐渐下降。纤维素热解总体为吸热反应,随着温度的升高,纤维素分子链断裂形成稳定的碳簇分子,使热解炭的固定碳含量和高位热值也逐渐升高。朱丹晨等^[46]选取湖北地区村镇木屑为原料热解制炭。随着热解温度的升高,热解炭的热值由 22.46MJ/kg 增加至 29.40MJ/kg,同时热解炭中无机元素和含氧官能团逐渐减少,热解炭的疏水性显著增强。同时,制备的热解炭不仅热值较高,压缩成型后还具有较大的体积密度和抗压强度,是一种理想的村镇燃料。

村镇生活垃圾热解制炭的产业化探索还处于起步阶段。现有的研究大多采用特定(单一)组分的村镇生活垃圾,主要探索温度对热解炭的产率以及特性的影响,热解炭的最终用途多为直接燃烧供能。对混合垃圾热解制炭、垃圾热解制炭协同效应、村镇条件热解制炭环境影响等内容缺乏探索。同时热解炭的品质调控以及应用拓展还需进一步强化,应寻求建立“组分特性识别——预处理模式匹配——热

解工况精确调控——热解炭定向提质与高质化利用”的村镇生活垃圾热解制炭工艺链条。结合大数据与人工神经网络算法,形成面向多元化应用的村镇生活垃圾热解制炭系统方案。

2.4 垃圾热解制油

热解油是垃圾热解过程中产生的液体。热解油可以直接作为锅炉燃料使用,也可以加工提炼制备化工产品^[47]。村镇生活垃圾热解油成分复杂,由芳香烃、酚类、酮类、酯类、醚类、糖类、胺类、醇类、呋喃类和一定量的水分混合构成^[48]。总体来看,村镇生活垃圾热解油呈现出含水率高、酸性大、含氧量高、稳定性差等特点^[49],这也一定程度限制了村镇生活垃圾热解油的应用。

针对垃圾热解油产率以及组分特性,国内外学者开展了广泛研究。刘璐等^[50]将垃圾破碎烘干后在不同温度下(450~650℃)进行热解实验。分析发现垃圾热解油中含有酚类、醛类、羧酸类、酮类、芳香烃类、脂肪族等多种组分。热解油的含水率在 20%~30% 范围内,酸值大于 30mg/g(KOH)。随着热解温度的升高,热解油的含水率以及酸值均逐步降低。当热解温度为 600℃ 时,热解油取得最低的含氧量(20.28%),热值达到最高的 31.42MJ/kg。实验室研究中常常会通过添加原料掺混或对原料进行预处理等方式来提升热解油的产率及品质。马大朝等^[51]在村镇生活垃圾(废纸)热解过程中添加生活垃圾焚烧后产生的灰渣,研究了不同热解温度下热解油的产率以及成分变化。结果表明,由于灰渣中无机盐的催化作用,掺混灰渣后废纸热解油的产率会降低。经过 GC-MS 分析发现掺混灰渣后废纸热解油中酚类、酮类、呋喃类、醛类和有机酸含量降低,而醇类和酯类则很难检测出,这表明灰渣的添加可以减弱热解生物油的毒性和腐蚀性。同时在热解生物油中还发现了 1-癸炔和二乙酸两种新的化合物,说明灰渣添加能够对热解油起到一定的提质作用。祝敏敏^[52]探究有机溶剂和酸溶剂预处理对木屑热解制油过程的影响。当热解温度为 550℃ 时,热解油产率最高。在所有预处理溶剂中,盐酸预处理效果最佳。盐酸预处理后的木屑热解油产率增加了 20.21%,通过 GC/MS 测得的热解产物总峰面积(多数为轻质生物油组分)也增加了 44%。贾晋炜^[53]将农作物秸秆与村镇生活垃圾进行了共热解,探究添加木薯茎后村镇生活垃

圾热解制油特性.实验结果表明,加入一定比例的木薯茎能够显著降低村镇生活垃圾热解活化能.木薯茎对于村镇生活垃圾热解制油具有促进作用,木薯茎的添加量从 0%增长到 20%,热解油的产率可从 33.7%提高到 46.0%.

然而,村镇生活垃圾热解制油面临着与生物质热解制油相同的困境,即油品差、提质成本高,且垃圾热解油组分更为复杂多变,污染性也更强.基于村镇生活垃圾处理场景,很难匹配成规模的热解油收集、提质和精炼设施,这也限制了热解油的高效开发利用.综合来看,村镇生活垃圾热解油主要有以下两个合理出路:1)热解油的炉内燃烧.结合热解炉的特殊设计,避免热解油的冷凝与外排,使其在炉内充分燃烧,燃烧释放的热量直接用于垃圾热解反应.2)热解油复配制备叶面肥、杀菌剂和土壤改良剂等.热解油成分与木醋液相似,基于对村镇生活垃圾的预筛选,以及热解过程的优化控制,有望通过简易的复配过程实现对于热解油的高质化农业利用.

2.5 垃圾热解制气

垃圾热解气主要由氢气和一氧化碳组成,还含有少量的二氧化碳、水蒸气、碳氢化合物、焦油等,这些组分经过复杂的高温反应生成,其产量与比例受垃圾原料和热解条件影响^[31].通常而言,反应温度越高,垃圾热解气产率越高.随着热解温度的升高,垃圾经历了水分蒸发、脱挥发分、碳化等阶段.挥发分与焦油经过脱羧、脱羰、脱氢、脱氧和裂解等一系列二次反应,形成热解气的主体成分^[54].高温有利于焦油的热裂解,从而提高热解气的产率^[55].垃圾热解气可作为燃料,用于村镇的发电、供热、供气、供汽等,也具备进一步净化合成制备化工原料的可行性.

国内外学者针对村镇生活垃圾热解气的产率与品质开展了全面的研究.刘照^[56]选取了村镇生活垃圾中的 5 种典型成分:废纸,织物,竹木,塑料以及厨余,在 500~1000℃ 的范围内测试其热解产气特性.结果表明热解气的产率随热解温度的升高而增加,其中废纸的产气量最低,为 81.6~454.4L/kg.而竹木和塑料的产气较高,分别为 108.8~549.2L/kg 与 106.0~576.8L/kg.这主要是由于塑料和竹木中 C、H 元素含量以及挥发分含量较高.5 种典型成分组成的混合垃圾热解气的热值也随着温度的升高而显著提升,从 201.73kJ/m³ 升至 1441.69kJ/m³.垃圾热解产气率不

仅可以通过提升热解温度来实现,也可以通过加入其他原料协同热解、以及加入催化剂等方式实现.贾晋炜^[53]提出利用玉米秸秆与村镇生活垃圾共热解制备热解气,当玉米秸秆添加比例为 80%时,能够使村镇生活垃圾热解气的产率达到最大值 23.5%.从热解气成分来看,玉米秸秆的添加提升了热解气中的 H₂ 含量、降低了 CO 的含量.当玉米秸秆添加比例为 40%和 60%时,热解气中 H₂ 产率达到最大值 0.01L/g_(原料),CO 产率达到最小值 0.018L/g_(原料).杨迪^[57]用纸屑、塑料、厨余物、织物、木屑和橡胶按照一定比例混合配制成村镇生活垃圾模拟样品,研究了不同的添加剂对垃圾热解产气的影响.模拟村镇生活垃圾的热解产气量随着温度的升高而增加,向实验材料中添加 CaCO₃ 后,产气量的增幅更加明显.

