

垃圾焚烧发电厂碳中和路径分析及技术展望

周团团¹, 张悦², 黄亮^{3*}

(1. 中山市市政维护管理中心, 广东 中山 528400; 2. 六安市金安区生态环境分局, 安徽 六安 237000;
3. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 垃圾焚烧作为传统填埋处理的替代方案, 通过避免甲烷排放和替代化石能源发电, 实现显著的双重碳减排效益, 与此同时, 焚烧过程本身直接产生二氧化碳排放。本研究通过系统分析垃圾焚烧发电厂的现状与挑战, 结合碳中和理论基础和技术手段, 提出一系列切实可行的措施, 以实现垃圾焚烧处理过程中的节能降耗、资源回收和低碳排放。研究内容包括提升能源效率与过程优化技术创新、精细化管理、拓展循环经济边界、碳捕集技术创新等。通过园区化布局、智慧化运营、资源化利用和协同化发展, 垃圾焚烧厂将从单纯的废物处理设施转型为城市能源枢纽和资源循环中心, 为我国“双碳”目标的实现提供重要支撑。

关键词: 蒸汽参数提升; 人工智能与大数据应用; 能耗物耗精细化管理; 排烟热损失控制; 烟气处理工艺升级

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1008-9659(2026)04-0061-05

在全球城市化进程加速的背景下, 城市生活垃圾处理已成为关乎可持续发展的重要议题。同时, 垃圾处理过程已成为全球温室气体主要排放源之一。我国提出的“力争2030年前实现二氧化碳排放达峰、2060年前实现碳中和”的战略目标, 为垃圾处理行业带来了前所未有的挑战与机遇。垃圾焚烧在“双碳”战略目标中扮演着矛盾而复杂的双重角色。一方面, 作为传统填埋处理的替代方案, 垃圾焚烧通过避免甲烷排放和替代化石能源发电, 实现了显著的双重碳减排效益; 另一方面, 焚烧过程本身又不可避免地直接产生二氧化碳排放, 尤其是来自化石源塑料的燃烧。

当前, 中国垃圾焚烧行业面临多重技术挑战。首先, 随着垃圾分类政策的实施, 入炉垃圾的物理化学特性发生显著变化。这种变化虽有利于提升发电效率, 但也导致化石源碳排放比例上升。其次, 中国垃圾焚烧厂普遍存在“邻避效应”导致的区位困境。大多数焚烧厂位于城市边缘的大型集中式设施, 供热管道建设困难, 影响热电联产应用, 导致能源效率普遍较低。另外, 随着焚烧处理占比的上升, 未来可能面临过度依赖焚烧的“锁定效应”, 阻碍新兴绿色回收工艺的发展。我国出台了一系列支持政策, 《国务院关于加强建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》明确提出, 加快城镇生活垃圾处理设施建设, 推进生活垃圾焚烧发电, 减少生活垃圾填埋处理的发展路径。同时, 环保税减免政策为达标排放的焚烧厂提供了实质性支持。

通过对垃圾焚烧发电厂现状与挑战进行系统分析, 结合碳中和理论基础及技术路径, 文章提出了多项切实可行的措施, 包括提升能源效率、优化工艺流程、实施精细化管理、拓展循环经济模式以及创新碳捕集技术等, 以实现垃圾焚烧过程中节能降耗、资源高效回收与低碳排放的目标。在此基础上, 通过园区化布局、智慧化运营、资源化利用和协同化发展, 垃圾焚烧厂将从单一的废物处理设施, 逐步转型为城市能源枢纽和资源循环中心, 从而为我国实现“双碳”战略目标提供有力支撑。

[收稿日期] 2025-10-10

[修回日期] 2025-11-12

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52570117; 52106072)。

[作者简介] 周团团(1990-), 男, 工程师, 主要从事生活垃圾治理及环境保护方面研究, E-mail: ztuant86@126.com.

