

核电厂低品位余热发电技术研究

赵雅卓¹, 张文杰¹, 廖颖慧^{2,3}, 林晋磊^{2,3}, 张荣勇¹, 段远源^{2,3*}

(1. 中国核电工程有限公司, 北京市 海淀区 100037;

2. 热科学与动力工程教育部重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;

3. 二氧化碳资源利用与减排技术北京市重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084)

Research on Power Generation Technologies for Low-Grade Waste Heat in Nuclear Power Plants

ZHAO Yazhuo¹, ZHANG Wenjie¹, LIAO Yinghui^{2,3}, LIN Jinlei^{2,3}, ZHANG Rongyong¹, DUAN Yuanyuan^{2,3*}

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 3. Beijing Key Laboratory for CO₂ Utilization and Reduction Technology (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

摘要:【目的】针对核电厂低品位余热直接排放造成的海洋热污染问题,亟需探索高效解决方案以降低排海热负荷。为此,对不同类型余热源特性及其发电潜力进行了系统评估,为核电厂余热利用提供热经济性数据依据。【方法】总结了核电厂中各类低品位余热的特点,并分析了余热的不同利用方式及其发展现状;介绍了3种适用于该余热的发电技术,并结合实际案例对比分析了不同发电技术的热经济性能及不同余热源的回收潜力。【结果】核电厂二回路凝结饱和水的能质系数最高,发电利用潜力最大。此外,有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)是热经济性能最佳的余热发电方案,其平准化度电成本最低,为0.037 6美元/(kW·h),相对于喷射式有机闪蒸循环和卡琳娜循环分别降低了84%和78%;ORC发电功率为462.2 kW,具有较好的可行性;在回收低压缸乏汽余热场景下,ORC的可减排热负荷为360.3 MW,环保效益显著。【结论】ORC等余热发电技术可大幅降低排海热负荷,为我国核电厂的低品位余热利用与降低排海热负荷提供重要参考。

关键词: 核电; 余热发电; 热污染防治; 低品位余热回收; 有机朗肯循环(ORC); 喷射式有机闪蒸循环(EOFC); 卡琳娜循环(KC); 热经济可行性分析

ABSTRACT: [Objectives] To address the issue of marine

thermal pollution caused by the direct discharge of low-grade waste heat from nuclear power plants, it is imperative to explore efficient solutions to reduce thermal discharge loads. Therefore, by the characteristics of different types of waste heat sources and their potential of power generation are systematically evaluating to provide thermo-economic data basis for waste heat utilization in nuclear power plants. [Methods] The characteristics of different types of low-grade waste heat in nuclear power plants are summarized, and different utilization methods of waste heat and their current development status are analyzed. Three types of power generation technologies suitable for this waste heat are introduced, and their thermo-economic performance and the recovery potential of different waste heat sources are comparatively analyzed through actual case studies. [Results] The energy quality coefficient of the secondary loop condensate saturated water in nuclear power plants is the highest, showing the greatest potential for power generation utilization. Moreover, the organic Rankine cycle (ORC) demonstrates optimal thermo-economic performance as a waste heat power generation solution, achieving the lowest levelized cost of electricity at \$0.037 6/(kW·h), which is 84% and 78% lower than that of the ejector organic flash cycle and the Kalina cycle, respectively. ORC achieves a generation capacity of 462.2 kW, demonstrating good feasibility. In the scenario of recovering waste heat from the low-pressure turbine exhaust, the ORC can reduce thermal discharge by 360.3 MW, showing significant environmental benefits. [Conclusions] Waste heat power generation technologies such as the ORC can significantly reduce thermal discharge loads into the sea, providing important references for low-grade waste heat utilization and thermal pollution reduction in China's nuclear power plants.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52106017); 中国核电工程有限公司自主立项科研项目(KY23076).
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52106017); Independent Research Project of China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., (KY23076).

KEY WORDS: nuclear power; waste heat power generation; thermal pollution prevention and control; low-grade waste heat recovery; organic Rankine cycle (ORC); ejector organic flash cycle (EOFC); Kalina cycle (KC); thermo-economic feasibility analysis

0 引言

在我国能源结构调整和“双碳”目标推进背景下，核电已成为能源转型的重要力量^[1-5]。然而，约 66% 的核反应堆热能以温排水形式排入海洋，造成热污染并威胁海洋生态安全。党的十九届四中全会提出“实行最严格的生态环境保护制度”；2019 年生态环境部发布的《核动力厂取排水环境影响评价指南(试行)》规范了温排水影响评价及工程设计；2023 年出台的《温排水节约集约用海标准》进一步明确了降低排海热负荷的具体要求。这些政策措施凸显出开发低品位余热利用技术、提升核电经济性与环保水平的紧迫性与必要性。

然而，当前对核电厂各种低品位热源特点及其利用方式的对比总结相关文献较少。低品位余热发电技术^[6]可将余热转化为电能，是提高核电经济性和降低温排水排海热负荷的重要途径。目前已有学者对核电厂余热发电的可行性开展了研究，如 Srivastava 等^[7]分析了有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)在印度核电站的应用，Gabbar 等^[8]研究了热电发电技术在加拿大重水堆和压水堆的应用，Zhang 等^[9]提出热管与热电发电相结合的方法。这些研究证实了核电厂余热回收的潜力，但多集中于单一余热源与单一发电技术，对多种低品位余热源的能量特性及综合发电技术的研究仍显不足。

为弥补上述不足，本文围绕核电厂低品位余热的利用问题，总结了核电厂余热特点，对比了各种余热利用方式，并进一步开展了典型低品位余热发电技术应用可行性研究。

1 核电厂低品位余热特点

以中核集团福清核电站为例，核电厂低品位余热主要来自二回路低压缸乏汽、凝结饱和水^[10]及三回路温排水，如表 1 所示。低品位余热主要分布在

二回路与三回路，虽然温度仅为 29.6~96.7℃，但流量可达 79.50~60 624.55 kg/s，呈现出典型的“量大品低”特征，热能回收难度较大。

表 1 核电厂低品位余热的主要来源及其特点

Tab. 1 Main sources and characteristics of low-grade waste heat in nuclear power plants

余热来源	状态	温度/℃	压力/kPa	流量/(kg/s)	干度
低压缸乏汽	气液共存	41.7	8.10	828.30	0.911 4
凝结饱和水	液态	96.7	90.04	79.50	0
温排水	液态	29.6	101.33	60 624.55	0

