DOI: 10.19666/j.rlfd.202405100

煤电机组余热能质深度回收优化研究

邓　佳[1]，许朋江[1]，郑　郝[2]，刘雨恩[1]，马汀山[1]
（1.西安热工研究院有限公司，陕西　西安　710054；
2.中国华能集团有限公司，北京　100031）

［摘　　要］针对煤电机组低品位余热能质浪费问题，以某 350 MW 机组为研究对象，采用 Ebsilon 平台建模模拟研究不同的低品位余热能质深度回收方案，计算“有机朗肯循环（organic Rankine cycle，ORC）”和“加热器”2 种方案对应机组运行数据，分析能耗特性、收益特性和差异性等，得到了余热能质深度回收的机理和优化方案。结果表明：2 种方案下机组能耗特性均有明显提升，“加热器”方案能耗更低；随着有机工质流量增加，ORC 系统发电量逐渐增大，ORC 系统热电效率先逐渐增大后趋于平缓并有下降趋势，变化范围为 6.94%~7.75%，有机工质流量对 ORC 系统循环效率影响较小；2 种方案技术经济均可行，“ORC”方案可以为电厂带来直接电能收益，“加热器”方案经济性略好。

［关　键　词］煤电机组；余热能质；深度回收；ORC；优化

［引用本文格式］邓佳，许朋江，郑郝，等. 煤电机组余热能质深度回收优化研究[J]. 热力发电，2024，53(12)：112-119. DENG Jia, XU Pengjiang, ZHENG Hao, et al. Deep recovery and optimization of waste heat and energy quality for coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 112-119.

Deep recovery and optimization of waste heat and energy quality for coal-fired units

DENG Jia[1], XU Pengjiang[1], ZHENG Hao[2], LIU Yuen[1], MA Tingshan[1]
(1. Xi’an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi’an 710054, China;
2. China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: In response to significant increase in energy consumption caused by low-grade waste heat and energy waste in coal-fired power plants, a 350 MW unit is selected as the research object, the Ebsilon software is used to model and simulate different deep recovery schemes for low-grated waste heat and residue. The operating data of the unit under two schemes of “organic Rankine cycle (ORC)” and “Heater” are calculated. The energy consumption characteristics, revenue characteristics and differences are analyzed, and the mechanism and optimization plan for deep recovery of waste heat and energy are obtained. The results show that, the energy consumption characteristics of the unit improve significantly under both schemes, and the “heater” scheme has lower energy consumption. As the organic working fluid flow rate increases, the power generation of the ORC system gradually increases, but the thermoelectric efficiency of the ORC system gradually increases at first and then tends to stabilize and has a downward trend, with a range of 6.94%~7.75%. The organic working fluid flow rate has a relatively small effect on circulation efficiency of the ORC system. Both schemes are technically and economically feasible. The “ORC” scheme can bring direct electricity benefits to the power plant, while the “Heater” scheme is slightly more economical.

Key words: coal-fired power unit; wasted heat and substance; deep recycling; ORC; optimization

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021 年）、《全国煤电机组改造升级实施方案》（发改运行〔2021〕1519 号）等一系列政策文件共同指出，

收 稿 日 期：2024-05-15
基 金 项 目：西安西热节能技术有限公司科技项目（GB-24-TZK11）
Supported by：Science and Technology Project of Xi’an Xire Energy Saving Technology Co., Ltd. (GB-24-TZK11)
第一作者简介：邓佳（1990），女，硕士，高级工程师，主要研究方向为热能动力工程，dengjia@tpri.com.cn。

煤炭清洁高效利用是深入推进能源革命的重要一环[1]，“双碳”目标下，坚持节能优先的能源发展战略，大力推动煤电节能降碳改造[2]，进一步深挖煤电机组的节能潜力，既是对节能减排政策的响应，又提高了火电机组在新型电力系统中的生存能力，缓解煤电机组经营生存困境[3-7]。

提高机组低温余热能质深度梯级利用回收能力可以缓解燃煤发电正面临的重大急迫需求。对电厂低品位余热的深度挖掘，如烟气余热[8-11]、循环水余热[12-17]、除氧器连续排汽[18-19]、灰斗加热蒸汽疏水等，是煤电机组进一步节能提效的有效途径。目前电厂的烟气余热和循环水余热分别通过低温省煤器[8-11]、旁路烟道[10]、原煤烟气预干燥[10]、高背压供热[12]、热泵[12-17]等技术加以利用，提高了机组运行的热经济性，减少了一次能源的消耗。然而，除氧器连续排汽、灰斗疏水、暖管蒸汽疏水等余热长期以来一直被忽视，余热能质持续浪费已成为煤电机组普遍存在共性问题。余热能质浪费一方面造成电厂的经济性下降，同时增加了碳排放指标和用水指标[20-21]，另一方面造成白色雾气视觉污染，产生了不良的社会影响[22-23]。如何对这些低品位余热进行深度的回收利用，是煤电机组节能降碳进入深水区的技术难题。目前，对于煤电机组深度余热利用的研究较少[24-26]，尤其是灰斗伴热疏水等余热能质回收的研究更少。

利用有机朗肯循环（organic rankine cycle，ORC）系统进行低温余热发电具有节能、环保等特点，符合能源梯级利用的要求。目前，利用 ORC 技术回收低品位工业废热（低于 350 ℃）的发电设备装置容量已经超过了 400 MW（主要位于欧美等国家），ORC 技术逐渐成熟，其主要应用在内燃机、燃气轮机、天然气压缩机站等大型设备或者行业的废热回收发电。ORC 系统在火电行业的应用目前还属于空白。煤电机组的低温余热资源丰富多样，具有很大的回收价值。