* [通讯作者] 黄亮(1989-), 男, 副教授, 主要从事二氧化碳捕集及利用方面研究, E-mail: l_huang@bjfu.edu.cn.

1 技术创新:提升能源效率与过程优化

垃圾焚烧厂实现碳中和的基础在于能源高效转化与过程系统优化。通过技术创新提升吨垃圾发电量,降低系统能耗,是减少碳排放的直接路径。

1.1 发电效率优化技术

提升蒸汽参数是提高发电效率的有效手段之一。中温中压(400 °C, 4.0 MPa)和中温次高压(450 °C, 6.5 MPa)是国内垃圾焚烧厂用余热锅炉常见的两种参数。林昌梅研究发现,在仅考虑发电效率的情况下,余热锅炉采用中温次高压参数(450 °C, 6.5 MPa),较中温中压参数(400 °C, 4.0 MPa)的发电效率更高,发电量可提高约17%^[1]。中山市中心组团垃圾综合处理基地一二期工程采用中温中压蒸汽参数,2024年入炉吨垃圾年均发电量为364 kWh/t;三期工程采用中温次高压蒸汽参数,2024年入炉吨垃圾年均发电量提升至471 kWh/t,增幅达29.4%。然而,高参数技术的应用曾面临受热面腐蚀的技术瓶颈。行业通过材料创新,例如,高镍合金钢等耐腐蚀材料在过热器中的应用,虽然增加了建设和运行成本,但有效延长了设备寿命,综合效益显著^[2-3]。

1.2 排烟热损失控制

排烟热损失是垃圾焚烧炉主要的热损失来源,主要受排烟温度和过量空气系数两大因素影响。研究表明,排烟温度升高和过量空气系数增加,均会造成排烟热损失增加^[4-5]。针对排烟温度控制,行业面临两难选择:一方面,降低排烟温度可减少热损失;另一方面,过低的排烟温度会加剧SO_x和HCl对锅炉受热面的低温腐蚀。目前主流设计是将省煤器出口排烟温度控制在190~200 °C之间。然而,随着垃圾分类的推进,考虑入炉垃圾热值提高以及锅炉受热面积灰问题,实际运行中排烟温度常高于设计值20~30 °C。解决策略包括增加水冷壁受热面、改善清灰方式以及采用排烟余热回收技术等。

在过量空气系数控制方面,烟气再循环技术展现出显著效果。烟气再循环可有效减少热力型NO_x排放,抽取的烟气可以直接或者通过混合一次风或二次风送入炉内。当烟气再循环率控制在15%~20%时,煤粉炉的NO_x排放浓度可降低约25%^[6]。

1.3 烟气处理工艺升级

随着环保要求趋严,烟气处理系统的能耗占比逐渐增加,工艺优化成为碳减排的重要环节。国内垃圾焚烧厂常规烟气净化系统多采用“SNCR+半干法+干法+活性炭喷射+布袋除尘”工艺,该工艺烟气排放指标能够达到欧盟2010/75/EC排放标准^[7]。然而,随着环保要求的日益严格及国家有关节能减排政策的实施,部分省市对NO_x的排放提出了更严格的要求,促使脱硝技术持续升级。NO_x深度处理方面,组合脱硝工艺展现出优势。国内某项目采用“SNCR+PNCR+烟气再循环”组合工艺,不仅实现NO_x稳定达标,还显著降低运行成本,取得了良好的经济效益^[8]。对于已建项目,在引风机前增加烟气再循环工艺,可进一步降低引风机电功率,同步实现节能降耗。

2 智能运营与系统优化:数据驱动的精细化管理

在垃圾焚烧行业从“建设为王”向“运营为王”转型的背景下,智能化管控和系统协同优化成为提升能效、降低排放的核心竞争力。此外,简化工艺流程、完善系统配置、规范操作程序是提高烟气净化效率和降低辅料消耗的关键。精细化管理和智能化控制,可实现吨垃圾石灰耗量、活性炭用量等关键指标的持续优化,间接降低碳排放。

