

面向低碳环保的生活垃圾资源化技术进展与应用

陈冠益^{1, 2, 3}, 陈欣², 颜蓓蓓², 李健², 陶俊宇¹, 孙昱楠¹, 周生权²

(1. 天津商业大学 环境能源+X 创新实验室, 天津 300134; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 3. 西藏大学 生态环境学院, 西藏 拉萨 850012)

摘要:生活垃圾的清洁处理关乎环境保护、循环经济发展和民生福祉。现有的生活垃圾处理技术主要包括: 填埋、焚烧、热解、气化、水热、(好氧)堆肥、(厌氧)消化/发酵等。我国生活垃圾清运量以及社会对清洁能源的需求与日俱增, 生活垃圾的环境污染属性与能量迁移转化高度相关, 因此生活垃圾资源化技术的发展与应用备受关注。在双碳目标下, 生活垃圾资源化技术应倡导绿色、环保、低碳。既要实现生活垃圾的高效利用, 又要加快降低碳排放步伐, 引导创新绿色技术。本文简述了生活垃圾资源化技术分类及特征, 以及主要技术的研究与应用进展, 并对资源化技术的低碳环保化发展机遇与挑战进行了分析, 最后展望了垃圾分类、人工智能技术、绿氢技术对生活垃圾资源化处理与绿色低碳化发展的重要作用。本文从能源转化与减污降碳的角度展开分析, 为生活垃圾资源化处理技术的发展提供指导。

关键词: 生活垃圾; 资源化技术; 碳排放; 热解气化; 应用与发展

中图分类号: X705

文献标识码: A

Low-carbon and environmental-friendly municipal solid waste treatment technologies for energy utilization: A review

CHEN Guanyi^{1, 2, 3}, CHEN Xin², YAN Beibei², LI Jian², TAO Junyu¹,
SUN Yunan¹, ZHOU Shengquan²

(1. *Interdisciplinary Innovation Lab for Environment & Energy, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China*; 2. *School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*; 3. *School of Environment and Ecology, Tibet University, Lhasa 850012, China*)

Abstract: The efficient treatment and clean disposal of municipal solid waste (MSW) are crucial to urban environmental protection and economic development. Existing municipal solid waste treatment technologies mainly include landfill, incineration, pyrolysis, gasification, hydrothermal method, (aerobic) compost, (anaerobic) digestion/fermentation, etc. The production of domestic MSW is increasing, as well as the energy demand of the society, and thus the conversion from MSW to energy is of great importance. Under the goal of carbon neutrality, the treatment of MSW should develop toward greening, protecting environment and reducing carbon emission. It should not only achieve efficient utilization of MSW, but also accelerate the pace of reducing carbon emissions and guide innovation in green technology. This paper briefly described the classification and characteristics of waste to energy technologies. The research and application progress of main technologies were summarized, and the opportunities and challenges were analyzed towards low-carbon and environment-friendly development. Finally, the applications of sorting, artificial intelligence and green hydrogen technologies for MSW treatment were reviewed. This paper provides useful information from the views of energy conversion and carbon reduc-

收稿日期: 2022-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(52122609)

第一作者: 陈冠益(1970—), 男, 江西玉山人, 教授, 主要从事生物质能源利用与环境保护相关研究。E-mail: chengy@tjcu.edu.cn

通讯作者: 李健(1992—), 男, 山西吕梁人, 助理研究员, 主要从事生物质气化技术研究。E-mail: lijian_2014@tju.edu.cn

tion, benefiting the development of MSW treatment.

Keywords: Municipal solid waste; Energy conversion technology; Carbon reduction; Pyro-gasification; Application and development

0 引言

生活垃圾是指日常生活中或为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物,以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物,包括四大类:可回收垃圾、有害垃圾和厨余垃圾/湿垃圾、其他垃圾/干垃圾。生活垃圾依据来源通常包括一般生活垃圾、厨余垃圾、园林绿化垃圾、餐饮垃圾、陈腐垃圾等。生活垃圾能源化处理技术主要包括:焚烧(与秸秆、煤的耦合燃烧)、热解、气化、(厌氧)消化/发酵等以及衍生燃料化、水热、高温或等离子熔融气化等技术。据《中国统计年鉴 2021》,2020 年全国城市垃圾清运量共 23 511.7 万 t,结合我国巨大的生活垃圾减量化需求以及清洁能源需求,生活垃圾的能源化处置与转化利用一直是行业重点发展方向。

2020 年 9 月 22 日,中国在第 75 届联合国大会上正式提出“在 2030 年力争实现碳达峰、2060 年力争实现碳中和”的目标;2021 年 2 月 22 日国务院印发的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》,对双碳战略目标的推进落实进行了具体部署。在双碳目标下,生活垃圾能源化技术既要求更高的处理效率和能源转化效率,又需进一步提高环保和低碳属性。如何走出一条适应我国国情、顺应低碳发展目标的生活垃圾能源化发展道路,是垃圾处理与循环经济产业面临的重大挑战。

本文简述了目前国内垃圾能源化技术分类及特征、主要技术的研究与应用进展,并对能源化技术的低碳环保化发展机遇与挑战进行了分析,最后展望了垃圾分类、人工智能技术、绿氢技术、协同处理技术等对生活垃圾能源化处理与绿色低碳发展的重要作用。