热解气在村镇条件下具有良好的应用前景.经过除尘、除焦、脱酸、脱硝等净化工艺,热解气可有效补充村镇能源供应,实现村镇生活垃圾的能源化利用.但由于热解气的制备往往需要较高的热解温度,大量依赖外部能源供应.因此,对村镇生活垃圾热解气进行直接燃烧,为热解段供能,成为一个更可行的方案.通过对热解气管道保温,防止热解油的冷凝与堵塞,将热解油、气高效燃烧,不但保证了热解段所需的能量供应,降低热解反应器运行所需的外加燃料成本,同时也可简化燃气净化系统,大幅降低热解设备的初投资.

3 村镇生活垃圾热解技术发展

3.1 村镇生活垃圾热解系统优化

3.1.1 热解系统模拟优化设计 通过模拟技术对热解系统进行优化设计,成为村镇生活垃圾处理技术发展的重点.如表 3 所示,热解过程模拟优化大体分为两个方向:一是对村镇生活垃圾热解系统进行模拟优化,通过研究村镇生活垃圾热解系统单元组成、能量分配、热解炉最佳运行条件等,提高系统效率,同时一定程度上降低污染物排放;二是对垃圾热解反应器的结构进行模拟设计,通过改变热解反应器的结构(倾角、尺寸、材质等),模拟探究炉内流体的运行状态,从而实现垃圾热解反应传热、传质过程的优化设计.

胡晴^[58]基于 Aspen Plus 软件模拟提出了一种干燥、热解、气化以及富氧分解为一体的自供热式村

镇生活垃圾处理系统.利用软件模拟探究村镇生活垃圾热解能量流优化方案以及自供热运行特性.由模拟结果可得,村镇生活垃圾热解最佳反应温度为 900℃,且当热解气化炉空燃比(A/F)为 0.4、热解气化炉空气当量比(ER)为 0.5 时,该双解技术有着最佳的垃圾处理效果.通过对物料与热量平衡模拟分析得出该技术可以实现稳定可靠的自供热模式运行,并且该技术处理后产生的炉渣为无毒的一般固废,尾气排放也能够满足标准限制.王颖^[59]利用 Aspen Plus 软件模拟了村镇生活垃圾热解气化耦合燃烧工艺.模拟结果证明过量空气系数在 0.3~0.4 之间时热解气化耦合燃烧有着较高的热转化率和碳转化率,与此同时还抑制了有害气体的生成.当一/二次风配比为 2:3 左右时,能够为烟气的二次燃烧提供充足的氧气,提升燃烧效果.利用软件模拟多工况下的热解过程,大大减少实验量,降低工艺试错成本,为村镇生活垃圾热解系统技术发展提供了重要理论参考.

热解反应器自身结构特性对村镇生活垃圾热解过程有着较大的影响,通过软件模拟实现对反应器的优化设计是提升热解效率的重要手段.王颖^[59]

采用 CFD 的 FLUENT 模拟软件对于垃圾热解气化二燃室进行结构优化设计.模拟结果表明烟气从切向进入能够使其在二燃室内获得更高的温度,同时拥有更快的气流速度.较长的停留时间能够让烟气充分混合燃烧,提升燃烧效率.曾毅夫等^[60]研制出了一种分散式垃圾热解气化装置.该装置在垃圾热解炉的顶部设置了进料斗及双层进料门.双层进料门设置的配重不同,以此来确保垃圾可松散、有序的落入炉内,避免炉内垃圾大量堆积,有利于炉内垃圾的充分热解,提升热解效率.垃圾经热解气化产生的可燃气体中会携带大量的灰分,堵塞烟气出口影响后续处理工艺.针对此问题,曹桦钊等^[61]对下吸式热解气化炉燃气出口结构进行模拟设计与应用研究,发现可以通过改变燃气出口倾角结构的方式改变燃气中固体颗粒的携带粒径.当热解炉出口倾角更大、而热解固体产物粒径更小时,能够避免固体颗粒被热解烟气携带出炉体,减轻后续烟气净化负担.以上对于热解器结构模拟优化研究有助于提升村镇生活垃圾热解效率与清洁性,是垃圾热解从工艺优化到装备研发的重要环节.

表 3 垃圾热解技术常用优化模拟软件
Table 3 Optimization simulation software commonly used in waste pyrolysis technology

软件	优化方案	探究因素	参考文献
Aspen plus	建立 MSW 固定床热解气化模型	气化温度、气化压力、空气当量比	[7]
	建立村镇生活垃圾固定床热解气化模型	气化温度、空气系数、蒸气与物料比、不同气化介质	[62]
	建立基于热化学平衡的垃圾共热解工艺模型	非均质垃圾与秸秆掺混比例	[63]
	建立塑料和橡胶(村镇生活垃圾典型成分)低温热解反应模型	热解温度、垃圾掺混比例	[64]
	建立了垃圾沸腾流化床热解气化过程综合模型	气化温度、当量比、富气含氧量、垃圾含水率	[65]
CFD	生物质旋风热解炉气相等温流场	热解炉入口切向速度、轴向速度、原料停留时间	[66]
	建立流化床内生物质颗粒尺度的热解模型	压力脉动信号、高清瞬时图像	[67]
	垃圾热解气在燃烧器中的低氧稀释混合(MILD)燃烧	喷管孔径、喷管间距、喷管分布、热值波动	[68]
MATLAB	热解炉温度随动控制	升温曲线	[69]

3.1.2 热解耦合技术 耦合技术可克服单一热解工艺存在的弊端,实现村镇生活垃圾处理中经济、环境效益的全局最优,因而成为行业研究的热点.

Chen 等^[70]采用 SWOT 分析法对西藏地区生活垃圾处理的 5 种方式进行了评价.研究表明,厌氧发酵耦合热解的方法具有最佳的应用潜力.此耦合体系可以有效避免厌氧消化过程中有机物分解不彻底的问题,将无法生物降解的沼渣通过热解的方式转化利用,从而降低了环境污染风险,显著提高系统能量利用效率.热解工艺还可以与燃烧工艺相耦合

用于村镇生活垃圾处理.张思成^[71]提出了一种垃圾热解耦合煤粉燃烧的双床反应系统,并在实验室规模的固定床反应器中研究了模拟热解气氛对垃圾热解的影响.此耦合体系解决了垃圾与煤粉直接混烧的技术难题,并利用煤粉燃烧为垃圾热解反应提供能量,实现了对村镇生活垃圾热解产物的高效资源化利用.村镇生活垃圾热解过程中不可避免的涉及到燃气的净化工艺.黄付平等^[72]设计低温热解耦合高压等离子体烟气净化技术处理生活垃圾的小型化设备,垃圾低温热解产生的燃气进入高压等

离子体静电系统.该系统采用蜂巢电场结构,能够在高压静电下产生低温等离子、自由基及强氧化物,将燃气中的有害物质分解成无害的碳分子和水,从而有效控制热解烟气中的二噁英、 SO_2 、 NO_x 、颗粒物等污染物.综上所述,针对村镇生活垃圾处理过程中能效与污染问题,耦合工艺可突破单一技术的瓶颈问题,因而具备显著的技术优势.