采用能质系数(总焓与总热量的比值)^[11]衡量余热品质，可知不同来源低品位余热的可利用潜力存在明显差异(如图 1 所示)：低压缸乏汽的能质系数为 0.061 9；尽管凝结饱和水总热量最小，但能质系数最高(0.086 2)，具备较好的回收潜力；温排水热量最大(7 163.3 J)，但能质系数极低，回收难度较大。因此，迫切需要进一步探索适合核电厂低品位余热的有效利用方式。

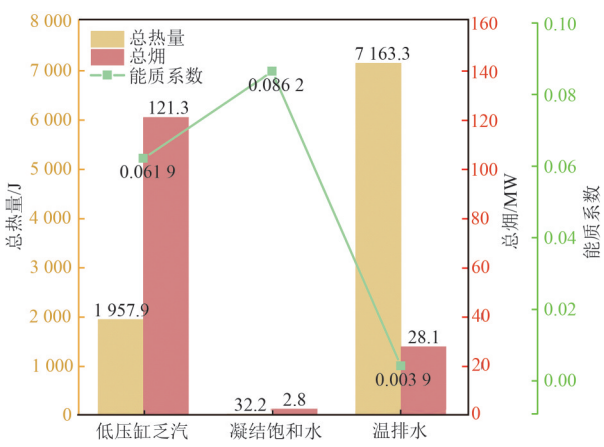


图 1 核电厂不同来源低品位余热的可利用潜力

Fig. 1 Utilization potential of low-grade waste heat from different sources in nuclear power plants

2 核电厂余热利用方式及发展现状

为推动核能综合利用并缓解温排水带来的不利影响，国内外核电厂采用了农业种植^[12]、水产养殖^[13-15]、市政与工业供热^[16-28]、海水淡化^[29-31]等方式对低品位余热进行消纳。

在农业种植与水产养殖方面，日本利用核电厂温排水进行商业养殖，显著提升了渔业产量^[13]。在市政与工业供热方面，清华大学 1989 年成功研

发5 MW低温核供热试验堆，开创了我国低温核供热技术领域的先河^[29]；山东烟台的“暖核一号”工程在政府支持下，供热面积从一期的70万m²上升到三期的630万m²，惠及20余万人，每年替代原煤23万t，减排二氧化碳42万t，成为国内首个跨区域核能供暖项目^[17-19]；瑞士贝兹瑙核电厂采取热电联产技术进行区域供热，每年节省燃油约

1.2万t，减排二氧化碳约4.5万t^[25]。在海水淡化方面，清华大学以低温核供热技术为基础在摩洛哥首次实现低温核供热堆与海水淡化技术的耦合，建成核能海水淡化厂^[30]；日本迄今为止，已有近10个核能海水淡化耦合装置，可实现市政管网的大面积供水^[31]。表2为上述余热利用方式适用的余热源及其优缺点。

表2 不同余热利用方式适用的余热源及其优缺点

Tab. 2 Applicable waste heat sources and advantages and disadvantages of different waste heat utilization methods

余热利用方式	适用的余热源	优点	缺点
农业种植 ^[12] 、水产养殖 ^[13-15]	二回路低压缸乏汽和三回路温排水	排海热负荷低、经济性好、环境污染小	所需的温室面积与水产养殖面积极大，难以消纳全部的低品位余热
市政与工业供热 ^[16-28]	二回路低压缸乏汽、凝结饱和水、三回路温排水	可满足大量供热需求，环保效益好	供热管路布置范围远、热损耗高、输送成本高；受供热端需求影响大，季节性明显
海水淡化 ^[29-31]	二回路凝结饱和水	可实现水电联产，缓解核电机组远程取淡水、用淡水压力	淡化成本高、设备寿命短，淡化后废弃物处理难度大

由表2可以看出，直接热利用方式普遍存在占地面积大、季节性强、消耗量有限、额外耗能多等弊端。相比之下，余热发电技术通过热电转化不仅有效提高了核电厂的能源综合利用效率，还可全年持续稳定运行，这降低了排海热负荷，减轻了对海洋生态环境的热污染，因此成为核电厂低品位余热资源消纳的首选方案。

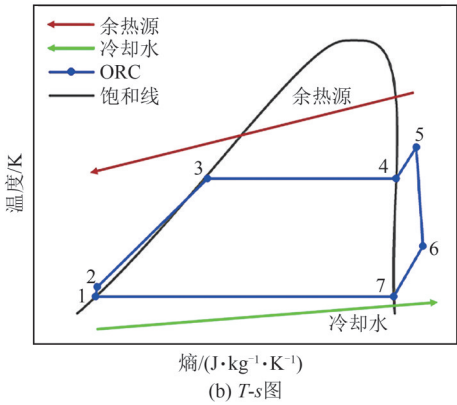
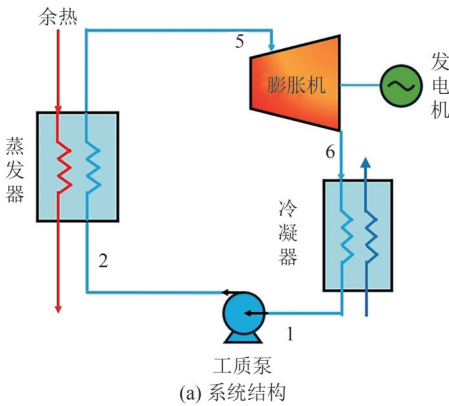
3 潜在的低品位余热发电技术

3.1 有机朗肯循环

目前，ORC系统的研究与应用主要集中于中低温可再生能源(如地热^[32-36]、太阳能^[37-39]、生物质能^[40-42])与工业余热^[43-45]领域。ORC技术成熟度高，在实际运行中展现了系统简单、稳定可靠、适用热源温度低、装机容量范围宽等优点。ORC基于朗肯循环原理，利用有机工质低沸点特点，在中低温热源条件下产生较高的蒸气压力并推动膨胀机对外做功，实现低品位热能的发电利用。简单ORC系统结构及其温-熵(T-s)图如图2所示。