针对煤电机组低品位余热能质浪费引起机组能耗升高、运行经济性变差、视觉污染严重的问题，本文以某电厂 350 MW机组为研究对象，采用Ebsilon平台建模模拟研究不同的低品位余热能质深度回收方案，计算“ORC”和“加热器”2 种方案对应不同负荷、不同有机工质流量下机组运行数据，分析能耗特性、收益特性和差异性等，得到余热能质深度回收的机理和优化方案，掌握不同余热能质深度回收方案对机组运行经济性的影响规律。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型

本文汽轮机计算模型为东方电气 CC350-24.2/4.05/1.3/566/566 型双抽可调供热纯凝式机组。设计额定蒸汽流量 1 029.7 t/h，热耗 7 638 kJ/(kW·h)，背压 4.9 kPa。

1.2 边界条件及求解方法

采用Ebsilon平台进行建模，计算模型包括汽轮机、发电机、凝汽器、凝结水泵组、低压加热器、除氧器、汽动给水泵组、高压加热器、锅炉及汽水管道等。汽轮机组变工况运行方式为滑压运行，以汽轮机组阀全开工况热平衡特性为计算基准，分别模拟ORC和热交换器换热的余热能质回收利用方案。“ORC”方案利用余热回收储罐把ORC与蒸汽动力循环结合起来，再利用换热器深度梯级利用废热，最后可直接回收工质，具体如图 1 所示。“加热器”方案利用余热回收储罐回收余热，然后通过换热器直接加热凝结水深度回收余热，最后可直接回收工质，具体如图 2 所示。

1.3 有机朗肯循环

ORC 是以低沸点有机物为工质的朗肯循环，主要由蒸发器（换热器）、膨胀机、冷凝器和工质泵 4 大部分组成[27-29]。本文中的“ORC”方案采用带有回热系统的 ORC，利用余热回收装置回收系统余热，有机工质在蒸发器中从余热流中吸收热量，生成具一定压力和温度的蒸汽，蒸汽进入膨胀机做功，从而带动发电机发电。从膨胀机排出的蒸汽在回热加热器中向冷却后的有机工质放热，然后进一步在冷凝器中向冷却水放热，凝结成液态后，借助工质泵回到回热加热器吸热，最后重新回到蒸发器，如此完成一个循环。ORC 发电设备占地规模小，自动化程度高，投入的人力成本较低，是一种比较理想的低品位热能回收利用技术[30-32]。图 3 为以 ORC 为核心的余热回收原理。

1.4 机组热耗计算

热耗 r 是指汽轮发电机组每生产 1 kW·h 的电能所需要的热量，反应了发电厂的热经济性，是发电厂重要的经济性指标之一[27]。机组不对外供热时的热耗，即纯凝工况机组热耗 r_{cn}，计算见式(1)。

