

Research on pollutant emission reduction technology and energy efficiency improvement of solid waste incineration power generation under the “double carbon” target

Lianxiu Zhu

Baotou Ecological Security Barrier Research Center (Baotou Ecological Environment Monitoring Center), Baotou, Inner Mongolia, 014060, China

Abstract

Guided by the “carbon peaking and carbon neutrality” goals, solid waste incineration power generation—a crucial method for urban solid waste treatment through “reduction, harmlessness, and resource utilization”—must not only fulfill its responsibility in pollutant reduction but also contribute to carbon emission reduction through energy efficiency improvements. This paper focuses on the correlation mechanism between the “dual-carbon” targets and solid waste incineration power generation, analyzing the characteristics of pollutant emissions, carbon footprint, and the impact of energy efficiency on carbon reduction. The study establishes a pollutant reduction technology system across four stages: pretreatment, incineration process, flue gas purification, and fly ash/leachate treatment. Additionally, it proposes energy efficiency enhancement strategies from four dimensions: optimization of incineration systems, cascade utilization of waste heat, synergy with renewable energy, and digital intelligence.

Keywords

dual-carbon goals; solid waste incineration power generation; pollutant reduction; energy efficiency improvement; flue gas purification

“双碳”目标下固废焚烧发电的污染物减排技术与能效提升研究

朱连秀

包头市生态安全屏障研究中心（包头市生态环境监测中心），中国·内蒙古 包头 014060

摘要

在“碳达峰、碳中和”目标的指引之下，固废焚烧发电这一“减量化、无害化、资源化”处理城市固废的重要方式，既需承担污染物减排的责任，又要通过能效提升来助力碳减排。本文主要围绕着“双碳”目标与固废焚烧发电的关联机制，分析了固废焚烧发电的污染物排放特征、碳足迹及能效对碳减排的影响。在文中从预处理、焚烧过程、烟气净化、飞灰与渗滤液处理四个阶段构建了污染物减排技术体系，同时从焚烧系统优化、余热梯级利用、可再生能源协同、数字化智能化四个维度提出能效的提升策略。

关键词

双碳目标；固废焚烧发电；污染物减排；能效提升；烟气净化

1 引言

城市生活垃圾的产生量随着我国城市化进程加快也在逐年地攀升。据《中国统计年鉴 2024》数据可得，2023 年我国城市生活垃圾清运量达 2.5 亿吨，若仅依赖于填埋处理，不仅占用了大量的土地资源，还会因垃圾厌氧分解产生甲烷（甲烷温室效应是二氧化碳的 28 倍），进而加剧碳排放与环境污染。此时固废焚烧发电凭借“减量化率超 90%、无

害化彻底、同步回收能源”的优势，成为了近年来我国固废处理的主流方式之一。但固废焚烧发电在运营过程中却面临着“污染物排放控制”与“碳减排”的双重挑战：一方面焚烧过程会产生颗粒物（PM）、二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）、二噁英等污染物，一旦处理不当将威胁到生态环境与人体健康；另一方面是焚烧系统能耗较高、余热利用不充分等问题导致能效偏低，不但降低了能源的回收效率，还会增加化石能源消耗带来的间接碳排放。本文将通过梳理固废焚烧发电与“双碳”目标的关联逻辑，构建全流程的污染物减排技术体系，随之提出了多维度的能效提升路径，希望为行业实现“污染物达标排放”与“低碳高效运行”的双重

【作者简介】朱连秀（1986—），女，中国内蒙古包头人，本科，工程师，从事生态环境研究。

目标提供理论支撑与实践方案。

2 “双碳”目标与固废焚烧发电的关联机制

2.1 “双碳”目标的核心要求与固废处理行业的碳减排责任

“双碳”目标的核心是通过能源结构调整、产业升级、技术创新等手段，来推动全社会碳排放总量达峰后稳步下降，最终实现碳中和。而固废处理行业作为碳排放的重要来源之一，其碳减排责任主要体现在两个维度：一是减少“直接碳排放”，即控制垃圾填埋、焚烧过程中甲烷、二氧化碳等温室气体的直接排放；二是减少“间接碳排放”，即降低固废收集、运输、处理过程中的能源消耗带来的碳排放。

