

基于热力学分析的垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化研究

胡俊凯

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110028

摘 要： 垃圾焚烧电厂热能动力系统由热能回收、蒸汽循环及发电单元构成。通过建立能量与焓分析法综合评价体系、分析主蒸汽参数关系、优化再热系统等，从数学建模、参数分析、仿真模拟、多目标优化等多方面，实现发电效率优化，还探讨了低压省煤器热集成、焓损诊断等提升效率方法及优化方向。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；热能动力系统；发电效率优化

Optimization of Power Generation Efficiency of Thermal Power System in Waste Incineration Power Plant based on Thermodynamic Analysis

Hu Junkai

Guangzhou environmental investment Conghua environmental protection energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The thermal power system of waste incineration power plant is composed of thermal energy recovery, steam cycle and power generation units. By establishing the comprehensive evaluation system of energy and exergy analysis method, analyzing the relationship between main steam parameters, optimizing the reheat system, etc., the optimization of power generation efficiency is realized from the aspects of mathematical modeling, parameter analysis, simulation, multi-objective optimization and so on. The efficiency improvement methods and optimization direction of low-pressure economizer thermal integration and exergy loss diagnosis are also discussed.

Keywords： waste incineration power plant; thermal power system; generation efficiency optimization

引言

《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》（2021年颁布）强调要提高垃圾焚烧处理能力和运行水平。垃圾焚烧电厂热能动力系统作为垃圾资源化利用的关键，其发电效率优化意义重大。该系统由热能回收、蒸汽循环及发电单元构成，基于热力学定律建立评价体系可全面评估其性能。主蒸汽参数、再热系统等诸多因素影响发电效率，通过数学建模、参数敏感性分析、仿真平台搭建等方法，能为优化提供依据。构建多目标优化模型、分析帕累托最优解集等措施，有助于实现系统高效稳定运行，符合政策提升垃圾处理效能的导向。

一、垃圾焚烧电厂热能动力系统热力学基础

（一）热能动力系统组成原理

垃圾焚烧电厂热能动力系统主要由热能回收系统、蒸汽循环系统及发电单元构成。热能回收系统通过焚烧垃圾产生高温烟气，利用余热锅炉吸收其热量，将水加热成高温高压蒸汽，实现热能的回收利用^[1]。蒸汽循环系统以高温高压蒸汽为工质，蒸汽进入汽轮机，在汽轮机内膨胀做功，推动汽轮机转子旋转，将热能转化为机械能。做功后的蒸汽排入凝汽器，被冷却凝结成水，再经给水泵送回余热锅炉重新加热，如此循环。发电单元则是由

与汽轮机同轴相连的发电机组，汽轮机转子的机械能带动发电机转子旋转，通过电磁感应原理将机械能转化为电能，最终实现垃圾焚烧热能到电能的高效转换，为外界提供电力。

（二）热力学分析方法框架

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，建立基于热力学第一定律和第二定律的能量分析法与焓分析法综合评价体系至关重要^[2]。能量分析法基于热力学第一定律，主要关注系统中能量的数量守恒，通过计算能量的输入与输出，分析系统在能量转换过程中的效率，能直观了解系统将垃圾化学能转化为电能等可用能量的比例情况。而焓分析法依据热力学第二定律，不仅考虑能量数量，

更着重能量质量，揭示系统中不可逆损失，识别导致可用能贬值的关键环节。将两者结合，既能从能量数量层面把握系统宏观能量利用情况，又能从能量质量角度深入剖析系统内部不可逆性，从而为全面、准确评价垃圾焚烧电厂热能动力系统性能，进而优化发电效率提供有力的分析框架。

二、蒸汽参数对汽轮机效率的影响机理

（一）主蒸汽参数关联性分析

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，主蒸汽压力与温度这两个参数存在紧密关联性。主蒸汽压力提升时，若温度保持不变，蒸汽的比容减小，单位质量蒸汽携带的能量在汽轮机内做功能力增强。然而，这也可能导致蒸汽湿度增加，对汽轮机叶片产生侵蚀，影响汽轮机效率。而主蒸汽温度升高，蒸汽的理想焓降增大，使得汽轮机的做功能力进一步提升，同时能有效减少蒸汽湿度，降低对叶片的侵蚀，提高汽轮机效率。但温度过高又会对汽轮机材料的耐热性能提出更高要求。这两个参数相互制约又相互影响，共同作用于汽轮机的做功过程，进而影响汽轮机的等熵效率和机组内效率，对垃圾焚烧电厂发电效率产生重要影响^[3]。

（二）再热系统热力学优化

再热系统通过将汽轮机高压缸排出的蒸汽重新引入锅炉加热，再送入中低压缸继续做功，有效提升了循环热效率。在热力学优化中，蒸汽参数的合理匹配至关重要。再热蒸汽温度升高，可增加工质在汽轮机内的焓降，提高汽轮机效率，但过高的温度可能导致金属材料性能下降及成本增加。再热蒸汽压力同样影响显著，适宜的压力能使再热过程与主蒸汽循环更好协同，实现能量的高效利用。通过热力学分析，基于朗肯循环原理^[4]，寻找蒸汽温度与压力的最佳匹配点，可优化再热系统，提升垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率，在保障设备安全运行的同时，最大化能源利用效率。