1 能源化技术分类及特征

生活垃圾的能源化是指通过热化学、生物、物理转化方法,将生活垃圾直接转化为热能,或进一步转化为气、油、固体燃料或者电能。基于热化学反应的生活垃圾能源化技术包括焚烧、热解、气化及水热等,基于生物反应的能源化技术主要指厌氧发酵,而基于物理转化的能源化技术包括垃圾

衍生燃料制备技术、成型技术等。

1.1 热化学转化技术

1.1.1 焚烧

焚烧是指在氧气充足的情况下,生活垃圾有机物发生激烈的热化学分解等传热、传质过程。焚烧是我国最近 10 年发展最快的垃圾处理技术,未来仍不可或缺。大规模生活垃圾焚烧多采用炉排炉技术,也有一部分采用流化床焚烧技术。炉排炉技术炉内温度一般控制在 800~1 200 °C,生活垃圾在高温下通过热分解、燃烧、熔融等反应被氧化,体积和质量大幅减小。焚烧排放的烟气中包括水分、CO₂、CO、H₂、CH₄、挥发性有机化合物(VOCs)、多环芳烃(PAHs)、二噁英、呋喃和焦油,也包括飞灰。垃圾焚烧飞灰为危险废弃物,需要进行严格的净化脱除。产生的炉渣中通常包含 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、Na₂O 等无机物^[1],以及 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Hg 和 Pb 等重金属^[2]。焚烧可以实现生活垃圾高效、安全、快速减量,垃圾中有机病虫害、病原体等可以被彻底清除,大量的重金属也可实现稳定化。同时焚烧产生高温烟气可以通过余热锅炉转化为热能和电能。但生活垃圾焚烧工艺复杂,设备投资大,厂房占地面积大,尤其严格的环保要求下烟气处理等环保投入成本大,对于小规模垃圾处理工程而言,成本偏高,同时焚烧烟气中含有二噁英等有毒有害物质,容易引起敏感的二次污染风险及社会邻避效应。

发电是垃圾焚烧实现能源化的主要途径。因为上网电价的优惠以及前端垃圾处置的地方补贴,使得垃圾焚烧发电项目受到市场的青睐。以日处理 1 600 t 的垃圾焚烧发电厂为例,发电效率为 400 kW·h/t,项目全年发电量达 2.2 亿 kW·h,相当于减少了约 7 万 t 标准煤燃烧发电的 CO₂ 排放量^[3]。

1.1.2 热解

热解是指是在无氧或缺氧以及高温的条件,有机物发生适度的热化学分解的过程。依据温度、加热速率、停留时间的不同,热解可分为慢速热解(300~700 °C,0.1~1 °C/s,10~100 min)、快速热解(400~500 °C,10~200 °C/s,30~1 500 ms)、闪速热解(800~1 000 °C,1 000 °C/s,0.5 s)^[4]。热解的主要燃料产物有热解油、热解炭和热解气,通

过工艺控制与设备选型,可实现对热解产物的有效调配^[5]。

生活垃圾热解具有灵活适用于小规模处理、二次污染相对容易控制且二噁英释放得到有效抑制、设备简单、投资成本低、可获得高附加值产品(如燃料油、燃料气、热解炭)、以及产物品质量灵活可调的优点^[6]。然而,生活垃圾往往具有较高的含水率,而热解总体上属于吸热反应,因此生活垃圾热解过程需要持续的外部能源输入,加上生活垃圾存在传热传质困难、加热不均匀、炉膛易结渣等问题,导致其运行控制复杂且成本较高。目前热解技术主要应用于 50 t/d 以下规模的中小城镇垃圾处理。

利用热解实现生活垃圾的能源化主要依赖于其能源产品的产生。热解炭除制备炭肥、用作土壤改良剂、吸附剂等材料以外^[7],还可以作为固体燃料直接燃烧;垃圾热解产生的热解油和热解气是理想的补充燃料,热解技术在村镇范围的应用不仅解决了中小规模垃圾处理的难题,也为村镇提供了一种便捷的能量来源。

1.1.3 气化

气化是指在缺氧以及高温的条件,生活垃圾发生快速热化学分解的过程,是一种基于热化学转化的生物质燃气化过程。在气化炉内,生活垃圾在气化介质氛围下(O_2 、 CO_2 、水蒸气等),发生干燥、热解、还原、氧化等一系列反应,最终形成气化燃气的过程^[7]。常规生活垃圾气化燃气由 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 和微量 C_2H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_6 的混合物组成^[4],热值在 $4\sim 10\text{ MJ/Nm}^3$,可用于燃烧供热、发电、合成化学品(如甲醇、二甲醚和氨^[8])、合成固体含氧燃料、以及分离出氢用于燃料电池等^[9]。