3.2 喷射式有机闪蒸循环

相较于有机朗肯循环而言，有机闪蒸循环(organic flash cycle, OFC)通过闪蒸技术有效提升了热源与循环之间的匹配度，避免了蒸发器内等温相变吸热过程带来的大量焓损^[46-51]。传统OFC



1—7均为系统工质状态点。

图2 简单ORC系统结构及其T-s图

Fig. 2 Simple ORC system structure and its T-s diagram

中的低压节流装置存在闪蒸后液态工质未被有效利用等问题^[48]，将其替换为喷射器后，形成的喷射器有机闪蒸循环(ejector organic flash cycle,

EOFC)不仅可以有效利用闪蒸后的饱和液,还得到了更低的膨胀机排气压力^[52]。简单 EOFC 系统结构及其 T - s 图如图 3 所示。

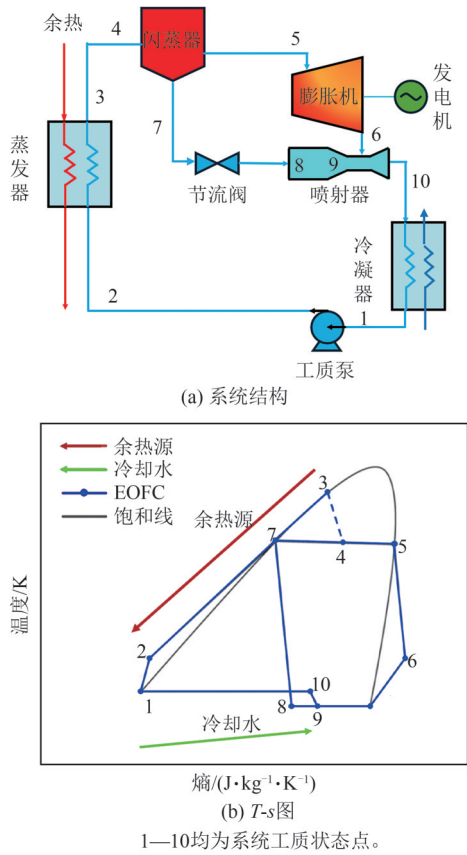


图 3 简单 EOFC 系统结构及其 T - s 图

Fig. 3 Simple EOFC system structure and its T - s diagram

3.3 卡琳娜循环

简单卡琳娜循环(Kalina cycle, KC)系统结构及其 T - s 图如图 4 所示。KC 是一种以氨水混合物为工质的低品位热能发电技术^[53]。氨水混合物经工质泵加压后进入蒸发器,吸收来自低品位热源的热量后蒸发,并在分离器中分离为富氨蒸气和贫氨溶液。富氨蒸气进入膨胀机膨胀做功,实现热能向机械能的转化。贫氨溶液则通过回热器加热泵出氨水混合物,提高系统热效率。随后,贫氨溶液经过节流阀降压,与膨胀后的蒸气在混合器中重新混合,并最终冷凝后回流至工质泵,完成循环。该循环通过氨水混合物的变温吸热特性,提高了与热源的热匹配性,降低了换热过程中的熵损,增强了低品位热能的利用效率^[53]。

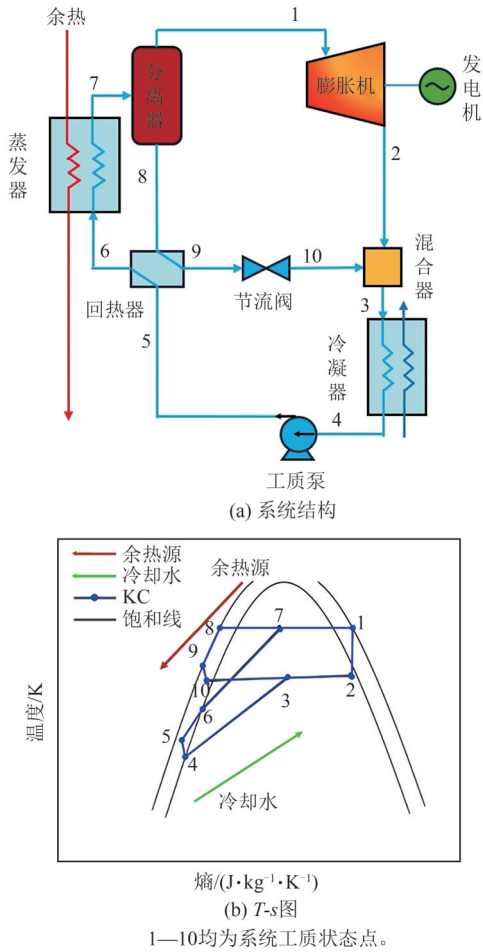


图 4 简单 KC 系统结构及其 T - s 图

Fig. 4 Simple KC system structure and its T - s diagram

4 余热发电技术可行性分析

4.1 问题描述

采用 MATLAB 软件进行系统建模,选用 R123 作为 ORC 与 EOFC 工质, KC 工质为氨水混合物,工质热物理性质来自 REFPROP 10.0 软件^[54],核电厂冷却海水的热物理性质来源于《福清厂址有关的设计参数》和 TEOS-10 海水热物理性质查询工具包。系统功率设备的效率^[55]如表 3 所示,换热过程的夹点温差设定为 2°C (换热器两端与内部的夹点温差均考虑在内)。

表 3 系统功率设备的效率

Tab. 3 Efficiency of system power equipment

参数	数值
工质泵等熵效率 η_{pump}	0.8
膨胀机等熵效率 η_{tur}	0.8
电动机效率 η_{motor}	0.98
发电机效率 η_{gen}	0.98

为简化分析, 采用如下假设: 1) 系统处于稳态运行; 2) 忽略设备和连接件的散热和流动压降损失; 3) 忽略工质泵进、出口处工质重力势能和动能的变化, 假设工质为不可压缩流体。

4.2 热力学模型

为评估 ORC、EOFC 和 KC 三种发电技术在核电厂低品位余热回收场景应用的热力学可行性, 对 3 种低品位热能发电技术建立热力学模型。这 3 种发电系统吸热量 Q_{eva} 的计算式均为

$$Q_{eva} = \dot{m}_{wf}(h_{eva,out} - h_{eva,in}) \quad (1)$$

式中: $\dot{m}_{wf}$ 为工质流量; $h_{eva,in}$ 和 $h_{eva,out}$ 分别为工质在蒸发器进口和出口处的焓值。

对于 ORC, 膨胀机的输出功率 W_{tur} 计算式为

$$W_{tur} = \dot{m}_{wf}(h_{tur,in} - h_{tur,out,s})\eta_{tur}\eta_{gen} \quad (2)$$