如果从固废处理技术对比来看，填埋处理因甲烷的排放量大（，碳足迹显著高于焚烧发电。据测算，每吨垃圾填埋的全生命周期碳排放量约为200-300千克CO₂当量，而焚烧发电通过能源回收可部分抵消碳排放，一般每吨垃圾焚烧发电的全生命周期碳排放量可降至50-100千克CO₂当量。因此推广固废焚烧发电技术、提升其运行效率，在现阶段是固废处理行业落实“双碳”目标的关键举措。同时“双碳”目标也对固废焚烧发电行业提出明确要求——进一步降低焚烧过程中的污染物排放，以避免因污染物治理不当引发二次环境问题，并且通过能效提升来增加可再生能源的产出，进而减少对化石能源的依赖，降低间接的碳排放，最终实现“处理固废”与“低碳发电”的协同发展。

2.2 固废焚烧发电的污染物排放与碳足迹特征

固废焚烧发电的污染物排放具有“多类型、复杂性”特点，其主要包括了烟气污染物、飞灰、渗滤液三大类，且部分污染物的治理过程与碳排放存在着“协同”或“权衡”关系。就烟气污染物来看，颗粒物（PM）、SO₂、NO_x是常规污染物，一般需通过除尘、脱硫、脱硝设备处理；而二噁英是毒性极强的持久性有机污染物，需要通过“3T+E”（温度、时间、湍流、过量空气）控制与活性炭吸附协同去除。而从碳足迹特征来看，固废焚烧发电的全生命周期碳排放涵盖了垃圾焚烧、能源消耗和辅助这三个环节。

2.3 固废焚烧发电能效水平对“双碳”目标的影响机理

能源替代效应：固废焚烧发电产生的电力若接入电网，便可替代火电厂的化石能源发电，从而减少电网的整体碳排放。据测算，每千瓦时固废焚烧发电可替代约0.8千瓦时燃煤发电，能够减少约0.6千克CO₂排放。因此提升了固废焚烧发电的能效，可显著的增加化石能源替代量，进而扩大碳减排的效果。

能耗降低效应：一般固废焚烧系统的风机、水泵等辅机设备能耗较高，约占电厂总能耗的30%-40%。而通过优化焚烧系统设计、采用高效辅机设备，则可降低单位垃圾处理量的能耗。

采用梯级利用技术，就能提升余热的回收效率，在增加发电量的同时降低了单位发电量的碳排放强度^{[1][2]}。

3 “双碳”目标下固废焚烧发电的污染物减排技术体系

3.1 预处理阶段

预处理阶段的核心是通过垃圾分选、破碎、干燥等技术，在减少焚烧过程中污染物生成量的同时提升垃圾的热值，进而为后续能效提升奠定基础。比如智能分选技术，此介绍采用机械分选结合人工智能识别的方式，能够对原生垃圾进行分选。即通过滚筒筛、风选机分离垃圾中的无机物，来减少焚烧过程中颗粒物的生成。然后利用基于计算机视觉的AI识别系统，精准地分离除垃圾中的塑料、橡胶等化石基成分与厨余、纸张等生物质成分。

3.2 焚烧过程中

焚烧作为污染物生成的核心环节，可以通过优化焚烧炉设计、控制燃烧参数从源头上减少污染物的生成，同时还兼顾了燃烧效率与碳减排需求。就低氮燃烧技术来说，NO_x的生成主要与燃烧温度、过量空气系数相关，如果采用“空气分级燃烧+烟气再循环”技术便可从源头减少NO_x生成。