气化技术的反应剧烈程度、固相减量程度介于焚烧和热解反应之间。相比于焚烧,气化可以实现生活垃圾的燃气化转化,形成的燃气产品可以长距离输送,其后续的转化利用形式更为多样,同时气化过程产生的飞灰等污染物显著少于焚烧,其投资、运行成本更低。而相比于热解,气化虽然产物较为单一,但不需要持续的外部能量输入,使其在处理规模和成本上具有明显优势。同时气化对垃圾的减量化效果优于热解,其固相残渣产率通常低于 20%。在气化过程中引入高温熔融或者等离子体熔融,可显著提高气化效率,提升垃圾处理效率。等离子体气化处理生活垃圾,首先将废物加热干燥蒸发水分,在热解区分解为 H_2

和 CO 合成气,剩余无机物和大分子有机物下降到熔融区,在等离子体瞬间高温的作用下,有机物(二噁英和呋喃等)进一步裂解,无机物转化为稳定的玻璃态^[10]。

1.1.4 水热

水热技术是指在一定的温度和压力条件下,以水为溶剂和反应介质转化生物质原料的过程。能源化转化中的水热技术包括水热炭化、水热液化和水热气化(超临界湿气化)。其中,水热炭化是指在亚临界水环境,温度 $250\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$,压力 $2\sim 10\text{ MPa}$ 条件下,原料转化为水热炭、含有高附加值有机物的液体和气相产物。

水热炭具有很多内在的优势,如尺寸均一,形貌规则,理化稳定性好,且表面富含大量的含氧官能团。因此,水热炭材料可在环境修复、催化剂载体以及超级电容器等方面存在广泛的应用。将原料经过一定的水热交联碳化处理后,可以得到尺寸均一、形貌较好的炭,通过合成改质可以作为高效稳定具有纳米尺度的碳功能材料。生活垃圾通过水热技术得到的水热炭,从能量密度上而言,可作为复合固体燃料直接燃用,从而实现生活垃圾的能源化转化。

生活垃圾处理的水热技术近年来得到了越来越多的关注,其在餐厨(厨余)垃圾、污泥等高含水生活垃圾的处理领域体现出独特的优势。利用连续批式的高温高压反应釜,不仅可以实现对生活垃圾的彻底无害化处理,同时也可以产生氢气、水热炭等能源产品,以及腐殖酸等农业化工产品。通过添加催化剂、调整溶剂成分、优化反应条件等方式,可以降低反应能耗,并进一步提升水热炭的产率和品质。

1.2 生物转化技术

厌氧发酵是在厌氧条件下,借助微生物作用,将有机物转化可燃沼气的慢速反应过程。厌氧发酵过程包括水解酸化、产氢产乙酸、产甲烷三个阶段,有机物分子通过水解,分解成糖、氨基酸和脂肪酸等可溶有机物,并进一步酸化生成挥发性脂肪酸(VFAs),VFAs 通过产乙酸作用转化为乙酸、 H_2 和 CO_2 ,最后通过产甲烷菌作用转化为 CH_4 和 CO_2 。

厌氧发酵是一项成熟的有机固废能源化技术,反应条件温和、过程可控、且产物为高热值的沼气^[4],已成功应用于秸秆、畜禽粪便等有机固废的处理。然而厌氧发酵处理生活垃圾还存在一些

限制与挑战。相比于上述的热化学技术,厌氧发酵工艺周期长,转化率低,无法实现对无机组分的无害化、稳定化处理,且伴随着垃圾沼渣、沼液等副产物的大量产生,副产物的出路是个问题,也易造成二次污染。

1.3 物理转化技术

生活垃圾可以分为可燃组分、不可燃组分、高含水组分。其中筛选出的可燃组分经过破碎、干燥、加药、压缩成型等工艺处理可以制备热值高、燃烧充分稳定、易于储存和运输的垃圾衍生燃料(RDF)^[11]。RDF 主要由碳基衍生物组成,包括纸张、塑料、木材和纺织品等^[12],可以替代化石燃料广泛应用,或与化石燃料共燃烧降低燃料成本。

1.4 耦合/组合技术

上述单一的生活垃圾资源化技术在应用过程中存在减量化不彻底、资源化效率低、二次污染排放高或者处理强度不高不灵活等缺陷,而通过技术耦合或组合是实现工艺优化的可行手段。组合技术通常指两个或多个彻底进行的反应过程的组合,例如生活垃圾彻底气化,制备得燃气进行燃烧,即为气化与燃烧的组合;耦合技术是指两个或多个技术在恰当的反应程度相互衔接,实现系统在某些环节的最优化。耦合技术的应用不仅可以有效处理生活垃圾,提高资源利用效率,还可以降低技术成本,实现更高效的生活垃圾减量化、无害化、低碳资源化转化。例如将热解与焚烧进行耦合,对生活垃圾进行可控热解,使重金属等污染物固化在热解残渣中,在对热解形成的油、气产物进行燃烧,燃烧释放的能量用于维持热解反应。此耦合技术不仅避免了直接焚烧带来的严重的污染问题,同时也通过自供能的形式降低了热解成本,对热解油气产物的燃烧利用也避免了低品位能源难以处置的现实问题。另一种具有前景的耦合技术是厌氧发酵技术与热解气化的耦合。先对生活垃圾进行一定程度的厌氧发酵,使生活垃圾中的可降解有机物迅速转化为高品质沼气。随后对沼渣进行热解气化制备可燃燃气。此耦合技术不仅解决了厌氧发酵过程木质素类生物质无法转化利用的难题,处理了厌氧发酵产生的沼渣副产物,还大幅缩短系统运行周期,提高系统燃气化效率,正成为目前研究和应用的热点。