式中: $h_{tur,out,s}$ 为工质经过等熵膨胀后在膨胀机出口处的焓值; $h_{tur,in}$ 为工质在膨胀机进口处焓值。

对于 EOFC, 膨胀机输出功需额外考虑蒸汽干度 x ; 对于 KC, 富氨蒸气进入膨胀机做功。

系统中工质泵的耗电功率 W_{pump} 计算式为

$$W_{pump} = \frac{\dot{m}_{wf}(h_{pump,out,s} - h_{pump,in})}{\eta_{pump} \times \eta_{motor}} \quad (3)$$

式中: $h_{pump,out,s}$ 为工质经过等熵膨胀后在工质泵出口处的焓值; $h_{pump,in}$ 为工质在工质泵进口处的焓值。

系统的净发电功率 W_{net} 计算式为

$$W_{net} = W_{tur} - W_{pump} \quad (4)$$

系统的热效率 η_1 计算式为

$$\eta_1 = \frac{W_{net}}{Q_{eva}} \quad (5)$$

4.3 经济性能模型

本文进一步对 ORC、DFC、KC 三种技术应用于核电厂低品位余热回收的经济可行性进行对比分析。

4.3.1 换热器成本

换热器部件单位面积成本数据采用中国核电工程有限公司数据的 1 300 元/m²(178.49 美元/m²), 单个换热器部件成本为

$$C_{BM} = S \times 178.49 \quad (6)$$

式中: C_{BM} 为换热器成本, 美元; S 为换热器面积, m²。

换热器总成本 $C_{BM,he}$ 的计算模型如式(7)所示, 其中 ORC 与 EOFC 无需计算回热器成本。

$$C_{BM,he} = C_{BM,eva} + C_{BM,con} + C_{BM,re} \quad (7)$$

式中 $C_{BM,eva}$ 、 $C_{BM,con}$ 和 $C_{BM,re}$ 分别为蒸发器成本、冷凝器成本和回热器成本, 美元。

4.3.2 功率设备成本

采用化工设备成本估算经验公式计算功率设备成本 $C_{BM,t}$, 计算模型如式(8)所示, 其中 ORC 与 KC 无需计算喷射器成本。

$$C_{BM,t} = C_{BM,tur} + C_{BM,pump} + C_{BM,eje} \quad (8)$$

式中 $C_{BM,tur}$ 、 $C_{BM,pump}$ 和 $C_{BM,eje}$ 分别为膨胀机、工质泵和喷射器的采购成本, 美元。

膨胀机和工质泵的成本 C_{BM} 计算式为

$$C_{BM} = C_{basic} F_B \quad (9)$$

式中: C_{basic} 为设备的基础成本; F_B 为考虑材料、压力和温度等影响因素的成本修正因子^[56]。

考虑通货膨胀影响, 采用化工成本指数 (chemical engineering plant cost index, CEPCI) 对成本进行修正, 计算式为

$$C_{tot,power} = a C_{BM,t} \frac{\delta_{CEPCI_{2023}}}{\delta_{CEPCI_{2021}}} \quad (10)$$

式中: $C_{tot,power}$ 为系统功率设备总成本; $a=1.18$, 为考虑除功率设备外其他设备的成本修正系数; $\delta_{CEPCI_{2021}}=397$, $\delta_{CEPCI_{2023}}=797.9$ ^[57], 分别为 2021、2023 年的化工成本指数, 用于度量化工工程项目成本变化。

低品位余热发电系统的总投资成本 C_{tot} 计算式为

$$C_{tot} = C_{BM,he} + C_{tot,power} \quad (11)$$

进一步引入净现值 (net present value, NPV) C_{NPV} 和平准化度电成本 (levelized cost of electricity, LCOE) C_{LCOE} 2 个指标评价低品位余热发电系统的经济性能, 其表达式分别如下:

$$C_{NPV} = -C_{tot} + \sum_{t=1}^{t_{LT}} \frac{(E_{yr} J - C_{OM} - C_{DEP})(1 - \eta_{tax}) + C_{DEP}}{(1+r)^t} \quad (12)$$

$$C_{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^{t_{LT}} [\frac{C_{OM}}{(1+r)^t} - \frac{C_{DEP}}{(1+r)^t}] + C_{tot} - \frac{C_{residual}}{(1+r)^{t_{LT}}}}{\sum_{t=1}^{t_{LT}} \frac{E_{yr}}{(1+r)^t}} \quad (13)$$

式中: E_{yr} 为系统年发电总量, 根据系统净输出功率计算, 年运行时长取 7 000 h; J 为售电价格,

取 0.045 美元/(kW·h)(即 0.325 57 元/(kW·h)); C_{OM} 为年运行维护成本, 取总投资成本的 1.5%; C_{DEP} 为年折旧金额, 采用线性折旧方法计算; η_{tax} 为税率, 取 17%; r 为折现率, 取 5%; $C_{residual}$ 为运行期末的净资产残值, 取 0; t 为机组运行时长, 年; t_{LT} 为机组运行年限, 取 25 年。

4.4 技术/经济可行性分析结果

4.4.1 技术可行性

在 3 种典型余热源场景下, ORC 均具有最高的发电效率, 如图 5 所示。对于低压缸乏汽余热利用, ORC 的发电效率为 3.3%, 吸热功率高达 360.3 MW, 可以显著降低排海热负荷, 此外, 其发电功率远高于 EOFC 与 KC。对于凝结饱和水余热利用, EOFC 具有最大的吸热功率和发电功率, 分别高达 22.5 MW 和 1.12 MW, 其原因在于, 通过闪蒸技术有效提升了热源与循环之间的匹配度; 而对于低压缸乏气和温排水, EOFC 并没有展现其性能优势。因此, EOFC 更适用于余热温度高且供电需求多的应用场景。对于温排水余热利用, ORC 与 EOFC 虽然发电效率极低(低于 0.3%), 但仍可吸收大量余热(分别为 172.4 MW 与 10.9 MW), 有助于达成降低排海热负荷的目标; 而 KC 由于热源温度较低, 无法实现发电。