2.1 发电效率优化技术

焚烧过程智能控制系统通过实时分析垃圾热值、炉温、烟气成分等数据,自动调节风量、给料速度等参数,实现燃烧效率最大化。通过运用物联网、大数据、云计算等先进技术,构建“数据+平台+智能应用”的架构,搭建稳定高效的管理平台。同时,开发智能监控、预警和决策工具,打造智慧型灯塔工厂,实现全厂“感知-分析-决策-执行”的闭环管理。

2.2 全厂协同优化策略

垃圾焚烧厂核心设备(焚烧炉、余热锅炉、汽轮发电机组、烟气净化系统)通常由不同厂家供货,设备匹配度直接影响全厂效率。在实际运行中发现,设备间存在错配现象,例如,焚烧炉预留超烧能力,但余热锅

炉受热面布置无法匹配;烟气净化系统处理能力与前端不协调等。

解决问题的关键在于实施全厂能效协同诊断。首先,评估各设备在设计工况和实际运行中的性能曲线;其次,分析设备接口参数匹配性;最后,通过技术改造或运行优化实现系统协同。例如,对已建项目,通过增加过热器面积、优化汽轮机通流部分等方式提升能量转化效率;对新建项目,在设计阶段统筹考虑设备选型匹配度。此外,余热多元化利用策略可显著提升能源效率。传统垃圾焚烧发电厂能源利用率普遍低于21%,而采用热电联产模式,通过热能分级利用可将综合能效提升至70%以上^[9-10]。未来,随着垃圾成分标准化、区域能源规划及碳交易机制完善,这一模式在中国具有广阔的前景。

2.3 能耗物耗精细化管理

高电耗设备节能改造是降碳的重要抓手。垃圾焚烧厂主要能耗设备包括风机、水泵、空压机等,通过增加变频控制、采用高效电机、应用永磁传动技术等措施,可实现节电率10%~30%,化学药剂精准“投加”同样关乎碳减排效果。烟气净化系统中石灰、活性炭、尿素等药剂的消耗既影响运营成本,也隐含碳足迹。通过建立基于烟气污染物浓度实时反馈的自动控制系统,可实现药剂用量的动态优化,既减少了物耗碳排放,又降低了固废产生量^[11-12]。

3 协同处置与产业共生:拓展循环经济边界

单一焚烧发电模式已无法满足碳中和要求,必须向多元协同处置和产业共生方向转型。通过与区域产业生态的深度融合,实现物质循环和能量梯级利用。

3.1 垃圾衍生燃料与水泥窑协同处置

随着垃圾分类的推进,其他垃圾中化石源组分比例上升,热值显著提高。通过机械生物预处理技术,可将rMSW转化为高热值的垃圾衍生燃料(RDF),其热值可达原垃圾的1.5~2倍。相较于传统燃烧,RDF气化将难以利用的固废转化为易催化转化的合成气,且飞灰和二噁英等有害物质排放显著下降,具有较大的发展潜力和应用前景。RDF在水泥窑协同处置中展现出显著优势。一方面,水泥窑高温环境(1600℃)可彻底分解有害物质;另一方面,焚烧残渣中的重金属等成分能固溶在熟料晶格中,避免二次污染。气化效率与经济性是RDF气化规模化利用的关键,因此选取合适的气化技术及调控关键操作运行参数至关重要^[13]。

垃圾衍生燃料是城市垃圾经过“精加工”后得到的“标准煤”。水泥窑是一个天生的、高效的“垃圾净化器”和“能源转换器”。它们之间的结合可以完美地将“废物处理”和“工业生产”两系统耦合在一起,创造一个资源循环、环境友好、经济可行的可持续发展模式。这不仅是技术上的创新,更是循环经济理念的成功实践。相较于新生塑料,rMSW衍生替代塑料可显著减少温室气体排放。RDF水泥窑协同处置的碳减排效益成为工业部门脱碳的重要路径。在水泥窑炉生产中可将可燃废弃垃圾制成“替代燃料”进行消纳,可明显改善城镇环境面貌,为我国绿色高质量发展和节能减排发挥显著作用^[14-15]。