在双碳目标的指引下,越来越多的低碳技术以耦合的形式引入到传统的生活垃圾资源化过程中。在生活垃圾焚烧、热解气化的工艺中引入相

应的碳分离、碳捕集、碳封存技术,例如,垃圾生物能-碳捕集与封存(BECCS 系统技术),不仅可提高能源产物(尤其是燃气产品)的品质,降低化石燃料利用造成的碳排放,同时也可实现行业负碳发展,进一步贡献双碳目标。

2 资源化技术研究进展与应用

本节主要针对焚烧、热解气化、厌氧发酵等资源化技术展开论述,详细分析三类资源化技术的国内外应用情况以及低碳化环保发展潜力。

2.1 焚烧技术

焚烧是我国目前应用占比最高的城市生活垃圾终端处理技术。根据《中国统计年鉴》,我国2020年生活垃圾无害化处理量约2.34亿t,其中焚烧处理量约为1.46亿t(占比达62.4%);生活垃圾处理能力963460t/d,其中焚烧处理能力567804t/d(占比达58.9%),全国共建有焚烧处理厂463座。

目前我国常规的生活垃圾焚烧发电厂的工艺流程包括4个系统:(1)垃圾接收、贮存及运输系统;(2)垃圾焚烧系统;(3)热力回收系统;(4)末端处理系统。垃圾经过称重后卸料,在垃圾贮坑进行搅拌、混合、脱水,被吊车输送至垃圾焚烧系统,在焚烧炉内,垃圾依次通过干燥段、燃烧段和燃烬段,实现充分燃烧。从炉膛出来的高温烟气进入余热锅炉,发生热交换,余热锅炉吸收热量产生过热蒸汽,输送至汽轮机做功。最后对产生的烟气、炉渣、飞灰进行末端处理。

生活垃圾焚烧处理的烟气中约2/3的二氧化碳来源于生活垃圾中其他垃圾类别所含的生物质碳,为更好地实现减排降碳的目标,碳捕集和封存技术可以助力生活垃圾焚烧发电实现负碳^[13]。根据国外应用案例报道,挪威奥斯陆郊区的焚烧发电厂每年焚烧40万t生活垃圾,CO₂排放量占整个城市CO₂排放的15%。该厂2022年开始全面运行碳捕集和封存技术,使用壳牌Cansolv二氧化碳捕集系统,基于胺的先进技术,从烟气中捕集二氧化碳。目前每年可实现40万t碳捕捉,包括化石能源燃烧释放的CO₂和有机质燃烧释放的CO₂。捕集到的气体通过提纯、压缩、液化、运输,最后在海底的地层中封存。

当前生活垃圾焚烧技术的重点是面向垃圾分类政策的落实推进及精准管控,垃圾热值与处理负荷更高,污染排放更低,碳排放还要消减。

研究关注包括:先进炉排设备构造及材料的研究、满足高热值生活垃圾焚烧炉改造、生活垃圾焚烧过程模拟与数字软件开发、智能优化配风系统、生活垃圾与医疗废物协同焚烧、生活垃圾全组分处置与利用、二噁英等污染物控制与超低排放、生活垃圾焚烧飞灰的无害化资源化处理等内容。

2.2 热解气化技术

总体上,国内的生活垃圾热解气化技术还处于起步阶段,规模较小,普遍应用于 200~300 t/d 以下的垃圾处理,但是热解气化技术的发展最近几年受到特别关注,国内多家公司都宣称投入技术研发与示范。热解气化技术应用于村镇生活垃圾可以节约垃圾转运成本、避免二次污染^[14]。周伟春^[15]提出一种热解气化处理生活垃圾的工艺路线,并基于此工艺路线进行了装备开发,结果表明:该工艺路线及装备开发具有处理量适合、排放达标、投资较小、操作简单的技术特点,满足偏远乡村经济环保处理生活垃圾的应用需求。针对城市生活垃圾热解气化技术还需进一步研究,缺乏符合技术特点的行业标准(包括排放标准与装备标准)也是导致该技术在国内外发展和推广速度缓慢的一个重要原因。

目前生活垃圾热解气化技术应用主要集中在日本和北美,早在 1973 年,日本就开始了城市生活垃圾热解技术的研究,新日铁公司的城市生活垃圾热解熔融技术在世界上最早实现工业化,在 2007 年,日本建成了新日铁最大的垃圾热解气化厂(Shin Moji Plant),总处理量达到 720 t/d。加拿大埃德蒙顿垃圾热解气化厂于 2014 年运行,总投资约 1 亿美元,每年处理量为 10 万 t,产生生物燃料 3 800 万 L。生活垃圾中 60% 的有机组分转换成生物燃料和小分子永久性燃气,能源产物的年销售额达 6 500 万美元。

相比较于焚烧技术,生活垃圾的热解气化实现碳减排的方法更为灵活。通过热解气化过程工艺参数的调整、原料调配等手段,可以实现对产物分布与品质的优化控制,进而实现系统碳流的调配。例如,生活垃圾热解气化联产炭肥和富氢燃气工艺,通过控制气化参数,使生活垃圾中的碳元素最大限度保留在气化固相残渣中,形成高品质有机炭肥。有机炭肥的使用形成了优质碳汇,直接贡献行业减碳。同时气化燃气经过分离提纯可制备氢气。氢气作为一种清洁的零碳能源,其转