$$r_{cn} = \frac{Q_{cn}}{P} \tag{1}$$

式中：r_{cn} 为纯凝工况机组热耗，kJ/(kW·h)；Q_{cn} 为纯凝工况介质的锅炉吸热量，kJ/h；P 为机组发电功率，kW。

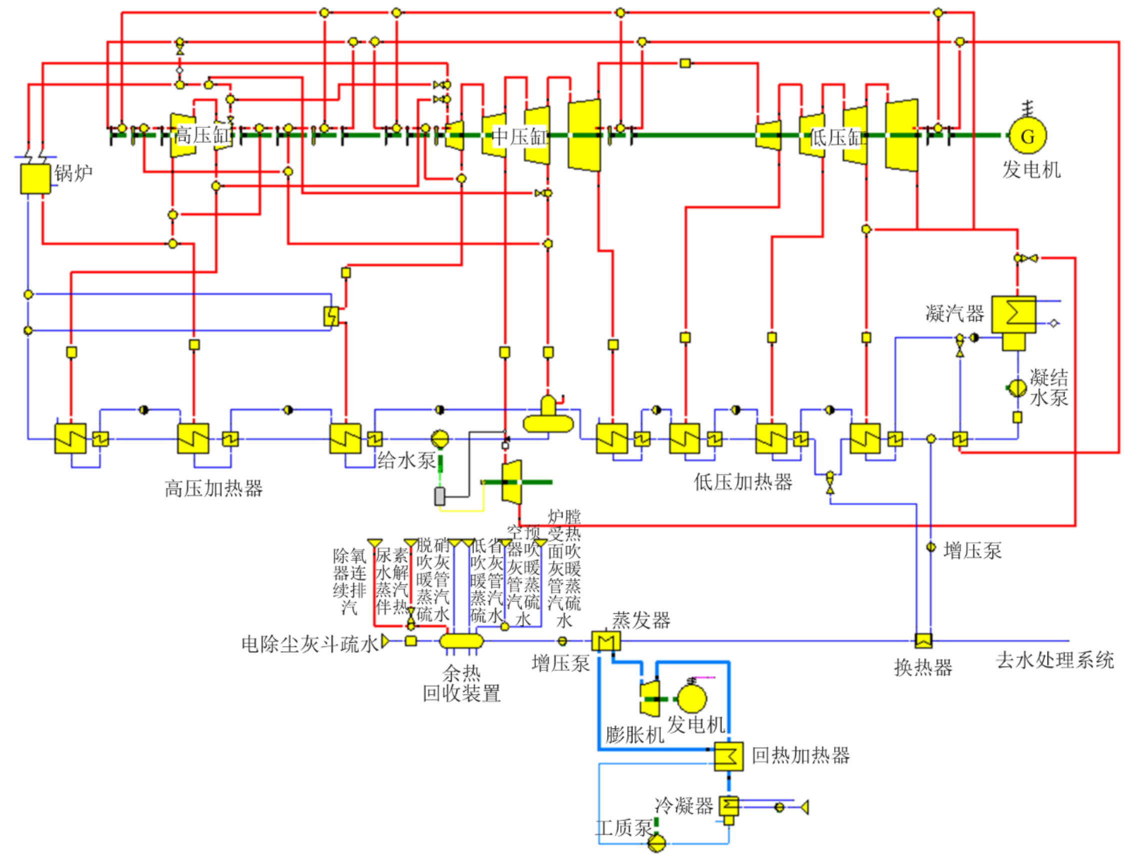

图 1 “ORC”方案 Ebsilon 平台计算模型

Fig.1 The Ebsilon platform computing model for “ORC” scheme

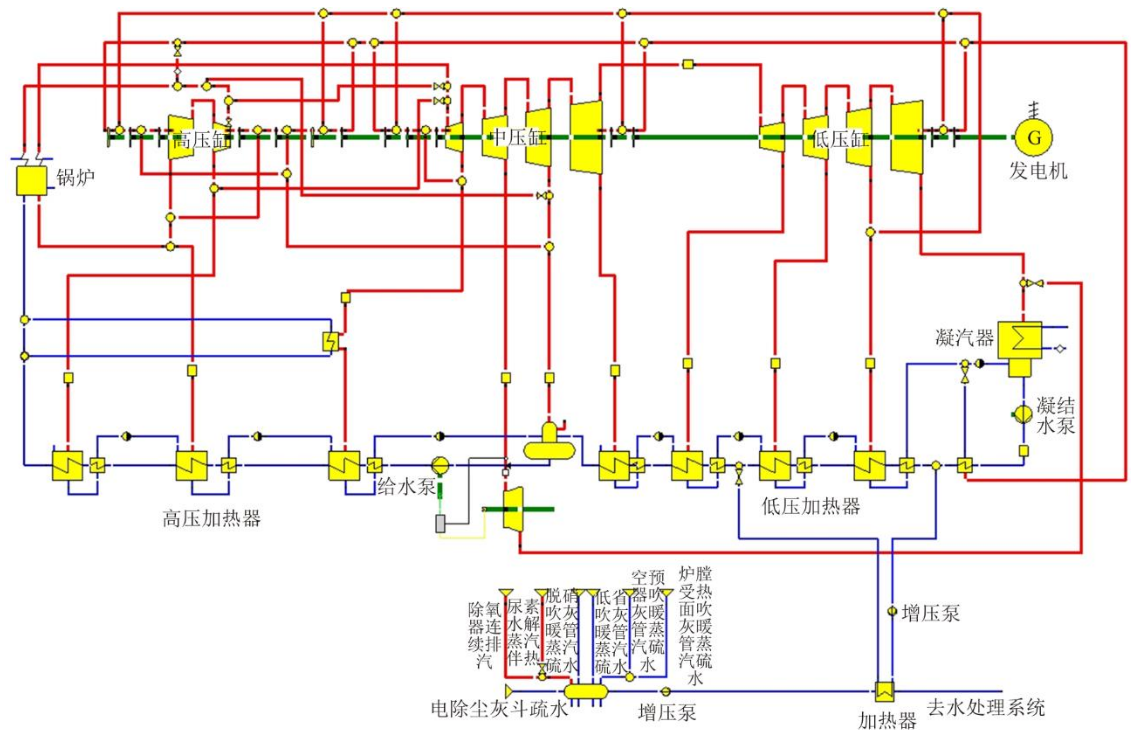

图 2 “加热器”方案 Ebsilon 平台计算模型

Fig.2 The Ebsilon platform computing model for “Heater”scheme

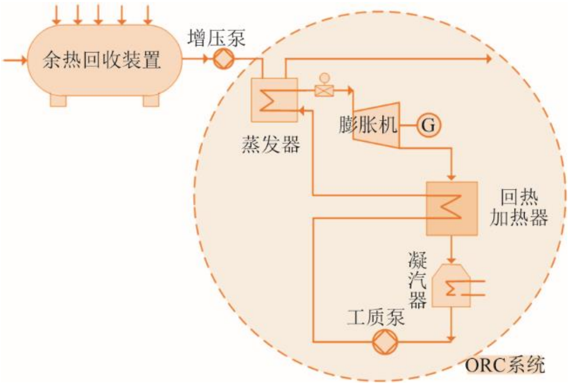

图 3 以 ORC 为核心的余热回收原理

Fig.3 Schematic diagram of waste heat recovery with ORC as the core

1.5 ORC 系统热电效率

ORC 系统的热电效率η是指 ORC 系统的净功率与 ORC 系统蒸发器的吸热量之比。

2 Ebsilon 模拟结果的收敛性

本文采用 Ebsilon 软件对 350 MW 机组的实际运行状态进行建模模拟，以机组 VWO 工况热平衡计算为建模计算的基准工况，VWO 工况计算收敛性如图 4 所示。从图 4 可知，该 VWO 工况模拟计算的焓值、流量、压力的残差呈下降趋势，最终趋于稳定，经过 35 步迭代、39 ms 的运行计算结果收敛，说明该模型的计算结果稳定、收敛，可以作为后续其他工况计算的基础。

