

垃圾焚烧发电厂热能动力系统优化与余热利用技术研究

张 强

广州环投从化环保有限公司 广州从化 510900

摘要：垃圾焚烧发电作为实现垃圾减量化、无害化、资源化的核心途径，在环境保护与能源供应中占据重要地位。本文围绕垃圾焚烧发电厂热能动力系统展开研究，分析当前系统运行中的主要瓶颈，包括焚烧工况波动引发的蒸汽参数不稳定、热能转换效率偏低及余热回收利用不充分等问题；进而阐述焚烧炉燃烧控制、蒸汽动力循环参数匹配、辅机设备能效提升等关键优化技术；探索烟气余热梯级利用、低品位蒸汽再利用及系统能量集成优化的技术路径，为提升垃圾焚烧发电厂能源利用效率、推动行业绿色低碳发展提供技术参考。

关键词：垃圾焚烧发电厂；热能动力系统；系统优化

随着城市化进程加快，城市生活垃圾产生量持续增长，垃圾处理成为生态环境保护的重要课题。垃圾焚烧发电技术通过高温焚烧实现垃圾减容减量，同时回收热能转化为电能或热能，既缓解了垃圾填埋带来的土地资源压力，又为能源结构多元化提供了补充，是践行绿色发展理念的重要实践。热能动力系统作为垃圾焚烧发电厂的核心组成部分，其运行效率与余热利用水平直接决定了项目的环保效益与经济效益。当前，部分垃圾焚烧发电厂的热能动力系统仍面临诸多挑战，影响了能源回收效率与系统稳定性。因此，针对系统现状与瓶颈，研发并应用针对性的优化技术，探索深度余热利用路径，对于提升垃圾焚烧发电行业的整体发展质量、助力“双碳”目标实现具有重要现实意义。

1 垃圾焚烧发电厂热能动力系统的现状与瓶颈

1.1 焚烧工况波动导致的蒸汽参数不稳定

垃圾焚烧的核心原料是城市生活垃圾，其成分具有显著的复杂性与差异性，涵盖有机物、无机物等多种类型，且不同批次垃圾的水分含量、热值、颗粒度等指标波动较大。同时，垃圾进料过程中，受进料设备运行特性与人工操作等因素影响，进料速度难以保持绝对均匀，导致焚烧炉内的燃料供给量呈现波动性。焚烧工况的不稳定直接作用于燃烧过程，使得炉内温度场分布不均，燃烧强度时高时低。这种波动传递至热能转换环节，会导致锅炉内蒸汽的生成速率、压力及温度难以维持在设计额定范围内，出现蒸汽参数频繁波动的现象。蒸汽参数的不稳定不仅会影响汽轮机等动力设备的运行稳定性，增加设备磨损与故障风险，还会降低电能生

产的连续性与稳定性，对电网供电质量产生不利影响。

1.2 热能转换效率偏低的问题

热能转换效率是衡量垃圾焚烧发电厂能源利用水平的核心指标，当前部分垃圾焚烧发电厂的热能转换效率仍处于相对较低水平。造成这一现象的原因是多方面的：在燃烧环节，由于垃圾成分复杂且波动较大，焚烧炉内易出现局部燃烧不充分的情况，部分可燃成分未能完全氧化分解，导致热能释放不彻底；在换热环节，锅炉受热面易因垃圾焚烧产生的烟气粉尘附着形成积灰、结渣，降低了传热系数，影响热能从烟气向工质的传递效率；在动力循环环节，蒸汽动力循环的参数设置未能充分适配焚烧工况的变化，循环流程设计缺乏针对性，导致蒸汽的热能未能高效转化为机械能进而转化为电能；此外，系统各设备间的协同运行不足，也使得整体热能转换效率受到制约，未能充分发挥各设备的设计效能^[1]。

1.3 余热回收利用不充分的现状

垃圾焚烧发电厂在运行过程中会产生大量余热，主要以烟气余热和低品位蒸汽余热的形式存在，这部分余热具有可观的回收利用潜力。当前，部分垃圾焚烧发电厂的余热回收系统存在设计不完善、利用方式单一等问题。在烟气余热回收方面，多数电厂仅通过锅炉受热面回收部分高温烟气热量，对于中低温烟气的余热未能有效捕获，大量余热随烟气排放至大气中，不仅造成能源浪费，还可能增加烟气处理的能耗；在低品位蒸汽利用方面，部分电厂将汽轮机排汽等低品位蒸汽直接冷凝排放，未充分挖掘其在供暖、工业用热等