3.2 热解气化多联产技术

热解气化技术作为传统焚烧的替代方案,在碳中和背景下受到更多关注。与直接焚烧相比,热解气化在缺氧条件下将垃圾转化为合成气,主要成分为CO、H₂和CH₄,再通过净化系统去除杂质后用于发电或化工原料制备。该技术的优势在于,污染物生成量少,二噁英排放低;合成气利用方式灵活;灰渣熔融度高,重金属浸出风险低。热解产生的液相主要包括焦油和废水,对液相的处理遵循“分级、分量、资源化”的原则,优先考虑源头减量、过程控制。通过回收利用其中有价值的成分,实现“联产”,并对无法资源化的部分进行无害化处理。

在碳中和约束下,热解气化技术的价值进一步凸显。首先,合成气可通过水煤气变换反应制取氢气,为垃圾制氢开辟新路径;其次,合成气中的CO和H₂可作为化工原料合成甲醇、乙醇等基础化学品;最后,气化过程产生的生物炭具有土壤改良和碳封存双重功能^[16-17]。

3.3 园区级循环经济模式

静脉产业园模式从顶层设计出发,通过地理集聚和产业耦合,循环合理规划垃圾填埋场、焚烧厂等与城市物质代谢强度相匹配的代谢模式,实现物质和能量的闭路,集成和优化物质循环、能量流动网络,提升城市物质代谢和循环能力^[18-19]。这不仅能够实现垃圾能源化,还可将生态修复与产业开发结合起来,例如,在已封场的填埋场上建设光伏发电项目,形成“光伏+填埋场治理”新模式,并规划发展菌类种植、家禽饲养等

产业。采用共建共享模式,通过建立集科教、娱乐、工业、旅游为一体的生态体系,由运营商向周边社区支付生态补偿费用,从而实现经济效益与环境效益的统一。

4 碳捕集与利用:实现负排放的关键路径

对于垃圾焚烧过程中不可避免的化石源CO₂排放,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是实现碳中和的最后一道防线。尤其对已建项目,CCUS是深度脱碳的必由之路。

4.1 燃烧后捕集技术创新

燃烧后捕集系统无需对现有燃煤电厂进行过多的结构改造便可实现CO₂捕集,具有较为广泛的市场潜力^[20]。胺法捕集技术在燃煤电厂应用成熟,但用于垃圾焚烧烟气时面临挑战,烟气中SO_x、NO_x、HCl等杂质会引发胺液降解和发泡,增加运行成本。对此,两级吸收塔设计和抗污型胺液成为研发重点^[21]。热钾法碳捕集技术在垃圾焚烧领域展现出独特优势。与传统胺法相比,采用热碳酸钾溶液作为吸收剂,具有成本低、无毒、不挥发等优势,运营成本显著降低。基于碳酸钾溶液与CO₂和水的可逆反应,通过专有的热回收阶段实现能耗优化^[22]。

4.2 碳利用方向多元化

捕集后的CO₂可通过多种途径实现资源化利用,提升项目经济性,食品级CO₂提纯用于饮料制造、干冰生产等领域,经济价值高但市场容量有限;微藻养殖利用CO₂和电厂余热培育高附加值藻类(如螺旋藻);化学转化通过加氢反应制甲醇(CO₂+3H₂→CH₃OH+H₂O),或与垃圾热解气共重整制合成气;矿化固化利用焚烧底灰中的碱性成分(CaO、MgO)矿化固定CO₂,同时提高灰渣稳定性^[20]。

4.3 碳监测技术创新

精准监测是碳减排的基础。垃圾焚烧碳排放在线监测系统通过烟气组分实时分析(CO₂、CO、CH₄、O₂等),结合垃圾特性数据库和人工智能算法,实现碳排放的分钟级更新,精度较传统方法显著。这不仅为碳交易提供了可靠依据,也为工艺优化提供了实时反馈。

