

垃圾焚烧电厂能源与动力系统热力学分析及效率优化探究

张超强

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110025

摘要：本文围绕垃圾焚烧电厂能源与动力系统展开，阐述其由焚烧炉等关键设备构成及运行的热力学理论。探讨蒸汽热力参数对发电效率影响，通过构建数学模型、T-s图分析等优化系统。还介绍了如烟平衡计算、余热利用系统优化等多种优化方法，指出应探索新方案、深化智能控制技术应用提升系统性能。

关键词：垃圾焚烧电厂；能源与动力系统；效率优化

Thermodynamic Analysis and Efficiency Optimization of Energy and Power Systems in Garbage Incineration Power Plants

Zhang Chaoqiang

Guangzhou Huantou Conghua Environmental Protection Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This article focuses on the energy and power system of waste incineration power plants, elaborating on the thermodynamic theory of their composition and operation, including key equipment such as incinerators. Explore the impact of steam thermal parameters on power generation efficiency, and optimize the system through the construction of mathematical models and T-s diagram analysis. It also introduced various optimization methods such as balance calculation and waste heat utilization system optimization, and pointed out the need to explore new solutions and deepen the application of intelligent control technology to improve system performance.

Keywords : garbage incineration power plant; energy and power systems; efficiency optimization

引言

《“十四五”节能减排综合工作方案》(2021年8月颁布)着重强调了节能减排工作的重要性，垃圾焚烧电厂作为能源转化与废弃物处理的关键环节，其能源与动力系统的高效运行意义重大。该系统由焚烧炉、余热锅炉、汽轮机组等构成，基于热力学理论实现垃圾化学能到电能的转换。通过研究蒸汽热力参数、构建多参数耦合数学模型、运用T-s图分析等方式提升发电效率；同时，从汽轮机能量损失、余热利用、凝结水系统等多方面优化，借助参数敏感性分析、综合评价模型等实现蒸汽参数全局优化。此外，联合循环系统、吸收式热泵等新技术以及参数自适应调控、预测维护技术的应用，为提升系统效率与智能化水平提供支持，推动垃圾焚烧发电行业符合政策导向，向高效绿色方向迈进。

一、垃圾焚烧电厂能源与动力系统概述

(一) 系统构成与工艺流程

垃圾焚烧电厂能源与动力系统主要由焚烧炉、余热锅炉、汽轮机组等关键设备构成。在垃圾焚烧过程中，垃圾在焚烧炉内充分燃烧，释放出大量热能，使炉内温度可达850–1100°C^[1]。这些高温烟气进入余热锅炉，通过热交换将水加热成高温高压蒸汽。余热锅炉产出的蒸汽压力通常在4–6MPa，温度约400–500°C，蒸汽随后驱动汽轮机组旋转，实现热能到机械能的转换。

汽轮机组带动发电机发电，完成从垃圾化学能到电能的转换过程。整个能量转换工艺流程高效且连续，确保垃圾焚烧产生的能量得到充分利用，为外界提供电力能源。

(二) 热力学理论基础

垃圾焚烧电厂能源与动力系统的运行基于一系列热力学理论。热力学第一定律，即能量守恒定律，指出能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它在垃圾焚烧电厂中体现为垃圾化学能通过焚烧转化为热能，热能又进一步转化为机械能和电能的过程中，能量总量保持不变。这为系统的能量平衡分析提供了理论依

据，通过建立能量平衡计算模型，可精确核算各环节能量的输入与输出^[2]。而热力学第二定律强调了能量传递和转换的方向性与不可逆性，引入了熵的概念。基于此，能对系统进行熵分析，考量能量的品质及做功能力，构建熵分析计算模型，洞察系统中不可逆损失的环节与程度，为效率优化指明方向。

二、蒸汽参数对发电效率的作用机理

(一) 蒸汽热力参数影响分析

蒸汽热力参数对垃圾焚烧电厂发电效率有着关键影响。主蒸汽温度升高，蒸汽的可用焓降增大，可使汽轮机相对内效率提高，更多热能转化为机械能，进而提升发电效率^[3]。同时，高温蒸汽能降低排汽湿度，减少对汽轮机叶片的侵蚀，保障汽轮机稳定高效运行。主蒸汽压力提升，同样会增加蒸汽的焓降，提升汽轮机作功能力，但压力过高可能导致设备材料要求提高及安全风险增加。再热参数方面，合适的再热温度和压力，可使蒸汽在汽轮机中实现二次膨胀作功，进一步增加焓降，提高循环热效率。通过优化蒸汽热力参数，在满足设备安全运行前提下，能有效提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的发电效率。