综上, 对于核电厂的不同余热源, ORC 通常展现出更高的发电效率和发电功率, 尤其是在低压缸乏汽和温排水余热利用场景下, 而 EOFC 在凝结饱和水余热利用场景下表现更好; 因此, 从技术可行性角度看, ORC 与 EOFC 均展现出较高的适配性, 具有较好的应用潜力。

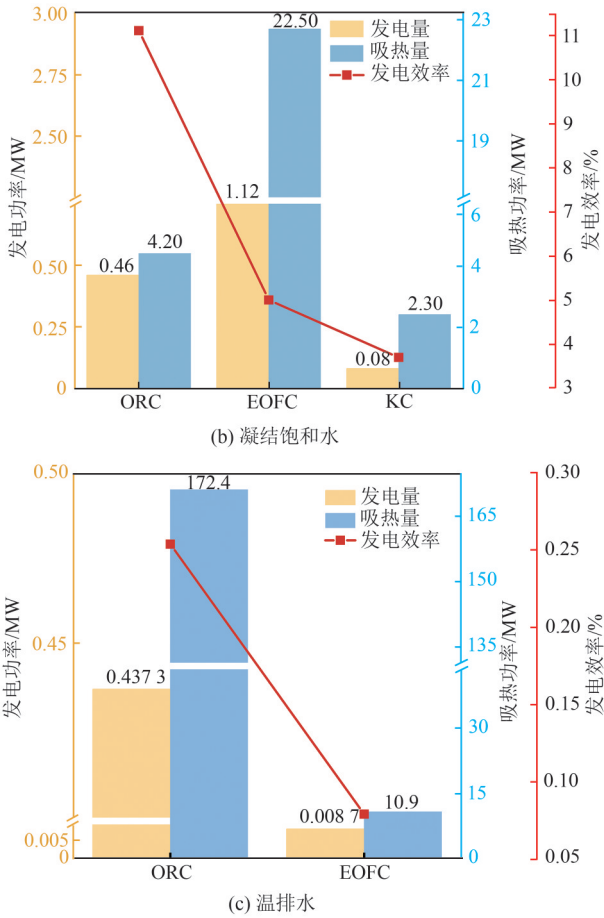
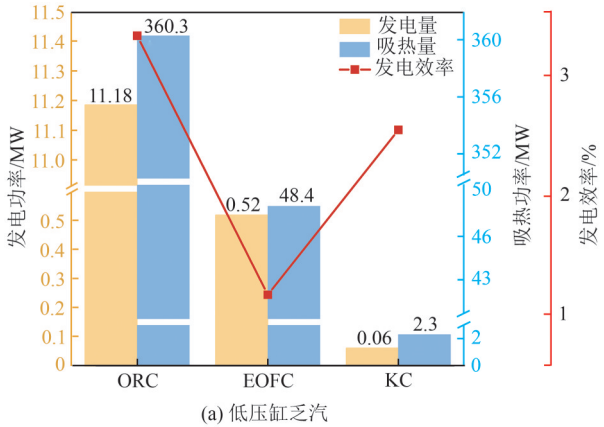


图 5 不同发电技术在 3 种典型余热源场景下的热力性能
Fig. 5 Thermal performance of different power generation technologies under three typical waste heat source scenarios

4.4.2 经济可行性

图 6 展示了不同发电技术在 3 种典型余热源场景下的经济性能。从净现值角度看, 不同发电技术在 3 种典型余热源场景下均无法实现盈利。ORC 在 3 种典型余热源场景下均具有最低的平准化度电成本, 结合 ORC 技术的热力性能优势, 具有较好的应用潜力。特别是在回收二回路凝结饱和水余热时, ORC 凭借其 11.1% 的发电效率和 0.037 6 美元/(kW·h) 的平准化度电成本, 在经济性方面表现卓越, 其平准化度电成本相对 EOFC 和 KC 分别降低了 84% 和 78%, 成为该热源条件下的首选技术。在回收低压缸出口乏汽余热场景下, ORC 同样表现出较高的发电效率(3.3%)和相对较低的平准化度电成本(0.107 2 美元/(kW·h)), 尽管净现值为负, 但其较高的技术成熟度和较大的排海热负荷减少量使其在大规模应用中仍具有重要

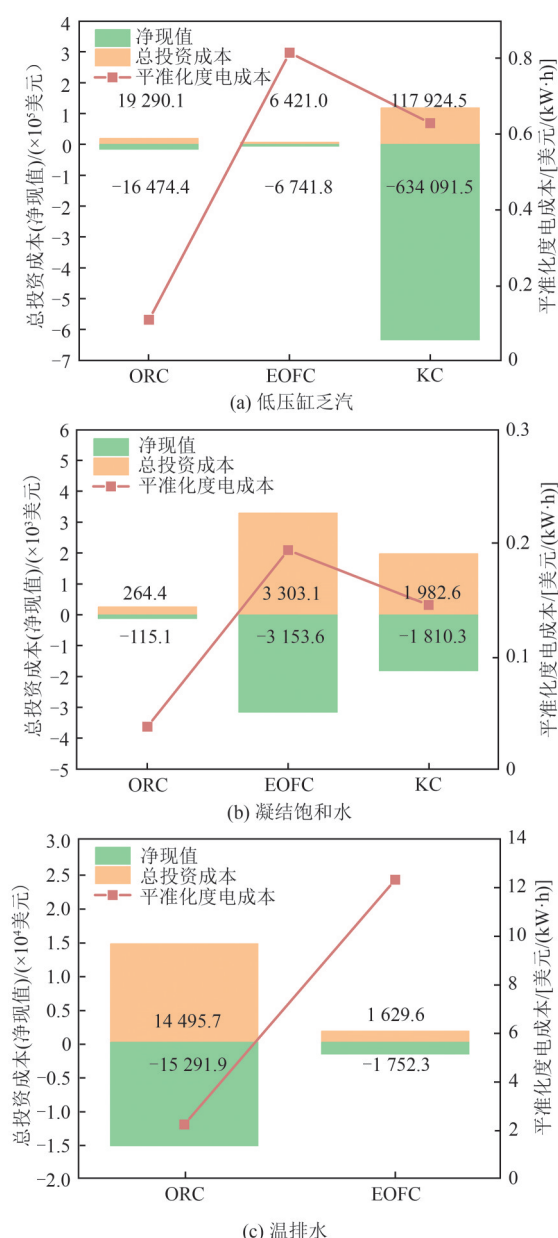


图6 不同发电技术在3种典型余热源场景下的经济性能
Fig. 6 Economic performance of different power generation technologies under three typical waste heat source scenarios

