

垃圾焚烧余热驱动 ORC 发电系统的循环工质优化选择

郭玉超

洪洞县民生垃圾综合处理有限公司 山西临汾

【摘要】垃圾焚烧余热利用不仅有助于降低能源消耗，还能实现固体废弃物处理与能源回收的双重目标。在有机朗肯循环（ORC）发电系统中，循环工质的选择是决定能量转化效率与系统经济性的关键环节。通过对不同循环工质的热力学性能、环境友好性及运行稳定性进行比较，可以发现合理的工质优化能够显著提升垃圾焚烧余热的发电效率，并兼顾设备安全与寿命。本文以垃圾焚烧余热特性为基础，结合 ORC 系统运行需求，探讨工质优化选择的原则和评价方法，提出适合的工质匹配策略，为垃圾焚烧余热驱动的高效清洁发电提供参考。

【关键词】垃圾焚烧余热；有机朗肯循环；工质优化；能效提升

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 6 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250234

Optimization selection of working fluids for orc power generation system driven by waste incineration waste heat

Yuchao Guo

Hongdong Minsheng waste comprehensive treatment Co., Ltd. Linfen, Shanxi

【Abstract】 The utilization of waste incineration waste heat not only helps reduce energy consumption but also achieves the dual goals of solid waste treatment and energy recovery. In the Organic Rankine Cycle (ORC) power generation system, the selection of cycle working fluids is a key link that determines the energy conversion efficiency and system economy. By comparing the thermodynamic performance, environmental friendliness, and operational stability of different cycle working fluids, it can be found that reasonable working fluid optimization can significantly improve the power generation efficiency of waste incineration waste heat while taking into account equipment safety and service life. Based on the characteristics of waste incineration waste heat and combined with the operational requirements of the ORC system, this paper discusses the principles and evaluation methods for the optimal selection of working fluids, proposes suitable working fluid matching strategies, and provides a reference for efficient and clean power generation driven by waste incineration waste heat.

【Keywords】 Waste incineration waste heat; Organic Rankine Cycle (ORC); Working fluid optimization; Energy efficiency improvement

引言

垃圾焚烧发电作为一种兼具废物处理与能源回收的方式，已逐渐成为城市固废处理的重要环节。其焚烧过程中释放的余热若能高效利用，将极大提高能源回收率。传统蒸汽发电系统受限于焚烧余热温度较低，难以实现理想的热电转化，而有机朗肯循环（ORC）因对低温热源具备较好适应性，成为提升余热利用效率的重要路径。在 ORC 系统运行中，循环工质的热力学性能直接决定了能量转化效率和设备运行稳定性，因此工质的科学选择与优化成为研究的核心问题。通过系统性分析垃圾焚烧余热特性，探讨工质选择的原则与

评价方法，有助于实现发电效率与环境效益的平衡。这一研究不仅具有理论价值，也对垃圾焚烧发电产业的绿色发展提供了实践指导。

1 垃圾焚烧余热特性与 ORC 发电系统适配问题

垃圾焚烧过程中释放的余热具有明显的低温特征，大部分集中在 200℃以下，这种热能若直接通过传统蒸汽动力循环转化，往往存在效率偏低与能量利用不足的局限。蒸汽循环需要较高的热源温度才能保证合适的汽化压力与膨胀比，而垃圾焚烧炉排烟气的温度分布并不稳定，易造成系统效率大幅波动^[1]。有机朗肯循环（ORC）则以有机工质代替水作为工作介质，具备较

低的沸点和较高的蒸汽饱和压力，更契合垃圾焚烧余热的特性，从而能够在低品位热源条件下实现较为稳定的能量转化。这种适配性不仅体现在热力学性能层面，还涉及到设备运行的安全性、维护性和整体经济性，因此对余热特性与 ORC 系统的匹配规律进行深入分析，具有重要的工程指导意义。

垃圾焚烧余热在释放过程中还伴随大量腐蚀性气体与粉尘颗粒，如氯化氢、二氧化硫及飞灰等，这对传热设备与动力系统运行提出了更高要求。如果采用传统蒸汽锅炉形式，高温腐蚀和结垢问题会显著增加设备故障率与运维成本。ORC 系统在适配过程中不仅需要考虑低温热源的利用，还要解决复杂烟气环境下换热器的防腐与耐久性问题。通过合理设计余热锅炉与有机工质蒸发器之间的换热方式，可以降低高腐蚀性烟气直接接触金属壁面的风险，同时利用工质低温蒸发的优势，将废热更高效转移到循环系统中。这种工程适配既是 ORC 能够成功应用于垃圾焚烧电站的重要条件，也是推动余热高效回收的关键环节。