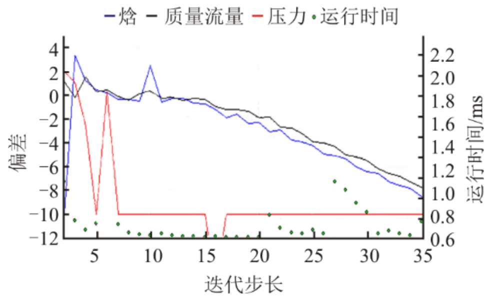

图 4 VWO 基准工况的 Ebsilon 模拟收敛性

Fig.4 Ebsilon simulation convergence under VWO benchmark operating conditions

3 热电经济性分析

3.1 机组热耗特性分析

通过 Ebsilon 软件分别模拟机组现状、“ORC”方案和“加热器”方案 3 种模型在 100%THA、75%THA、50%THA、40%THA 和 30%THA 不同负荷工况下汽轮机的热耗特性 r，具体如图 5 所示。从图 5 可知：100%THA、75%THA、50%THA、40%THA 和 30%THA 工况下，机组现状的热耗分别为 7 721、7 949、8 306、8 522、8 814 kJ/(kW·h)；采用“ORC”方案机组热耗分别为 7 713、7 939、8 292、8 504、8 791 kJ/(kW·h)；采用“加热器”方案机组热耗分别为 7 706、7 928、8 276、8 484、8 764 kJ/(kW·h)。综上可知，随着负荷降低机组热耗逐渐增大。同一工况下，汽轮机组现状热耗＞“ORC”方案热耗＞“加热器”方案热耗。

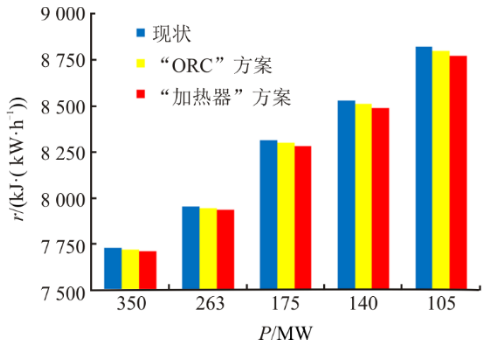

图 5 汽轮机热耗特性

Fig.5 Heat consumption characteristics of steam turbine

3.2 ORC 系统的运行分析

机组余热流量 53 t/h，焓值 549 kJ/kg，“ORC”方案中配置带回热系统的 ORC 系统回收机组余热，然后通过换热器深度梯级利用 ORC 系统蒸发器的余热。额定工况下 ORC 系统的运行状况如图 6 所示，ORC 系统采用有机工质五氟丙烷 R245fa。从图 6 可知，蒸发器内有机工质的吸热量为 2 487.07 kW，ORC 系统的发电量为 206.23 kW，ORC 系统的发电效率约为 7.75%。

不同有机工质流量 q 下，ORC 系统的运行特性如图 7 所示。从图 7 可知，随着有机工质流量 q 的逐渐增大，ORC 系统输出的电功率 P_{eva} 逐渐增大。ORC 系统的输出功率主要受限于热源温度、热源流量、冷源温度、冷源流量、膨胀机效率等。热源温度越高、热源流量越大、冷源温度越低、冷源流量越大、膨胀机效率越高，则 ORC 系统输出电功率越大。

不同有机工质流量 q 下，ORC 系统的热电效率η特性如图 8 所示。从图 8 可知，随着工质流量的增大，ORC 系统的热电效率曲线呈下开口抛物线趋势，变化范围为 6.94%~7.75%，有机工质流量对 ORC 系统循环效率的影响较小。结合图 7 和图 8 可知，有机工质的流量与 ORC 系统输出电功率成正比，与 ORC 系统循环效率呈抛物线变化，因此在 ORC 系统设计时，存在最优流量兼顾 ORC 系统的效率和输出功率。