潜力。在回收温排水余热场景下,由于热源温度极低,ORC的发电效率和经济性受到大幅限制,但其在减少排海热负荷方面具有显著的环保效益。相比之下,EOFC和KC在回收低压缸出口乏汽和温排水余热场景下的经济性表现欠佳,这是因为其高投资成本和低发电效率限制了其实际应用。

5 结论

聚焦核电厂的低品位余热发电利用,得出以

下主要结论:

1) 核电厂低品位余热来源广泛、热量丰富,但回收难度不一,现有的直接热利用方式虽具有一定效益,但普遍受季节性、用热不稳定和利用规模限制。相比之下,余热发电技术具备热电转化效率高、运行稳定、全年可用等优势,可有效提升核能综合利用水平,降低排海热负荷,是实现核电厂低品位余热高效利用的优选路径。

2) 在回收二回路凝结饱和水余热场景下,ORC是热经济性能最佳的技术方案,其平准化度电成本最低,为0.0376美元/(kW·h),相对于EOFC和KC分别降低了84%和78%;同时其发电功率为462.2 kW,规模较大,具有较好的可行性。

3) 通过余热发电技术回收核电厂低品位余热,在当前技术经济条件下虽难以实现直接经济收益,但在降低排海热负荷方面效果显著(如低压缸乏汽余热回收可减排360.3 MW)。因其环保效益与潜在经济效益的协同性,使其具有推广价值。随着制造工艺升级带来的成本下降,部分余热源场景将显现盈利潜力。此外,余热利用可通过农业种植、市政供暖等间接效益实现价值转化。

参考文献

- [1] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th Five-Year Plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [2] 吴熙, 陈康文, 郭其胜, 等. 考虑核电灵活参与调峰的多源联合运行低碳经济调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 1-11.
WU X, CHEN K W, GUO Q S, et al. A multi-source combined operation low carbon economy dispatch considering flexible participation of nuclear power in peaking[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 1-11.
- [3] 崔文浩, 郑胜, 秦雄杰, 等. 基于多尺度时间窗口的核电运行数据关联性分析方法研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 143-150.
CUI W H, ZHENG S, QIN X J, et al. Research on

- correlation analysis method for nuclear power operation data based on multi-scale time window[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 143-150.
- [4] 刘学成, 杨军, 申锦鹏, 等. 基于系统动力学模型的电力系统等效惯量时空演变趋势研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(5): 579-590.
- LIU X C, YANG J, SHEN J P, et al. Analysis of spatiotemporal evolution trend of equivalent inertia in power system based on system dynamics model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 579-590.
- [5] 梁毅, 李华, 刘航旭, 等. 计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 124-133.
- LIANG Y, LI H, LIU H X, et al. Multi source complementary peak shaving scheduling method considering nuclear power risk quantification[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 124-133.
- [6] 余娜. 中国核电站冷却水“热污染”调查[J]. 能源, 2016(2): 82-88.
- YU N. Investigation on “thermal pollution” of cooling water in China nuclear power station[J]. Energy, 2016(2): 82-88.
- [7] SRIVASTAVA M, SARKAR J, SARKAR A, et al. Thermo-economic feasibility study to utilize ORC technology for waste heat recovery from Indian nuclear power plants[J]. Energy, 2024, 298: 131338.
- [8] GABBAR H A, BARRY STOUT C A, STEELE D, et al. Evaluation and optimization of thermoelectric generator network for waste heat utilization in nuclear power plants and non-nuclear energy applications[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 101: 454-464.
- [9] ZHANG J R, TIAN Z X, GUO K L, et al. Investigations on thermoelectric characteristic of heat pipe thermoelectric generator waste heat utilization device in nuclear power system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 407: 112299.
- [10] 林燕萍, 王威, 童中山, 等. 我国滨海核电厂温排水及液态流出物排放研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(1): 210-216.
- LIN Y P, WANG W, TONG Z S, et al. Research progress on thermal discharge and liquid effluent from coastal nuclear power plants in China[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(1): 210-216.
- [11] 胡泉, 李少伦, 王丹, 等. 烟在综合能源系统中的理论、模型、应用综述及展望[J]. 电力建设, 2024, 45(3): 1-15.
- HU X, LI S L, WANG D, et al. Review and prospect of exergy in theory, modelling, and applications of integrated energy systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 1-15.
- [12] 刘永叶, 刘森林, 陈晓秋. 核电厂温排水余热综合利用方案设计的初步研究[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(2): 48-51.
- LIU Y Y, LIU S L, CHEN X Q. Preliminary study on the design of comprehensive utilization scheme of waste heat in thermal discharge of nuclear power plant[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(2): 48-51.
- [13] 亓浙兴. 日本核电站温排水的渔业利用[J]. 水产科技情报, 1987, 14(2): 28.
- QI Z X. Fishery utilization of warm drainage water from nuclear power plants in Japan[J]. Fisheries Science and Technology Information, 1987, 14(2): 28.
- [14] 於凡, 杨东. 核电站冷却水余热利用问题的研究初探[J]. 能源与环境, 2009(2): 7-9.
- YU F, YANG D. Preliminary study on the utilization of cooling water waste heat in nuclear power plants[J]. Energy and Environment, 2009(2): 7-9.
- [15] 青岛罗非鱼良种场. 国家级水产原良种场风采——青岛罗非鱼良种场简介[J]. 中国水产, 2001(8): 53.
- Qingdao Tilapia Seed Farm. Showcase of national-level aquatic seed production farms: introduction to Qingdao Tilapia Seed Farm[J]. China Fisheries, 2001(8): 53.
- [16] 中国电力报. 核能供热基本原理[EB/OL]. (2022-06-08)[2025-02-17]. https://www.nea.gov.cn/2022-06/08/c_1310617345.html.
- China Electric Power News. Basic principles of nuclear heating[EB/OL]. (2022-06-08) [2025-02-17]. https://www.nea.gov.cn/2022-06/08/c_1310617345.html.
- [17] 董卿, 杨秀萍. 记者蹲点“硬核”供暖又一年[EB/OL]. (2022-11-24) [2025-02-17]. <https://sghexport.shobserver.com/html/baijiahao/2022/11/24/908393.html>.
- DONG Q, YANG X P. Journalists on-site: another year of “hardcore” heating[EB/OL]. (2022-11-24) [2025-02-17]. <https://sghexport.shobserver.com/html/baijiahao/2022/11/24/908393.html>.
- [18] 威海新闻网. 海阳→乳山! 我国首个跨地级市核能供热工程投运[EB/OL]. (2023-11-28) [2025-02-17]. https://www.weihaigov.cn/art/2023/11/27/art_58817_4150426.html.
- Weihai News. Haiyang→Rushan! China's first cross-prefecture-level nuclear heating project put into operation[EB/OL]. (2023-11-28)[2025-02-17]. https://www.weihaigov.cn/art/2023/11/27/art_58817_4150426.html.

