

基于蒸汽参数的垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率影响探究

梁迦业

广州环投从化环保能源有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025110026

摘 要： 垃圾焚烧电厂热能动力系统中，余热锅炉与汽轮机组紧密耦合，蒸汽参数对发电效率影响重大。通过对蒸汽热力学特性建模、推导量化关系式等探究影响机理，经变工况仿真分析可知各蒸汽参数与发电效率关系复杂。构建多参数协同优化模型、热力系统集成创新等可提升发电效率，某厂实践证实其有效性，且该方案具经济性与节能效益。

关 键 词： 垃圾焚烧电厂；蒸汽参数；发电效率

Exploration of The Influence of Steam Parameters on The Power Generation Efficiency of Thermal Power System Steam Turbine Units in Garbage Incineration Power Plants

Liang Jiaye

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

Abstract： In the thermal power system of waste incineration power plants, the waste heat boiler is closely coupled with the steam turbine unit, and the steam parameters have a significant impact on the power generation efficiency. By modeling the thermodynamic characteristics of steam and deriving quantitative relationships, the influencing mechanism was explored. Through variable operating condition simulation analysis, it was found that the relationship between various steam parameters and power generation efficiency is complex. Constructing a multi parameter collaborative optimization model and innovating the integration of thermal systems can improve power generation efficiency. The effectiveness of this approach has been proven by practical experience in a certain plant, and the scheme has economic and energy-saving benefits.

Keywords： garbage incineration power plant; steam parameters; power generation efficiency

引言

随着《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》于2021年发布，垃圾焚烧发电作为重要的垃圾处理方式，其效率提升备受关注。垃圾焚烧电厂热能动力系统由多个子系统构成，其中蒸汽参数对汽轮机组发电效率影响重大。主蒸汽压力、温度，再热参数及过热度等指标相互关联，形成能效链。通过建模、推导量化关系及仿真分析，研究蒸汽参数对发电效率的影响机理，并提出多参数协同优化、热力系统集成创新等提升路径，对提高垃圾焚烧电厂能源利用水平，响应国家规划，实现可持续发展意义深远。

一、垃圾焚烧电厂热能动力系统概述

（一）系统组成与工艺流程

垃圾焚烧电厂热能动力系统主要由垃圾焚烧系统、余热锅炉系统、汽轮机组系统等组成。垃圾在焚烧炉中充分燃烧，释放大热量能，产生高温烟气^[1]。这些高温烟气进入余热锅炉，与余热锅炉内的受热面进行热交换，将水加热产生蒸汽。蒸汽作为工质，进入汽轮机组，推动汽轮机叶片转动，进而带动发电机发电。做完功的蒸汽从汽轮机排出后，进入凝汽器，在凝汽器中被

冷却凝结成水，通过凝结水泵送回余热锅炉的除氧器进行除氧，除氧后的水再由给水泵重新打回余热锅炉，完成整个热力循环。在这个过程中，余热锅炉与汽轮机组紧密耦合，余热锅炉所产生的蒸汽的参数，如温度、压力等，直接影响汽轮机组的发电效率，二者的协同运行对垃圾焚烧电厂的整体发电效能至关重要。

（二）蒸汽参数系统特征

蒸汽参数系统在垃圾焚烧电厂热能动力系统中具有独特特征。主蒸汽压力和温度是关键参数，较高的主蒸汽压力能提升系统的作功能力，但过高可能导致设备材料要求严苛、成本增加；

合适的主蒸汽温度能有效提高循环热效率，然而超温会影响设备寿命。再热参数也不容忽视，合理的再热蒸汽压力和温度可使蒸汽在汽轮机中实现二次膨胀作功，进一步提升热效率。这些蒸汽品质指标体系紧密关联，共同构建起系统的能效链^[2]。它们如同系统的“动力密码”，在垃圾焚烧发电过程中，精准调控着能量转换与传递，战略定位举足轻重，直接影响汽轮机组发电效率以及整个热能动力系统的运行效能。

二、蒸汽参数影响机理的理论分析

（一）蒸汽热力学特性建模

为深入探究蒸汽参数对垃圾焚烧电厂汽轮机组发电效率的影响，需先对蒸汽热力学特性建模。建立涵盖压力、温度、过热度参数的蒸汽物性方程至关重要，它能精确描述蒸汽在不同状态下的物理性质^[3]。同时，构建卡诺循环与朗肯循环的数学表征模型，这有助于从理论层面剖析蒸汽在循环过程中的能量转换机制。卡诺循环作为理想热机循环，为理解能量转换的极限提供基准；而朗肯循环更贴合实际电厂运行，通过对其数学建模，可清晰呈现蒸汽参数变化对做功能力及热效率的影响，从而为优化汽轮机组发电效率奠定理论基础。

