

# 垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学剖析及效率优化探究

邹国华

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110023

**摘要：**本文围绕垃圾焚烧电厂能源与动力系统展开研究，涵盖热力学原理、效率优化、余热回收、不同规模机组适配等多方面。通过烟分析、构建指标体系等方法剖析能量利用，提出多目标优化模型与智能算法提升效率，经工程实践验证策略可行性，还从经济与环境效益评估并探讨行业推广与兼容设计，对系统优化意义重大。

**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

Zou Guohua

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

**Abstract :** This article focuses on the research of energy and power systems in waste incineration power plants, covering thermodynamic principles, efficiency optimization, waste heat recovery, and adaptation to different scale units. By analyzing energy utilization and constructing an indicator system, a multi-objective optimization model and intelligent algorithm are proposed to improve efficiency. The feasibility of the strategy is verified through engineering practice, and the economic and environmental benefits are evaluated and industry promotion and compatible design are discussed, which is of great significance for system optimization.

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

## 引言

随着环保意识的增强和能源需求的增长，垃圾焚烧发电成为重要的能源利用方式。2020年颁布的《关于进一步加强塑料污染治理的意见》也从侧面推动垃圾处理行业向更高效环保方向发展。垃圾焚烧过程遵循质量与能量守恒，其能源转化涉及朗肯循环等关键模型。通过烟分析、构建评价指标体系等方式剖析能量利用，从蒸汽参数调整、多目标优化、智能算法应用、余热回收等方面优化系统效率，并经工程实践验证。同时考量全生命周期成本、碳排放效益、机组适配性及智能控制系统兼容，对提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统性能意义重大。

## 一、垃圾焚烧电厂热力学系统基础理论

### (一) 垃圾焚烧能源转化热力学循环原理

垃圾焚烧过程遵循质量与能量守恒方程。垃圾中的化学能在焚烧时释放，转变为热能，此过程质量与能量总量保持恒定。在能源转化中，朗肯循环是关键的热力学模型。高温高压蒸汽在汽轮机中膨胀做功，推动汽轮机旋转进而带动发电机发电，做功后的蒸汽进入凝汽器冷凝成水，再经给水泵升压送回余热锅炉加热成蒸汽，完成循环。通过建立焚烧炉 - 余热锅炉 - 汽轮机系统的烟分析框架，能更深入剖析能量利用情况。烟分析可确定各环节不可逆损失，为效率优化提供依据，精准定位系统中能量品质降

低的关键部位，以便针对性改进，从而提高垃圾焚烧电厂能源转化效率，实现能源的高效利用<sup>[1]</sup>。

### (二) 系统热力学效率评价指标体系

在垃圾焚烧电厂热力学系统中，系统热力学效率评价指标体系至关重要。构建基于热力学第二定律的分析体系，纳入主蒸汽参数、给水温度、凝汽器真空度等关键参数<sup>[2]</sup>。主蒸汽参数决定了蒸汽携带能量的品质与数量，对做功能力影响显著；给水温度关乎回热系统的运行效果，适当提高可减少燃料消耗；凝汽器真空度直接影响汽轮机排汽压力，进而影响循环效率。通过这些参数，可精准分析系统各环节能量转换与利用情况。定义总效率计算公式，综合考量各部分能量损失与有效利用，能全面评估系统

热力学效率，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化改进提供关键依据，实现能源的高效利用与系统性能提升。

## 二、蒸汽参数对汽轮机组效率影响机理

### (一) 主蒸汽温度对发电效率的影响规律

基于 T-S 图可对主蒸汽温度提升所带来的影响进行定量分析。当主蒸汽温度升高时，在汽轮机内，蒸汽的做功能力增强，这使得汽轮机内效率提高。从循环热效率角度看，主蒸汽温度提升，整个热力循环平均吸热温度升高，根据热力学原理，循环热效率也会随之提高<sup>[3]</sup>。然而，主蒸汽温度的提升并非无限制。材料的耐温极限构成了关键约束条件。过高的温度会超出材料的承受范围，致使材料性能下降，甚至引发设备故障，影响机组安全稳定运行。因此，在追求主蒸汽温度升高以增益发电效率时，必须充分考虑材料的耐温极限，在两者之间寻求平衡，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统效率的优化。

### (二) 主蒸汽压力优化匹配研究

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，主蒸汽压力对汽轮机组效率有着重要影响。借助 Aspen Plus 建立变压力工况热力学模型，能深入探究其内在机制。主蒸汽压力的变化与汽轮机叶片设计存在耦合关系。较高的主蒸汽压力可提升蒸汽的做功能力，使蒸汽在汽轮机内膨胀更充分，从而增加机组输出功率。但压力过高，会对汽轮机叶片材料和结构强度提出更高要求，若叶片设计不合理，可能导致能量损失增加，降低机组效率。因此，需要优化匹配主蒸汽压力与汽轮机叶片设计，通过对不同压力工况下汽轮机内蒸汽流动与能量转换的模拟分析<sup>[4]</sup>，寻找两者的最佳契合点，实现汽轮机组效率的最大化提升，促进垃圾焚烧电厂能源利用效率的提高。

