

城市生活垃圾处理装置技术现状与发展趋势

杨光悦

重庆移通学院

摘要: 城市规模持续扩张,生活垃圾产生量迅速增加,处理技术和装备水平要求越来越高。围绕着减量化、无害化和资源化这三大目标,本文对目前主流的垃圾处理装置现状进行了梳理,从传质、反应动力学和智能控制等角度,分析了分选、生物处理和热化学处理三类装置的结构特点与工作机理,并讨论了智能化技术在实际中的应用。分析表明,垃圾处理装置正在从单一技术转向为多个技术协同、资源高值利用和智能化运行的方向发展,但是对于复杂垃圾组分的适应能力仍然偏弱,装置的能效和产物经济价值之间的矛盾尚未完全解决。今后需要进一步加强工艺集成和装备优化,推动处理系统向高效、柔性 and 协同的方向演进。

关键词: 生活垃圾; 处理装置; 焚烧发电; 生物处理; 资源化利用

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.02.024

引言

城市生活垃圾处理是环境治理和资源循环利用的一个重要方面。有预测指出,如果缺乏有效干预,到2050年全球每年的生活垃圾产生量可能会达到34亿吨,过去那种主要靠填埋和粗放式焚烧的模式已经难以为继。在“双碳”目标和“无废城市”建设的驱动下,垃圾管理正从被动消纳转向主动的资源化利用,而处理装置作为技术落地的载体,其设计水平和系统集成程度直接影响着整条资源化链条的效率。目前已有的研究大多侧重于宏观工艺比较,对装置层面涉及的反应机理和物料流动特性关注还不多。本文将处理装置按功能划分为分类收集与预处理、生物处理、热化学处理以及智能监测控制四个模块,重点分析它们的技术特征、应用难点和演变方向,能为装备开发和工程实践提供一些参考。

1 处理装置技术分类与现状

城市生活垃圾处理装置的迭代,始终是围绕减量、无害和资源化展开的。前端分选决定了进入后续工序的物料纯净度,生物处理实现有机碳的温和循环,热化学装置完成深度减容和能量回收,智能控制则赋予全流程动态调节能力。四类装置的协同发展,正在让整个处理体系变得更加精细。

1.1 分类收集与预处理装置

分类收集和预处理处于整个垃圾处理链条的最前端,分选精度和物料均质化程度会直接影响后续工段的负荷水平与产品质量。传统的人工分选受视觉疲劳和主观判断偏差的影响,很难处理辨识度低的组分,容易造成焚烧热值波动、生物处理杂质含量偏高等问题。

近些年,基于深度学习的智能分选技术进展迅速。

系统通过卷积神经网络融合高光谱成像、近红外和激光诱导击穿光谱等多种方式,可以在毫秒级的时间内完成物质指纹识别、空间定位和分拣动作的闭环,对金属和塑料做到较为精细的识别。考虑到垃圾组分受地域和季节的影响波动很大,借助迁移学习和在线主动学习来更新模型,能够缩短新品类适应周期,增强设备运行的鲁棒性。

预处理环节一般包括破碎、筛分、脱水和除杂等工序。厨余垃圾处理就是按照这个环节处理,可以有效降低含水率并提高有机质纯度。破碎设备依靠剪切和挤压把大块物料变细,筛分装置按粒径分级,磁选和涡电流分选联合使用能高效分离金属杂质。多级脱水技术可以将含水率从很高的水平降到适合后续生物或热处理的范围。压缩转运装置通过提高垃圾密度来降低运输成本,是连接前端收集和后端处理的重要枢纽,液压和传感技术的进步使它的压缩效率和能耗表现都有了明显改善。

1.2 生物处理装置

生物处理装置利用厌氧或好氧微生物的代谢作用,实现有机垃圾的资源化,典型的工艺路线有厌氧发酵和好氧堆肥两种。

厌氧发酵装置在不存在分子氧的条件下,依靠水解菌、产酸菌和产甲烷菌的互营共生,将大分子有机物转化为沼气。按照含固率的不同,发酵工艺分为湿式和干式两种。湿式工艺传质比较均匀,但容积产气率受到低含固率的限制;干式工艺容积负荷可以很高,却容易出现混合死区和局部酸化的问题。为了维持产甲烷菌群的活性,需要准确平衡挥发性脂肪酸、氨氮和碱度,一旦易降解有机物瞬时负荷过高,产酸

速率超过了耗酸速率,系统的pH就会迅速下降,产甲烷过程也会受到抑制。当前的商业装置通过增温保温、优化搅拌方式和调控微量营养元素,已经能够在中温或高温条件下连续稳定运行,并形成了从家用微型消化器到集中式厌氧厂的系列化产品。提升产物附加值,是突破经济性瓶颈的关键途径。除了沼气直接用于发电以外,将沼气提纯为生物天然气并入城市燃气管道,以及将沼渣深度干化制成生物炭基肥,都能拓展收益空间。