化利用具有更好的减碳效益。

垃圾热解气化技术在不断拓展,从传统的热解气化技术,发展出高温气化熔融技术、等离子气化熔融技术、化学链气化技术以及气化制氢技术。生活垃圾的热解气化技术的发展必须关注以下 3 个重点问题:

(1) 反应过程兼具减量化与清洁化特性。生活垃圾处理的首要目的是实现减量化与清洁处理,因此在强调生活垃圾能源化转化的同时,必须保持其大幅减量的需求,避免将污染物从一种形态转移到另一种形态。

(2) 提升反应产物的可用性。目前生活垃圾气化的燃气,仍然面临含水率高、含灰量高、含焦油、热值低的问题,导致其通常只能通过二燃室燃烧实现污染物的彻底消除。虽然通过余热锅炉可以实现一定的能源回收,但如果能通过合适的预处理、先进炉型的开发、以及优化的工艺控制提高生活垃圾气化产物的可用性(如可管道输送的燃气产品),则可进一步降低生活垃圾处理成本,提高系统效率。

(3) 生活垃圾热解气化燃气的无焰燃烧技术。生活垃圾气化燃气热值低、组分复杂多变,在常规燃烧过程中 NO_x 、CO 等排放风险高,且存在燃烧不稳定、点火困难等问题^[16]。无焰燃烧技术是指通过燃烧炉膛的优化设计以及燃烧条件的控制,利用燃气燃烧的局部自点火现象,实现燃气燃料的高效、彻底、均匀转化。生活垃圾热解气化与无焰燃烧技术结合,可实现气化燃气的稳定、高效燃烧,显著提升燃烧效率,且大幅降低 NO_x 、CO 等的排放浓度,成为具有前景的生活垃圾能源化清洁转化方案。

2.3 厌氧发酵技术

厌氧发酵尤其干式厌氧发酵技术一直都是生活垃圾能源化研究的关注点。厌氧发酵技术在处理垃圾方面,最早用于餐厨垃圾的处理。在 20 世纪 80 年代时,干式厌氧发酵技术开始在德国、荷兰等欧洲国家市场化应用,最具代表性的连续干发酵系统工艺为:比利时的 Dranco 干发酵工艺(竖式推流)、法国的 Valorga 干发酵工艺(竖式气体搅拌)、瑞典的 KOMPOGAS BRV 工艺(卧式推流)等。利用生活垃圾干式厌氧发酵处理,生成沼气后利用的技术具有能耗小、资源化、温室气体排放少等特点。国内厌氧发酵技术多用于处理餐厨(厨余)垃圾。溧水天山厨余垃圾处理项目采用

“预处理+厌氧发酵+沼液处理”工艺路线,设计处理规模 500 t/d,年处理厨余垃圾 16.5 万 t,2021 年正式投产并运行稳定,该项目可以漂水主城区生活垃圾产生量的增长及乡镇一体化垃圾处理处置问题^[17];哈尔滨某生活垃圾处理工程引进德国车库式厌氧发酵技术,对生活垃圾进行厌氧干发酵,产物通过热电联产实现热能回收和电力转化^[18],实现生活垃圾的能源化转化。

生活垃圾厌氧发酵的低碳化资源化体现在其生成的沼气发电可用作绿色能源、沼渣可用做土壤肥料、沼液也可以用于改良土壤。而利用沼气发电的余热产生蒸汽和热水,建立冷-热-电三联供系统,可用于工业、生活取暖等,有效提高能源利用率,达到节能减排的目的^[19]。当前生活垃圾厌氧发酵技术的发展,仍需关注以下热点问题:

(1) 过程稳定化

生活垃圾成分复杂,存在厌氧发酵抑制成分,如何通过合理的高效油水分离等预处理,提高生活垃圾的可生化降解性,成为工艺稳定运行的关键。

(2) 效率提升

通常厌氧发酵周期长,导致其处理设施占地面积大,工艺控制缺乏灵敏度。因此通过菌群优化、过程分离等手段开发更高负荷的厌氧发酵技术,成为生活垃圾能源化转化的关键。

(3) 氢气-沼气联产

生活垃圾厌氧发酵处理可以通过两步发酵法实现氢气-沼气联产,相较于单相发酵,可有效避免氢分压和酸化反馈抑制,大幅提高生活垃圾降解率及能源回收效率,并可以通过调节系统参数实现末端产物的比例。目前研究主要集中在高效菌源筛选、生活垃圾预处理、沼气原位提质、系统参数优化等方面。但该技术应用限制在于微生物仅能利用生活垃圾中厨余垃圾、部分木质纤维素类废弃物及可降解塑料等有机物,但对生活垃圾中传统塑料、化纤衣物及其他无机杂质无法达到减量化处理效果。

3 低碳环保化发展机遇与挑战

3.1 政策支持

按照《中华人民共和国环境保护法》《生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据应用管理规定》等有关要求,自 2020 年 1 月 2 日起,生活垃圾焚烧发

