

新型混合工质有机朗肯循环系统性能研究

郑昀晗

浙江浙能融资租赁有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI: 10.61369/SSSD.2025020016

摘 要 : 本文采用基于混合工质的有机朗肯循环系统回收柴油机排气, 通过对比分析发现 isopentane 的循环效率最高, R245ca 的循环净功最高, 因此将两者混合成非共沸混合物可综合两者的优点, 混合工质相对于纯工质的热力学性能及安全性都得到了有效提升。通过参数研究发现热源条件一定时, 非共沸混合工质有机朗肯循环系统具有最佳的蒸发温度和过热度对应最优的热力学性能, 因此必须根据热源条件优选蒸发温度和过热度提升有机朗肯循环性能。

关 键 词 : 余热利用; 有机朗肯循环; 混合工质; 性能研究

Optimization of Organic Rankine Cycle Performance Based On Non-azeotropic Mixing Medium

Zheng Yunhan

Zhejiang Provincial Energy Group Financial Leasing Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : In this paper, the organic Rankine cycle system based on mixed working medium is used to recover diesel exhaust. Through comparative analysis, it is found that isopentane has the highest cycling efficiency and R245ca has the highest cycling net work. Therefore, mixing the two into a non-azeotropic mixture can synthesize the advantages of both, and the thermodynamic performance and safety of the mixed working medium relative to the pure working medium have been effectively improved. The non-azeotropic organic Rankine cycle has the best evaporation temperature and superheat in the specific system, so it is necessary to choose the evaporation temperature and superheat reasonably according to the heat source conditions.

Keywords : waste heat utilization; organic rankine cycle; mixing working medium; performance study

引言

有机朗肯循环采用有机物作为工质进行发电, 由于有机工质的沸点低, 可以利用中低温热源进行发电, 因此在余热利用领域, 是一种非常具有竞争力的选择^[1]。近年来, 在双碳政策的大背景下, 有机朗肯循环作为一种高效、环保的能源转换技术, 获得了国内外学者持续的关注^[2]。

在工质选择方面, Lakew A A 等^[3]通过对比不同的有机工质, 提出当热源温度低于 160°C 情况下, R227ea 的效率最高, 而当热源温度高于 160°C, R245fa 的效率最高, 此外, n-pentane 对应单位功率换热面积最少。Dai Y 等^[4]通过对比 8 种工质, 提出 R236ea 对应的循环效率最高, 而且透平紧凑性最高。Mago P J 等^[5]对比了 R113, R245ca, R123 和异丁烷等工质的循环性能, 提出工质的沸点温度越高, 系统的效率越高。但系统蒸发器夹点温差导致热源和纯工质的匹配效果差, 导致损失高, 因此为了解决该问题, 提出采用非共沸工质^[6]替代纯工质。Dong 等^[7]研究了采用共沸混合物 (MM/MDM) 为工质, 提出混合物比纯流体效率更高, 并且可以扩大选择范围。Heberle 等人^[8]研究了共沸混合物 (异丁烷 / 异戊烷和 R227ea/R245fa) 作为地热应用的 ORC 工质。结果表明, 共沸混合物的非等温相变比纯液体具有更高的效率。Li 等^[9]使用共沸混合物 (异丁烯 / R123) 分析了 ORC 的热经济性。结果表明, 共沸混合物比纯流体具有更好的经济性能。Shu 等^[10]将三种碳氢化合物 (环戊烷、环己烷、苯) 和两种阻燃剂 (R11、R123) 混合使用, 降低了碳氢化合物的可燃性, 提出共沸混合物具有更高的热效率和更低的损失。Sadeghi M^[11]通过对比研究提出, 混合物 R407A 的发电功率相比于 R245fa 可提高 27.76%, 混合物相比于纯工质具有更低的涡轮尺寸参数。

本文针对中低温余热发电的有机朗肯循环系统, 通过对比分析优选出最优的混合工质, 研究混合工质对循环热力学性能的影响规律。

一、研究对象及模型介绍

(一) 研究对象

有机朗肯循环的系统示意图分别为如图1所示。如图所示，有机工质(状态3)通过有机工质泵中被压缩升压后(状态4)进入吸热器，有机工质在吸热器中吸热后成为高温高压的有机工质(状态1)，经过升温升压后的有机工质进入膨胀机带动膨胀机对外做功，膨胀机出口乏气在进入冷却器前进入回热器中，将热量传递给压缩机出口的有机工质提高系统循环效率，其中热源采用船舶柴油机余热烟气。