好氧堆肥装置通过强制通风或翻堆来供氧,驱动嗜温菌和嗜热菌的演替,让有机物矿化并转化为稳定的腐殖质。温度和氧浓度在堆体内部是否分布均匀,是决定腐熟度和堆肥周期的关键控制变量。静态堆置很容易因为供氧不足而形成厌氧区域,动态翻堆或强制通风反应器能明显改善供氧状况,但会相应增加能耗。在农村和园林废弃物处理中,经常采用厌氧发酵与好氧堆肥串联的方法,前面快速回收能源,后面将沼渣转化成高品质有机肥,从而形成比较完整的物质闭路。这一技术路线面对的困难在于,堆肥产品中残留的微塑料和重金属可能通过土壤食物链积累,因此对进料纯净度的前端控制就提出了更严格的要求。

整体来看,生物处理装置在有机垃圾资源化方面优势比较突出,但对原料组分和运行条件相当敏感,稳定性还有提升的空间。

1.3 热化学处理装置

热化学处理装置在高温下实现垃圾的减量和能量利用,主要包括焚烧发电、热解气化和等离子体气化等技术。

焚烧发电是目前应用最广泛的处理方式,其核心是借助高温氧化反应释放热能。装置由给料系统、焚烧炉排、余热锅炉、汽轮发电机组和烟气净化系统组成。为了抑制二噁英这类污染物的生成,必须严格控制烟气在高温区的停留时间,并采用急冷方式避开前驱物再合成的温度窗口。引入高参数余热锅炉和再热循环之后,全厂的发电效率可以提升到30%左右,能量回收效益明显改善,这也成为焚烧厂经济性的重要支撑。复杂的烟气净化系统通过选择性非催化还原脱硝、活性炭喷射吸附和布袋除尘的组合,将各项污染物浓度控制在合规范围内;飞灰经螯合稳定化后仍然需要安全填埋,是需要继续完善的环节。

热解气化装置在缺氧或低氧条件下运行,将有机物转化为可燃气和固体残渣,资源化程度较高,污染物排放相对较低,其核心部件包括进料密封单元、热解反应器和气体净化冷却单元。旋转窑和流化床是两

种主流结构,前者对物料的适应性比较强,后者传热传质效率更高,但系统对进料稳定性的要求很严格,焦油析出导致的管路堵塞是制约长周期运行的难点。高温催化裂解脱除焦油被认为是根本性的解决路径,不过催化剂的抗积炭能力和成本仍需要工程验证。

等离子体气化利用电弧或等离子体炬产生数千摄氏度的高温,使有机物瞬间裂解重组为合成气,而无机组分则熔融为玻璃态惰性渣。这种技术处理得比较彻底,排放极低,但电力消耗大,电极和耐火材料损耗严重,目前还处在示范应用阶段,主要面向危险废物和高值废弃物处理。

1.4 智能监测与控制系统

信息技术的进步正在推动垃圾处理装置向智能化方向转变。通过物联网、大数据和人工智能,处理过程能够实现实时监测和动态调控。在系统层面,智慧环卫平台实现了垃圾收集、运输和处理全过程的数据化管理;在装置层面,温度、压力和气体成分等参数通过传感器实时反馈,为运行优化提供依据。多源数据融合和数字孪生技术的应用,使装置运行状态可视化和预测性维护成为可能,有助于提高系统效率和安全性。

在焚烧厂,基于可调谐半导体激光吸收光谱的炉膛截面温度和气体组分分析,配合炉排运动控制,构成燃烧优化的主回路,使烟气一氧化碳浓度和热灼减率稳定在目标范围以内。在厌氧发酵罐内,在线近红外探头可以实时监测游离挥发性脂肪酸,取代了实验室取样分析需要的几个小时延迟,使负荷调节实现前馈控制,大大降低了系统因酸化带来的惯性风险。在区域调度层面,融合居民支付行为、季节性消费特征的垃圾产生量预测模型,与环卫车辆路径优化算法联动,可以在较大服务范围内动态平衡各中转站的负荷,减轻末端处理设施受到的冲击。

数字孪生技术在信息空间构建出物理装置的并行镜像,使工艺过程变得透明化。可以在不干扰实际生产的情况下,针对新的垃圾组分、紧急停机预案和工艺切换场景进行超实时仿真推演,为操作人员提供可视化的决策支持。目前,高保真模型对计算资源的消耗比较大,而降阶模型又难以捕捉极端工况下的非线性突变,模型精度和实时性之间的平衡是眼下需要突破的一个难题。