在实际村镇生活垃圾处理工程中,还需要充分考虑到我国村镇生活垃圾处理规模小、地理位置偏僻、运输成本高等问题,故可以将村镇生活垃圾热解与产物利用工艺耦合,实现村镇生活垃圾就地减量化、能源化、资源化处理.郝彦龙等^[73]介绍了河北省某村镇的垃圾处理系统,该系统采用了“预处理+热解气化+烧结制砖技术”为一体的循环经济工艺路线.村镇生活垃圾热解气可以为旋转窑烧结制砖系统供能,同时垃圾热解炭经处理后可掺入页岩、矸石等用作制砖的原料.该工艺将村镇生活垃圾热解产物充分利用,各工艺单元紧密衔接,具有较强的协同性.

热解工艺耦合其他工艺处理村镇生活垃圾,在实验室探究与实际工程应用中都有一定的优势,通过工艺耦合扬长避短,实现对特定场景以及不同目标下村镇生活垃圾的减量化、无害化、资源化处理.但耦合技术往往也面临系统工艺复杂、装备成本高、运行维护难等问题,这将是未来村镇生活垃圾耦合处理研究的重点.

3.2 催化工艺

通过添加催化剂来实现热解工艺的定向优化,也是热解技术发展的重要方向之一.村镇生活垃圾热解过程中添加催化剂,不仅能够显著改变垃圾热解炭、油和气的产率,也可以选择性地调控某类产物的品质^[74],达到优化热解过程以及控制污染物的目的.

李东炎^[75]选取了村镇生活垃圾中最常见的六种典型成分:PE、橡胶、木屑、织物、纸箱以及果皮为实验原料,以3种不同的工业固体废弃物(主要成分分别为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha\text{-SiO}_2$ 以及 $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$)为催化剂进行了催化热解实验.加入催化剂后,村镇生活垃圾热解炭产量均减少,特别地,在 $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ 催化热解PE时,其热解炭产率减少可达52.49%,说明催化剂的添加显著的强化了热解过程挥发分的释放.对于

垃圾热解产生的液相与气相产物, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 催化热解橡胶能使其热解生物油产率增加9.26%,而用 $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ 催化热解PE会使热解气产率增加19.28%.同时3种催化剂的添加均可降低热解油的黏度.可见用工业废弃物作为热解催化剂有利于减少热解炭产量,同时对热解油、气起到一定的提质的作用.贾顺杰^[76]选取了3种不同类型的分子筛催化剂(HZSM-5、HY以及HBeta),研究其对陈腐垃圾热解过程的催化效果.结果发现催化剂加入后能够显著提高陈腐垃圾热解气和油的产率,热解气产率从29.2%分别提升至47.0%、40.8%、42.0%;热解油产率由25.1%分别提升至30.3%、33.0%、35.5%.同时气体的热值也有明显的提高,由 33.66MJ/m^3 提升至最高的 67.45MJ/m^3 .综上所述,热解过程添加催化剂主要可降低挥发分释放的活化能,使热解反应能够进行得更加彻底充分,从而提升了热解油、气产物的产率,也能够通过促进大分子化合物的裂解来提升热解气的品质.但大部分催化剂的加入都降低了垃圾热解炭产率,热解炭的提质更多的依赖热解工艺的控制(延长停留时间、降低热解温度)以及预处理手段.

催化剂还可以提高垃圾热解过程中特定产物的选择性,或抑制某些污染物的形成、迁移与释放.周昭志等^[77]研究了钙基催化剂对垃圾模型样品热解的催化作用,重点关注了垃圾催化热解过程中含氯污染物的释放情况.当热解温度为 750°C 时,氯元素主要以HCl的形式存在于气相产物中.在热解炉内添加CaO、白云石和Ni/CaO三种不同的钙基催化剂后,热解过程中氯元素都能够被有效地转移到固相中,达到燃气脱氯的效果.当钙氯物质的量比为2:1时脱氯效率最高,分别达到79.1%、83.4%和84.4%.结合热解油GC-MS谱图推测油相中的氯主要以有机芳香类大分子的形式存在,而3种钙基催化剂可减少热解油中含氯物质的比例,显著抑制氯苯类物质的形成,这对热解过程中二噁英污染物的控制起到重要作用.催化热解不仅可以减少热解气中的污染物含量,也可以减少热解油中有毒化合物的含量.陈思^[78]利用两种改性分子筛催化剂Fe/HZSM-5和Co/HZSM-5开展木屑催化热解研究.结果表明,在 CO_2 气氛下两种催化剂均能够抑制热解油中多环芳烃(PAHs)和含氧化合物的生成.加入两

种改性催化剂后,热解油的毒性当量值(TEQ)由未加 催化剂时的 22.87 分别降低到 15.70 和 7.20.

表 4 垃圾热解常用催化剂及催化效果
Table 4 Common catalysts and their catalytic effects for waste pyrolysis

催化剂	热解对象	热解温度(℃)	主要效果	参考文献
CaO	小麦秸秆	200~900	吸收释放的 CO ₂ ,抑制 CO 和 CH ₄ 的产率,催化热解油还原反应	[79]
MgO/CaO	松木	500	热解油酸度和氧含量显著降低,pH 值和热值均增加	[80]
MoO ₃	塑料垃圾与固体废物	500, 550, 600	热解油中脂肪烃和芳烃的产率升高,促进了热解气中氢的产生	[81]
SiO ₂	木屑	500	去除热解油中烃类聚合,抑制热解炭、多环芳烃化合物形成,稳定热解油组分	[82]
沸石	塑料垃圾混合物	500~600	合成气产率升高,油产率降低	[83]
USY 分子筛	纺织与塑料垃圾	450~750	提高呋喃产量,提升对芳香烃的选择性	[84]
Fe-Mo/ZSM-5	木材/秸秆	400~600	提升原料热转化率,提高热解油收率	[85]
改性 HZSM-5	油茶籽壳	500	提升热解油、气产率,提高热解油中酚类物质的相对含量,并减少酸类物质的相对含量	[86]
金属类催化剂/复合分子筛 HM	竹木屑	550	大幅降低热解油的氧含量,促进低聚物的二次裂解,显著提高烃类收率	[87]

如表 4 所示,综合来看,催化剂在村镇生活垃圾热解领域有着广泛的应用前景,不仅能够提升垃圾能源化效率,还能够降低热解过程中的环境危害.在热解反应各类催化剂中,酸性催化剂的应用研究是最为普遍的.以分子筛催化剂为代表,此类催化剂比活性强、表面积大、孔道多,在垃圾催化热解过程中,可防止挥发分二次聚合和结焦^[88].垃圾热解催化剂还需要具备较强的耐腐蚀性、抗酸和抗积碳属性,同时也要有较好的催化活性,避免在热解高温中失活.随着热解技术在我国不断发展应用,关于不同类型热解催化剂的应用研究不断增加,而应对村镇生活垃圾处理条件,对催化剂的适用性和经济性有了更高的要求.以垃圾热解炭为催化剂(或催化剂载体)的研究得到广泛关注.依靠发达的孔隙结构、丰富的表面官能团、以及富含的碱金属碱土金属,热解炭催化剂对热解气、油具有一定的提质作用.同时热解炭本身来自于热解过程,廉价易得,无需考虑再生,其在村镇生活垃圾热解中的应用更具前景.