三、系统建模与关键参数仿真

（一）汽轮机系统数学建模

1. 热力过程状态方程构建

在汽轮机系统数学建模中，热力过程状态方程构建至关重要。需综合考虑工质特性与热力学原理，建立能够精准描述蒸汽在汽轮机内热力状态变化的方程。例如，针对蒸汽膨胀过程，结合理想气体状态方程及蒸汽实际特性进行修正，以刻画蒸汽压力、温度、比容等参数间关系。同时，将汽轮机级效率纳入考量，其反映了蒸汽能量转换为机械功的实际效果，对状态方程产生影响。对于蒸汽膨胀曲线，它直观展现蒸汽在汽轮机内状态演变，为状态方程提供关键边界条件与变化趋势。通过这样的构建，可全面、准确地描述汽轮机热力过程，为后续发电效率优化提供坚实的数学基础^[5]。

2. 参数敏感性分析模型

参数敏感性分析模型用于探究各参数变化对汽轮机系统性能

的影响程度。在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，诸多参数如蒸汽压力、温度、流量等，均与汽轮机输出功率紧密相关。通过构建该模型，能够量化每个参数改变时，汽轮机输出功率的响应幅度^[6]。例如，当蒸汽压力出现波动，模型可精准呈现出其对汽轮机做功能力的具体影响，以及由此导致的发电效率变化。借助参数敏感性分析模型，可快速甄别出对汽轮机输出功率及发电效率影响最为显著的关键参数，为后续针对性的参数优化提供重要依据，助力实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率的有效提升。

（二）整体系统仿真平台开发

1. EBSILON 仿真模型搭建

基于典型垃圾热值参数构建热力系统数值仿真平台，其中 EBSILON 仿真模型搭建是关键环节。在搭建过程中，需依据垃圾焚烧电厂热能动力系统的实际结构与运行原理，精确设置各组件参数。例如，按照垃圾的典型热值设定焚烧炉的输入热量、燃烧效率等参数，依据汽轮机的设计规格确定其进汽参数、排汽参数以及效率等。同时，结合实际的换热设备特性，合理设置换热器的传热系数、端差等参数。通过这些精确设置，构建起贴合实际运行情况的 EBSILON 仿真模型，为后续基于热力学分析的发电效率优化研究提供可靠平台^[7]。

2. 动态工况模拟方法

为实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化，在整体系统仿真平台开发中，动态工况模拟方法设计了包含锅炉负荷波动、蒸汽参数调节的时域响应仿真模块。垃圾焚烧过程中，锅炉负荷会因垃圾特性、进料量等因素产生波动，这对发电效率影响显著^[8]。通过该模块可模拟不同工况下锅炉负荷的动态变化情况，同时考虑蒸汽参数调节，如蒸汽温度、压力等的改变，研究其对发电效率的影响。在时域上分析响应过程，清晰呈现系统在不同时刻对工况变化的响应特性，有助于深入了解热能动力系统在动态工况下的运行规律，为进一步优化发电效率提供精准的数据支持与理论依据，助力垃圾焚烧电厂实现高效稳定发电。

四、系统效率优化策略研究

（一）主蒸汽参数优化配置

1. 多目标优化模型构建

在垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优化研究中，多目标优化模型构建至关重要。需综合考虑多个关键因素，以实现系统整体性能提升。综合热效率反映了系统热能有效利用程度，对发电效率影响显著；烟效率则从能量品质角度衡量系统的完善程度，可更精准地剖析能量转化过程中的损失。同时，设备投资也是不可忽视的经济要素，过高投资会增加成本，降低经济效益。因此，要以综合热效率、烟效率和设备投资为目标函数，基于热力学原理及相关约束条件，构建多目标优化模型^[9]。通过该模型求解，能获取主蒸汽参数的最佳配置方案，在提高发电效率的同时，兼顾系统经济性，为垃圾焚烧电厂的高效运行提供有力支持。

2. 帕累托最优解集分析

在基于热力学分析的垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率优

化研究中，对于主蒸汽参数优化配置的帕累托最优解集分析至关重要。通过 NSGA-II 算法求解蒸汽压力温度的优化配置方案后，帕累托最优解集能够呈现出在多个相互冲突的目标（如发电效率最大化、设备成本最小化等）之间的最佳权衡关系。在该解集中的每一个解，都代表着一种在当前约束条件下无法在不降低其他目标性能的前提下，进一步提高某一目标性能的蒸汽参数配置方案。对其深入分析，有助于从众多方案里筛选出最符合垃圾焚烧电厂实际需求与发展战略的主蒸汽参数优化配置，从而切实提升系统发电效率^[10]。