1.5 技术对比与机理分析

不同类型垃圾处理装置在技术路径、资源化方式和适用场景上存在明显差异。表1对几种典型处理技术进行了对比。

表1 城市生活垃圾主要处理技术对比

| 技术类型 | 核心机理 | 技术优势 | 局限性 | 适用场景 |
|--------|-----------------|-----------------|----------------|------------|
| 智能分选 | 图像识别、多传感融合、自动执行 | 分类精度高和效率高、可连续运行 | 投资成本高,对数据依赖强 | 大中型垃圾分选中心 |
| 厌氧发酵 | 微生物厌氧代谢产甲烷 | 能源回收率高、碳减排效果显著 | 启动周期长,对原料稳定性敏感 | 高含水有机垃圾 |
| 好氧堆肥 | 好氧微生物降解生成腐殖质 | 工艺成熟、投资较低、运行稳定 | 占地大、处理周期较长 | 农村及园林有机废弃物 |
| 焚烧发电 | 高温氧化反应释放热能并发电 | 减量彻底、处理规模大、稳定性高 | 排放控制要求高、设备投资大 | 城市混合垃圾 |
| 热解气化 | 缺氧条件下热分解生成合成气 | 资源化程度高、污染物较低 | 工艺复杂、运行控制难度大 | 分类较好的有机固废 |
| 等离子体气化 | 高温等离子体裂解有机物 | 处理彻底、排放极低、产物纯度高 | 能耗高、成本高 | 危险废物及高值处理 |

总体来看,焚烧发电技术在规模化和稳定性方面优势比较突出,生物处理垃圾方法适合有机垃圾的资源化利用,而热解气化和等离子体技术则代表了高效价值的方向。今后,垃圾处理会从单一技术路线转向多种技术的协同,提高资源化效率和经济性。

2 垃圾处理装置运行问题和优化发展路径

2.1 装置运行中的关键问题

目前,城市生活垃圾处理装置已经有了一些技术进步,但在实际运行中仍受现实制约。

2.1.1 数据标准与系统协同不足

各种处理装置之间的数据格式和通信协议没有统一的规范,信息不流通,难以实现真正意义上的全流程协同控制和智能化管理。

2.1.2 进料波动对装置稳定性的影响

不同生活垃圾的组成差异较大,其含水率、热值和杂质含量的变化,很容易引发预处理设备堵塞、生物反应效率下滑和热工过程不稳定等连锁问题。

2.1.3 装置经济性与推广受限

高参数焚烧、等离子体气化等先进工艺的投资门槛和运行成本都比较高,在中小城市或者分散处理场景中,难以进行推广。而部分生物处理装置产生的副产品附加值偏低,也直接影响了整体经济可行性。

2.2 垃圾处理装置的优化发展路径

针对上述问题,未来应从以下几个方向重点推动垃圾处理装置的发展。

2.2.1 构建标准化与智能化运行体系

建立统一的数据采集标准和通信接口,让各处理环节的信息能够互联互通;整合传感数据和机器学习的方法,开展设备状态的实时监测、故障预警和预测

性维护,更好实现全流程的智能调度与协同控制。

2.2.2 提升装置适应性与场景适配能力

改进预处理工艺和调节进料机制,能够更好地应对垃圾成分的动态变化;同时,发展小型和模块化的处理装置,更好满足社区二号村镇等分散式处理的需求,提升部署的灵活性和运行的稳定性。

2.2.3 推进多技术协同与资源闭环利用

重点加强生物处理、热处理和资源回收等环节的深度集成,切实提升系统的整体资源化效率和经济可行性。

3 结论

综上所述,城市生活垃圾处理装置正在从单一处理功能向多技术协同和智能化方向演进,智能分选、生物处理和热化学处理等技术在不同应用场景下各有优势。今后,应进一步提升处理装置的适应性和经济性,加强技术集成的深度与系统优化力度,推动垃圾处理装置朝着更高效和更具有高效价值资源化的方向持续发展。

参考文献:

- [1]Fotovvatikhah F,et al.A Systematic Review of AI-Based Techniques for Automated Waste Classification[J].Sensors,2025,25(8):2412.
- [2]温天成,卜元卿,张后虎.人工智能技术在固体废物综合治理领域的研究进展及展望[J].生态与农村环境学报,2025,41(9):1122-1133.
- [3]丁玉.生活垃圾无害化资源化的处理方法及装置[J].中国地名,2025,(6):247-249.
- [4]吴雅倩.城市垃圾处理技术现状及处理对策分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024,(10):119-122.