4 村镇生活垃圾热解技术应用前景

4.1 政策支持

2018 年中共中央、国务院发布的《中共中央国务院关于实施乡村振兴战略的意见》中指出,“实施乡村振兴战略的关键在于村镇环境的生态宜居”.在该方针的指导下,加强对村镇生活垃圾增量以及污染的综合治理成为了各村镇地区政府与人民共同努力的目标,将村镇生活垃圾处理作为主攻方向

之一.我国村镇地区分布地域广,环境差异大,因此村镇生活垃圾处理须考虑应对不同地理环境特性而采取适宜的处理模式与处理技术.2020 年最新修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中关于我国村镇地区生活垃圾的处理,要求“各级人民政府加强村镇生活垃圾污染环境的防治,保护和改善村镇人居环境”.与此同时,国家鼓励村镇生活垃圾处理能够做到“源头减量、因地制宜、就近就地利用”,这与垃圾热解技术能源化、小型化的特点非常契合.在因地制宜做好垃圾减量基础上,村镇生活垃圾处理须通过创新技术手段来创造更高的经济价值.根据国家发改委、住房和城乡建设部 2016 年发布的《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》要求“将生活垃圾无害化处理能力覆盖到建制镇,坚持资源化优先,不断提高生活垃圾无害化处理水平”.因此,村镇生活垃圾热解技术有望弥补我国小型化垃圾处理技术的不足,兼顾经济效益与环境效益,保障村镇生活垃圾的减量化、无害化、能源化处理.

国家工信部、科技部和环保部等三部委在 2014 年发布的《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录》中,支持采用生活垃圾热解处理设备来处理生活垃圾,热解气化的垃圾有机物减量率大于 93%,单炉日处理量达到 80~100t,垃圾热解后产生的可燃气可直接用于燃气发电机发电.在 2020 年最新发布的《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录》中,进一步提出使用有机污染物热解处理装备

来处理村镇生活垃圾,如有机固废闪蒸干化耦合热解气化装备等.由此可看出热解技术处理村镇生活垃圾有着较好技术导向.但在国家以及地方出台的关于垃圾资源利用以及污染防治的政策文件中,并未明确提出采用热解技术来处置村镇生活垃圾,仅是指出了村镇生活垃圾处理的相关技术导向性要求以及环保经济性要求,而热解技术能够充分契合相关要求,助力各村镇地区完成既定的生活垃圾整治处理目标.

4.2 村镇生活垃圾热解技术应用

在国家相关政策的支持与鼓励下,近年来在全国多地建立村镇生活垃圾热解技术的示范应用(表5).垃圾热解项目在经济发展水平较低的偏远地区得到了较好的应用.青海昆仑山西大滩地区是入藏的必经之地,游客过境造成大量的旅游垃圾排放.2020年,该地区投资2543万元建设了一座年处理能力为4206t的高温村镇生活垃圾热解处理站.该项目采用连续式垃圾热解处理工艺,在全密闭、无氧、高温条件下,使垃圾在炉内自动实现立式分层结构,对垃圾中有机物质进行间接加热融化热解反应,并分离获得热解油、气产品,同时热解炭(尾渣)用作有机肥料或制作环保砖.宁夏贺兰县为处理村镇生活垃圾,于2020年引进了村镇固体废弃物热解气化项目.该项目年处理12700t村镇生活垃圾.处理过程首先对垃圾进行粉碎烘干,制成棒状原料后运输进热解炉热解,产生热解气用于发电.对产生的气体进行无

害化处理,处理过程中残余的废渣和污水进行循环利用,使整个流程实现零污染排放.

随着垃圾热解技术自身不断发展以及在国内市场应用的逐渐成熟,村镇垃圾热解技术不再局限于针对国家政策倾斜地区量身建设的大型化示范工程,越来越多的环保设备生产厂家研发了适用范围广、规模小、环境友好的村镇生活垃圾热解处理设备,并在国内应用推广.某环保设备公司研制了一种可整体安装移动的一体化微型热解设备,可用于处理村镇垃圾中含量较多的废塑料、轮胎、橡胶,并将其转化为燃料油、钢铁和炭黑,日处理量为1~3t,集装箱式配置可实现热解装备的多区域及时应用,在国内陕西、山西、内蒙古等地区得到了应用.无锡某公司与高校合作研发的“小型垃圾热解气化处理成套装置”,垃圾日处理量为10~30t,可用于处理村镇可燃生活垃圾,在实现烟气回用供热的同时解决了环境污染问题,在我国四川、云南、广东、广西等地区得到了广泛工程应用.杭州某公司研发的低温磁化热解设备,日处理量为2t,设备可24h运行,不受地域和气候影响;占地面积小,操作简单,仅需配备一名操作人员,符合村镇地区的实际运行条件.可见在国家大力推进乡村生态文明建设的进程中,村镇生活垃圾热解设备也在与时俱进地不断发展完善,愈加趋向于适应村镇生活垃圾实际处理需求的技术导向,以期在村镇生活垃圾处理市场中得到更加广泛的应用.

表 5 近年来我国开展的村镇生活垃圾热解项目
Table 5 Rural household waste pyrolysis project in China in recent years

项目地址	运行年份	处理规模	项目规模	热解产物应用
云南富宁	2017	400t/d	占地 66667m ² ,投资 1.5 亿元	1.并网发电; 2.环保型建筑材料
青海黄田	2020	40t/d	不详	烟气净化后排放,灰渣填埋
广西昭平	2021	150t/d	总投资 5600 万元,厂房 3000 m ²	低温余热发电
宁夏贺兰	2020	35t/d	总占地面积 8000m ²	垃圾热解燃气发电
江西万载	2018	400t/d	拟投资 4.8 亿元,其中一期 2.5 亿元、二期 2.3 亿元	村镇生活垃圾经过处理后产生清洁 燃油、燃气、固体炭及电能
河北霸州	2016	200t/d	不详	1.净化后所得的热解气作为产品外卖 2.热解炭和油气分离净化产生的热解油送去流化床气 化,流化床气化产生的洁净的气化气作为旋转床燃气 再生燃料油、可燃气体
青海西大滩	2020	4206t/a	总投资 2543.40 万元	尾渣可用作有机肥料或制作环保砖,处理后的粗灰可 用作修路的路基
青海乌图美仁	2020	2738t/a	总投资 1095.74 万元	

4.3 村镇生活垃圾热解处理经济效益分析

在实现村镇垃圾“减量化、无害化”处理的基

基础上,生活垃圾热解技术在村镇地区的应用发展,还应考虑其经济效益.村镇生活垃圾热解项目的经济成本主要包括三部分^[89]:项目前期的投资建设成本、项目运行管理成本以及设备的折旧费用.由于项目为响应国家政策号召的社会性事业,所以不需要考虑税收问题^[90].村镇生活垃圾热解项目的经济收益主要来源于国家财政补贴和生活垃圾热解产物的售卖利润,同时由于其就地处置、低污染的处理特性,也节省了垃圾运输成本以及污染防治成本.