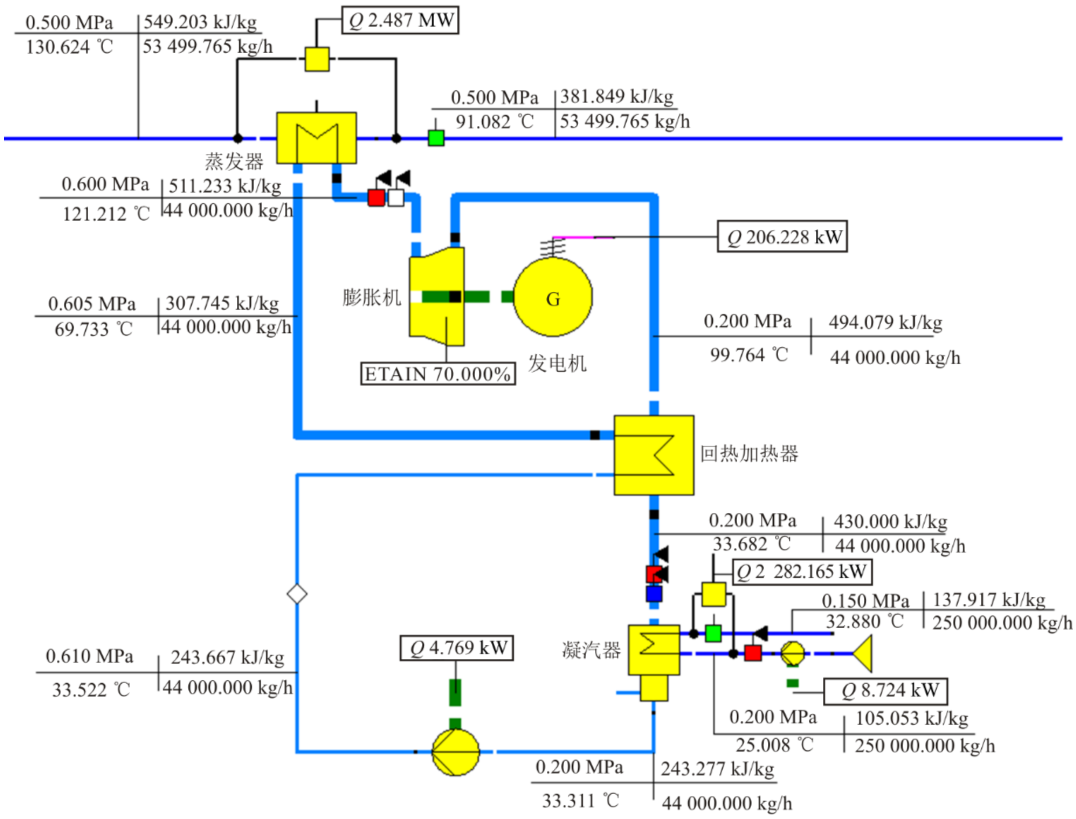

图 6 额定工况 ORC 系统运行状况

Fig.6 Operation status of the ORC system under rated conditions

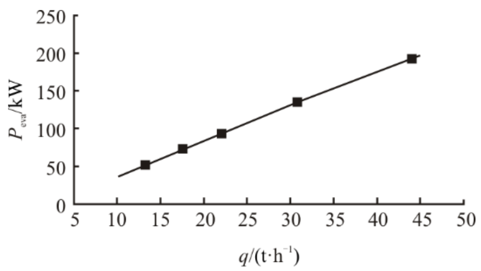

图 7 不同有机工质流量下 ORC 系统的运行特性

Fig.7 Operating characteristics of the ORC system at different organic working fluid flow rates

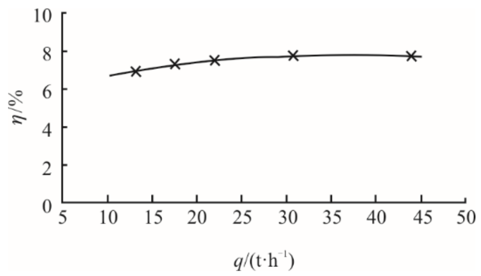

图 8 不同有机工质流量下 ORC 系统的热电效率

Fig.8 Electrothermal efficiency of the ORC system at different organic working fluid flow rates

3.3 加热器系统的运行分析

“ORC”方案中，加热器在额定工况的运行参数如图 9 所示。不同工况下余热能质的放热量 Q_F 和凝结水的吸热量 Q_X、余热进水温度 T_{YJ} 和余热出水温度 T_{YC} 见表 1。从图 9 和表 1 可知，加热器的换热损失为 2%，从蒸发器出来的余热温度约为 91 ℃，经加热器加热凝结水后温度降到 38 ℃，最终回到水处理系统进行余质回收。改变机组工况、ORC 系统有机工质流量为 100%q_a（q_a 为额定工况有机工质流量）时，加热器放热量为定值 3.30 MW，凝结水吸热量为定值 3.24 MW。机组 THA 工况、改变 ORC 系统有机工质流量，则随着有机工质流量的逐渐减小，加热器的放热量逐渐增大，凝结水的吸热量相应增加，这与 ORC 系统的耗热量逐渐减少有关。余热能量守恒，ORC 系统余热利用量减少，则加热器系统余热利用量增加。

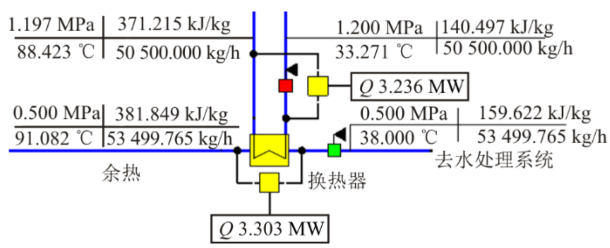

图 9 “ORC”方案加热器运行特性

Fig.9 Operating performace of the heater in the “ORC” scheme

表 1 不同负荷工况“ORC”方案加热器运行特性
Tab.1 Operating characteristics of the heaters under different load conditions in the “ORC” scheme

运行工况	Q_F/MW	Q_X/MW	T_{YJ}/℃	T_{YC}/℃
THA-100%q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
75%THA-100% q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
50%THA-100% q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
40%THA-100% q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
30%THA-100% q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
THA-100% q_a	3.30	3.24	91.08	38.00
THA-70% q_a	4.05	3.96	102.95	38.00
THA-50% q_a	4.54	4.45	110.89	38.00
THA-40% q_a	4.79	4.70	114.85	38.00
THA-30% q_a	5.04	4.94	118.81	38.00