(二) 参数关联模型构建

基于热力学方程构建多参数耦合数学模型，以此揭示蒸汽参数与发电效率间的内在联系。垃圾焚烧电厂能源与动力系统涉及复杂的能量转换过程，蒸汽参数如温度、压力等，与发电效率密切相关。在模型构建中，综合考虑蒸汽在锅炉内的吸热、在汽轮机中的膨胀做功以及在冷凝器中的放热等环节^[4]。通过热力学第一定律与第二定律，确定各过程中的能量平衡关系，进而建立蒸汽参数与系统整体效率的耦合方程。此模型不仅能够清晰呈现蒸汽参数改变时对发电效率的直接影响，还能反映出各参数之间相互制约与协同作用的关系，为进一步探究蒸汽参数对发电效率的作用机理奠定坚实的理论基础，为后续效率优化提供准确的量化依据。

三、热能动力系统热力学分析

(一) 汽轮机热力过程研究

1. 热力循环特性分析

运用 T-s 图对朗肯循环展开改进分析，能直观且清晰地洞察抽汽回热、再热等技术对循环效率的影响。抽汽回热技术，是从汽轮机某些中间级抽出部分蒸汽，用于加热锅炉给水，减少了蒸汽在凝汽器中的冷源损失，提高了给水温度，进而提升循环效率^[5]。再热技术则是将汽轮机高压缸排出的蒸汽，送回锅炉再热器加热升温后，重新进入中低压缸继续做功，增加了蒸汽在汽轮机中的焓降，有效提高了循环做功能力，最终提升循环效率。通过 T-s 图分析这些技术，可量化其对循环效率的提升效果，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化提供理论依据，明确改进方向，实现能源的高效利用。

2. 熵损失分布特征

通过熵平衡计算，可清晰辨识出汽轮机通流部件的主要能量

损失环节。在蒸汽流经汽轮机各级叶片时，存在着流动损失，如摩擦损失、冲击损失等，这些损失会导致蒸汽的可用能降低，造成熵损失。此外，级间漏汽也是重要的能量损失源，部分蒸汽未按设计路径做功，而是通过间隙泄漏，致使有效做功的蒸汽量减少，从而产生熵损失。影响这些熵损失的因素众多，例如蒸汽的初始参数，包括压力、温度等，初始参数越高，理论上熵损失相对越小，但实际运行中需综合考虑设备材料等限制。汽轮机的结构设计，如叶片形状、级间间隙大小等，对熵损失分布也有显著影响^[6]。了解这些损失环节及影响因素，对提升汽轮机热力过程效率、优化垃圾焚烧电厂能源与动力系统至关重要。

(二) 余热利用系统优化

1. 余热锅炉热回收

在垃圾焚烧电厂余热利用系统优化中，余热锅炉热回收部分至关重要。锅炉排烟温度直接影响余热回收量，较高的排烟温度意味着更多热量未被有效利用而散失，降低排烟温度可增加余热回收，但过低可能导致尾部受热面腐蚀等问题，需权衡。受热面布置同样关键，合理布置可增强传热效果，实现余热的梯级利用。不同受热面的位置与结构，决定了对不同温度余热的吸收效率。通过优化受热面布置，如采用逆流布置增加传热温差等方式，能提高余热回收效率。综合考虑锅炉排烟温度与受热面布置，依据热力学原理精准调控，可实现余热锅炉热回收效率的提升，进而优化整个余热利用系统，提高垃圾焚烧电厂能源利用率^[7]。

2. 凝结水系统优化

凝结水系统优化在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中至关重要。通过优化凝结水系统，可有效减少能量损失，提升系统整体效率。具体而言，对凝结水泵进行精准选型与调控，能降低泵的功耗，确保凝结水输送过程中的能量损耗最小化。同时，优化凝结水的流动路径与换热环节，提高凝结水与其他介质的换热效率，使得凝结水所含热量得到充分回收与利用。此外，合理调整凝结水的温度与压力等参数，能更好地适配系统其他环节的运行需求。在优化过程中，参考相关先进技术与经验^[8]，实现凝结水系统与余热利用系统等的协同优化，进而提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的整体热力学性能与运行效率。

四、系统效率优化策略

(一) 蒸汽参数优化配置

1. 参数敏感性分析

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，参数敏感性分析对于蒸汽参数优化配置至关重要。采用单变量法与正交试验法，能够确定各蒸汽参数对发电效率影响的显著性排序。单变量法通过每次仅改变一个蒸汽参数，保持其他条件不变，来观察发电效率的变化，从而直观地了解该参数对效率的影响^[9]。正交试验法则能考虑多个参数同时变化的情况，通过合理设计试验方案，利用较少的试验次数获得全面的信息，分析各参数之间的交互作用以及对发电效率影响的主次关系。通过这两种方法结合，精准确定如蒸汽压力、温度、流量等参数对发电效率影响的显著程度，为后

续蒸汽参数的优化配置提供科学依据，助力提升系统整体发电效率。

2. 多目标优化设计

构建经济性 – 效率性综合评价模型基础上，提出蒸汽参数的全局优化方案是多目标优化设计的关键。此优化方案需全面考虑能源利用效率与经济成本等多个目标。通过精准分析不同蒸汽参数对系统效率与运行成本的影响，运用先进算法与技术，寻找使能源效率与经济收益达到最优平衡的蒸汽参数组合。例如，细致研究蒸汽压力、温度等参数变化对垃圾焚烧电厂能源转换效率及设备投资、运行维护成本的作用机制^[10]。在此过程中，借助数学模型与模拟工具，对多种蒸汽参数配置方案进行对比评估，筛选出既能提升系统能源利用效率，又能保障经济成本合理的最优方案，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统在能源效率与经济性方面的多目标协同优化。