- [19] 烟台市人民政府. 一城供热, 两市同暖! 我国首个跨地级市核能供热工程在海阳投运[EB/OL]. (2023-11-28) [2025-02-17]. https://www.yantai.gov.cn/art/2023/11/28/art_41951_3155417.html.
The People's Government of Yantai. One city heats, two cities warm! China's first cross—prefecture—level nuclear heating project put into operation in Haiyang[EB/OL]. (2023-11-28) [2025-02-17]. https://www.yantai.gov.cn/art/2023/11/28/art_41951_3155417.html.
- [20] 中央纪委国家监委网站. 零碳供暖背后的硬“核”力量 走近全国最大核能供热项目“暖核一号”[EB/OL]. (2022-12-19)[2025-02-17]. https://www.ccdi.gov.cn/yaowenn/202212/t20221219_237121.html.
Central Commission for Discipline Inspection and National Supervisory Commission Website. The “hardcore” power behind zero-carbon heating: approaching the nation's largest nuclear heating project “Warm Core No. 1”[EB/OL]. (2022-12-19) [2025-02-17]. https://www.ccdi.gov.cn/yaowenn/202212/t20221219_237121.html.
- [21] 中国广核集团. 突破3000亿! 红沿河核电站助力东北地区打好蓝天保卫战[EB/OL]. (2024-08-20)[2025-02-17]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyxx/202408/t20240820_1084213.html.
China General Nuclear Power Group. Exceeding 300 billion! Hongyanhe Nuclear Power Station helps Northeast China fight the battle for blue skies[EB/OL]. (2024-08-20) [2025-02-17]. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyxx/202408/t20240820_1084213.html.
- [22] 郭翔, 白涌泉. 东北地区首个核能供暖项目正式供热[EB/OL]. (2022-11-01) [2025-02-17]. https://www.xinhuanet.com/local/2022-11/01/c_1129092480.htm.
GUO X, BAI Y Q. Northeast China's first nuclear heating project officially begins operation[EB/OL]. (2022-11-01)[2025-02-17]. https://www.xinhuanet.com/local/2022-11/01/c_1129092480.htm.
- [23] 牟思南. 东北地区首个! 辽宁红沿河核电站核能供暖项目正式供热[EB/OL]. (2022-11-03)[2025-02-17]. <https://www.huanqiu.com/article/4AI5poe23Nt>.
MOU S N. Northeast China's first! Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Station's nuclear heating project officially begins operation[EB/OL]. (2022-11-03) [2025-02-17]. <https://www.huanqiu.com/article/4AI5poe23Nt>.
- [24] 中国核工业集团有限公司. 我国南方首个核能供热示范工程正式投运[EB/OL]. (2021-12-06)[2025-02-17]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588119/c22084143/content.html>.
China National Nuclear Corporation. China's first nuclear heating demonstration project in the south officially put into operation[EB/OL]. (2021-12-06) [2025-02-17]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588119/c22084143/content.html>.
- [25] AXPO. Beznau Power Plant Axpo[EB/OL]. (2024-03-22) [2025-02-17]. <https://www.axpo.com/ch/en/energy/generation-and-distribution/nuclear-power/beznau.html>.
- [26] POWER. District heating supply from nuclear power plants[EB/OL]. (2022-02-01) [2025-02-17]. <https://www.powermag.com/district-heating-supply-from-nuclear-power-plants/>.
- [27] Traceyhonney. Russia's floating NPP supplies heat to second Pevek district[EB/OL]. (2022-07-26) [2025-02-17]. <https://www.neimagazine.com/news/russias-floating-npp-supplies-heat-to-second-pevek-district-9877829/>.
- [28] 苑佳卉, 吴元柱. 核电站温排水现状研究[J]. 科技视界, 2015(12): 231.
YUAN J H, WU Y Z. Study on the present situation of thermal drainage in nuclear power plant[J]. Science & Technology Vision, 2015(12): 231.
- [29] 宋二猛, 贾海军, 王玉华, 等. 高温多效蒸馏及在核能海水淡化方面的应用[J]. 水处理技术, 2005, 31(7): 11-14.
SONG E M, JIA H J, WANG Y H, et al. Technology of high temperature vte-med and progress in nuclear desalination research in China[J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(7): 11-14.
- [30] 郑文祥, 董铎, 张达芳. 摩洛哥坦坦地区核能海水淡化示范项目[J]. 核动力工程, 2000, 21(1): 48-51.
ZHENG W X, DONG D, ZHANG D F. Project of a nuclear desalination demonstration plant for Tan Tan Morocco[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(1): 48-51.
- [31] 陈微, 张立君. 海水淡化技术在国内外核电站的应用[J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 128-132.
CHEN W, ZHANG L J. Application of seawater desalination technology in nuclear power plant[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(11): 128-132.
- [32] 李健, 武江元, 杨震, 等. 地热发电技术及其关键影响因素综述[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 1-8.
LI J, WU J Y, YANG Z, et al. Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 1-8.
- [33] 陈然, 刘强, 蒙冬玉. 过冷度对地热发电非共沸工质有机朗肯循环热力性能的影响[J]. 发电技术, 2020,