“加热器”方案中，加热器在额定工况的运行参数如图 10 所示。不同工况下余热能质放热量 Q_F 和凝结水吸热量 Q_X、余热进水温度 T_{YJ} 和余热出水温度 T_{YC} 见表 2。从图 10 和表 2 可知，加热器的换热损失为 2%，余热储热装置出口温度约为 131 ℃，经加热器加热凝结水后温度降到 38 ℃，然后回到水处理系统进行余质回收。机组改变工况时，加热器放热量为定值 5.79 MW，凝结水吸热量为定值 5.67 MW，当余热的能质稳定时，“加热器”方案可以深度梯级利用余热，并回收余质。

对比图 9 和图 10 可知：“ORC”方案中，ORC 系统利用了一部分余热，所以加热器有效利用的热量相对较少，仅为 3.24 MW；“加热器”方案中，余热直接进入加热器中，所以加热器有效利用的热量相对较多，为 5.67 MW。

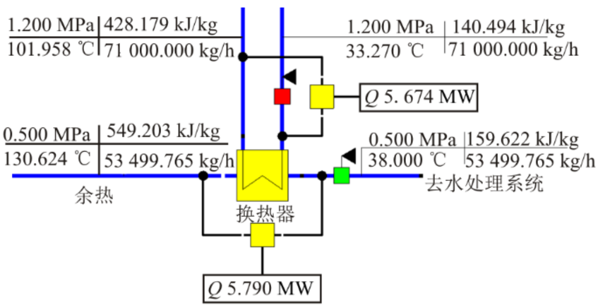

图 10 “加热器”方案加热器运行特性
Fig.10 Operating characteristics of the heater in the “Heater” scheme

表 2 不同负荷工况“加热器”方案加热器运行特性
Tab.2 Operating characteristics of the heaters under different load conditions in the “Heater” scheme

运行工况	Q_F/MW	Q_X/MW	T_{YJ}/℃	T_{YC}/℃
THA	5.79	5.67	130.63	38.00
75%THA	5.79	5.67	130.63	38.00
50%THA	5.79	5.67	130.63	38.00
40%THA	5.79	5.67	130.63	38.00
30%THA	5.79	5.67	130.63	38.00

3.4 技术经济性分析

2 种方案回收余热后，余质均回到水处理系统进行回收。“ORC”方案会产生电、煤、水 3 种收益，其中电能可以为企业直接带来收益。“加热器”方案会产生煤、水 2 种收益。2 种深度余热能质回收方案的投资收益见表 3。从表 3 可以看出：“ORC”方案新增发电收益 38 万元/年，节煤收益 39.6 万元/年，节水收益 467.3 万元/年，总收益为 544.9 万元/年；“换热器”方案节煤收益 73.7 万元/年，节水收益 467.3 万元/年，总收益为 541 万元/年。

表 3 余热能质回收投资收益
Tab.3 Investment income statement for waste heat energy and quality recovery

项目	“ORC”方案	“换热器”方案
机组功率/MW	350	350
改前热耗/(kJ·(kW·h)$^{-1}$)	7 721.34	7 721.00
改后热耗/(kJ·(kW·h)$^{-1}$)	7 713.37	7 706.19
热耗下降/(kJ·(kW·h)$^{-1}$)	7.96	14.81
节约标煤/(g·(kW·h)$^{-1}$)	0.27	0.51
年利用小时/h	4 071	4 071
年节煤量/t	387	720
标煤单价/(元·t^{-1})	1 022.7	1 022.7
总节煤费用/万元	39.6	73.7
总节水量/(t·a^{-1})	467 319	467 319
水价/(元·t^{-1})	10	10
总节水费用/万元	467.3	467.3
ORC 汽轮机发电量/kW	206	
年新增发电量/(kW·h)	839 554	
上网电价/(元·(kW·h)$^{-1}$)	0.453	
新增发电收益/万元	38.0	
总收益/万元	544.9	541.0
总费用/万元	703	460
静态投资回收期/a	1.29	0.85

“ORC”方案主要由废热回收系统、ORC 系统和回热系统组成，总投资约 703 万元，该方案的静态投资回收期为 1.29 年，技术经济性良好。“加热器”方案主要由废热回收系统和回热系统组成，总投资约 460 万元，该方案的静态投资回收期为 0.85 年，技术经济性良好。通过以上对比分析可知，“ORC”方案利用 ORC 系统吸收电厂低温废热发电，后采用换热器对余热进行进一步的梯级利用，最后回收工质，不仅可以减少企业的碳排放，还可以提供可观的电能，技术创新性相对较强。“加热器”方案采用换热器对余热进行充分的梯级利用，并回收工质，可以提高循环热效率，减少企业碳排放，该方案较为传统。2 个方案的投资收益均良好，均可以对电厂的余热、余质进行深度的回收，技术经济均可行。

4 结　论

针对煤电机组低品位余热能质浪费引起机组能耗大幅升高，导致电厂热经济性下降的问题。本文以某 350 MW机组为研究对象，采用Ebsilon平台建模模拟研究不同低品位余热能质深度回收方案，计算“ORC”和“加热器”2 种方案在不同负荷、不同有机工质流量下机组运行状态，分析能耗特性、收益特性和差异性等，得到了余热能质深度回收的机理和优化方案。掌握了不同余热能质深度回收方案对机组运行经济性的影响规律，研究总结如下。