研究人员针对我国不同村镇地区的生活垃圾热解工程进行了经济性分析(表 6),通过计算不通规模热解工程所需的初投资以及运行管理和设备折旧费用,确定各个项目的经济投入成本,而后计算基于特定的经济回收形式下的项目利润,结合当地政府所提供的财政补贴,确定项目的投资回收期.综合看来,村镇生活垃圾热解项目能够通过技术化资源利用以及政府的经济支持,在 4~10a 内完成投资回收,进而获得较为可观的经济收益,尤其是热解发电项目.

表 6 村镇地区生活垃圾热解项目经济性分析
Table 6 Economic analysis of rural household waste pyrolysis project in China

项目地点	处理规模 (t/d)	项目初投资 (万元)	运行管理费用 (万元/a)	设备折旧费用 (万元/a)	经济回收形式	政府补贴 (元/t)	投资回收期 (a)	参考文献
天津	10	309	49.7	15.5	售电收益、金属回收、节省运输费用	60	5	[91]
北京	100	5900	405	518	售电收益、金属回收、节省运输费用	83	4	[91]
福建大田	400	13703	845.9	计入运行费用	外销燃气、外销电能、废金属回收、焦油回收	113	10	[92]
西藏自治区	10	502	69.9	25.1	金属资源回收	177.2	维持正常运行	[90]
西藏自治区	30	2450	107.4	81.7	节省运输费用	98	维持正常运行	[90]

5 结论与展望

相比于传统处理技术,热解技术规模灵活、过程清洁、设备简单且运行可靠,在对村镇生活垃圾就地无害化处理的同时,热解过程产生的油、气、炭产品也可有效补充村镇应用需求,因此热解技术是匹配村镇生活垃圾处理需求的理想选择.近年来,村镇生活垃圾热解相关的科学研究和科技立项发展迅速,装备研发与产业示范都呈现蓬勃发展的趋势.综合来看,热解技术处理村镇生活垃圾是政策和经济的双导向,有望在我国的中小规模垃圾处理中占主导地位.

但是目前村镇生活垃圾热解技术仍存在一些不足.首先,热解系统仍需进一步优化.科学的垃圾分类在我国村镇地区尚未全面实施,因此亟需研发与我国村镇实际情况相匹配的垃圾预处理系统,以保证热解反应的稳定性与热解产物的品质.热解过程需要消耗能量,因此如何优化热解单元,减少外部能源输入、降低热解处理成本,是热解系统面临的重要问题.其次,热解产物的应用缺乏规范.虽然垃圾热解的产物在村镇条件下都具有一定的应用前景,但实

际情况中很难做到成规模的热解油提炼、热解气净化发电以及热解炭改性提质.目前小规模村镇生活垃圾热解多倾向于将热解产物作为能源,直接燃烧供能.因此,产物的规范化利用以及与之相匹配的工艺调整机制,是热解系统需要解决的关键问题.

总体来看,村镇生活垃圾热解技术未来的发展应考虑如下几个方面:1)热解产物因地制宜的多元化应用.充分了解项目实施地垃圾特性以及产物应用市场,针对性匹配预处理工艺、热解过程控制,以及产物定向提质流程.充分利用热解技术的灵活性和产物的多样性,满足村镇生活垃圾处理和资源、能源供应的实际需求.2)建立健全村镇生活垃圾热解处理及设备研发相关标准、法规.目前垃圾热解处理仍遵照焚烧的相关标准,二者的技术差异在一定程度上导致了热解行业的乱象丛生,制约了热解技术的进一步发展.因此需加快制定垃圾热解气化相关标准,明确村镇生活垃圾处理政策,规范装备设计与市场管理,为热解技术的发展提供有力的政策指引与制度保障.3)新型村镇生活垃圾热解装备研发.匹配村镇地区小规模、低成本、短时间的垃圾处理需求,以集成装备的设备形式进入市场,通过“入口筛

选+热解减量+烟气净化”的技术链条,实现村镇生活垃圾的标准化处理.此外,还可搭建村镇生活垃圾处理大数据平台,有效应对各类常规村镇生活垃圾以及特殊垃圾处理,建立围绕市场反馈、系统优化、应急调度的村镇生活垃圾处理新模式,为村镇生态环境治理提供全面保障.

参考文献:

- [1] 席北斗,刘东明,李鸣晓,等.我国固废资源化的技术及创新发展 [J]. 环境保护, 2017,45(20):16-19.
Xi B D, Liu D M, Li M X, et al. Innovative development of solid wastes resource technology [J]. Environmental Protection, 2017,45 (20):16-19.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020 年城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjn/index.html>.
- [3] 王 佳,陈 蕊.美丽乡村背景下农村生活垃圾处理研究 [J]. 农村实用技术, 2019,(6):6-7.
Wang J, Chen R. Study on the treatment of rural household garbage in beautiful countryside [J]. Practical Rural Technology, 2019,(6):6-7.
- [4] 靳 琪,岳 波,王 琪,等.我国不同区域农村生活垃圾的产生、管理现状——基于抽样的村镇调查研究 [J]. 环境工程, 2018,36(10): 97-101.
Jin Q, Yue B, Wang Q, et al. Present situation of production and management of rural domestic refuse in different regions of China: based on survey of the sampled villages and towns [J]. Environmental Engineering, 2018,36(10):97-101.
- [5] 李 丹,陈冠益,马文超,等.中国村镇生活垃圾特性及处理现状 [J]. 中国环境科学, 2018,38(11):4187-4197.
Li D, Chen G Y, Ma W C, et al. Characteristics and treatment status of rural solid waste in China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(11):4187-4197.
- [6] 晏卓逸,岳 波,高 红,等.我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 [J]. 环境科学, 2017,38(7):3078-3084.
Yan Z Y, Yue B, Gao H, et al. Basic features of combustible rural garbage component and its spatial temporal difference in China [J]. Environmental Science, 2017,38(7):3078-3084.
- [7] 蔡 杰.基于 ASPEN Plus 的村镇垃圾热解气化燃烧模拟与试验 [D]. 杭州:浙江大学, 2021.
Cai J. Simulation and Test of Pyrolysis, Gasification and Combustion of Rural Waste Based on ASPEN Plus [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [8] 程 伟.北京城区和农村地区生活垃圾组成特性的对比分析 [J]. 再生资源与循环经济, 2020,13(1):17-22.
Cheng W. Comparative analysis of physical composition and characteristics of domestic waste in urban and rural areas of Beijing [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2020,13(1):17-22.
- [9] 韩智勇,费勇强,刘 丹,等.中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议 [J]. 农业工程学报, 2017,33(15):1-14.
Han Z Y, Fei Y Q, Liu D, et al. Yield and physical characteristics analysis of domestic waste in rural areas of China and its disposal proposal [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(15):1-14.
- [10] 何晶晶,张春燕,杨 娜,等.我国村镇生活垃圾处理现状与技术路线探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2010,29(11):2049-2054.
He P J, Zhang C Y, Yang N, et al. Present situation and technical treatment route of rural domestic waste treatment in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010,29(11):2049-2054.
- [11] 常永锋,刘明辉,李朝晖.浅析我国农村垃圾处置模式 [J]. 节能与环保, 2020,(8):24-25.
Chang Y F, Liu M H, Li Z H. Analysis of rural garbage disposal mode in China [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2020,(8):24-25.
- [12] Wang J Y, Cao Y, Yu G P, et al. Research on application of IOT in domestic waste treatment and disposal [C]. IEEE, 2014.
- [13] 郇旭萍.城市生活垃圾处理、处置和利用技术分析 [J]. 中国资源综合利用, 2021,39(9):99-101.
Tai X P. Technical analysis of municipal solid waste treatment, disposal and utilization [J]. China Resources Comprehensive Utilization. 2021,39(9):99-101.
- [14] 胡林飞,方旭东.城市生活垃圾处置和利用技术分析 [J]. 资源节约与环保, 2021,(6):137-138.
Hu L F, Fang X D. Technical analysis of disposal and utilization of municipal solid waste [J]. Resource Conservation and Environmental Protection. 2021,(6):137-138.
- [15] Li P, Wang K, Meng L, et al. An overview of municipal organic waste disposal in China [J]. Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development, 2015.
- [16] 孔 晶,李 宣,陈正件,等.垃圾处理及其热解气化技术应用现状 [J]. 当代化工研究, 2021,(22):107-109.
Kong J, Li X, Chen Z J, et al. Current status of municipal solid waste treatment and pyrolysis gasification technology application [J]. Modern Chemical Research, 2021,(22):107-109.
- [17] 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.
Qian Z Q, Liao B J, Sun Q, et al. Application of pyrolysis technology in the treatment of rural household garbage [J]. Rural Economy and Science Technology, 2021,32(17):14-16.
- [18] 张国治,魏珞宇,葛一洪,等.我国农村生活垃圾处理现状及其展望 [J]. 中国沼气, 2021,39(4):54-61.
Zhang G Z, Wei L Y, Ge Y H, et al. Present situation and prospect of domestic waste disposal in rural areas of China [J]. China Biogas, 2021,39(4):54-61.
- [19] 宋志伟,吕一波,梁 洋,等.国内外城市生活垃圾焚烧技术的发展现状 [J]. 环境卫生工程, 2007,(1):21-24.
Song Z W, Lv Y B, Liang Y, et al. Present situation of the development of municipal domestic waste incineration technology [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2007,(1):21-24.
- [20] 陈玲玲.城市生活垃圾的处理方法及应用 [J]. 环境与发展, 2020, 32(4):86-87.
Chen L L. Treatment method and application of urban domestic garbage [J]. Huan Jing Yu Fa Zhan, 2020,32(4):86-87.
- [21] 何晶晶.农村生活垃圾处理的目标、原则和评价方法浅议 [J]. 环境卫生工程, 2018,26(1):52-55.
He P J. Target, principle and assessment method of waste treatment in small towns and rural area [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018,26(1):52-55.
- [22] Fahmy T Y A, Fahmy Y, Mobarak F, et al. Biomass pyrolysis: past,

- present, and future [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020,22(1):17–32.
- [23] Fisher T, Hajaligol M, Waymack B, et al. Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002,62(2):331–349.
- [24] Jahirul M, Rasul M, Chowdhury A, et al. Biofuels production through biomass pyrolysis —A technological review [J]. *Energies*, 2012,5(12): 4952–5001.
- [25] Bridgwater A V, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass [J]. *Organic Geochemistry*, 1999,30(12):1479–1493.
- [26] 安 淼.城市生活垃圾热解处理工艺研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2018,43(3):153–155.
- An M. Study on pyrolysis process of municipal solid waste [J]. *Environment and sustainable development*, 2018,43(3):153–155.
- [27] 曹凤中,安 祺,李 京.生活垃圾热解气化技术的突破 [J]. *黑龙江环境通报*, 2019,43(3):1–5.
- Cao F Z, An Q, Li J. Breakthrough of pyrolysis and gasification technology of domestic waste [J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2019,43(3):1–5.
- [28] 辛 馨.城市生活垃圾热解过程HCl、H₂S、NH₃的析出特性研究 [D]. 武汉:武汉轻工大学, 2019.
- Xin X. Release behavior of HCl, H₂S, NH₃ during municipal solid waste pyrolysis process [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [29] 刘红盼,倪海涛,朱 江,等.基于 Citespace 的生活垃圾热解技术前沿态势分析 [J]. *广州化工*, 2020,48(18):107–109.
- Liu H P, Ni H T, Zhu J, et al. Analysis on the frontier trend of domestic waste pyrolysis technology based on Citespace [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020,48(18):107–109.
- [30] 袁国安.生活垃圾热解气化技术应用现状与展望 [J]. *环境与可持续发展*, 2019,44(4):66–69.
- Yuan G A. Present status and prospect of municipal solid waste pyrolysis and gasification technology [J]. *Environment and sustainable development*, 2019,44(4):66–69.
- [31] Hasan M M, Rasul M G, Khan M M K, et al. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021,145:111073.
- [32] Altafini C R, Wander P R, Barreto R M. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003,44(17):2763–2777.
- [33] Leung D Y C, Yin X L, Wu C Z. A review on the development and commercialization of biomass gasification technologies in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004,8(6):565–580.
- [34] Lv P M, Xiong Z H, Chang J, et al. An experimental study on biomass air–steam gasification in a fluidized bed [J]. *Bioresource Technology*, 2004,95(1):95–101.
- [35] Beheshti S M, Ghassemi H, Shahsavan-Markadeh R. Process simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015,94:345–352.
- [36] Ding K, Zhong Z, Zhong D, et al. Pyrolysis of municipal solid waste in a fluidized bed for producing valuable pyrolytic oils [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016,18(4):1111–1121.
- [37] 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——I.热解条件对热解产物分布的影响 [J]. *太阳能学报*, 2000,(4): 333–340.
- Li S Q, Li A M, Yan J H, et al. Pyrolysis of the biomass wastes pyrolysis in a rotary kiln I: influences of reaction conditions on pyrolysis product distribution [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2000, (4):333–340.
- [38] Li S Q, Yao Q, Chi Y, et al. Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004,43(17):5133–5145.
- [39] Martos S, Mattana S, Ribas A, et al. Biochar application as a win-win strategy to mitigate soil nitrate pollution without compromising crop yields: a case study in a Mediterranean calcareous soil [J]. *Journal of Soils And Sediments*, 2020,20(1):220–233.
- [40] Pandey D, Daverey A, Arunachalam K. Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,255:120267.
- [41] González J F, Román S, Encinar J M, et al. Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009,85(1/2): 134–141.
- [42] Foong S Y, Liew R K, Yang Y, et al. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020,389:124401.
- [43] Bazargan A, Rough S L, McKay G. Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2014,70:489–497.
- [44] Zhu L, Yin S, Yin Q, et al. Biochar: A new promising catalyst support using methanation as a probe reaction [J]. *Energy Science & Engineering*, 2015,3(2):126–134.
- [45] 王 菁,蔡佳校,张 柯,等.不同组成纤维素热解炭的燃烧行为分析 [J]. *烟草科技*, 2017,50(7):76–81.
- Wang J, Cai J X, Zhang K, et al. Analyses on combustion behaviors of cellulose pyrochars of different compositions [J]. *Tobacco Science and Technology*, 2017,50(7):76–81.
- [46] 朱丹晨,胡 强,何 涛,等.生物质热解炭化及其成型提质研究 [J]. *太阳能学报*, 2018,39(7):1938–1945.
- Zhu D C, Hu Q, He T, et al. Integrate quality upgrading study of biomass through pyrolysis and densification [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018,39(7):1938–1945.
- [47] Bennett N M, Helle S S, Duff S J B. Extraction and hydrolysis of levoglucosan from pyrolysis oil [J]. *Bioresource Technology*, 2009,100(23):6059–6063.
- [48] Aho A, Kumar N, Eränen K, et al. Catalytic pyrolysis of woody biomass in a fluidized bed reactor: Influence of the zeolite structure [J]. *Fuel*, 2008,87(12):2493–2501.
- [49] Tsai W, Lee M, Chang Y. Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions [J]. *Bioresource Technology*, 2007,98(1):22–28.
- [50] 刘 璐,张安强,吴小飞,等.温度对垃圾热解液体产物性质的影响 [J]. *环境工程*, 2016,34(3):137–141.
- Liu L, Zhang A Q, Wu X F, et al. Characteristics of pyrolysis liquid from municipal solid waste under different temperature [J]. *Environmental Engineering*, 2016,34(3):137–141.
- [51] 马大朝,贾 瑛,冯庆革,等.生活垃圾灰渣对生物质热解油特性的影响 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019,44(6):1772–1780.
- Ma D C, Jia Y, Feng Q G, et al. Influence of municipal solid waste ash