- 41(2): 190-197.
- CHEN R, LIU Q, MENG D Y. Effect of subcooling on thermal performance of organic Rankine cycle with zeotropic mixture in geothermal power generation[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 190-197.
- [34] EHYAEI M A, AHMADI A, EL HAJ ASSAD M, et al. Investigation of an integrated system combining an organic Rankine cycle and absorption chiller driven by geothermal energy: energy, exergy, and economic analyses and optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120780.
- [35] LIU Q, DUAN Y Y, YANG Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids[J]. Energy, 2013, 63: 123-132.
- [36] HABIBOLLAHZADE A, PETERSEN K J, ALIAHMADI M, et al. Comparative thermoeconomic analysis of geothermal energy recovery via super/transcritical CO₂ and subcritical organic Rankine cycles[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 115008.
- [37] 顾煜炯, 陈礼敏, 耿直. 不同太阳能热源下混合工质ORC系统性能分析[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 177-187.
- GU Y J, CHEN L M, GENG Z. Performance analysis of ORC system for non-zeotropic mixtures under different solar energy sources[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 177-187.
- [38] 李晶, 裴刚, 季杰. 太阳能有机朗肯循环低温热发电关键因素分析[J]. 化工学报, 2009, 60(4): 826-832.
- LI J, PEI G, JI J. Analysis of key factors in low-temperature solar-thermal-electric power generation with organic Rankine cycle[J]. Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China, 2009, 60(4): 826-832.
- [39] CHEN Y Z, XU J Z, ZHAO D D, et al. Exergoeconomic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump[J]. Energy, 2021, 230: 120717.
- [40] OYEKALE J, PETROLLESE M, HEBERLE F, et al. Exergetic and integrated exergoeconomic assessments of a hybrid solar-biomass organic Rankine cycle cogeneration plant[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 215: 112905.
- [41] KARIMI M H, CHITGAR N, ALI EMADI M, et al. Performance assessment and optimization of a biomass-based solid oxide fuel cell and micro gas turbine system integrated with an organic Rankine cycle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(11): 6262-6277.
- [42] BEHZADI A, ARABKOOHSAR A, GHOLAMIAN E. Multi-criteria optimization of a biomass-fired proton exchange membrane fuel cell integrated with organic Rankine cycle/thermoelectric generator using different gasification agents[J]. Energy, 2020, 201: 117640.
- [43] XIE P, LONG R, LIU Z, et al. Working fluid selection of organic Rankine cycle for low-temperature industrial waste heat utilization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(9): 1834-1837.
- [44] FANG Y Y, BIAN Y Y, WANG T S, et al. Optimal choice of working fluids of organic Rankine cycle for industrial waste heat recovery[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2018, 18(3): 25-28.
- [45] 黄晓艳, 吴家正, 王海鹰, 等. 中低温工业余热ORC回收装置的工质发展与应用[J]. 节能技术, 2012, 30(1): 34-38.
- HUANG X Y, WU J Z, WANG H Y, et al. Advances in research and application of working fluids for ORC waste heat recovery apparatus[J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(1): 34-38.
- [46] HO T, MAO S S, GREIF R. Comparison of the organic flash cycle (OFC) to other advanced vapor cycles for intermediate and high temperature waste heat reclamation and solar thermal energy[J]. Energy, 2012, 42(1): 213-223.
- [47] MONDAL S, ALAM S, DE S. Performance assessment of a low grade waste heat driven organic flash cycle (OFC) with ejector[J]. Energy, 2018, 163: 849-862.
- [48] NEMATI A, NAMI H, YARI M. Assessment of different configurations of solar energy driven organic flash cycles (OFCs) via exergy and exergoeconomic methodologies[J]. Renewable Energy, 2018, 115: 1231-1248.
- [49] BACCIOLI A, ANTONELLI M, DESIDERI U. Technical and economic analysis of organic flash regenerative cycles (OFRCs) for low temperature waste heat recovery[J]. Applied Energy, 2017, 199: 69-87.
- [50] WANG Q, MACIÁN-JUAN R, LI D T. Analysis and assessment of a novel organic flash Rankine cycle (OFRC) system for low-temperature heat recovery[J]. Energy Science & Engineering, 2022, 10(8): 3023-3043.
- [51] HO T, MAO S S, GREIF R. Increased power production through enhancements to the organic flash cycle (OFC)[J]. Energy, 2012, 45(1): 686-695.
- [52] LI T L, GAO H Y, GAO X. Synergetic mechanism of organic Rankine flash cycle with ejector for

geothermal power generation enhancement[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375: 134174.

- [53] 聂晶. 基于朗肯循环和卡琳娜循环的中低温余热动力循环分析[J]. 制冷, 2015, 34(3): 40-44.

NIE J. Power cycle analysis for mid-low temperature waste heat resource based on rankin cycle and kalina cycle[J]. Refrigeration, 2015, 34(3): 40-44.

- [54] 彭斌, 刘帅, 刘慧鑫, 等. 不同工质对有机朗肯循环低温余热发电系统性能的影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 43-48.

PENG B, LIU S, LIU H X, et al. Influence of different working fluids on performance of organic Rankine cycle low temperature waste heat power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 43-48.

- [55] LI J, YANG Z, YU Z T, et al. Influences of climatic environment on the geothermal power generation potential[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 115980.

- [56] TURTON R. Analysis, synthesis, and design of chemical processes[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009: 1-6.

- [57] Chemical Engineering. 2023 CEPCI annual average value decreases from previous year: Chemical Engineering Page 1[EB/OL]. (2024-03-25) [2025-02-17]. <https://www.chemengonline.com/2023-cepci-annual-average-value-decreases-from-previous-year>.

收稿日期: 2025-02-17。

修回日期: 2025-04-05。

作者简介:



赵雅卓

赵雅卓(1995), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为核电水工设计与科研, zhaoyz@cnpe.cc;



张文杰

张文杰(1988), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为核电水工设计与科研, zhangwjc@cnpe.cc;



廖颖慧

廖颖慧(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为中低温热能利用、热力系统优化等, Liao-yh23@mails.tsinghua.edu.cn;



林晋磊

林晋磊(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为中低温热能利用、热力系统优化等, linjl24@mails.tsinghua.edu.cn;



张荣勇

张荣勇(1977), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为核电水工设计与科研, zhangryc@cnpe.cc;



段远源

段远源(1971), 男, 博士, 教授, 研究方向为热力学、流体的热物理性质、中低温热能利用等, 本文通信作者, yyduan@mail.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)