3.3 烟气净化阶段

烟气净化阶段在控制污染物排放过程当时为关键环节，建议采用“组合工艺”去除颗粒物、SO₂、NO_x、二噁英等污染物，同步优化工艺参数，即可降低净化过程的碳排放。具体来说：先使用高效除尘加脱硫协同技术，借助“半干法脱硫+袋式除尘器”的组合工艺，在半干法脱硫中利用石灰浆作为脱硫剂，使其与烟气中的SO₂反应生成亚硫酸钙、硫酸钙，反应产物将以颗粒物的形式存在，再通过后续袋式除尘器一并进行去除，便实现了“脱硫+除尘”协同处理。在此基础上，再使用高效脱硝加二噁英去除协同技术。即采用“选择性催化还原法（SCR）+活性炭吸附”组合工艺，此时SCR脱硝在催化剂的作用下，会利用氨（NH₃）将NO_x还原为N₂与H₂O，而活性炭吸附可同时去除二噁英、重金属（如汞）与未反应的氨^[3]。

3.4 飞灰与渗滤液

飞灰与渗滤液二者是固废焚烧发电的主要固废与液废，如果处理不当就会造成二次污染，一般可以无害化、资源化的技术进行处理，便能有效地降低处理过程的能耗与碳排放。以飞灰稳定化与协同处置技术的组合为例来说，飞灰因含有重金属与二噁英，因此属于危险废物，要先进行稳定化处理。即采用“螯合剂稳定化+水泥固化”组合工艺，此时螯合剂（如二硫代氨基甲酸盐类）与飞灰中的重金属反应生成稳定的螯合物，水泥固化则形成了固化体，确保了重金属浸出浓度符合《生活垃圾焚烧飞灰污染控制标准》（GB16889-2008）要求。

4 “双碳”目标下固废焚烧发电的能效提升策略

4.1 焚烧系统能效优化

固废焚烧发电的核心能耗单元就是焚烧系统，针对此系统可通过优化炉排设计、辅机设备与运行参数，显著的降低能耗、提升能效。从炉排热效率的优化为切入点，建议在炉排干燥段、燃烧段与燃尽段分别设置独立的温度控制系统，然后根据各段垃圾处理需求精准地调节加热功率，同时在焚烧炉炉壁采用耐高温浇注料、陶瓷纤维保温层的复合保温结构。此举可将炉壁散热损失从传统设计的5%-8%降至2%-3%，有效地提升了炉内热量的利用率。而对于高效辅机设备的选型与运行优化来说，风机、水泵等高能耗辅机设备应优先选用高效节能型号，以避免“大马拉小车”导致的能耗浪费现象。再配合建立辅机设备能效监测体系，经由智能电表、流量传感器，实时地监测各辅机设备的能耗与运行参数，及时地对能效偏低的设备进行维护或更换。

4.2 余热梯级利用

固废焚烧发电过程中产生的余热（如高温烟气、汽轮机排汽、设备散热）如果仅仅用于发电，便会造成员低品位余热的浪费。此时通过余热梯级利用，将不同温度等级的余热用于不同用途，能够最大化的提升能源的利用效率。一方面是高温烟气余热的深度利用。因为传统余热利用仅通过余热锅炉产生蒸汽发电，此时烟气出口温度仍高达200-250℃，存在着大量的热量浪费。但采用“余热锅炉+低温省煤器+空气预热器”梯级利用系统烟气余热利用率提升15%-20%，单位垃圾发电量增加30-50千瓦时/吨。在此系统当中，高温烟气（800-1000℃）先进入余热锅炉产生高温高压的蒸汽（用于发电），降温后的烟气（300-400℃）进入低温省煤器可加热锅炉给水（替代部分蒸汽加热，减少蒸汽消耗），经进一步降温后的烟气（200-250℃）进入空气预热器，用于加热助燃空气（将助燃空气温度从常温提升至150-200℃），最终烟气温度降至150-180℃时再进入后续烟气净化系统。另一方面是汽轮机排汽的余热回收。由于汽轮机排汽属于低品位余热，传统方式会直接通过冷却塔进行冷却，使得热量被完全浪费。而采用“吸收式热泵+余热供暖”技术即可回收排汽余热，即利用汽轮机抽汽（高温蒸汽）作为驱动热源，通过吸收式热泵将排汽余热提升至60-70℃，将其用于厂区供暖、职工生活区供暖，胡总和是为周边社区提供集中的供暖服务。