- or slag on characteristics of biomass pyrolysis oil [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019,44(6):1772-1780.
- [52] 祝敏敏.生物质催化热解制备轻质生物油研究 [D]. 南京:东南大学, 2019.
- Zhu M M. Studies on biomass catalytic pyrolysis for producing light bio-oil [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [53] 贾晋炜.生活垃圾和农业秸秆共热解及液体产物分离研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2013.
- Jia J Y. Co-pyrolysis of municipal solid waste with agricultural stalk and separation of pyrolysis liquid [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2013.
- [54] He M, Xiao B, Liu S, et al. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalysts [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010,87(2):181-187.
- [55] Kantarelis E, Zabanitou A. Valorization of cotton stalks by fast pyrolysis and fixed bed air gasification for syngas production as precursor of second generation biofuels and sustainable agriculture [J]. Bioresource Technology, 2009,100(2):942-947.
- [56] 刘 照.城市生活垃圾的热解气特性及催化制合成气 [D]. 武汉:武汉轻工大学, 2018.
- Liu Z. Characteristics of pyrolysis gas of municipal solid waste and preparation of synthetic gas with catalyst [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018.
- [57] 杨 迪.城市生活垃圾与农林废弃物共热解及热解液分离提质研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2017.
- Yang D. Co-pyrolysis of municipal solid waste with agricultural and forest residues and separation and upgrading of pyrolysis liquids [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2017.
- [58] 胡 晴.小型生活垃圾双解炉设计及工艺过程研究 [D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018.
- Hu Q. Design of a pilot-scale "double-solution" technology for domestic waste and study on the process [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [59] 王 颖.垃圾热解气化焚烧炉的优化模拟研究 [D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2018.
- Wang Y. Optimization simulation of waste pyrolysis and gasification incinerator [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.
- [60] 曾毅夫,刘 强,邱敬贤,等.分散式垃圾热解气化与烟气净化装置的研究 [J]. 能源环境保护, 2018,32(5):37-40.
- Zeng Y F, Liu Q, Qiu J X, et al. Research on pyrolysis and gasification of decentralized garbage and flue gas purification equipment [J]. Energy Environmental Protection, 2018,32(5):37-40.
- [61] 曹桦钊,邓 晨,黎 莉,等.超高热值垃圾热解气化下吸式出风口应用研究 [J]. 环境卫生工程, 2019,27(1):54-56.
- Cao H Z, Deng C, Li L, et al. Application research on downdraft outlet of ultra-high calorific value waste pyrolysis gasification [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019,27(1):54-56.
- [62] 张藤元,冯俊小,冯 龙.基于 Aspen plus 的生活垃圾热解气化模拟及正交优化 [J]. 环境工程, 2021:1-12.
- Zhang T Y, Feng J X, Feng L. Simulation and orthogonal optimization on pyrolysis and gasification of MSW based on Aspen plus [J]. Environmental Engineering, 2021:1-12.
- [63] 付建英,余 权,马瀚程,等.基于 Aspen Plus 的非均质垃圾与秸秆的共热解气化模拟 [J]. 能源与环境, 2020,(5):2-5.
- Fu J Y, Yu Q, Ma H C, et al. Simulation of co-pyrolysis gasification of heterogeneous garbage and straw based on Aspen Plus [J]. Energy and Environment, 2020,(5):2-5.
- [64] 刘雨豪,李爱军,陈郭石.垃圾低温热解的特性模拟及过程优化 [J]. 应用能源技术, 2019,(5):1-6.
- Liu Y H, Li A J, Chen G S, et al. Characteristics simulation and process optimization on low temperature pyrolysis of garbage [J]. Applied Energy Technology, 2019,(5):1-6.
- [65] Niu M, Huang Y, Jin B, et al. Simulation of syngas production from municipal solid waste gasification in a bubbling fluidized bed using aspen plus [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013,52(42):14768-14775.
- [66] 张 玉,翟 明,张 波,等.生物质旋风热解炉气相等温流场数值模拟 [J]. 节能技术, 2015,33(5):413-419.
- Zhang Y, Zhai M, Zhang B, et al. Numerical simulation for the gas-phase isothermal flow field of a biomass cyclone pyrolysis burner [J]. Energy Conservation Technology, 2015,33(5):413-419.
- [67] 王 恒.流化床内生物质与床料颗粒混合流动特性研究及热解过程 DEM-CFD 数值模拟 [D]. 南京:东南大学, 2020.
- Wang H. Study on mixed flow characteristics of biomass and bed material particles in fluidized bed and numerical simulation of pyrolysis process based on DEM-CFD method [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [68] 廖艳芬,张曼玉,陈顺凯,等.基于 FLUENT 的垃圾热解气 MILD 燃烧研究 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021,49(2):9-16.
- Liao Y F, Zhang M Y, Chen S K, et al. Study on MILD combustion of MSW pyrolysis gas based on FLUENT [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021,49(2):9-16.
- [69] 尹怀永,陈广华,张 强.热解炉温度随动控制系统设计与仿真 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2017,(6):37-40.
- Yin H Y, Chen G H, Zhang Q. Design and simulation of the pyrolysis furnace temperature servo control system [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2017,(6):37-40.
- [70] Chen G, Zhang R, Guo X, et al. Comparative evaluation on municipal sewage sludge utilization processes for sustainable management in Tibet [J]. Science of The Total Environment, 2021,765:142676.
- [71] 张思成.垃圾热解耦合燃煤混烧的实验研究与数值模拟 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
- Zhang S C. Experimental study and numerical simulation on waste pyrolysis combined with coal combustion [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [72] 黄付平,黄智宁,谢启军,等.低温热解耦合高压等离子体技术处理农村生活垃圾工程应用 [J]. 环境工程, 2019,37(5):196-199.
- Huang F P, Huang Z Y, Xie Q J, et al. Application of low temperature pyrolysis coupled high pressure plasma technology to rural domestic waste treatment [J]. Environmental Engineering, 2019,37(5):196-199.
- [73] 郝彦龙,侯成林,付丽霞,等.生活垃圾无害化处理工程设计实例 [J]. 环境工程, 2020,38(2):135-139.
- Hao Y L, Hou C L, Fu L X, et al. Engineering design of a municipal solid waste disposal project [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(2):135-139.
- [74] Chouhan A P S, Sarma A K. Modern heterogeneous catalysts for biodiesel production: A comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(9):4378-4399.
- [75] 李东炎.城市生活垃圾催化热解实验研究 [D]. 天津:天津大学, 2017.