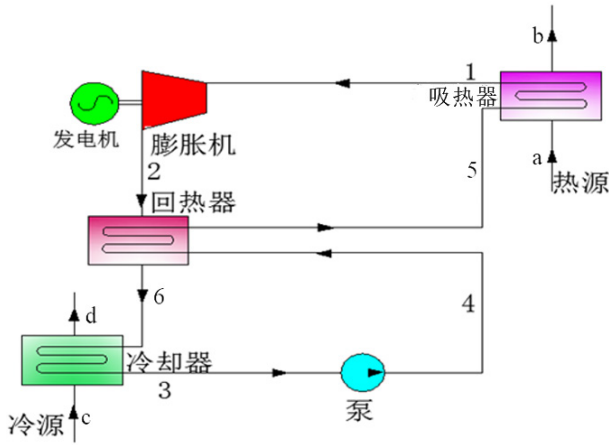


图1 有机朗肯循环系统图

(二) 模型介绍

有机朗肯循环系统的净功率为：

$$\dot{W} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \tag{1}$$

式中： $\dot{W}_t$ ——有机工质透平输出功率，W；

$\dot{W}_p$ ——有机工质泵的耗功，W；

其中：膨胀机的输出功率为：

$$W_t = m_w \eta_t (h_1 - h_2) \tag{2}$$

式中： h_i ——各状态点焓值，kJ/kg；

m_w ——工质质量流量，kg/s；

η_t ——膨胀机等熵效率；

膨胀机的输出功率为：

$$W_p = m_w (h_4 - h_3) / \eta_p \tag{3}$$

式中： η_p ——有机工质泵等熵效率；

有机朗肯循环热效率为：

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} \tag{4}$$

式中： $\dot{Q}$ ——有机工质的吸热量，W。

(三) 模型验证

为了验证模型的准确性，表1比较了通过本模型计算的结果和Feng Y^[12]等人计算的结果，通过表1可得本文采用模型获得的性能参数与文献计算的参数之间的误差小于10%。通过上述对比可以得出，所搭建的模型中获得的结果与文献中报道的结果之间具有良好的一致性，间接验证了本文所模型的准确性。

表1 模型验证

参数		Feng Y	本模型
输入	蒸发器出口温度	107.72℃	107.72℃
	冷凝温度	30.38℃	30.38℃
	窄点温差	3.12℃	3.12℃
	过热度	3.53℃	3.53℃
输出	热效率	52.12%	53.12%
	发电成本率	10.8cent/(kW·h)	10.2cent/(kW·h)

二、系统参数影响分析

(一) 非共沸工质的选取

热源为烟气^[13-15]，其温度为290℃，流量为4.6kg/s，如表2所示，isopentane在循环效率指标上表现最优，而R245ca凭借其高蒸发压力特性实现了更高的循环净功输出。通过将两者混合形成非共沸工质，可结合两者优势从而优化系统整体性能

表2 不同纯工质有机朗肯循环性能对比

工质类型	热源出口温度 /℃	蒸发压力 / MPa	热效率	循环净功 / kW
R365mfc	145.02	1.18	13.46	88.97
pentane	149.48	1.11	13.69	87.46
R141b	124.68	1.29	13.4	101.79
perfluoropentane	113.46	1.55	12.91	105.13
isopentane	146.36	1.35	13.75	89.94
R123	137.93	1.54	13.21	91.91
R245fa	130.95	1.91	13.29	96.96
R11	143.96	1.56	13.16	87.67
R245ca	110.27	2.61	12.96	107.6
neopentane	126.4	2.08	13.36	100.44