（二）参数-效率关联模型

基于热力学原理，推导汽轮机等熵效率、循环热效率与蒸汽参数的量化关系式，以揭示蒸汽参数对发电效率的影响机理。汽轮机等熵效率与蒸汽进出口状态密切相关，蒸汽参数如压力、温度的变化，会改变蒸汽在汽轮机内的膨胀过程，进而影响等熵焓降与实际焓降的比值，即汽轮机等熵效率^[4]。对于循环热效率，它与朗肯循环的各个过程紧密相连。蒸汽参数的改变，会使循环吸热、放热过程发生变化，从而影响循环热效率。通过这些量化关系式，能够清晰看到蒸汽参数与效率之间的内在联系，进一步明确热力学第二定律对蒸汽参数与发电效率关系的制约机制，为垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率的提升提供理论依据。

三、蒸汽参数对发电效率的影响因素

（一）主蒸汽参数影响

1. 压力参数影响规律

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，主蒸汽压力参数对发电效率有着显著影响。通过变工况仿真分析可知，主蒸汽压力变化会非线性地影响汽轮机通流能力。当主蒸汽压力升高时，蒸汽比容减小，若通流面积不变，单位时间内通过汽轮机的蒸汽流量增加，汽轮机的作功能力增强，发电效率提高。但同时，过高的主蒸汽压力会使汽轮机内部的蒸汽流速增大，导致流动损失增加，对发电效率产生不利影响。主蒸汽压力变化还会影响排汽焓值。若主蒸汽压力升高，排汽压力不变，蒸汽在汽轮机内的膨胀过程更充分，排汽焓值降低，使得汽轮机输出的有用功增多，发电效率得以提升。然而，主蒸汽压力的改变对汽轮机各部件的受力、强度等也有影响，需综合考虑。总之，蒸汽压力参数与发

电效率之间的关系复杂，需精确控制以实现高效发电^[5]。

2. 温度参数影响规律

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，主蒸汽温度参数对发电效率影响显著。随着主蒸汽温度升高，循环热效率会得到提升，这是因为较高的温度能使蒸汽在汽轮机内膨胀做功过程中，保持较高的可用焓降，从而提高了能量转换效率^[6]。然而，主蒸汽温度并非可以无限制升高，它受到金属材料蠕变极限的约束。若蒸汽温度过高，超过金属材料所能承受的蠕变极限，会导致材料性能恶化，影响设备的安全性和使用寿命。因此，需研究出在金属材料蠕变极限约束下的最优温度区间。在这个区间内，不仅能最大程度发挥温度提升对循环热效率的边际效应，提高发电效率，还能保证机组长期稳定运行。

（二）再热系统参数影响

1. 再热压力优化分析

再热压力对垃圾焚烧电厂汽轮机组发电效率影响显著。建立再热压力与循环热效率的抛物线关系模型，对于准确把握二者关联意义重大。通过该模型可发现，当再热压力处于某一特定区间时，循环热效率能达到相对较高水平，实现经济性最佳。这是因为再热压力的变化会改变蒸汽在汽轮机内的做功过程与焓降分配。压力过低，无法充分发挥再热的作用，使循环热效率提升受限；压力过高，则可能导致设备投资与运行成本增加，且蒸汽膨胀过程可能偏离理想状态，同样不利于效率提升。因此，依据抛物线关系模型确定经济性最佳值域至关重要，为实际运行中再热压力的精准调控提供依据，以最大化提升发电效率^[7]。

2. 过热度控制策略

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组中，过热度控制策略对发电效率至关重要。合适的过热度可有效抑制汽轮机末级叶片水蚀现象，减少设备损耗，延长使用寿命，进而保障发电效率的稳定^[8]。若过热度控制不当，蒸汽中带水会冲击叶片，降低汽轮机运行效率。精准控制过热度，还能挖掘余热回收潜力。通过优化蒸汽过热度，可使更多的热能在系统中得到有效利用，将原本可能被浪费的余热进行回收转化，提高能源利用率，最终提升发电效率。要实现高效的过热度控制，需借助先进的监测与调控技术，根据机组运行实际情况，实时调整蒸汽过热度，确保汽轮机组始终处于高效运行状态。

四、基于蒸汽参数优化的效能提升路径

（一）参数匹配优化设计

1. 多参数协同优化模型

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组发电效率的研究中，多参数协同优化模型构建极为关键。构建压力-温度-流量多目标优化函数，是实现多参数协同优化的核心。此函数全面考虑蒸汽压力、温度与流量之间复杂的相互关系，以及它们对汽轮机组发电效率的综合影响^[9]。同时，采用遗传算法求解 Pareto 最优解集，该算法具有全局搜索能力，能在多目标优化空间中，快速、有效地寻找出一组非劣解，即 Pareto 最优解集。这些解代表着在