## 三、垃圾焚烧系统效率优化策略设计

### (一) 蒸汽参数协同优化方法

#### 1. 多目标优化模型构建

构建多目标优化模型时，综合考虑热效率、设备投资与运行成本这几个关键因素。热效率直接关乎垃圾焚烧系统能源利用的有效性，高效的热转换能提升整体能源利用率。设备投资是前期建设的重要考量，合理规划可避免资源浪费与成本过度支出。运行成本则贯穿系统运行全周期，对长期经济效益影响深远。基于此，建立多目标优化数学模型，将这三个目标函数进行有机整合。通过数学算法对模型求解，确定 Pareto 最优解集，该解集涵盖了在不同目标侧重下的最优参数组合，能为垃圾焚烧系统的蒸汽参数协同优化提供科学依据，在提高能源利用效率的同时兼顾经济成本<sup>[5]</sup>。

#### 2. 智能优化算法应用

在垃圾焚烧系统效率优化策略设计中，智能优化算法应用至关重要。采用改进 NSGA-II 算法实现蒸汽温度与压力参数的全局优化。此算法能在复杂的多目标优化问题中，有效平衡蒸汽温度

与压力间的关系，以寻求最佳参数组合，提升系统效率。在实际运行中，垃圾焚烧过程涉及诸多变量，传统方法难以全面、高效地进行参数调整。而改进 NSGA-II 算法凭借其强大的搜索能力，可遍历众多可能的参数解空间，找到最优解。同时，结合提出的分级优化控制策略，从整体到局部对蒸汽参数进行协同优化，进一步提高垃圾焚烧系统的能源利用效率，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的高效运行提供有力支持<sup>[6]</sup>。

### (二) 余热深度回收技术

#### 1. 烟气余热梯级利用方案

在垃圾焚烧系统的余热深度回收技术中，烟气余热梯级利用方案至关重要。组合式省煤器 - 空气预热器系统与基于夹点技术的余热网络优化方案协同作用。省煤器 - 空气预热器系统能有效回收烟气热量，预热锅炉给水与助燃空气，提升能量利用率。夹点技术则可精准分析余热资源，确定最小公用工程能耗与最大余热回收量，实现余热的合理分配与利用。通过这种方式，依据不同工艺环节对能量品质的需求，将烟气余热按温度高低进行梯级利用，避免高品质能量的低品质使用，实现余热深度回收，从而显著提高垃圾焚烧系统效率<sup>[7]</sup>。

#### 2. 低温余热发电技术集成

在垃圾焚烧系统效率优化策略设计的余热深度回收技术之低温余热发电技术集成中，有机朗肯循环与卡林娜循环在低温余热回收方面各具特点。需深入对比两者适用性，有机朗肯循环工质选择多样，系统相对简单，但不同工质性能差异大；卡林娜循环采用混合工质，能更好匹配余热热源温度变化，部分负荷性能优。综合考虑后，提出双压余热锅炉配置方案<sup>[8]</sup>。该方案可有效利用不同温度区间的余热，提高余热回收效率，进而提升垃圾焚烧系统整体发电效率。通过优化锅炉内部结构，合理分配高低压蒸汽参数，使余热在不同压力层级下充分转化为可用能量，实现低温余热的高效发电集成，为垃圾焚烧电厂能源与动力系统的效率提升提供有力支撑。

## 四、工程验证与效益分析

### (一) 典型机组优化案例分析

#### 1. 500t/d 焚烧线改造实践

在 500t/d 焚烧线改造实践中，针对蒸汽参数从 4.0MPa/400°C 提升至 6.4MPa/450°C 这一优化举措进行工程验证与效益分析。通过实际运行数据监测发现，机组整体热效率得到显著提升。以该焚烧线为研究对象，对改造前后的各项能耗指标进行对比。改造前，机组发电效率处于一定水平，而改造后，由于蒸汽参数提升，做功能力增强，发电效率提升了 15%。从效益角度来看，不仅增加了发电量，提升了能源利用率，还带来了可观的经济效益。经核算，在设备投资回收周期内，因效率提升所带来的额外收益足以覆盖改造投资成本<sup>[9]</sup>。这充分验证了蒸汽参数提升这一优化策略在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中具有显著的可行性和效益性。