5 未来展望与结论:迈向碳中和的路线图

基于中国垃圾焚烧行业发展现状和碳中和目标,可规划“低碳-零碳-负碳”三阶段演进路径。

近期(现在至2030年):以效率提升和热电联产普及为主攻方向。推广中温次高压技术,使吨垃圾发电量提升至550 kWh/t以上;加快老旧机组改造,提高热电联产比例;建设循环经济产业园,实现余热多元化利用。政策层面,完善垃圾处理费与发电效率挂钩机制,将碳减排量纳入补贴考核体系。

中期(2030—2040年):向能源化与资源化并重转型。重点发展热解气化多联产技术,实现垃圾制氢、化学品合成等高值利用;推广CCUS技术,捕集化石源CO₂;突破飞灰资源化技术瓶颈,实现全量利用。设施布局从集中式向分布式转变,结合城市更新,将新焚烧厂建于城市发展中心,缩短供热半径。

长期(2040—2060年):实现负碳排放目标。通过BECCS(生物质能结合碳捕集与封存)技术,封存生物源CO₂;利用直接空气捕集(DAC)技术中和残余排放;形成跨行业碳循环网络,如CO₂-微藻-生物燃料产业链。最终,垃圾焚烧厂从能源供应商转型为城市物质代谢枢纽和碳中和技术平台。

6 结语

垃圾焚烧厂实现碳中和并非依靠单一技术路径的突破,而是系统变革的过程。从能源效率提升到智能运营优化,从协同处置到碳捕集利用,需要技术、政策、市场机制的协同创新。中国垃圾焚烧行业已从规模扩张转向质量提升阶段,在“运营为王”的时代,精细化管理和技术创新成为核心竞争力。随着标杆项目示范效应的扩散,中国垃圾焚烧行业正朝着“低碳化、零碳化、负碳化”方向坚定前行。未来,通过园区化布局、智慧化运营、资源化利用和协同化发展,垃圾焚烧厂将从单纯的废物处理设施转型为城市能源枢纽和资源循环中心,为中国实现“双碳”目标提供重要支撑。

参考文献:

- [1] 林昌梅.生活垃圾焚烧厂吨垃圾发电量的研究分析[J].环境卫生工程,2010,18(05):7-8.