电厂每日公开前一日 5 项污染物(颗粒物、氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳、氯化氢)日均值、炉膛温度曲线和相关数据标记。

在政策的支持下,通过公众参与,加大对垃圾焚烧厂运行过程中各个环节的环保监督力度,包括渗滤液和恶臭问题、污染物的处理、设备的运行维护记录、应急预案、排污数据等,促进生活垃圾焚烧行业的绿色运行与发展。

2022 年 6 月 13 日,生态环境部等七部门印发《减污降碳协同增效实施方案》,减污降碳协同增效进入加速提速阶段,生活垃圾能源化技术的低碳环保化发展成为主攻方向之一。

低碳环保化技术的发展离不开高效清洁设备的研发与推广。生态环境部等三部门联合印发的《环保装备制造业高质量发展行动计划(2022—2025 年)》提出,重点推广陈腐垃圾筛分分选成套设备,有机废弃物干式厌氧发酵处理装备;在核心技术装备攻关上,重点研发操作简单、维修便捷的小型农村垃圾处理装备。攻克其运行不稳定、烟气处理不达标等技术瓶颈,降低建设运行和维护成本,进一步优化资源配置^[20]。

2022 年 2 月 9 日,发改委、生态环境部等四部委联合发布《关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见》提出,城市生活垃圾日清运量超过 300 t 地区加快建设垃圾焚烧处理设施,不具备建设规模化垃圾焚烧处理设施条件的地区,鼓励通过跨区域共建共享方式建设。随后国家发展改革委等四个部门联合发布《关于加强县级地区生活垃圾焚烧处理设施建设的指导意见》提出要分类施策加快提高焚烧处理设施能力,积极开展小型焚烧试点。

在政策红利和财政税收资金扶持下,在生活垃圾处理方面,应因地制宜地设计并应用清洁设备,提高低碳环保设备的供给能力,满足人居环境改善及循环经济发展的重大需求,不断实现绿色化、低碳化的环保要求。

3.2 技术提升

如何改进处理工艺,对废水、废渣进行无害化处理和资源化利用;在废气处理无害化的同时,实现二氧化碳、甲烷等温室气体的抑制、分解、捕捉,减少温室气体排放,促进绿色低碳转型,实现更加清洁环保的排放,是生活垃圾能源化处理技术与工程的研究重点。

3.2.1 强化处理过程清洁

以生活垃圾焚烧为例。废气可分为垃圾运输

及堆放带来的恶臭以及焚烧后含二噁英、重金属、酸性气体等污染物的烟气。针对排放气体实际情况和排放标准选择合理的方法进行处理,如对运输和储存过程中的垃圾进行密封化处理,减少恶臭;从源头、燃烧、排放各个环节应对二噁英类化合物,使用组合烟气净化系统对有害烟气进行吸收净化。以往为满足国家标准 GB 18485—2014《生活垃圾焚烧污染控制标准》的要求,一般采用“SNCR+半干法+干法+活性炭喷射+袋式除尘器”的烟气净化工艺组合^[21]。面向更为严格的污染控制需求以及焚烧设备小型化发展需求,开发集成式、撬装式多污染协同净化技术成为发展的主流趋势。同时,在烟气处理中引入新型效应的处理效应,如等离子、高效氧化剂,也是烟气净化技术发展的重要方向。此外,垃圾处理过程涉及到渗滤液处理、灰渣处理及飞灰的处置过程都需要更加清洁低碳。

3.2.2 提高能源利用效率

以生活垃圾热解气化为例。通过技术革新,将热解气化技术的低碳性与斯特林发电技术结合,形成低碳高效垃圾热解气化发电技术,利用垃圾热解气化生成的可燃气体,通过燃气斯特林发动机,可燃气体在燃烧室内充分燃烧,斯特林热机吸收热量产生机械运动驱动发电,实现不同规模的垃圾发电及供热,其热-电转换效率比传统垃圾发电技术高 50%。采用热电联产生物炭技术等,将含碳产品作为目标产物,可以提高能源转化及利用效率,实现资源回用的目的。此外,通过技术创新及不同的技术耦合,进一步提高生活垃圾的能源利用效率,依然有空间。

3.2.3 低碳技术的应用

碳捕集、利用与封存技术指将 CO₂ 从相关排放源中捕集并分离出来,直接加以利用或输送到封存场地来实现与大气长期隔离^[22]。在燃烧前、富氧燃烧过程、燃烧结束后三阶段,通过碳捕集形式控制 CO₂ 排放,如广东东莞某火力发电厂,加入燃烧前处理技术,创造理想的煤气化条件,并以氢气燃烧,降低 CO₂ 排放^[23];然后捕集可以采用有机氨技术或氨水吸收技术。将生活垃圾能源化技术与碳捕集、利用、封存技术进行耦合,形成源头减碳与末端固碳的结合,并通过系统优化以控制成本,促进垃圾能源化技术的低碳排放,服务“双碳”目标。