(二) 组分的影响

在固定蒸发器窄点温度（50℃）与环境温度（25℃）的条件下，通过控制烟气入口参数（温度290℃、流量4.6kg/s）与工质状态（蒸发温度140℃、过热度20℃），系统研究了R245ca/isopentane混合工质摩尔比对有机朗肯循环性能的影响规律。结果（图2）表明，随着R245ca摩尔分数从0%增至100%，烟气出口温度由初始值137℃显著下降至93℃，这与其高蒸发压力特性密切相关——R245ca在蒸发段通过提升工质与烟气的温差匹配度，实现烟气余热回收深度的突破；与此同时，系统蒸发压力呈现从1.62MPa至2.7MPa的增长趋势，而循环净功则因膨胀比与质量流率的动态博弈呈现先降后升的U型曲线，在R245ca占比20%时达到极值。值得注意的是，尽管循环热效率整体呈现波动下降趋势，但R245ca主导的高工质流量特性使其净功输出提升至125kW，揭示了热效率与净功的工程权衡机制。进一步分析表明，当混合工质中掺入20%–40%的isopentane时，系统蒸发压力降低，这得益于isopentane的低压相变特性与非共沸混合物的温度滑移效应，该效应通过调节工质蒸发温度分布曲线，有效缓解了高蒸发压力导致的设备安全隐患。基于上述发现，应用中可

根据热源特性灵活选择工质方案：在余热品位较高且设备承压能力允许时，优先采用纯 R245ca 以最大化净功输出；而在压力安全敏感的场景，则建议采用 R245ca/isopentane 混合工质，通过组分优化实现热力学性能与设备经济性的协同提升。

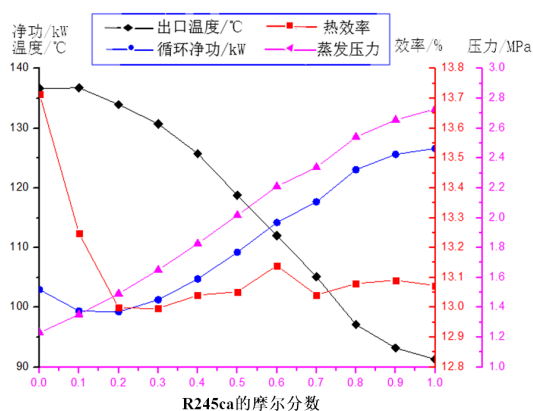


图2 组分对系统的影响

在固定热源参数（烟气入口温度 290℃、质量流量 4.6kg/s）与环境温度 25℃ 的约束下，通过调控 R245ca/isopentane 混合工质的摩尔配比（蒸发温度恒定 140℃、过热度 20℃），系统研究了烟气出口温度稳定于 110℃ 时有机朗肯循环的热力学响应规律。数据（图 3）表明，随着 R245fa 占比从 0% 增加至 100%，工质蒸发压力由初始值 1.25MPa 升至 2.7MPa，而循环净功则呈现先升后降的非单调变化趋势，在 R245ca/isopentane (0.1/0.9) 配比时达到峰值 115.6kW，其机理可归结为低浓度 R245ca 对膨胀机做功能力的适度优化与高浓度下的过膨胀损失的动态平衡。R245ca/isopentane (0.1/0.9) 混合工质在实现最大净功 (Z kW) 的同时，将蒸发压力抑制在 1.3MPa 范围内，较纯 R245ca 系统降低 50%，这得益于 isopentane 的低压相变特性与非共沸混合物的温度滑移效应，后者通过调节相变温区扩展了工质与热源的匹配兼容性。

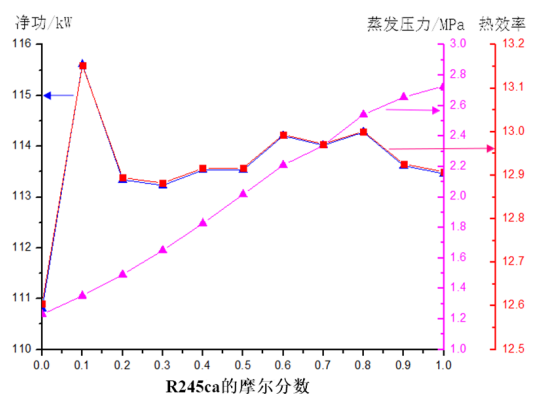


图3 组分对系统的影响

在固定热源参数条件下，通过构建 isopentane/R245ca 混合工质体系并维持蒸发器窄点温差 50℃、蒸发压力 1MPa(a) 及过热度 0℃ 的边界条件，系统揭示了非共沸工质组分梯度对有机朗肯循环的热力学调控机制。结果（图 4）表明，随着 R245ca 摩尔分数从 0% 增至 100%，烟气出口温度由 102.5℃ 下降至 67℃，循环热效率与净功分别降低 30% 和 29%，这归因于 R245ca 的高临界