## 2. 双压余热锅炉应用效果

以某垃圾焚烧电厂典型机组为例，在应用双压余热锅炉进行改造前，机组发电效率处于较低水平。而在完成改造后，通过对各项运行参数的长期监测与分析，发现发电效率得到了显著提升。具体数据表明，改造后发电效率相较于改造前提升了20%，这清晰地验证了余热深度回收技术方案的有效性<sup>[10]</sup>。从效益方面来看，发电效率的提高意味着在相同垃圾处理量的情况下，电厂能够输出更多的电量，直接增加了经济效益。同时，余热的深度回收也提高了能源利用率，减少了对外部能源的依赖，具有良好的节能效益。此外，高效的能源利用还在一定程度上降低了污染物排放，带来了积极的环境效益。

## (二) 系统经济性评价

### 1. 技术改造投资回报分析

建立全生命周期成本模型，对垃圾焚烧电厂能源与动力系统不同优化方案的投资回收期与净现值进行计算，以此实现技术改造投资回报分析。投资回收期能直观反映方案初始投资回收的快慢，若投资回收期较短，表明技术改造可较快回笼资金，降低投资风险。净现值则考量了资金的时间价值，通过将未来各期的现金流量折现到当前，判断方案是否能为企业带来正收益。若净现值为正，意味着该技术改造方案在经济上可行，有望提升企业经济效益。综合分析投资回收期与净现值，能全面评估垃圾焚烧电厂能源与动力系统技术改造的投资回报情况，为决策提供有力依据，助力企业选择最优方案，实现经济效益与环境效益的双赢。

### 2. 碳排放效益评估

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统中，结合CDM（清洁发展机制）机制对碳排放效益进行评估。通过量化系统优化所带来的碳减排量，计算减少的二氧化碳等温室气体排放。这不仅体现环境效益，也具备经济价值。碳减排量可在碳交易市场上交易，为电厂带来额外收入，提升经济收益。同时，系统优化减少碳排放，降低潜在环境成本，避免因碳排放超标面临的罚款等费用。经环境经济性综合评价可见，垃圾焚烧电厂能源与动力系统的优化，在降低碳排放、提升环境友好度的同时，还能实现一定经济收益，为电厂可持续发展奠定基础，有效平衡能源利用、环境保护与经济效益间的关系。

## (三) 行业推广适用性研究

### 1. 不同规模机组适配性分析

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统的行业推广中，不同规模机

组的适配性至关重要。小型机组处理垃圾量相对较少，对场地空间要求较低，适合处理垃圾产生量较小且分散地区的垃圾，在这类地区建设小型机组可避免资源浪费。然而，小型机组能源转换效率相对有限，需优化设备选型和运行参数来提高效率。大型机组处理垃圾量大，能源转换效率较高，能更有效地实现能源回收利用，适合垃圾产生量大且集中的区域。但大型机组前期建设成本高，对技术和管理水平要求也高。因此，建立优化策略与焚烧线规模的对应关系图谱时，要综合考量不同规模机组特性，针对不同地区垃圾产生量、地理条件、经济实力等因素，提出差异化实施方案，以提高能源与动力系统整体效率，实现垃圾焚烧电厂的高效、可持续发展。

### 2. 智能控制系统兼容设计

在垃圾焚烧电厂能源与动力系统智能控制系统的兼容设计方面，重点在于研究优化方案与现有DCS系统的接口标准。需深入剖析现有DCS系统的架构、通信协议及数据格式等，以此为基础制定出适配优化方案的接口标准，确保两者能够无缝对接。同时，开发自适应参数调整模块。这一模块要依据垃圾焚烧过程中诸如垃圾成分、焚烧温度、蒸汽产量等实时变化的参数，运用智能算法自动调整能源与动力系统的运行参数。如此，既能保证系统稳定运行，又能提高能源利用效率。通过这样的智能控制系统兼容设计，实现垃圾焚烧电厂能源与动力系统在智能优化层面与现有控制体系的融合，为高效运行奠定坚实基础，助力行业内推广应用，为垃圾焚烧发电行业的整体发展提供有力支持。

## 五、总结

垃圾焚烧电厂能源与动力系统的热力学剖析及效率优化研究意义重大。通过对蒸汽参数作用机理的揭示，明确其对系统效率的关键影响。所验证的优化方案能显著提升发电效率8~12%，这为垃圾焚烧电厂的高效运行提供了有力支撑。不过，在推进过程中，高温腐蚀控制与智能控制算法改进需重点关注，这关系到系统的长期稳定与高效。基于此，建议积极开展超临界参数在垃圾焚烧领域的应用探索，挖掘该参数在提升效率方面的潜力；同时，深入进行多能源联产系统集成研究，促进能源的梯级利用与高效转化，全方位提升垃圾焚烧电厂能源与动力系统的整体性能与效率，实现可持续发展。

## 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] 孔禹.黄土地区垃圾焚烧电厂灰土挤密桩优化设计 [J].山西建筑, 2022, 48(4):99~101.
- [10] 李帅, 胡红云, 黄永达, 等.垃圾焚烧电厂重金属排放与控制 [J].能源环境保护, 2023, 37(3):36~49.