4 结论与展望

本文简要分析了目前主要的生活垃圾能源化技术分类与特征,重点分析焚烧技术、热解气化技术、厌氧发酵技术目前的应用现状和未来的应用前景。针对垃圾能源化技术如何低碳环保化从政策方面和技术层面进行分析,面对严格的环保要求和实现“双碳”目标的有力挑战,生活垃圾处理行业的绿色低碳发展离不开政策的扶持、法律的要求、公众的监督,更离不开技术的进步,针对垃圾能源化技术的过程应强化清洁,提高其能源利用效率,耦合碳捕集、利用与封存等技术都是潜在的发展机遇。

国家发展改革委、生态环境部、住房和城乡建设部、国家卫生健康委发布的《关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见》提出,“到 2025 年,生活垃圾分类收运能力达到 70 万吨/日左右,焚烧处理能力达到 80 万吨/日左右。”该《指导意见》明确了以焚烧为主的生活垃圾能源化技术格局发展。面对低碳环保的严格要求,生活垃圾能源化技术具有巨大的发展潜力,应加强垃圾分类,可回收物和厨余垃圾资源化利用,持续推进生活垃圾处理能力建设,减少有机垃圾填埋,加强垃圾渗滤液、恶臭和温室气体协同控制,因地制宜稳步推进生活垃圾多元化处理与开发利用。

面向未来,低碳环保的生活垃圾能源化技术可着力从以下几方面发展:

(1) 推进垃圾分类,优化生活垃圾处理处置方式。

推进垃圾分类,对于后续能源化处理过程产生显著增益,不仅可以提高能源转化效率,还可以借助源头优化抑制二次污染的产生。对于焚烧来说,生活垃圾分类不仅能够将含水量高的厨余垃圾分离,降低脱水处理成本,还能分离出金属、玻璃等不适合燃烧或不能燃烧的物质,既减少焚烧辅助燃料的使用,达到减碳效益,又提高焚烧效率,产生更多热能,提高发电量。通过生活垃圾分类分离出塑料组分,即可实现高值垃圾的资源回收,又可有效减少焚烧过程二噁英、氯化氢气体等有毒物质生成。未来应合理布局生活垃圾分类收集站点,逐步提升我国生活垃圾分类和处理能力,推行生活垃圾分类减量与利用。针对垃圾分类困难的农村,健全生活垃圾收运处置体系,完善分类运输系统,补齐能力短板。

(2)发展人工智能技术,提高生活垃圾处理智能化及垃圾焚烧与气化技术的精准化。

近年来人工智能技术的飞速发展,为生活垃圾处理智能化及垃圾焚烧与气化技术的精准化带来新的契机。从生活垃圾处理智能化方面来看,机器视觉、波谱智能解谱等技术为生活垃圾的智能分类分拣提供新的技术思路,而基于机器学习的调度策略及路径优化也为生活垃圾的高效收储运提供决策依据;从垃圾焚烧与气化技术的精准化方面来看,机器学习在热化学反应仿真模拟领域的突破使得设计者可以更加准确地预测产物与污染物生成特性,进而加以精细化地控制反应条件、调配原料构成。在上述由前端收储运与分类分拣到下游处置与利用全链条的智能化革新下,生活垃圾焚烧与气化技术有望突破传统工艺设计缺乏科学理论指导、原料均质性与动力学同步性差等瓶颈,从而实现更加高效的资源能源化。

(3)开发绿氢技术,促进生活垃圾处理绿色清洁。

氢能是绿色低碳的新型清洁能源。面向未来,发展氢能对于节能减排、深度减碳、提高能源利用率方面意义重大。而生活垃圾中含有大量碳氢化合物,经过处理后可分离出氢气,有望成为制氢技术的创新突破。生活垃圾向氢的转化,不仅是能源的再利用,更是从元素角度的科学分配管理。未来,基于热化学过程如热解、气化或生物化学过程如光发酵、暗发酵的制氢技术,推动制氢设备研发和制氢项目试点处理生活垃圾,耦合发电或碳资源化技术,建设绿色、能源化、低碳的垃圾处理工厂是重点研究方向。

(4)强化协同处理技术,提高生活垃圾处理的减污降碳综合效益。

生活垃圾包含城市居民生活和生产过程中产生的各类垃圾,组分复杂,不同的垃圾在能源化处理过程中可形成协同效应,实现能量梯级回收,有利于提升系统能源转化效率与清洁程度。因此,明晰生活垃圾各组分在能源化转化中的协同效应作用机制,开发基于园区的强化协同型多源生活垃圾处理技术成为行业关注的热点问题。如将餐厨垃圾与生活垃圾协同处理,利用高效三相分离技术,实现餐厨垃圾中水、油、固体的分离,废水进入厌氧消化系统制备沼气为园区供能,油脂除杂后制备生物柴油,固体残渣与其他生活垃圾协同焚烧。此技术路线不仅实现对园区多源

生活垃圾的协同处置,同时也针对物料特性实现能源梯级回收,体现出显著的减污降碳综合效益。

参考文献 (References) :