（二）余热回收系统改进

1. 低压省煤器热集成

在垃圾焚烧电厂热能动力系统中，低压省煤器热集成对系统效率提升具有重要意义。通过将低压省煤器与系统进行有效热集成，可实现对余热的高效回收利用。一方面，将低压省煤器布置在合适位置，使其能够充分吸收低温烟气的热量，提高进入锅炉的给水温度，进而减少燃料消耗。另一方面，合理设计热集成流程，优化工质在低压省煤器与其他设备间的流动与换热，确保余热传递的高效性与稳定性。这种热集成方式，不仅能增强低压蒸汽余热回收效果，还能对主蒸汽参数起到优化补偿作用，减少蒸汽在系统中的能量损失，最终实现整个垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率的提升，为电厂节能减排、高效运行提供有力支持。

2. 热力系统焓损诊断

对垃圾焚烧电厂热力系统进行焓损诊断，旨在精准找出系统中焓损失较大的环节。这需要详细分析各个热力设备及流程，如锅炉、汽轮机、冷凝器等。从能量品质角度，分析各部分能量传递与转换过程中的不可逆损失，例如燃烧过程中的化学能向热能转换，由于燃烧不完全、传热温差等因素导致的焓损。通过精确计算各部件的焓损量与焓损率，明确对系统发电效率影响显著的部位。诊断结果将为后续针对性改进提供依据，帮助优化系统结构、调整运行参数，减少不必要的焓损失，进而有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统的发电效率，实现能源的高效利用。

（三）运行参数调控策略

1. 负荷 - 参数协同控制

负荷 - 参数协同控制旨在实现垃圾焚烧电厂热能动力系统发

电效率的优化。垃圾热值波动会影响蒸汽参数，进而影响发电效率。因此，通过开发基于垃圾热值波动的蒸汽参数自适应调节算法，实现负荷与参数的协同控制。该算法能够实时监测垃圾热值变化，当垃圾热值升高，自适应地调整蒸汽压力、温度等参数，使汽轮机在更优工况下运行，提高做功能力；若垃圾热值降低，及时优化参数，避免因参数不匹配导致的效率损失。通过这种协同控制方式，使得系统在不同垃圾热值下，均能保持较高的发电效率，充分利用垃圾热能，降低能源浪费，实现垃圾焚烧电厂热能动力系统的高效稳定运行。

2. 在线优化控制系统架构

基于热力学分析对垃圾焚烧电厂热能动力系统发电效率进行优化，在线优化控制系统架构设计十分关键。通过集成实时数据采集与模型预测控制构建智能优化系统。实时数据采集模块全方位收集如蒸汽温度、压力，垃圾进料量等关键运行数据，确保数据的准确性与及时性。模型预测控制模块则依据采集的数据，利用热力学相关模型，预测系统未来运行状态。基于预测结果，智能调整系统运行参数，实现发电效率的动态优化。这种架构实现了从数据采集、分析到控制调整的闭环流程，使系统能根据实际工况和热力学原理，自适应地优化运行，有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统的发电效率，达到高效、稳定运行的目标。

五、总结

通过对垃圾焚烧电厂热能动力系统基于热力学分析的研究，我们明确了提升发电效率的有效途径。主蒸汽温度提升至 435℃ 能显著提高系统效率，这为实际运行中的参数调整提供了重要依据。同时，所建立的多目标优化方案在增加年发电量的同时大幅降低运行成本，充分展现了优化策略的可行性与有效性。然而，高温腐蚀对参数提升构成技术限制，这也提示后续研究需聚焦于材料性能提升等方向，以突破限制，进一步挖掘系统发电效率提升的潜力。总体而言，本研究不仅为当前垃圾焚烧电厂热能动力系统优化提供了参考，更为未来的深入研究指明了方向。

参考文献

- [1] 李寅斌. 某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [2] 钟吴君. 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统优化调度研究 [D]. 长沙理工大学, 2021.
- [3] 朱传强. 垃圾焚烧电厂脱硝工艺开发及工程优化 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 张健伟. 垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [5] 郑家银. 垃圾焚烧电厂锅炉过热器钛铝涂层的高温腐蚀性能研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 邢家丽, 王甲, 曾武. 垃圾焚烧发电厂垃圾储坑应急除臭优化研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(21): 190-192, 227.
- [7] 朱姗. 发电厂热能动力系统优化与节能改造研究 [J]. 科技创新导报, 2022, 19(5): 84-86.
- [8] 邱留良. 垃圾焚烧电厂锅炉优化设计措施 [J]. 应用能源技术, 2022(12): 27-30.
- [9] 胡继新, 马志军, 冯涛, 等. 火电厂热能动力系统节能优化探究 [J]. 电力系统装备, 2021(22): 43-44.
- [10] 武鑫. 火力发电厂热能动力系统优化与节能改造研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(7): 233-235.