领域的应用价值。此外，余热回收系统与主能源系统缺乏有效的协同联动，导致余热回收效率偏低，未能实现能源的梯级利用与最大化回收^[2]。

2 热能动力系统的关键优化技术

2.1 焚烧炉燃烧过程的优化控制

焚烧炉燃烧过程的稳定与充分是提升热能动力系统性能的基础，其优化控制核心在于实现燃烧工况的动态调节与精准把控。针对垃圾成分波动与进料不均的问题，可采用智能进料调控技术，通过在线监测垃圾的热值、水分含量等关键指标，动态调整进料速度与进料量，确保炉内燃料供给的均衡性。在燃烧空气调节方面，基于炉内温度、氧含量等实时监测数据，采用动态配风技术，合理分配一次风与二次风的风量与风速，优化空气与燃料的混合比例，促进燃料充分燃烧，减少不完全燃烧损失。同时，通过优化焚烧炉炉型结构，采用分区燃烧设计，强化炉内气流扰动，使温度场分布更加均匀，避免局部高温或低温区域的形成，提升燃烧稳定性。此外，引入先进的燃烧自动控制系统，实现炉内温度、压力等参数的闭环控制，及时响应工况变化，确保燃烧过程始终处于最优状态。

2.2 蒸汽动力循环系统的参数匹配优化

蒸汽动力循环系统的参数匹配直接影响热能向机械能的转换效率，其优化需基于焚烧工况特性与设备设计参数，实现循环参数的动态适配与流程优化。在蒸汽参数优化方面，根据垃圾焚烧产生的热能特性，合理设定蒸汽的初压、初温及终压等关键参数，避免参数过高导致设备投资增加或参数过低造成效率损失。针对焚烧工况波动的特点，采用变工况参数优化策略，当工况发生变化时，及时调整蒸汽参数，确保循环系统始终运行在高效区间。在循环流程优化方面，合理引入回热循环与再热循环技术，通过回热加热器利用汽轮机抽汽加热锅炉给水，减少锅炉加热负荷，提升循环热效率；通过再热装置将高压缸排出的蒸汽重新加热至高温后送入中低压缸做功，降低蒸汽湿度，减少汽轮机内部损失。同时，优化循环系统的设备布局与连接方式，减少蒸汽输送过程中的压力损失与热量损失，提升系统整体运行效率^[3]。

2.3 主要辅机设备的能效提升技术

辅机设备作为热能动力系统的重要组成部分，其运行效率对系统整体能效具有显著影响，针对泵、风机、换热器等关键辅机设备的能效提升是系统优化的重要环节。对于换

热器，采用强化传热技术，通过选用高效传热材料、优化换热面结构设计，增加传热面积、提高传热系数，减少换热温差损失，提升换热效率；同时，定期进行换热器清洗与维护，避免积灰、结垢对传热效果的影响。对于泵与风机等流体机械，采用变频调速技术，根据系统运行负荷的变化，动态调整设备转速，使设备输出功率与负荷需求精准匹配，避免低负荷运行时的能源浪费；此外，优化设备的气动性能与机械结构，减少内部泄漏与机械摩擦损失，提升设备运行效率。针对当前系统中存在的密封性能不足这一显著问题，积极引入并采用了一种新型的高性能密封材料，并结合创新的密封结构设计，旨在有效减少蒸汽、烟气以及其他工质在运行过程中的泄漏现象，从而显著降低由此带来的能量损失。通过这一系列改进措施，能够确保系统在能量传递过程中的完整性和高效性，避免因泄漏导致的能量浪费。在此基础上，辅机设备对整个系统效能的贡献度也将得到显著提升，进一步优化系统的整体运行效率，为系统的稳定、高效运行提供有力保障。

3 深度余热利用的技术路径

3.1 烟气余热的梯级利用技术

烟气作为垃圾焚烧发电厂余热的主要载体，其温度范围覆盖高温、中温、低温区间，采用梯级利用模式可最大化回收烟气中的热能。在高温段（烟气温度高于 400℃），利用烟气热量加热锅炉给水或产生过热蒸汽，直接参与蒸气动力循环，提升电能产出；此阶段可通过优化锅炉受热面布置，增加高温段传热面积，强化热能捕获效率。在中温段（烟气温度介于 200℃ – 400℃），利用烟气余热预热焚烧所需的助燃空气，提升燃烧效率，同时可设置余热锅炉产生低压蒸汽，用于驱动溴化锂制冷机组或供应厂区生产用热；某垃圾焚烧项目通过在该温度段增设余热回收装置，将烟气余热转化为厂区供暖热源，不仅减少了化石能源消耗，还降低了烟气排放温度。在低温段，即当烟气温度低于 200℃的情况下，充分利用这些低温烟气的余热资源，将其有效转化为加热生活热水或应用于污泥干化等工艺过程中，从而实现对余热资源的深度利用和高效转化。为了克服低温余热回收过程中普遍存在的传热效率低下以及露点腐蚀等难题，特别采用了高效低温换热器技术。这种换热器不仅显著提升了传热效率，还通过特殊材料和设计有效防止了露点腐蚀现象的发生，从而确保了余热利用系统的长期稳定运行，为节能减排和资源循