1）“ORC”方案系统的热效率低于“加热器”方案系统的热效率，故“ORC”方案机组的热耗率高于“加热器”方案，随着负荷降低机组的热耗逐渐增大。

2）ORC 系统的发电效率约为 7.75%。有机工质的流量与 ORC 系统输出电功率成正比，与 ORC 系统循环效率呈抛物线变化，因此在 ORC 系统设计时，存在最优流量兼顾 ORC 系统的效率和输出功率。

3）“ORC”方案中，ORC 系统利用了一部分余热，故加热器有效利用热量相对较少，仅为 3.24 MW；“加热器”方案中，余热直接进入加热器中，故加热器有效利用热量相对较多，为 5.67 MW。“ORC”方案总余热利用效率低于“加热器”方案。

4）“ORC”方案和“加热器”方案的投资收益均良好，均可以对电厂的余热能质进行深度的回收，技术经济均可行，“ORC”方案可以为电厂带来直接电能收益，“加热器”方案经济性略好。建议电厂进行余热能质深度回收利用改造时，根据电厂的实际情况，进行经济性论证，以使机组的运行经济性处于最优。

[参 考 文 献]

[1] 葛世荣，樊静丽，刘淑琴，等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203-223.
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 203-223.

[2] 李政，陈思源，董文娟，等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报，2021, 41(12): 3987-4000.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000.

[3] 孙哲. “双碳”背景下火电厂“三改联动”现状及实施建议[J]. 能源与节能, 2023(7): 71-74.
SUN Zhe. Current situation and implementation suggestions of “linkage of three reforms” in thermal power plants under background of “double carbon”[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(7): 71-74.

[4] 于伟静，杨鹏威，王放放，等. 双碳战略背景下中国煤电技术发展与挑战[J]. 煤炭学报，2023, 48(7): 2641-2656.
YU Weijing, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Research and challenge of coal power technology development in China under the background of dual carbon strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2641-2656.

[5] 江川，孔茜，焦倩，等. 基于 3060 目标的陕西省火电行业节能减排路径与潜力研究[J]. 环境科学与管理，2023, 48(7): 16-20.
JIANG Chuan, KONG Qian, JIAO Qian, et al. Energy saving and emission reduction path and potential analysis of thermal power industry in Shaanxi province based on 3060 target[J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(7): 16-20.

[6] 徐顺智，赵瑞彤，王孝全，等. 燃煤发电行业低碳化发展路径分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(12): 83-94.
XU Shunzhi, ZHAO Ruitong, WANG Xiaoquan, et al. Analysis on low-carbon development path of coal-fired power generation industry[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(12): 83-94.

[7] 吴迪，康俊杰，王可珂，等. 我国典型 5 省煤电发展现状与转型优化潜力研究[J]. 中国煤炭，2023, 49(5): 18-29.
WU Di, KANG Junjie, WANG Keke, et al. Research on the development status and transformation optimization potential of coal power in five typical provinces of China[J]. China Coal, 2023, 49(5): 18-29.

[8] 王华霆，陈衡，徐钢，等. 煤电升级改造背景下烟气余热利用节能效益对比评估[J]. 发电技术，2024, 45(1): 90-98.
WANG Huating, CHEN Heng, XU Gang, et al. Comparative evaluation of energy-saving benefits of flue gas waste heat utilization under the background of coal power upgrading[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 90-98.

[9] 牟春华，王一坤，白文刚，等. 超低排放改造后烟气余热利用设备存在问题及防治措施[J]. 热力发电，2020, 49(4): 46-50.
MU Chunhua, WANG Yikun, BAI Wengang, et al. Existing problems and control measures of flue gas waste heat utilization equipment after ultra-low emission modification[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 46-50.

[10] 许宏宇，许诚. 燃用低阶煤电站烟气余热利用方式热经济性比较[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 17-23.
XU Hongyu, XU Cheng. Comparison of thermal economy of waste heat utilization approaches of low-rank coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 17-23.

[11] 王林，杨博，高景辉，等. 蒸汽-烟气余热协同回收联合利用系统应用研究[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 67-71.
WANG Lin, YANG Bo, GAO Jinghui, et al. Application of steam-flue gas waste heat collaborative recovery combined utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 67-71.

[12] 霍立伟. 热电联产机组冷端余热利用及热经济性研究[D]. 包头：内蒙古科技大学, 2022: 1.
HUO Liwei. Research on utilization and thermal economy of cold end waste heat and power units[D].

Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022: 1.
[13] 邹道安，光旭. 大型火电厂余热深度利用技术分析研究[J]. 电力勘测设计, 2023(12): 55-60.
ZOU Daoan, GUANG Xu. Research on waste heat utilization in large thermal power plants[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(12): 55-60.
[14] 贾丕建，孙立梅，邢学荣，等. 热电厂循环水余热利用和节能减排效益分析[J]. 能源研究与利用，2020(2): 46-50.
CAO Pijian, SUN Limei, XING Xuerong, et al. Analysis of waste heat utilization and energy-saving and emission reduction benefits of circulating water in thermal power plants[J]. Energy Research and Utilization, 2020(2): 46-50.
[15] 冯贺. 清苑电厂热泵吸收循环水余热的供热系统改造[D]. 保定：华北电力大学, 2019: 1.
FENG He. Heating system transformation of heat pump absorbing circulating water waste heat of Qingyuan Power Plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 1.
[16] 孙士恩，田亚，高新勇. 热泵与低真空耦合回收循环水余热的热力性能分析[J]. 太阳能学报，2018, 39(5): 1309-1319.
SUN Shien, TIAN Ya, GAO Xinyong. Thermodynamic analysis on coupling system of heat-pump and low-vacuum with circulating water heat recovery[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1309-1319.
[17] 韩学伟. 利用吸收式热泵回收电厂冷凝水余热的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2013: 1.
HAN Xuewei. Research on the recovery of the waste heat of condensation water in power plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1.
[18] 张赞流. 超临界机组除氧器排汽系统改造及效果分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2023, 28(4): 6-8.
ZHANG Zanliu. A study on the renovation of the steam exhausting system of the deaerator of the supercritical unit and its effect analysis[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2023, 28(4): 6-8.
[19] 徐世明，邹兵. 锅炉排污及除氧器排汽综合利用研究[J].电站辅机, 2015, 36(2): 19-22.
XU Shiming, ZOU Bing. Study on the comprehensive utilization of boiler blowdown and deaerator exhaust steam[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2015, 36(2): 19-22.
[20] 白涛，靳智平. 基于烟气余热回收的热泵供热系统热力学分析[J]. 电力学报, 2023, 38(2): 117-126.
BAI Tao, JIN Zhiping. Thermodynamic analysis of heat pump heating system based on flue gas waste heat recovery[J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(2): 117-126.
[21] 王克. “双碳”目标下供热机组灵活性调峰热电解耦技术探讨[J]. 特种设备安全技术, 2023(1): 8-10.
WANG Ke. Discussion on flexible peak shaving thermoelectric decoupling technology for heating units under the “dual carbon” target[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2023(1): 8-10.
[22] 赵丽. 火电企业绿色治理的价值创造研究—基于华能国际的案例分析[D]. 贵阳：贵州财经大学, 2023: 1.
ZHAO Li. Research on value creation of green governance in thermal power enterprises: a case study based on Huaneng International[D]. Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2023: 1.
[23] 毕经纬. 燃煤烟气白色烟羽定量化表征及光辐射特性研究[D]. 济南：山东大学, 2023: 1.
BI Jingwei. Study on quantitative characterization and light radiometric properties of white plume from coal-fired flue gas[D]. Jinan: Shandong University, 2023: 1.
[24] 李帅，李贵鹏，鲁希振. 1 000 MW 二次再热机组烟气余热深度利用技术[J]. 洁净煤技术，2023, 29(增刊 2): 352-359.
LI Shuai, LI Guipeng, LU Xizhen. Deep utilization technology of flue gas residual heat for a 1 000 MW double-reheat unit[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl.2): 352-359.
[25] 王轩，陈嘉宝，舒歌群，等. 基于深度强化学习的有机朗肯循环内燃机余热回收系统瞬态优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4169-4177.
WANG Xuan, CHEN Jiabao, SHU Gequn, et al. Transient optimal control of a transcritical organic Rankine cycle for waste heat recovery of internal combustion engine based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4169-4177.
[26] 穆连波，王随林，鲁军辉，等. 烷烃脱氢加热炉排烟余热深度回收协同烟压控制性能分析[J]. 化工进展，2024, 43(6): 3029-3041.
MU Lianbo, WANG Suilin, LU Junhui, et al. Analysis of flue gas deep waste heat recovery with cooperative flue gas pressure control for alkane dehydrogenation heating furnace[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(6): 3029-3041.
[27] 税杨浩，刘强，张磊，等. 650 ℃超超临界 1 000 MW 机组回热系统的参数优化[J]. 工程热物理学报，2020, 41(1): 89-94.
SHUI Yanghao, LIU Qiang, ZHANG Lei, et al. Parametric optimization of a regenerative system for a 650 ℃ ultra-supercritical steam turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 89-94.
[28] 闫沛伟，张曼铮，肖猛，等. 地热能有机朗肯循环系统控制策略研究[J]. 化工学报, 2023, 74(12): 4810-4819.
YAN Peiwei, ZHANG Manzheng, XIAO Meng, et al. Study on the control strategy of a geothermal organic Rankine cycle system[J]. CIESC Journal, 2023, 74(12): 4810-4819.
[29] 林秋宇，王铎，赵云云. 关键设计参数对 ORC 系统性能影响分析[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(5): 352-354.
LIN Qiuyu, WANG Duo, ZHAO Yunyun. Impact analysis of key design parameters on ORC system performance[J]. Turbine Technology, 2023, 65(5): 352-354.
[30] 李娜娜，陶诚，孔彦龙，等. 全球地热发电现状与研究进展[J]. 热力发电, 2024: 2-12.
LI Nana, TAO Cheng, KONG Yanlong, et al. Status and research progress of geothermal power generation development and utilization[J]. Thermal Power Generation, 2024: 2-12.
[31] ZHANG X X, LI Y. A method for determining the operable ideal condensation temperature of dry and isentropic fluids used in organic Rankine cycle based on temperature-entropy (T-S) diagram[J]. Journal of Thermal Science, 2023: 32(6): 2144-2154.
[32] FENG F Y, LI T Y, AN J Z, et al. Performance assessment of a novel polygeneration system based on the integration of waste plasma gasification, tire pyrolysis, gas turbine, supercritical CO_2 cycle and organic Rankine cycle[J]. Journal of Thermal Science, 2023: 32(6): 2196-2214.

（责任编辑　邓玲惠）