不同参数组合下，发电效率与其他相关指标间的最佳平衡，为实际运行中蒸汽参数的合理调整提供科学依据，进而实现基于蒸汽参数优化的发电效率提升。

2. 热力系统集成创新

基于蒸汽参数优化的效能提升路径的热力系统集成创新，关键在于构建更高效合理的整体架构。提出基于二次再热的新型热力循环架构及其参数配置方案，这一创新可有效改善垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率。二次再热能进一步利用蒸汽的余热，让蒸汽在汽轮机中实现多次膨胀做功，从而提升能源利用效率。在该架构下合理配置参数，优化蒸汽的压力、温度等参数匹配，使得热力系统各环节紧密协同，减少能量损失，充分发挥蒸汽热能潜力。这种集成创新将传统热力系统与先进的二次再热技术相结合，通过科学配置蒸汽参数，为垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率提升开辟新路径，对提升垃圾焚烧电厂整体能源利用水平具有重要意义^[10]。

(二) 运行调控策略优化

1. 变工况自适应调节

垃圾焚烧电厂中，垃圾热值波动会使汽轮机处于变工况运行状态。开发蒸汽参数随垃圾热值波动的动态调控算法及前馈补偿机制，能够实现变工况自适应调节。该算法依据垃圾热值实时数据，快速准确地调整蒸汽参数，让汽轮机始终在高效区间运行。前馈补偿机制则提前预判热值变化对蒸汽参数的影响，在变化发生前就做出补偿调节，减少延迟和偏差。通过这种变工况自适应调节方式，使蒸汽参数与垃圾热值波动紧密适配，降低因工况变化导致的能量损失，显著提升汽轮机在不同工况下的发电效率，确保垃圾焚烧电厂热能动力系统高效稳定运行。

2. 数字孪生技术应用

在垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机发电效率提升中，数字孪生技术发挥着关键作用。借助该技术，可构建与实际汽轮机高度匹配的虚拟模型，实时反映蒸汽参数变化对发电效率的影响。通过将采集到的蒸汽压力、温度等实际参数，精准同步到数字孪生模型中，能直观地分析不同工况下发电效率的波动情况。基于此，运维人员可提前模拟不同蒸汽参数调整方案，预测发电效率的提升效果，制定出最适宜的蒸汽参数调控策略，有效避免因盲目调整带来的效率损失，进而实现基于蒸汽参数优化的发电效率显著提升，为垃圾焚烧电厂的高效运行提供有力技术支撑。

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] 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.
[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] 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.
[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] 宋景全. 垃圾焚烧发电厂发电效率的影响因素及提升措施 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 127-129.
[7] 李桐. 垃圾焚烧电厂高效发电技术分析 [J]. 清洗世界, 2022, 38(6): 6-8.
[8] 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.
[9] 罗正锐. 垃圾焚烧发电厂的运行优化分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(11): 342-343.
[10] 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.

(三) 典型案例实证分析

1. 参数优化工程实践

在某典型垃圾焚烧厂的参数优化工程实践中，针对热能动力系统汽轮机组，对蒸汽参数进行调整。通过精准分析与研究，提升蒸汽压力与温度，使其更适配机组运行特性。改造前，机组发电效率处于一定水平，各项蒸汽参数存在提升空间。经改造，新的蒸汽参数投入运行，设备运行状态改善。经一段时间运行监测，详细记录发电效率等相关数据。对比发现，改造后发电效率显著提高，这表明基于蒸汽参数优化，能够有效提升垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组的发电效率，为同类电厂提供了可借鉴的实践范例，证实蒸汽参数优化对发电效率提升有积极影响。

2. 经济性评估

对垃圾焚烧电厂热能动力系统汽轮机组蒸汽参数优化方案的经济性评估，需从投资回收期与度电成本等维度展开。投资回收期方面，尽管蒸汽参数优化可能初期需投入额外资金用于设备改造升级，如对蒸汽管道、汽轮机部件等进行适配性改进，但优化后发电效率提高，垃圾焚烧产生热能的利用率提升，发电量增加，收益增长，能缩短投资回收时间。度电成本上，优化后设备运行效率提升，能源消耗降低，加上发电量上升分摊固定成本，使得度电成本下降。通过这些维度的分析可知，基于蒸汽参数优化的方案能带来显著综合效益，提升垃圾焚烧电厂的整体经济性与市场竞争力。

五、总结

蒸汽参数与汽轮机效率紧密相关，蒸汽压力、温度的提升，能够有效减少蒸汽在汽轮机内的不可逆损失，提高机组的理想焓降，从而提升发电效率。对垃圾焚烧电厂而言，通过参数优化，能显著提升整体能效，带来可观的节能效益。例如，合理提高蒸汽参数后，机组发电效率可能提升10%，相应地降低了单位发电的能耗。未来，垃圾焚烧电厂热能动力系统的研究可聚焦于宽负荷调节，实现不同垃圾处理量下蒸汽参数与机组效率的最佳匹配，减少部分负荷时的效率损失。同时，多能互补方向也值得深入探索，如将垃圾焚烧与太阳能、生物质能等联合，借助蒸汽参数调节优化能源耦合，进一步提升能源综合利用效率，助力垃圾焚烧电厂的可持续发展。