从能源利用率的角度看，垃圾焚烧余热与 ORC 系统的耦合关系，决定了最终发电量与系统经济性的水平。实践表明，若能够充分考虑焚烧炉排烟气温度分布特征与热负荷波动情况，合理选择换热器布置方式与工质蒸发条件，ORC 系统可以在保证稳定输出的同时提升整体能效比。相较于蒸汽循环，ORC 在低温段能量利用方面优势明显，这种差异不仅提升了发电效率，还减少了余热排放带来的环境影响。垃圾焚烧余热的特性与 ORC 发电系统之间存在着高度的互补关系，通过深入分析二者的适配问题，可以为后续工质优化与系统设计提供坚实的理论基础与工程实践方向。

2 循环工质热力学性能与选择原则分析

循环工质的热力学性质是 ORC 系统性能的核心因素，不同工质在临界温度、临界压力、蒸发潜热以及比热容等方面存在差异，这些参数直接决定了热能转化效率与系统稳定性。对于垃圾焚烧余热这种低温且波动较大的热源，工质的沸点和蒸发压力需要与余热温度特征匹配，以确保换热器能够在较小温差下实现高效传热。若工质临界温度过低，在实际运行中容易出现过热度不足的问题，影响膨胀机的效率与寿命；若临界温度过高，则难以充分利用低品位热源，导致能量浪费。在工质选择过程中，热力学性能的平衡性成为研究的重点。

不同类型的有机工质可分为干工质、湿工质与等熵工质，其膨胀过程中的饱和蒸汽特性存在明显差别。

干工质在等熵膨胀后仍保持为过热蒸汽，能够避免膨胀机叶片受到液滴冲蚀，提高设备运行寿命；湿工质则容易在膨胀过程中发生部分冷凝，增加机械损耗与能量损失；等熵工质则处于两者之间，具备一定的工程适用性^[2]。考虑到垃圾焚烧余热环境的复杂性，干工质往往更具优势，但其热物性参数需要与具体的余热温度分布相匹配，否则难以实现理想的系统能效。工质的类型选择不仅是热力学问题，更是工程适用性与运行可靠性的综合判断。

除了热力学性能之外，工质的环境安全性与经济性也必须纳入考量。部分高效能工质可能具有较高的臭氧消耗潜能（ODP）或全球变暖潜能（GWP），若在大规模应用中存在泄漏风险，将带来环境污染与政策限制。近年来低 GWP 新型制冷剂类工质的开发，为 ORC 系统提供了新的选择方向，这些工质在兼顾能效与环保方面展现出较好潜力。工质的来源与价格也影响项目的经济可行性，若工质获取困难或成本过高，难以实现规模化应用。循环工质的选择必须在热力学效率、环境友好性与经济可行性之间寻求平衡，这一选择原则为后续优化提供了理论依据。

3 工质优化评价方法与多因素综合比较

在进行循环工质优化时，单纯依赖热力学效率指标并不足以全面反映工质的优劣。垃圾焚烧余热驱动 ORC 系统的实际运行环境复杂，涉及热源波动、设备耐久性、环境法规与经济投入等多方面因素，因此需要建立多维度评价体系，对不同工质进行综合分析。常见的评价方法包括热效率分析、火用效率分析、净功输出与单位发电成本的对比，同时引入环境影响评价和生命周期成本分析，从而形成较为完整的工质优选模型。通过这种多指标耦合的方法，可以避免仅凭单一热力学性能指标做出片面判断，保证工质选择的科学性与实用性。

在热力学评价方面，火用分析被广泛应用于低温余热利用研究中，它能够反映能量利用的有效程度，而不仅仅是数量上的转化。对于垃圾焚烧余热这种低品位热源，火用效率能够揭示不同工质在膨胀机中的实际利用率差异。基于热经济学的评价方法通过将能效与经济成本结合，能够直观反映不同工质在全生命周期内的经济性差异^[3-7]。虽然部分工质在单位发电效率上表现突出，但若采购与维护成本过高，可能导致项目整体回收期延长，降低经济可行性。将热经济学与火用效率结合，构成了评价工质优化的重要工具。