4.3 可再生能源协同

如果将固废焚烧发电与太阳能、风能等可再生能源协同进行发展，就能优化能源结构，以此减少对于化石能源的依赖，以及提升电厂的整体碳减排能力。首先要实现太阳能与焚烧发电的协同。在实践中积极地利用焚烧发电厂厂区闲置土地（如厂房屋顶、停车场、灰场）建设分布式光伏发电系统，其中光伏发电优先满足厂区自用（如辅机设备用电、办公用电、生活用电），剩余电力则接入电网或用于厂区储能（如储能电池、储氢系统）。如若焚烧发电厂位于光照充足地区（如我国西北地区），还可建设“光伏+光热”互补系统。其次是风能与焚烧发电的协同。一般风力资源丰富的地区（如我国华北、西北地区），焚烧发电厂可配套建设小型的风电场（单机容量1.5-2.5兆瓦），使得风能发电与焚烧发电形成互补，且将风能发电与储能系统相结合，进而避免风电波动对于电网的影响，提升了电力供应的稳定性。此外便是绿氢与焚烧发电的协同。即利用焚烧发电产生的富余电力（如夜间用电负荷低时），通过电解水制氢（绿氢），将氢气作为焚烧炉的辅助燃料（替代天然气），或者是用于厂区交通工具（如氢能叉车、氢能通勤车），从而实现“电-氢-热”的能源循环。

置土地（如厂房屋顶、停车场、灰场）建设分布式光伏发电系统，其中光伏发电优先满足厂区自用（如辅机设备用电、办公用电、生活用电），剩余电力则接入电网或用于厂区储能（如储能电池、储氢系统）。如若焚烧发电厂位于光照充足地区（如我国西北地区），还可建设“光伏+光热”互补系统。其次是风能与焚烧发电的协同。一般风力资源丰富的地区（如我国华北、西北地区），焚烧发电厂可配套建设小型的风电场（单机容量1.5-2.5兆瓦），使得风能发电与焚烧发电形成互补，且将风能发电与储能系统相结合，进而避免风电波动对于电网的影响，提升了电力供应的稳定性。此外便是绿氢与焚烧发电的协同。即利用焚烧发电产生的富余电力（如夜间用电负荷低时），通过电解水制氢（绿氢），将氢气作为焚烧炉的辅助燃料（替代天然气），或者是用于厂区交通工具（如氢能叉车、氢能通勤车），从而实现“电-氢-热”的能源循环。

4.4 数字化与智能化

借助物联网、大数据、人工智能等数字化技术，得以实现固废焚烧发电全流程智能化管控，进而优化运行参数、减少人为操作失误，达到提升能效与碳减排水平的效果。目前智能燃烧优化系统应用比较广泛，此系统基于物联网技术，借助焚烧炉内安装的温度传感器、烟气成分传感器（O₂、CO、NO_x浓度）、炉排运行状态传感器，可实时地采集燃烧过程数据。随后通过大数据分析平台建立燃烧工况与能效、污染物排放的关联模型，便能识别最优的燃烧参数（如炉排速度、送风量、炉膛温度），再利用人工智能算法（如神经网络算法、遗传算法），根据实时采集的数据动态地调整燃烧参数，便确保了焚烧过程始终处于“高效低排”状态。

5 结语

基于“双碳”目标，固废焚烧发电行业需同时应对“污染物减排”与“能效提升”的双重挑战，而这既是行业绿色低碳转型的必然要求，也是实现固废“减量化、无害化、资源化”的关键路径。本文通过分析“双碳”目标与固废焚烧发电的关联机制，明确了固废焚烧发电在碳减排中的责任与作用，即通过污染物减排技术控制二次污染，再通过能效提升策略增加可再生能源产出、降低碳排放，最终二者协同发力可推动行业实现“环境效益”与“碳减排效益”的统一。

参考文献

- [1] 谢瑶.焚烧发电变废为宝[N].经济日报,2025-02-11(011).
- [2] 李遥,薛洪其.生活垃圾焚烧发电厂掺烧一般工业固废的大气源强核算——以贵州省某厂为例[J].广东化工,2025,52(18):125-129+100.
- [3] 郭霁莹.化债资金加快落地垃圾焚烧发电行业迎来现金流修复契机[N].第一财经日报,2025-02-25(A09).