温度引发的相变温区上移效应——相较于 isopentane（临界温度 187.2℃），其烷烃分子结构赋予的高气化潜热（180kJ/kg）在蒸发压力 1MPa(a) 时可实现烟气余热吸收效率提升，而 R245ca 的低液态粘度虽能降低工质泵耗功，但其过高的相变温度导致热源与工质的匹配度下降。在 isopentane 中添加不可燃工质 R245ca 可有效的降低烷烃类工质可燃性，同时保证优异的热力性能。这为易燃工质在工业余热发电中的工程化应用提供了热力学-安全性协同优化范式。

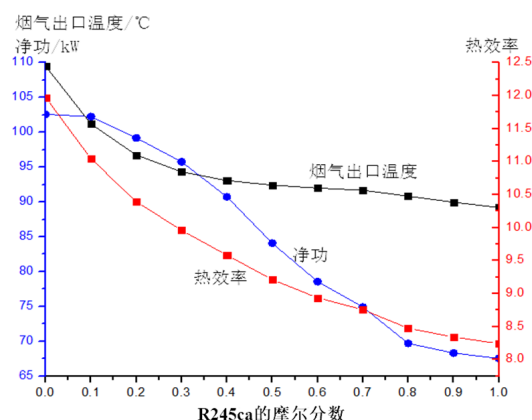


图4 组分对系统的影响

（三）蒸发温度的影响

系统研究了蒸发温度梯度（90–165℃）对有机朗肯循环的热力学调控机理。结果（图 5）显示，随着蒸发温度从 90℃ 升至 165℃，蒸发压力由 0.75MPa 增至 3MPa，这与混合工质的蒸汽压-温度特性曲线呈正相关性；而循环净功呈现先升后降的抛物线型响应，在蒸发温度 160℃ 时达到峰值 107kW，其拐点形成源于膨胀机做功能力与工质泵耗功的动态平衡机制。循环热效率与净功的同步性可归因于热力学第一定律的约束：在固定热源输入量条件下，热效率的解析式使二者变化轨迹严格耦合。当蒸发温度超过 160℃ 时，工质 R245ca 的临界温度开始引发物性参数异常，表现为蒸发压力增速趋缓而工质泵耗功陡增，导致净功输出出现衰减。因此在非共沸混合工质在热源条件不变的情况下具有最佳蒸发温度使得系统热力学性能最优。

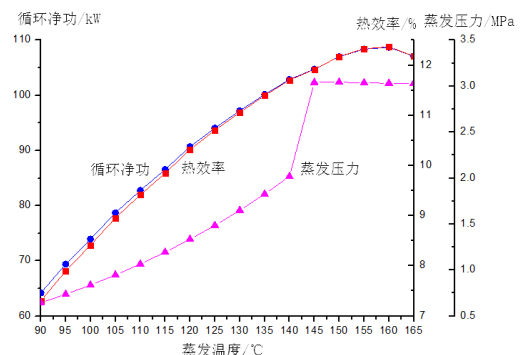


图5 蒸发温度对系统的影响

（四）过热度的影响

通过调控 R245ca/isopentane (0.5/0.5) 非共沸混合工质的过热度（0–70℃）与蒸发温度（90–160℃），系统揭示了有机朗

肯循环的热力学响应机制。结果（图6）表明，当过热度从0℃增至70℃时，循环净功呈现先升后降的非单调变化趋势，在过热度为15℃时达到峰值114kW，而循环热效率与净功保持同步变化轨迹。因此在非共沸混合工质在热源条件不变的情况下具有最佳过热度使得系统热力学性能最优。