- [1] Luo H, He D, Zhu W, et al. Humic acid-induced formation of tobermorite upon hydrothermal treatment with municipal solid waste incineration bottom ash and its application for efficient removal of Cu(II) ions[J]. Waste Management, 2019, 84: 83–90.
- [2] Luo H, Cheng Y, He D, et al. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 90–103.
- [3] 陈子华. 垃圾焚烧发电厂废水“零排放”技术及工程案例分析[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 99–105.
CHEN Zihua. "Zero discharge" technology and engineering case analysis of wastewater treatment of solid waste incineration power plants[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 99–105.
- [4] Nanda S, Berruti F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123970.
- [5] 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.
- [6] 李宣, 孔晶, 刘凌雯, 等. 城市生活垃圾高温热解气化技术的工业化应用[J]. 当代化工研究, 2022(14): 64–66.
LI Xuan, KONG Jing, LIU Lingwen, et al. Industrial application of high-temperature pyrolysis and gasification technology for municipal solid waste [J]. Modern Chemical Research, 2022(14): 64–66.
- [7] Sikarwar V S, Pohorely M, Meers E, et al. Potential of coupling anaerobic digestion with thermochemical technologies for waste valorization[J]. Fuel, 2021, 294: 120533.
- [8] Cao L, Yu I, Xiong X, et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects [J]. Environmental Research, 2020, 186: 109547.
- [9] Radenahmad N, Azad A T, Saghir M, et al. A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109560.
- [10] 王建伟, 郑鹏, 崔慧. 等离子体气化熔融/垃圾处理系统 [J]. 新能源进展, 2020, 8(5): 391–395.
WANG Jianwei, ZHENG Peng, CUI Hui. Plasma gasification melting/waste treatment system[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(5): 391–395.
- [11] 王静毅. 城市生活垃圾衍生燃料在燃煤电厂中的应用 [J]. 应用能源技术, 2021(3): 13–15.
WANG Jingyi. Application of municipal solid waste-derived fuels in coal-fired power plants[J]. Applied Energy Technology, 2021(3): 13–15.
- [12] Yang Y, Liew R K, Tamothran A M, et al. Gasification of re-

- fuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production; A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(3): 2127-2140.
- [13] 徐海云. 垃圾焚烧未来有可能实现“负碳”[J]. *环境经济*, 2021(12): 42-45.
XU Haiyun. Waste incineration is likely to achieve "negative carbon" in the future [J]. *Environmental Economy*, 2021(12): 42-45.
- [14] 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 Zuyu, LIAO Baijun, SUN Qiang, et al. Application of pyrolysis technology in rural domestic waste treatment [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2021, 32(17): 14-16.
- [15] 周伟春. 乡村生活垃圾热解气化处理的工艺研究与装备开发[J]. *机电工程技术*, 2022, 51(2): 162-165.
ZHOU Weichun. Technics research and equipment development for pyrolysis gasification treatment of garbage in rural area [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(2): 162-165.
- [16] 周生权, 李远博, 陈冠益, 等. 生物质气化燃气无焰燃烧的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(3): 226-230.
ZHOU Shengquan, LI Yuanbo, CHEN Guanyi, et al. Experimental study on flameless combustion of biomass gasification-derived gas [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(3): 226-230.
- [17] 刘杰, 陈婷, 王瑾瑾, 等. 溧水天山厨余垃圾处理项目稳定运行工况分析[J]. *广东化工*, 2021, 48(24): 123-125.
LIU Jie, CHEN Ting, WANG Jinjin, et al. Analysis of stable operation condition of kitchen waste disposal project in Lishui [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(24): 123-125.
- [18] 李冰峰, 张大雷. 干式厌氧发酵技术现状与国内应用项目简介[J]. *可再生能源*, 2021, 39(3): 294-299.
LI Bingfeng, ZHANG Dalei. Status quo of dry anaerobic fermentation technology and introduction of domestic application projects [J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(3): 294-299.
- [19] 马蛟. 生活垃圾焚烧发电厂设备的安装研究[J]. *造纸装备及材料*, 2022, 51(9): 49-51.
MA Jiao. Research on the installation of municipal solid waste incineration power plant equipment [J]. *Papermaking Equipment and Materials*, 2022, 51(9): 49-51.
- [20] 李宣璋. 五部门发指导意见: 积极开展小型焚烧试点[N]. *每日经济新闻*, 2022-11-28(2).
- [21] 王文仲, 孟素丽, 王丽平. 我国生活垃圾焚烧及燃煤耦合发电现状与行业发展趋势 [J]. *煤质技术*, 2022, 37(4): 1-8.
WANG Wenzhong, MENG Suli, WANG Liping. Development situation and trend of waste incineration and coal-fired coupling power generation industry in China [J]. *Coal Quality Technology*, 2022, 37(4): 1-8.
- [22] 谢斌, 卢大贵, 吴彩斌. 碳捕集利用与封存技术研究进展 [J/OL]. *有色金属科学与工程*: 1-8. [2023-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20221209.0907.001.html>.
XIE Bin, LU Dagui, WU Caibin. Research progress of carbon capture utilization and storage technology [J/OL]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*: 1-8. [2023-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20221209.0907.001.html>.
- [23] 陈利涛, 李云. 碳捕捉、利用和封存技术的发展现状及相关政策分析[J]. *节能与环保*, 2022(11): 40-41.
CHEN Litao, LI Yun. Development status and relevant policy analysis of carbon capture, utilization and storage technologies [J]. *Energy Conservation Environmental Protection*, 2022(11): 40-41.