- Li D Y. Experimental research on catalytic pyrolysis of municipal solid waste [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [76] 贾顺杰. 不同类型分子筛催化热解陈腐垃圾性能研究 [J]. 工业催化, 2020,28(10):75-80.
- Jia S J. Study on catalytic pyrolysis of stale waste by different zeolite catalysts [J]. Industrial Catalysis, 2020,28(10):75-80.
- [77] 周昭志, 池涌, 汤元君, 等. 钙基添加剂对生活垃圾热解过程含氯污染物排放的影响 [J]. 现代化工, 2020,40(9):121-125.
- Zhou Z Z, Chi Y, Tang Y J, et al. Effect of calcium-based additives on emission of chlorine-containing contaminants during MSW pyrolysis [J]. Modern Chemical Industry, 2020,40(9):121-125.
- [78] 陈思. 生物质热解油中多环芳烃的分布特征及其调控规律研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- Chen S. Distribution characteristics and regulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in biomass pyrolysis oil [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [79] Han L, Wang Q, Ma Q, et al. Influence of CaO additives on wheat-straw pyrolysis as determined by TG-FTIR analysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010,88(2):199-206.
- [80] Veses A, Aznar M, Martínez I, et al. Catalytic pyrolysis of wood biomass in an auger reactor using calcium-based catalysts [J]. Bioresource Technology, 2014,162:250-258.
- [81] Miskolczi N, Ateş F, Borsodi N. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char and pyrolysis oil properties [J]. Bioresource Technology, 2013,144:370-379.
- [82] Mochizuki T, Atong D, Chen S, et al. Effect of SiO₂ pore size on catalytic fast pyrolysis of Jatropha residues by using pyrolyzer-GC/MS [J]. Catalysis Communications, 2013,36:1-4.
- [83] Onwudili J A, Muhammad C, Williams P T. Influence of catalyst bed temperature and properties of zeolite catalysts on pyrolysis-catalysis of a simulated mixed plastics sample for the production of upgraded fuels and chemicals [J]. Journal of the Energy Institute, 2019,92(5):1337-1347.
- [84] Wang J, Jiang J, Ding J, et al. Promoting Diels-Alder reactions to produce bio-BTX: Co-aromatization of textile waste and plastic waste over USY zeolite [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,314:127966.
- [85] 郑小峰, 樊文斌, 刘娟, 等. Fe-Mo/ZSM-5 催化剂对生物质热解产物分布的影响 [J]. 当代化工, 2021,50(11):2549-2553.
- Zheng X F, Fan W B, Liu J, et al. Effect of Fe-Mo/ZSM-5 catalyst on the distribution of biomass pyrolysis products [J]. Contemporary Chemical Industry, 2021,50(11):2549-2553.
- [86] 邓同辉, 黎建刚, 李琴, 等. 改性 HZSM-5 对油茶籽壳催化热解特性的影响 [J]. 能源研究与管理, 2021,(2):59-64.
- Deng T H, Li J G, Li Q, et al. Effect of modified HZSM-5 on catalytic pyrolysis characteristics of camellia nut shell [J]. Neng yuan Yan jiu Yu Guan li, 2021,(2):59-64.
- [87] 傅继敏, 仲兆平, 吴维涛. 金属类催化剂与复合分子筛协同催化特性研究 [J]. 太阳能学报, 2021,42(11):379-386.
- Fu J M, Zhong Z P, Wu W T, et al. Study on synergistic catalytic characteristics of metal catalysts and composite molecular sieves [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021,42(11):379-386.
- [88] 刘壮, 田宜水, 马大朝, 等. 生物质热解的典型影响因素及技术研究进展 [J]. 可再生能源, 2021,39(10):1279-1286.
- Liu Z, Tian Y S, Ma D C, et al. Research progress on typical influencing factors and technology of biomass pyrolysis [J]. Renewable Energy Resources, 2021,39(10):1279-1286.
- [89] 戴大丰. 垃圾热解项目可研及初设阶段优化工程投资的主要举措 [J]. 工程技术研究, 2020,5(7):192-193.
- Dai D F. Main measures of optimizing engineering investment in the feasibility study and initial establishment stage of garbage pyrolysis project [J]. Engineering Management, 2020,5(7):192-193.
- [90] 孟德安. 高原地区乡镇生活垃圾热解焚烧特性研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
- Meng D A. Study on pyrolysis incineration characteristics of township domestic waste in plateau region [D]. Lhasa: Tibet University, 2021.
- [91] 潘敏慧. 村镇生活垃圾热解气化特性的实验研究与工艺设计 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- Pan M H. Experimental study on the pyrolysis and gasification characteristics of solid waste in villages and process design [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [92] 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.
- Zhang Q. Pyrolysis-gasification technology development and process simulation analysis for MSW treatment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

作者简介: 颜蓓蓓(1981-), 女, 教授, 研究方向为固体废物资源化利用及污染物控制. 发表论文 60 篇.