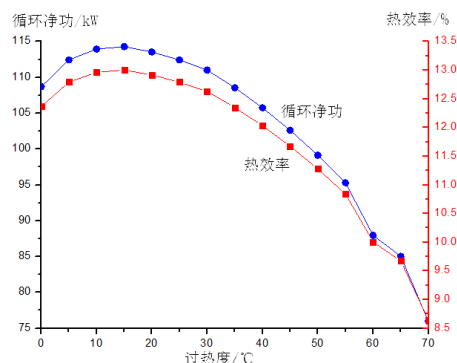


图6 过热度对系统的影响

综上所述，在热源参数与系统约束的动态耦合机制研究中，纯工质的热力学性能呈现显著的离散分布特征：以 R245ca 为代表的氟化烃类工质在高温余热场景（>200℃）下因临界温度限制导致蒸发压力骤升，而 isopentane 等烷烃类工质虽具有更高的热效率，但其可燃性风险制约了工业应用范围。这种性能互补性揭示出单一纯工质无法满足宽域工况的普适性需求，通过构建非共沸混合工质体系，可突破单一组分的热力学边界约束，实现热源－工质－设备的协同优化。

三、结论

本研究针对柴油机排气余热回收系统，开发了基于非共沸混合工质的有机朗肯循环（ORC）技术方案，通过热力学性能评价与组分协同优化，揭示了混合工质对系统性能的调控机制，主要研究结论如下：

（1）isopentane 凭借其高临界温度和相变潜热特性在循环热效率方面表现突出，而 R245ca 则因其蒸汽压特性在循环净功输出上更具优势。因此通过将两者掺混形成混合工质可充分利用两者优势。

（2）混合工质的温度滑移值使相变温区与柴油机烟气温梯度形成动态匹配，相较于纯工质系统可降低蒸发器窄点温差不可逆损失。

（3）非共沸混合工质在热源条件不变时，具有最佳的蒸发温度以及过热度对应热力学性能最优，因此实际应用中基于热源条件优选系统运行参数。

本研究通过非共沸工质的组分工程与参数协同优化，突破了传统纯工质的性能瓶颈，为柴油机余热发电系统提供了从“单一工质适配”向“工质－架构协同优化”的范式转变路径，其成果对工业余热回收系统的热力学－安全协同设计具有重要指导意义。

参考文献

- [1] 饶建业, 李骥飞, 郭智琳, 等. 地热能有机朗肯循环系统设计与动态仿真 [J]. 热力发电, 2024, 53(04): 19–27.
- [2] 张洁雄, 张杰, 穆永超, 等. 太阳能有机朗肯循环发电系统模拟优化研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(09): 236–240.
- [3] Lakew A A, Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(10): 1262–1268.
- [4] Dai Y, Wang J, Gao L. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 576–582.
- [5] Mago P J, Chamra L M, Srinivasan K, et al. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids[J]. Applied thermal engineering, 2008, 28(8–9): 998–1007.
- [6] Sadeghi M, Nemati A, Yari M. Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures[J]. Energy, 2016, 109: 791–802.
- [7] Dong B, Xu G, Cai Y, et al. Analysis of zeotropic mixtures used in high-temperature Organic Rankine cycle. Energy Convers Manage 2014;84:253–60.
- [8] Heberle F, Preißinger M, Brüggemann D. Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources. Renewable Energy 2012;37(1):364–70.
- [9] Li S, Dai Y. Thermo-economic analysis of waste heat recovery ORC using zeotropic mixtures. J Energy Eng 2014;141(4):04014050.
- [10] Shu G, Gao Y, Tian H, et al. Study of mixtures based on hydrocarbons used in ORC (Organic Rankine Cycle) for engine waste heat recovery. Energy 2014;74:428–38.
- [11] Sadeghi M, Nemati A, Yari M. Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures[J]. Energy, 2016, 109: 791–802.
- [12] Feng Y, Hung T C, Zhang Y, et al. Performance comparison of low-grade ORCs (organic Rankine cycles) using R245fa, pentane and their mixtures based on the thermoeconomic multi-objective optimization and decision makings[J]. Energy, 2015, 93: 2018–2029.
- [13] 李子申, 李惟毅, 徐博睿, 等. 混合工质内置热泵有机朗肯循环冷热电联供系统性能研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4972–4980.
- [14] 张鸣. 混合工质有机朗肯循环系统性能的研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2019.
- [15] 连麒飞. 混合工质有机朗肯循环系统的性能优化与实验研究 [D]. 郑州大学, 2021.