(二) 系统集成技术应用

1. 联合循环系统

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，联合循环系统是提升系统效率的关键技术应用。通过将燃气轮机循环与蒸汽轮机循环相结合，实现能源的梯级利用。燃气轮机先利用垃圾焚烧产生的高温烟气做功发电，排出的中高温烟气再用于产生蒸汽，驱动蒸汽轮机二次发电。这一过程中，需精准调控燃气轮机与蒸汽轮机的参数匹配。例如优化燃气轮机的进气温度和压力，使燃烧更充分，提高燃气轮机的做功能力；同时合理设计余热锅炉，提升蒸汽参数，优化蒸汽轮机的运行效率。联合循环系统不仅能提高能源利用率，还能有效降低污染物排放，为垃圾焚烧电厂的高效、清洁运行提供有力支持，实现能源与动力系统热力学性能的优化。

2. 热泵回收技术

吸收式热泵可有效回收垃圾焚烧电厂的低品位余热，提升能源利用率。通过溴化锂 – 水等工质对，利用其在不同温度下对制冷剂的吸收与解吸特性，实现热量从低温热源向高温热源的转移。在垃圾焚烧过程中，产生的大量低温烟气余热可被吸收式热泵捕获。比如，将吸收式热泵置于烟气处理系统与汽水系统之间，热泵吸收低温烟气余热，驱动内部工质循环，将热量传递给汽水系统中的水，提高水的温度，进而提升蒸汽品质。这种技术应用可使原本被浪费的低品位余热得到重新利用，优化垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学性能，提高系统整体效率，减少能源浪费，实现节能减排，对垃圾焚烧电厂的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 钟昊君.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.
- [2] 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.
- [3] 张健炜.垃圾焚烧电厂运行可靠性分析及评估 [D].广东工业大学, 2021.
- [4] 李寅寅.某城市生活垃圾焚烧发电厂系统设计 [D].浙江工业大学, 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] 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.
- [7] 刘东.垃圾焚烧电厂汽轮机真空严密性优化 [J].电力系统装备, 2021(11):112–113.
- [8] 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.
- [9] 王祖悦, 冯冰潇, 王海荣.基于垃圾焚烧电厂锅炉双预防安全管理评价工作的分析与探讨 [J].锅炉技术, 2021, 52(S01):4.
- [10] 孔禹.黄土地区垃圾焚烧电厂灰土挤压密实优化设计 [J].山西建筑, 2022, 48(4):99–101.

(三) 智能控制策略研究

1. 参数自适应调控

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，参数自适应调控是智能控制策略的关键部分。基于实时工况的蒸汽参数动态优化，需依据垃圾特性、焚烧炉温度、蒸汽流量与压力等多参数实时变化进行。例如，当垃圾热值发生波动，会直接影响焚烧温度，进而影响蒸汽产生。此时，自适应调控系统要迅速捕捉这些变化，通过智能算法动态调整蒸汽压力和温度设定值，使汽轮机在最佳工况运行。并且，针对不同季节环境温度变化，也能自适应调整冷却系统参数，确保凝汽器保持良好真空度。通过这样精准的参数自适应调控，优化能源与动力系统匹配度，有效提升系统整体热效率，实现能源的高效利用与转换。

2. 预测维护技术

预测维护技术在垃圾焚烧电厂能源与动力系统效率优化中起着关键作用。通过构建设备状态监测模型，可对设备运行状态进行实时、精准监测。利用传感器收集设备温度、压力、振动等关键数据，运用大数据分析和机器学习算法，深入挖掘数据背后设备潜在的运行问题。当模型监测到效率出现衰减趋势时，能及时发出预警，提前告知运维人员设备可能存在的故障隐患。基于此，运维人员可制定更为科学合理的维护决策，避免设备故障引发的停机和效率损失。这种预测性维护方式改变了传统的定期维护模式，既降低了维护成本，又能有效保障设备稳定运行，进而提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统整体运行效率。

五、总结

蒸汽参数优化对垃圾焚烧电厂发电效率的提升效果显著，通过合理调整蒸汽压力、温度等参数，能够有效提高循环热效率。多维度优化策略存在协同增效机制，例如设备运行优化与余热回收改进相结合，可从整体上提升能源利用效率。新型热力系统配置方案具有广阔发展前景，有望突破传统系统局限，实现更高能源转换效率。同时，智能控制技术的深化应用不可或缺，其能精准调控系统运行，依据实时工况优化操作，减少能源损耗。未来，应持续探索新型热力系统配置方案，加强智能控制技术在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中的深度应用，进一步提升系统热力学性能与能源利用效率，推动垃圾焚烧发电行业向高效、绿色方向发展。