环利用提供了坚实的技术保障。

3.2 低品位蒸汽的再利用途径

低品位蒸汽（通常指压力低于0.5MPa、温度低于200℃的蒸汽）由于能量密度较低，直接用于发电的效率不高，但其在工业生产与民生领域具有广泛的应用场景。垃圾焚烧电厂可根据周边用能需求，构建多元化的低品位蒸汽再利用体系。对于周边存在工业园区的电厂，可将低品位蒸汽通过管网输送至园区，为化工、纺织、食品加工等企业提供生产用热，替代传统燃煤锅炉，减少区域污染物排放；某工业园区配套垃圾焚烧电厂通过该方式，实现了对周边三家企业的稳定供热，年替代标准煤数千吨。对于城市近郊的电厂，可将低品位蒸汽用于城市集中供暖，通过换热站将蒸汽热量传递至供暖管网，为居民提供清洁供暖服务，改善城市供暖能源结构。此外，还可以通过利用低品位蒸汽来驱动吸收式制冷机组，这样就可以产生出冷水。这些冷水可以用于电厂自身的空调系统，也可以用于周边的商业建筑进行制冷。通过这种方式，可以实现“冬供暖、夏供冷”的综合能源服务模式，从而大大提升低品位蒸汽的利用价值。这种模式不仅可以满足不同季节的能源需求，还可以提高能源利用效率，降低能源消耗，对于推动能源的可持续发展具有积极的意义。

3.3 系统整体能量的集成与优化

深度余热利用的核心在于实现系统整体能量的统筹规划与高效匹配，通过构建能量集成体系，打破各子系统之间的能量壁垒，实现余热资源的优化配置。首先，建立系统能量平衡分析体系，全面梳理焚烧系统、蒸汽动力循环系统、余热利用系统等各环节的能量输入、输出与损失情况，明确余热资源的数量、品质及分布特征。基于能量平衡分析结果，优化系统能量流动路径，将不同品位的余热资源与相应的用能需求精准匹配，避免高品位余热低用或低品位余热滥用的情况。例如，将高品位烟气余热优先用于发电，中品位余热用于工业供热或制冷，低品位余热用于生活热水供应，形成阶梯式能量利用模式。同时，为了进一步提升能源利用效率，将着重强化各系统之间的协同联动机制，确保余热利用系统与主能源系统的运行状态能够实现实时匹配。具体而言，当

主能源系统的工况发生任何变化时，余热利用系统能够迅速捕捉到这些变化，并立即做出相应的调整，优化余热利用方案。这样一来，可以确保整个能源系统始终保持在高效协同的最佳运行状态。此外，通过系统整体能量的集成与优化配置，能够实现对余热资源的最大化回收利用，从而显著提升电厂的综合能源利用效率，达到节能减排、资源高效利用的目标。

4 结语

垃圾焚烧发电厂作为兼具环保与能源属性的重要基础设施，其热能动力系统的运行效率与余热利用水平直接关系到行业的可持续发展。通过对系统现状与瓶颈的分析，明确了焚烧工况波动、热能转换效率偏低、余热回收不充分是当前面临的主要问题。针对这些问题，从焚烧炉燃烧控制、蒸汽动力循环参数匹配、辅机设备能效提升三个维度提出了关键优化技术，为解决系统运行难题、提升系统稳定性与效率提供了技术支撑；同时，探索了烟气余热梯级利用、低品位蒸汽再利用及系统能量集成优化的深度余热利用路径，为挖掘能源回收潜力、实现能源最大化利用提供了可行方案。通过上述技术的应用与推广，垃圾焚烧发电厂的热能动力系统能够实现运行稳定性与能源利用效率的双重提升，不仅可以降低企业运营成本，还能减少能源浪费与污染物排放，为行业绿色低碳转型注入动力。未来，随着技术的不断创新与升级，垃圾焚烧发电行业将在环境保护与能源供应中发挥更大作用，为推动生态文明建设、实现“双碳”目标作出重要贡献。

参考文献：

- [1] 饶龙欣.浅谈发电厂热能动力系统优化与节能改造研究[J].魅力中国,2021(51).
- [2] 孙小静.面向余热利用的换热器网络耦合冷电联产系统集成[D].大连理工大学,2022.
- [3] 赵鹏,胡甫才,薛厚强,等.柴油发电机余热利用制冷系统设计及性能分析[J].小型内燃机与车辆技术,2020,49(2):5.