- [2] 朱珊珊,梁志远,谷学峰,等. 某垃圾焚烧锅炉过热器管腐蚀穿孔失效分析[J]. 工业锅炉, 2024, (06): 52-58.
- [3] 白浩,罗昭强,亚云启. 垃圾焚烧炉高温过热器腐蚀及其防护研究[J]. 锅炉制造, 2025, (06): 54-56.
- [4] 车得福,亢艳滨,刘卫东,等. 天然气锅炉极限热效率及排烟热损失分析[J]. 能源研究与信息, 2001, 17(04): 217-224.
- [5] 陈继明,马硕,李子豪,等. 影响燃气锅炉热效率的主要因素分析[J]. 节能, 2020, 39(10): 50-53.
- [6] 李高亮,王乃继,肖翠微,等. 烟气再循环在煤粉工业锅炉上的数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(02): 125-128.
- [7] 王文刚,付晓慧,王学珍. 生活垃圾焚烧烟气污染物控制工艺选择[J]. 中国人口资源与环境, 2014, 24(S1): 87-91.
- [8] 柯文峰. SNCR+PNCR+烟气再循环脱硝工艺改造实例[J]. 山东化工, 2024, 53(17): 263-266.
- [9] 吕志中. 生活垃圾焚烧能源梯级利用探讨与应用[J]. 科技创新与应用, 2019, (32): 171-173.
- [10] 吴剑,蹇瑞欢,刘涛. 我国生活垃圾焚烧发电厂的能效水平研究[J]. 环境卫生工程, 2018, 26(03): 39-42.
- [11] 张宇飞,赵娜娜,黄杰,等. 垃圾焚烧电厂热电联产的经济性分析[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(04): 216-221.
- [12] 龚梦银,郭帅,李伟,等. 垃圾衍生燃料气化技术研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(03): 58-70.
- [13] 江旭昌. 对“垃圾衍生燃料”RDF之探析[J]. 新世纪水泥导报, 2021, 27(03): 2-6.
- [14] 刘跃谋,田应琼. “双碳”背景下的生活垃圾焚烧厂碳减排[J]. 资源节约与环保, 2025, (07): 5-9.
- [15] 丁海波. 垃圾焚烧发电厂厂用电率影响因素及节能降耗技术研究[J]. 技术与市场, 2025, 32(09): 58-62, 67.
- [16] 易正明,师利晨,陈晓琳. 水泥窑协同处置垃圾衍生燃料对 NO_x 和 SO_2 生成转化的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(05): 1631-1637.
- [17] 程永新,刘瑜,陈牧. 双碳目标下生物质热解多联产技术工艺探讨[J]. 山东工业技术, 2022, (04): 10-14.
- [18] 陈颖顺,王赛娅,金彦礼. 生物质气化多联产技术研究现状及发展前景[J]. 现代化工, 2022, 42(11): 49-53.
- [19] 毕莹莹,刘景洋,董莉. 城市静脉产业园物质代谢优化模式探讨[J]. 生态经济, 2019, 35(11): 201-204, 221.
- [20] 张瑞青,杜鹏,闵海华,等. 城市静脉产业园规划设计——以南方某市为例[J]. 四川环境, 2018, (03): 164-168.
- [21] 牟俊锐,毕金鹏,李福昭,等. 燃煤电厂二氧化碳燃烧后捕集技术研究进展[J]. 齐鲁工业大学学报, 2023, 37(03): 8-17.
- [22] 李雪宁,王茹洁,刘静怡,等. 中国电力行业碳捕集、利用与封存技术应用进展[J]. 低碳化学与化工, 2026, 51(01): 108-119, 149.
- [23] 张秋园,甘志超,岳海荣,等. 适用于燃煤电厂的碳捕集技术路线选择[J]. 煤炭工程, 2025, 57(02): 202-207.
- [24] 黄艳,胡治平,王玉玮,等. 电渗析用于燃烧后二氧化碳捕集的胺回收技术研究进展[J]. 热力发电, 2025, 54(06): 79-89.

Systematic Analysis and Technical Prospects of Carbon Neutrality Pathways for Waste Incineration Power Plant

ZHOU Tuan-tuan¹, ZHANG Yue², HUANG Liang^{3*}

- (1. Zhongshan Municipal Maintenance and Management Center, Zhongshan, Guangdong, 528400, China;
2. Bureau of Ecology and Environment of Jin'an District Lu'an City, Lu'an, Anhui, 237000, China;
3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: As an alternative to traditional landfill disposal, waste incineration achieves significant dual carbon reduction benefits by avoiding methane emissions and substituting for fossil fuel-based power generation. On the other hand, the incineration process itself inevitably generates carbon dioxide emissions. This study systematically analyzes the status and challenges of waste-to-energy plants, combined with the theoretical foundations and technological means of carbon neutrality, a series of practical measures are proposed to achieve energy conservation, consumption reduction, resource recovery, and low-carbon emissions in the waste incineration process. Research content includes innovations in energy efficiency improvement and process optimization technologies, refined management, expansion of circular economy boundaries, and advancements in carbon capture technology. Through integrated park planning, smart operations, resource utilization, and collaborative development, waste incineration plants will transform from mere waste disposal facilities into urban energy hubs and resource recycling centers, providing crucial support for China's achievement of its "dual carbon" goals.

Keywords: Steam parameter improvement; Artificial intelligence and big data application; Refined management of energy and material consumption; Flue gas heat loss control; Flue gas treatment process upgrade