在多因素比较过程中，环境影响评价也不可或缺。

近年来碳达峰与碳中和目标的提出，使得能源系统的温室气体排放问题备受关注。工质的 GWP 与 ODP 指标成为评价过程中必须考量的重要参数。若某种工质即便具备较高的热效率，但其环境风险较大，在未来政策限制下仍可能被淘汰。通过多因素综合比较，不仅可以识别出热效率与经济性均衡的工质，还能确保其在环保要求下具备长期应用前景。最终的优化结果往往是多目标平衡的产物，而不是单一指标下的最优解，这种综合评价方法为垃圾焚烧余热驱动 ORC 系统的工质选择提供了科学的路径。

4 垃圾焚烧余热驱动 ORC 工质应用实践与效果分析

在实际工程应用中，垃圾焚烧余热驱动的 ORC 系统已经在多个城市垃圾处理厂中得到验证，结果表明工质优化选择对系统性能发挥着决定性作用。通过对不同工质运行下的发电效率与设备稳定性，发现 R245fa、R1233zd 以及部分新型低 GWP 工质在低温余热条件下表现出较强的适应性。以某大型垃圾焚烧发电厂为例，采用 R245fa 作为工质的 ORC 系统，在 250℃ 以下的排烟余热中能够实现 8% 以上的能量回收效率，较传统蒸汽循环提高约 3 个百分点。这一结果说明，科学的工质选择不仅能够提升余热利用水平，还能延长设备运行寿命，降低腐蚀与结垢带来的维护成本。

在工程实践中，工质优化的效果还体现在系统的经济回收周期与运行稳定性上。部分案例表明，通过合理匹配工质特性与余热温度区间，系统能够在年运行时间达到 7000 小时以上的条件下保持高效运行，投资回收期缩短至 5 年以内。尤其在垃圾焚烧厂这种热源供应稳定的场景下，工质优化的收益更加显著。通过对不同工质在长期运行下的换热器结垢情况与膨胀机效率变化，可以看出低腐蚀性、低环境风险工质能够有效降低运维成本，为系统带来更高的全生命周期经济效益^[8]。工质优化在实践中的应用价值不仅体现在热效率提升上，更直接关系到投资回报与项目可持续性。

在未来的发展趋势中，工质优化选择将进一步结合新型环保工质与先进系统结构的研究。随着低 GWP 工质的不断推出，ORC 系统有望在满足环保要求的同时保持较高效率。结合多级循环、混合工质与余热分级利用等新技术，能够进一步拓展垃圾焚烧余热的利用

深度。在这些实践探索中，工质的科学选择依然是核心环节，它决定了新技术能否在实际工程中发挥预期效果。通过对应用实践与运行效果的深入分析，可以得出一个明确结论：垃圾焚烧余热驱动 ORC 发电系统的循环工质优化选择，是实现废弃物处理与能源回收协同增效的关键途径。

5 结语

垃圾焚烧余热驱动 ORC 发电系统的研究表明，循环工质的合理选择是实现高效能量转化与环境友好并存的关键环节。通过对余热特性与 ORC 适配性分析，结合工质热力学性能与多因素优化评价，可为工程应用提供科学指导。实践案例进一步证明，优化工质不仅提升了发电效率，还改善了系统经济性与可持续性，对推动垃圾焚烧发电产业绿色发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 骆律源,王昆,胡勇,等. 垃圾焚烧余热深度回收系统设计与节能优化应用[J]. 资源节约与环保,2025,(07):42-45+88.
- [2] 从海亮,李宜鹏,焦阳. 垃圾焚烧发电厂烟气余热回收利用技术的研究[J]. 电站系统工程,2025,41(04):38-40.
- [3] 关振健,宋永富,杨红红. 浅析垃圾焚烧余热锅炉省煤器模块异常位移[J]. 锅炉制造,2025,(04):14-16.
- [4] 杨木和,胡雪利,徐晓燕. 垃圾焚烧电厂冷却水余热利用供热方案探讨[J]. 制冷,2025,44(02):27-32.
- [5] 陆在涛,韦晓丽. 生活垃圾焚烧发电烟气余热利用技术分析[J]. 中国电力企业管理,2024,(33):86-87.
- [6] 王浩,朱兆喆,李晔. 垃圾焚烧电厂余热利用数字孪生系统设计开发[J]. 软件,2024,45(11):111-114.
- [7] 苏晓梅. 垃圾焚烧余热成了供热先锋[N]. 天津日报,2024-11-14(005).
- [8] 王志强,陈子龙,金飞,等. 垃圾焚烧余热锅炉高温过热器超温解决对策探究[J]. 锅炉技术,2024,55(04):32-37.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS