

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410220

基于有机朗肯循环的新型燃煤发电系统 热力性能

张俊莲, 杨传燕, 张雪标

(成都工贸职业技术学院(成都市技师学院)电气工程学院, 四川 成都 611730)

[摘要] 为实现蒸汽能量的梯级利用, 提高蒸汽发电能力, 提出了一种集成有机朗肯循环系统与风冷式燃煤发电系统的新型发电系统。该系统基于有机朗肯循环系统在中低温阶段的热电高效转换特性, 抽取燃煤机组中膨胀到一定程度的蒸汽驱动有机朗肯循环系统进一步提高输出功率。该耦合方案可以实现燃煤电厂提高输出功率、回收排汽余热和在冬季防止空冷器结冰的多重目的。针对某 600 MW 燃煤电厂进行了热力学性能分析, 结果显示, 当抽汽流量为 160 kg/s 时, 系统在 50%THA、75%THA 和 100%THA 负荷下的热效率分别提高了 3.48 个百分点、1.72 个百分点和 1.08 个百分点, 焓效率分别提高了 3.38 个百分点、1.68 个百分点和 1.05 个百分点, 煤耗率分别降低了 27.72、12.88、7.92 g/(kW·h), 余热回收率达到 64.57%、25.64% 和 15.40%。该方案不仅提升了现有风冷式燃煤电厂的性能, 而且降低了煤耗, 研究成果为提高电厂整体性能提供了新的思路。

[关键词] 能量梯级利用; 余热回收; 有机朗肯循环; 燃煤电厂; 热力学分析

[引用本文格式] 张俊莲, 杨传燕, 张雪标. 基于有机朗肯循环的新型燃煤发电系统热力性能[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 144-152. ZHANG Junlian, YANG Chuanyan, ZHANG Xuebiao. Thermal performance of a new coal-fired power generation system based on organic Rankine cycle[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 144-152.

Thermal performance of a new coal-fired power generation system based on organic Rankine cycle

ZHANG Junlian, YANG Chuanyan, ZHANG Xuebiao

(School of Electrical Engineering, Chengdu Industry and Trade College, Chengdu 611730, China)

Abstract: A novel power generation system integrating an organic Rankine cycle (ORC) with an air-cooled coal-fired power plant is proposed to achieve cascaded utilization of steam energy and enhance output power capability. Based on the efficient thermoelectric conversion characteristics of the ORC system at low and medium temperatures, the steam expanding to a certain level in the coal-fired unit is extracted to drive the ORC system for higher output power. This coupling scheme can achieve the multiple purposes of increasing output power, recovering exhaust steam waste heat and preventing air cooler icing in winter. Focusing on a 600 MW coal-fired power plant, thermodynamic performance evaluation has been carried out. The results show that, when the extraction flow rate is 160 kg/s, the thermal efficiency of the system at 50% THA, 75% THA and 100% THA loads increases by 3.48, 1.72 and 1.08 percentage points, respectively. The exergy efficiency increases by 3.38, 1.68 and 1.05 percentage points, and the coal consumption rate decreases by 27.72, 12.88 and 7.92 g/(kW·h), respectively. The heat recovery rate reaches 64.57%, 25.64% and 15.40%, respectively. This approach not only improves the performance of existing air-cooled coal-fired power plants, but also reduces coal consumption, and the research results can provide a way to improve the overall performance of power plants.

Key words: energy cascade utilization; waste heat recovery; organic Rankine cycle; coal-fired power plants; thermodynamic analysis

收稿日期: 2024-10-23

第一作者简介: 张俊莲(1979), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力与能源, junlian@163.com.

长期以来,煤炭、原油、天然气等一次能源的广泛使用不仅造成能源短缺,也带来严峻的环境问题,因此节能减排一直是各领域学者的研究热点^[1]。然而,受制于当前的技术和经济因素,大规模应用清洁能源仍然存在一定的现实问题^[2]。在可预见的未来,化石燃料仍是主要能源。我国以煤炭为主要能源,电力生产主要依赖燃煤。因此,燃煤电厂不仅是煤炭的主要消耗者,也是节能减排的关键领域之一^[3]。

在中低温领域具有高效热电转化技术的有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)系统近年来倍受国内外学者的关注^[4]。Bălănescu 等人^[5]使用 ORC 回收燃气-蒸汽联合循环电厂的烟气余热。结果表明:当以 R123 为工质时,系统效率提高 1.19%,每年节约天然气约 57 000 m³(标况下)。Guo 等人^[6]利用 ORC 回收磷酸燃料电池的余热,并从热力学和生态学角度评价其性能。结果表明,相比于纯磷酸燃料电池,耦合方案的最大输出功率提高了 25.2%。Moreira 等人^[7]在巴西采用亚临界简单 ORC 回收水泥厂余热,并进行了热力学和经济性分析。结果表明,收益率超过 80%,最大净现值为 1.7 亿雷亚尔。Zhi 等人^[8]采用亚临界-跨临界平行 ORC 回收发动机余热,并从能量和焓方法两方面进行热力学性能分析。结果表明,与单一工质相比,采用共沸混合工质可以提高输出功率。上述研究证明了 ORC 在中低温热电转换和余热回收方面具有显著优势。

众多学者对燃煤电厂与 ORC 的耦合系统进行了深入研究。Jin 等人^[9]将热泵和 ORC 与燃煤电厂耦合,回收锅炉烟气余热,解决烟气余热回收率与利用效率之间的矛盾。结果表明,该电厂年净输出功率和售电效益分别提高 409.19 kW 和 12 200 美元,标准煤耗量和煤炭成本分别降低 595.5 t 和 89 320 美元。Liao 等人^[10]提出了一种耦合 ORC 的新型冷热电联产系统,用于回收 300 MW 燃煤电厂的底渣余热,并研究了冷凝温度、冷却水流量和过热度对机组焓效率和热效率等性能的影响。随后,他们采用基于 ORC 的组合系统回收烟气余热。结果表明,ORC-ORC 系统的焓效率和热效率分别为 45.54% 和 16.37%,高于 ORC-超临界二氧化碳系统^[11]。Zhang 等人^[12]采用 ORC 降低吸收式热泵驱动热源的能级,降低受热侧和供热侧的能级差。结果表明,新型热电联产系统不仅能提高供热能力和输出功率,而且能降低化石燃料消耗。上述研究表明,耦合 ORC 与燃煤电厂能够达到显著节能效果。

基于 ORC 在中低温高效热电转换优势,本文提出了一种新的发电系统,该系统通过抽取燃煤机组汽轮机中的蒸汽来驱动 ORC 进一步发电,提高蒸汽的发电能力。本文以某 600 MW 电厂为研究对象,基于第一和第二热力学定律,从能量和焓利用的角度对传统发电系统和新发电系统进行热力学性能分析。通过定量和定性的方法揭示了改造前后的性能变化,为新发电系统的设计和应用提供指导作用。

1 集成方案介绍

图 1 为本文提出的新型发电系统流程。耦合发电系统由燃煤发电系统和 ORC 系统组成,燃煤发电系统主要包括锅炉、汽轮机系统(高压缸、中压缸和低压缸)、回热系统、空冷器和泵,ORC 系统由预热器、蒸发器、涡轮机、空冷器 I 和工质泵组成。工作阶段,经工质泵加压(流股 35→36)后的有机工质先在预热器内被电厂排汽预热(流股 36→37),再进入蒸发器内由 5 号抽汽加热至饱和汽态(流股 37→38),随后通过涡轮机输出功率(流股 38→39)。涡轮机出口的乏汽经空冷器 I 冷却至饱和液态(流股 39→35)后进入工质泵开始下一次循环。

可以看出,处于高品位状态的蒸汽在电厂汽轮机中膨胀做功,随着品质降低到中低温级,再作为 ORC 系统的驱动热源。该耦合方案充分利用 ORC 在中低温领域热电转化效率高的优势,提高蒸汽的整体发电能力,同时还回收了一定比例的低温排汽余热,使不同等级的热能更好地匹配相应的热力学循环,从而提高系统的整体性能。此外,ORC 的低熔点有机工质排汽代替汽轮机排汽,可以防止蒸汽在风冷系统中的冻结,也为防冻提供新的方案。因此,耦合 ORC 与燃煤电厂的新型发电系统可以实现增强蒸汽发电能力、回收余热和预防冻结的多重目标。

2 数学模型

基本的设计参数见表 1^[3]。风冷式燃煤机组主要应用于西北部干旱寒冷地区,因此环境温度设置为 -5 ℃。为便于建立热力学模型,需要做出如下假设:1) 忽略设施和管道的热损失和压降损失;2) 忽略动能和势能的变化;3) ORC 系统中蒸发器和冷凝器出口的有机工质处于饱和状态;4) 系统处于稳定运行状态;5) 改造前后系统的参数不变,输出性能的变化归因于流量的改变。

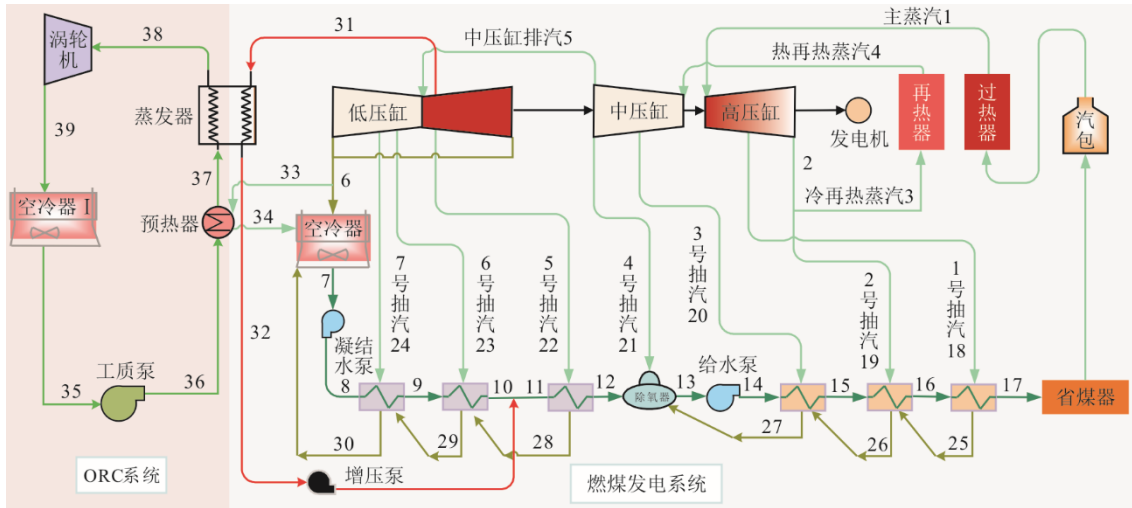


图 1 新耦合发电系统流程
Fig.1 Flow chart of the new coupled power generation system

表 1 基本设计参数
Tab.1 Basic design parameters of the system

项目	数值	项目	数值
环境压力/kPa	101	汽轮机排汽压力/kPa	15
环境温度/℃	-5	ORC 排汽压力/kPa	109
锅炉效率/%	93	标准煤低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	29 308
主蒸汽温度/℃	538	涡轮机等熵效率/%	85
主蒸汽压力/kPa	16 670	工质泵等熵效率/%	80

2.1 回热系统的数学模型

电厂中的回热系统包含 2 种加热器，其原理如图 2 所示。疏水流动式加热器在传热过程中冷流体和热流体相互分离，汇集式加热器在传热过程中冷流体和热流体相互接触。

对于疏水流动式换热器^[13]为：

$$\tau_j = \bar{\tau}_j - \bar{\tau}_{j-1} \tag{1}$$

$$q_j = h_j - \bar{t}_{sj} \tag{2}$$

$$\gamma_j = \bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{sj} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 & q_2 \\ \gamma_3 & \gamma_3 & q_3 \\ \gamma_4 & \gamma_4 & \gamma_4 & q_4 \\ \tau_5 & \tau_5 & \tau_5 & \tau_5 & q_5 \\ \tau_6 & \tau_6 & \tau_6 & \tau_6 & \gamma_6 & q_6 \\ \tau_7 & \tau_7 & \tau_7 & \tau_7 & \gamma_7 & \gamma_7 & q_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ m_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{bmatrix}$$

式中： m_1 — m_7 为第 1—7 级抽汽流量，kg/s； m_g 为给水流量，kg/s。

2.2 ORC 系统的数学模型

有机工质先在预热器中被电厂排汽预热，然后

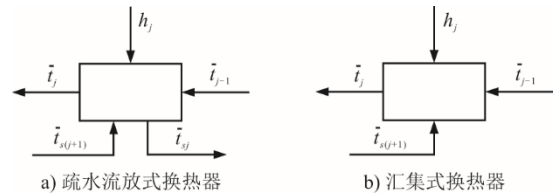


图 2 疏水流动式回热器和汇集式回热器原理
Fig.2 Schematic diagrams of closed heater and open heater

对于汇集式换热器^[13]为：

$$\tau_j = \bar{t}_j - \bar{t}_{j-1} \tag{4}$$

$$q_j = h_j - \bar{t}_{j-1} \tag{5}$$

$$\gamma_j = \bar{t}_{s(j+1)} - \bar{t}_{j-1} \tag{6}$$

式中： τ 为给水比焓增量，kJ/kg； t 为换热器出口的给水比焓值，kJ/kg； q 为抽汽的比放热量，kJ/kg； h 为抽汽比焓值，kJ/kg； γ 为疏水比放热量，kJ/kg；下标 j 和 s 分别代表抽汽级数和疏水。

各级抽汽流量可由能量平衡方程计算得到^[14]：

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \\ \tau_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_g \\ m_g \\ m_g \\ m_g \\ m_g \\ m_g \\ m_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 & q_2 \\ \gamma_3 & \gamma_3 & q_3 \\ \gamma_4 & \gamma_4 & \gamma_4 & q_4 \\ \tau_5 & \tau_5 & \tau_5 & \tau_5 & q_5 \\ \tau_6 & \tau_6 & \tau_6 & \tau_6 & \gamma_6 & q_6 \\ \tau_7 & \tau_7 & \tau_7 & \tau_7 & \gamma_7 & \gamma_7 & q_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ m_7 \end{bmatrix} \tag{7}$$

进入蒸发器内被抽汽加热至饱和汽态，得到预热器和蒸发器的热负荷为^[15]：

$$Q_{pre} = m_{orc} \times (h_{37} - h_{36}) \tag{8}$$

$$Q_{gen} = m_{orc} \times (h_{38} - h_{37}) \tag{9}$$

式中: Q_{pre} 和 Q_{gen} 分别为预热器和蒸发器的热负荷, kW; m_{orc} 为有机工质流量, kg/s; h 为比焓值, 其下角标为图 1 中的相应流股, kJ/kg。

涡轮机的输出功率为:

$$W_{\text{tur}} = m_{\text{orc}} \times (h_{38} - h_{39s}) \times \eta_{\text{tur}} \quad (10)$$

式中: W_{tur} 为涡轮机的输出功率, kW; h_s 为相应流股的等熵比焓, kJ/kg; η_{tur} 为涡轮机的等熵效率。

空冷器I的换热负荷为^[15]:

$$Q_{\text{ACSI}} = m_{\text{orc}} \times (h_{39} - h_{35}) \quad (11)$$

工质泵的耗功可由下式计算得到:

$$W_{\text{b,orc}} = m_{\text{orc}} \times (h_{36s} - h_{35}) / \eta_{\text{b,orc}} \quad (12)$$

式中: $W_{\text{b,orc}}$ 为工质泵的耗功, kW; $\eta_{\text{b,orc}}$ 为工质泵的等熵效率。

ORC 系统的净输出功率为:

$$W_{\text{orc}} = W_{\text{tur}} - W_{\text{b,orc}} - W_{\text{ACSI}} \quad (13)$$

式中: W_{orc} 为 ORC 系统的净输出功率, kW; W_{ACSI} 为 ORC 系统中空冷器I的耗功, kW; W_{ACSI} 为空冷器I的耗功, kW。

2.3 评价指标

2.3.1 输出功率

系统总输出功率为:

$$W_{\text{total}} = W_{\text{ST}} + W_{\text{orc}} - W_{\text{b,CPG}} \quad (14)$$

式中: W_{total} 为系统总输出功率, kW; $W_{\text{b,CPG}}$ 为燃煤机组中泵的耗功, kW; W_{ST} 为汽轮机的输出功率, kW, 其可由式(15)计算得到。

$$W_{\text{ST}} = m_1 \times (h_1 - h_{18}) + \sum_{j=2}^{n_1} (m_1 - \sum_{i=1}^{j-1} m_i) \times (h_{j-1} - h_j) + m_4 \times (h_4 - h_{n_1+1}) + \sum_{j=n_1+2}^{n_1+n_2+1} (m_4 - \sum_{i=n_1+1}^{j-1} m_i) \times (h_{j-1} - h_j) \quad (15)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为燃煤机组中再热前后的抽汽总数; j 为抽汽级数。

2.3.2 煤耗率

系统标准发电煤耗率为:

$$m_{\text{cr}} = \frac{3.6 \times 10^6 \times m_c}{W_{\text{total}}} \quad (16)$$

$$m_c = \frac{m_1 \times (h_1 - h_{17}) + m_4 \times (h_4 - h_5)}{\eta_{\text{bl}} \times Q_{\text{LHV,coal}}} \quad (17)$$

式中: m_{cr} 为标准发电煤耗率, g/(kW·h); m_c 为煤耗流量, kg/s; η_{bl} 为锅炉效率, %; $Q_{\text{LHV,coal}}$ 为标准煤的低热值。

2.3.3 余热回收率

燃煤机组的汽轮机排汽被用于预热有机工质,

实现了余热回收利用, 相应的余热回收率为:

$$\alpha = \frac{m_{33} \times (h_{33} - h_{34})}{m_6 \times (h_6 - h_7)} \times 100 \quad (18)$$

2.3.4 能量转换效率

系统的热效率和焓效率为:

$$\eta_{\text{en}} = \frac{W_{\text{total}}}{Q_{\text{t,in}}} \times 100 \quad (19)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{W_{\text{total}}}{E_{\text{t,in}}} \times 100 \quad (20)$$

式中: η_{en} 和 η_{ex} 分别为系统的总热效率和总焓效率, %; $Q_{\text{t,in}}$ 和 $E_{\text{t,in}}$ 分别为输入系统的总热值和总焓值, kW。

2.4 焓分析的数学模型

系统中相应节点焓值为:

$$E_x = m \times (h - h_0 - T_0 \times (s - s_0)) \quad (21)$$

式中: E_x 为各节点的焓值, kW; m 为工作流体的质量流量, kg/s; h 和 s 分别为工作流体的比焓和比熵, kJ/kg, kJ/(kg·K); h_0 和 s_0 分别为工作流体在环境温度下的比焓和比熵, kJ/kg, kJ/(kg·K); T_0 为环境温度, K。

焓平衡方程为:

$$\sum E_{x,\text{in}} + \sum E_{x,Q} - \sum E_{x,\text{out}} - W = \sum E_{x,\text{loss}} \quad (22)$$

式中: $E_{x,\text{in}}$ 和 $E_{x,\text{out}}$ 分别为随工质输入和输出设备的焓, kW; $E_{x,Q}$ 为设备与外界的换热量, kW; W 为设备的输出功, kW; $E_{x,\text{loss}}$ 为设备的焓损失, kW。

2.5 模型验证及工质筛选

为验证所建立燃煤电厂模型的准确性, 基于上述数学模型, 对 100%THA 工况下的燃煤发电系统进行了校核, 结果见表 2。由表 2 可见, 模型关键参数输出功率的误差为 0.07%, 最大误差为 2.91%。表明所建模型可以准确反映燃煤发电机组的实际运行工况。

表 2 燃煤电厂模型验证

Tab.2 Model validation of the coal-fired power plant

项目	设计值	计算值	相对误差/%
主蒸汽温度/°C	538.00	538.00	0
主蒸汽压力/kPa	16 670	16 670	0
再热蒸汽温度/°C	508.55	508.55	0
再热蒸汽压力/kPa	3 320	3 320	0
高压缸排汽流量/(kg·s ⁻¹)	429.60	435.32	1.33
中压缸排汽流量/(kg·s ⁻¹)	388.65	399.97	2.91
低压缸排汽流量/(kg·s ⁻¹)	339.20	338.84	0.11
输出功率/MW	600.00	600.40	0.07

为验证 ORC 系统的准确性, 依据上述数学模

型，建立与文献[16]相同工况的仿真模型，并将输出结果与文献数据进行比较，结果见表 3。由表 3 可见，各输出结果的误差均小于 0.80%，验证了所建立 ORC 系统模型的准确性。

表 3 ORC 模型验证
Tab.3 Model validation of the ORC system model

项目	文献[16]值	计算值	相对误差/%
蒸发器负荷/kW	6 668.50	6 668.50	0
输出焓/kW	1 492.62	1 492.62	0
泵耗功/kW	58.00	58.41	0.71
净输出功/kW	1 054.40	1 056.66	0.21
热效率/%	15.81	15.85	0.25
焓效率/%	70.64	70.80	0.23

在相同的热源驱动下，选用不同的有机工质对集成系统性能输出产生不同程度的增益效果。同时，工质的环境性质和安全性也是不容忽视的关键要素。为了选择更适合集成系统的有机工质，本文在表 4 列出了的不同类型的有机工质作为候选工质，相应的性能输出如图 3 所示。结果显示，输出功率最大的前 4 种工质分别为 Cyclohexane、R141b、R123 和 R1233zd(E)等。然而，Cyclohexane 具有毒性且易燃，安全性为 A3^[17]；R141b 和 R123 的臭氧消耗潜能值（ODP）和全球变暖潜能值（GWP）均较大，会给环境带来一定威胁；R1233zd(E)的环境性质友好，安全性属 A1。因此，本文选取 R1233zd(E)作为 ORC 系统的有机工质。

表 4 有机工质的性质
Tab.4 Properties of the organic working mediums

有机流体	临界温度/℃	临界压力/MPa	ODP	GWP
R600	151.98	3.80	0	20
R245fa	154.00	3.65	0	950
R141b	204.20	4.25	0.086	700
R601	196.55	3.37	0	20
R123	183.70	3.66	0.012	120
R365mfc	186.90	3.20	0	8 060
Heptane	267.00	2.74	0	0
Cyclohexane	280.45	4.08	0	0
MDM	290.90	1.42		
Hexane	234.70	3.03	0	0
Octane	296.05	2.50		
R1233zd(E)	165.60	3.57	0	1
R1224yd(Z)	155.50	3.33	0	1
R1234ze(Z)	150.1	3.53	0	1

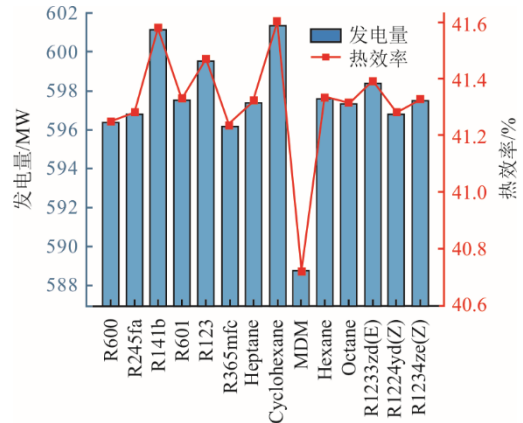


图 3 不同有机工质对集成系统性能输出的影响
Fig.3 Effects of different organic working fluids on output performance of the integrated system

3 结果与讨论

依据热力学第一和第二定律，探究了电厂在改造前后 50%、75% 和 100%THA 运行工况下的性能变化。

3.1 能量分析

3.1.1 输出功率

图 4 显示了不同驱动蒸汽流量下新发电系统输出功率变化情况。可以发现将原有燃煤发电机组改造为新型耦合发电系统后，输出功率明显提高。当驱动蒸汽流量从 0 增加到 160 kg/s 时，50%THA、75%THA 和 100%THA 工况下的输出功率分别增加了 27.18、19.12、15.54 MW。这表明，利用 5 号抽汽驱动 ORC 可以提高总输出功率，且机组负荷越低，输出功率增加幅度越大。这是因为在抽汽流量一致时，与主蒸汽相比，低负荷下 ORC 的驱动蒸汽流量比例更大，系统发电能力更强。因此，抽取在汽轮机中膨胀做功至一定程度的蒸汽驱动 ORC，可以进一步提高蒸汽的整体发电能力。

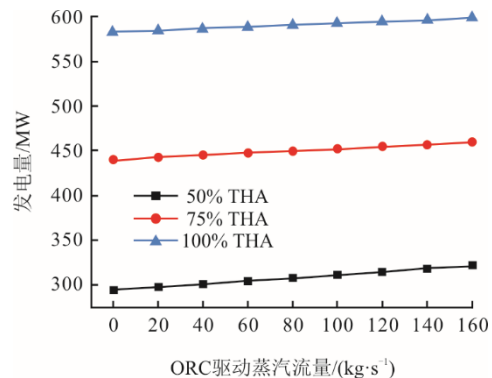


图 4 输出功率随驱动蒸汽流量的变化
Fig.4 Variations of output power with the driving steam flow rate

3.1.2 标准发电煤耗率

不同驱动蒸汽流量下系统的标准发电煤耗率变化情况如图5所示。由图5可以发现,在新发电系统中,煤耗率随驱动蒸汽流量的增加而降低。当驱动蒸汽流量从0增加到160 kg/s时,50%THA、75%THA和100%THA负荷下煤耗率分别降低了27.72、12.88、7.92 g/(kW·h)。这是由于随着驱动蒸汽流量的增大,总输出功率增大,导致煤耗率降低。此外电厂负荷越低,煤耗率下降幅度越大。因此,新型发电系统可以有效降低化石燃料的消耗。

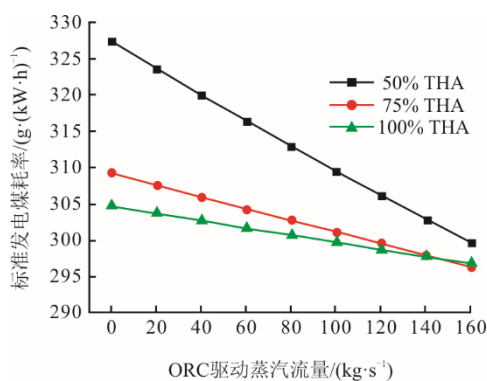


图5 标准发电煤耗率随驱动蒸汽流量的变化

Fig.5 Variations of the standard coal consumption rate with the driving steam flow rate

3.1.3 余热回收率

图6显示了不同驱动蒸汽流量下系统余热回收率变化情况。

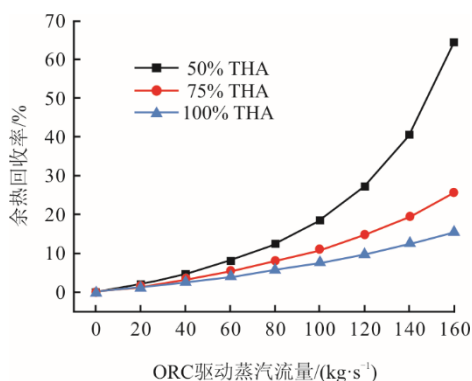


图6 余热回收率随驱动蒸汽流量的变化

Fig.6 Variations of waste heat recovery rate with the driving steam flow rate

由图6可以发现,系统余热回收率随驱动蒸汽流量的增大而增大。当ORC的驱动蒸汽流量达到160 kg/s时,50%THA、75%THA和100%THA工况下的系统余热回收率分别达到64.57%、25.64%和15.40%。这是因为ORC的工质流量随驱动蒸汽

流量的增加而增加,从而提高了以排汽为热源的预热器热负荷;同时,空冷器的排汽流量随驱动蒸汽流量的增大而减小,二者共同作用增大了系统余热回收率。此外机组负荷越低,余热回收效果越显著。因此,新发电系统不仅可以提高中温蒸汽的发电能力,还可以提高对排汽余热的回收利用程度。

3.1.4 热效率

图7显示了不同驱动蒸汽流量下系统热效率变化情况。由图7可知,原燃煤电厂改造后的热效率明显提高。当驱动蒸汽流量从0增加到160 kg/s时,50%THA、75%THA和100%THA负荷下的热效率分别提高了3.48个百分点、1.72个百分点和1.08个百分点。这是由于在耦合ORC后,消耗等量的燃料,系统的总输出功率得到了提高。此外,在低负荷下热效率提升幅度更显著。可以发现,采用新型耦合方式后,系统的燃料利用效率明显提高。

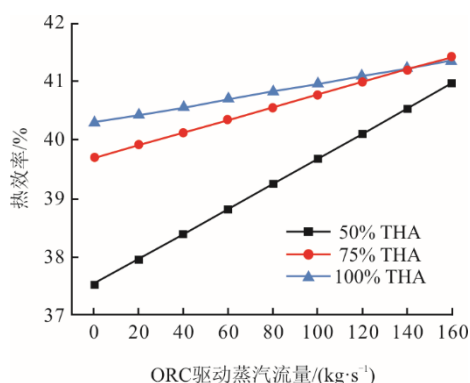


图7 热效率随驱动蒸汽流量的变化

Fig.7 Variations of thermal efficiency with the driving steam flow rate

3.2 焓分析

为了进一步确定系统对燃料的利用情况,根据热力学第二定律分析了新旧发电系统以及各部分的焓利用情况。

3.2.1 焓指标

图8为驱动蒸汽流量为160 kg/s时,100%THA新旧发电系统各部分的焓指标。原发电系统的总焓损失和焓效率分别为898.77 MW和39.34%,新发电系统的总焓损失和焓效率分别为883.23 MW和40.39%。焓效率提高1.05个百分点,焓损失减少15.54 MW。其中ORC系统的焓效率为55.13%,显著高于原发电系统的39.34%。可以发现,新发电系统的总输出功率增大了15.54 MW,空冷器焓损失减小了69.88 MW。尽管ORC系统造成了65.62 MW

烟损失，却获得了 80.62 MW 的输出功率，并且回收了 12.28 MW 排汽热烟。因此，将原有发电系统

改造为与 ORC 相耦合的新发电系统后，整体能源利用效率得到了显著提高。

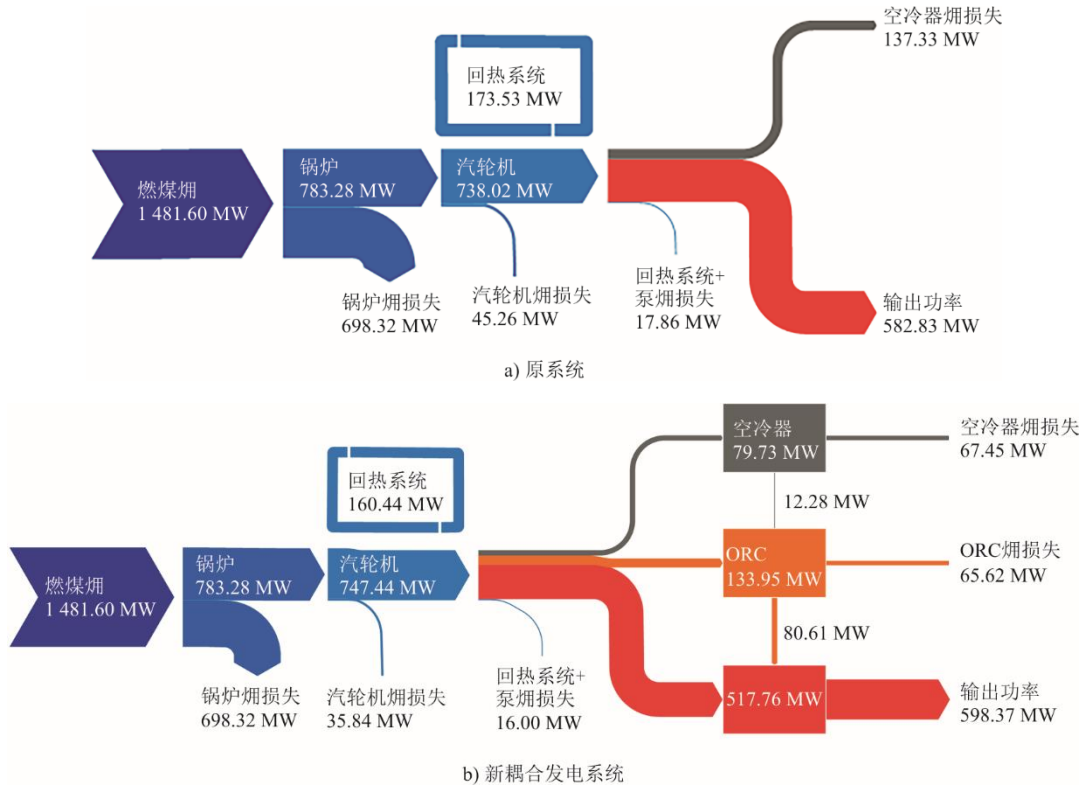


图 8 原系统和新发电系统的烟流
Fig.8 Exergy flow of the original and new coupled power generation system

原发电系统和新发电系统的子系统烟损失分布如图 9 所示。

新发电系统节省了 15.52 MW 的烟损失。在这些因素中，空冷器烟损失的减少起主要作用。空冷器的烟损失减少主要有 2 个原因：一方面，部分蒸汽驱动 ORC 发电，减小了进入空冷器的排汽流量，从而降低放热烟损失；另一方面，部分排汽用于预热有机工质，进一步降低空冷器中的排汽烟损失。

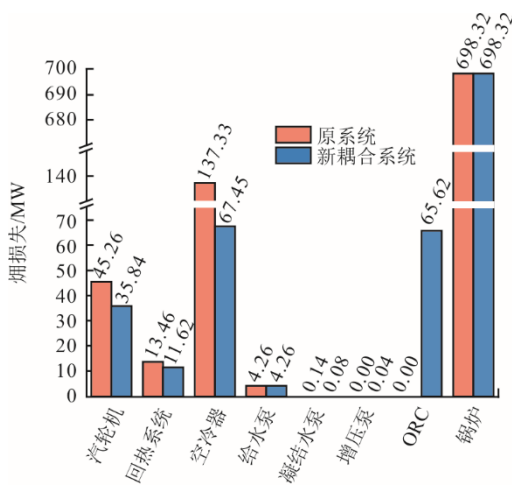


图 9 子系统烟损失分布
Fig.9 Distribution of exergy loss of the subsystems

由图 9 可知，锅炉和给水泵的烟损失保持不变。ORC 和增压泵的烟损失分别增加了 65.61 MW 和 0.04 MW，空冷器、回热系统、汽轮机和凝结水泵的烟损失分别减少了 69.88、1.84、9.42、0.06 MW，

ORC 系统的烟损失分布如图 10 所示。

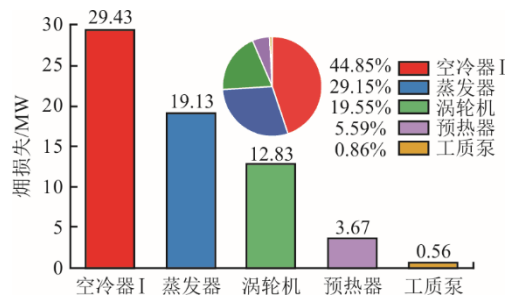


图 10 ORC 系统烟损失分布
Fig.10 Distribution of exergy loss of the ORC system

由图 10 可知，烟损失由小到大依次为工质泵、预热器、涡轮机、蒸发器和空冷器 I。预热器带来了 3.67 MW 烟损失，但回收了 12.28 MW 的排汽热烟；

涡轮机造成了 12.83 MW 焓损失, 但产生的额外功率为 80.61 MW, 大于燃煤机组的功率减少量 65.07 MW; 尽管空冷器 I 的焓损失达到 29.43 MW, 但是燃煤机组的空冷器焓损失减少了 69.88 MW。与原系统相比, 新系统的排汽热焓损失减少了 40.45 MW。因此, ORC 与燃煤机组耦合后, 可显著降低系统冷端散热焓损失, 提高能源利用效率。

3.2.2 焓损失和焓效率

不同驱动蒸汽流量下的焓损失如图 11 所示。由图 11 可以发现, 新耦合系统的焓损失小于原发电系统, 且随着驱动蒸汽流量的增大, 焓损失逐渐减小。当驱动蒸汽流量从 0 增加到 160 kg/s 时, 50%THA、75%THA 和 100%THA 负荷下的焓损失分别减少了 27.18、19.12、15.54 MW。这是由于 ORC 在中低温热电转换率高的作用, 使更多的中温级蒸汽和低温排汽在驱动蒸汽流量增大的情况下得到有效利用。

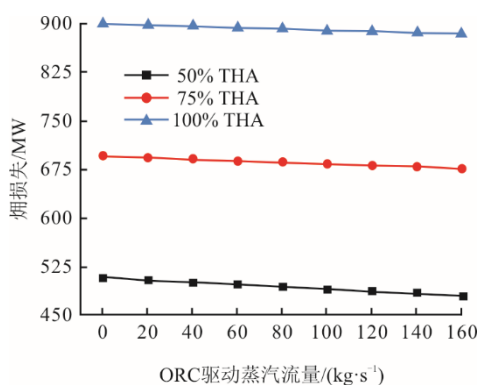


图 11 焓损失随驱动蒸汽流量的变化
Fig.11 Variations of exergy loss with the driving steam flow rate

不同驱动蒸汽流量下的焓效率如图 12 所示。

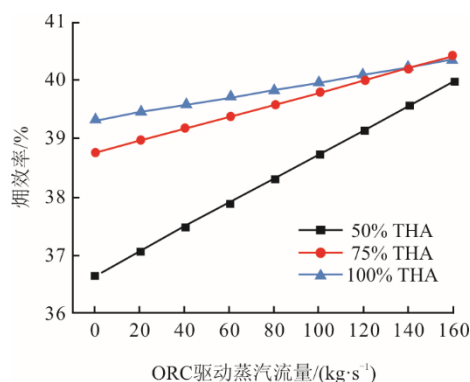


图 12 焓效率随驱动蒸汽流量的变化
Fig.12 Variations of exergy efficiency with the driving steam flow rate

由图 12 可知, 将原系统改造为新耦合发电系统后, 焓效率明显提高, 同时系统的焓效率随着 ORC 驱动蒸汽流量的增加而增加。当驱动蒸汽流量从 0 增加到 160 kg/s 时, 50%THA、75%THA 和 100%THA 负荷下的焓效率分别提高了 3.38 百分点、1.68 百分点和 1.05 百分点。因此, 可以通过提高 ORC 的驱动蒸汽流量来提高系统焓效率。此外, 负荷越低, 焓效率的增幅越大。因此, 采用该耦合方法可以显著提高能量利用效率。

4 结 论

为了实现能源的深度梯级利用, 本文提出了一种新型发电系统, 该系统由燃煤发电厂耦合 ORC 实现蒸汽能量的梯级利用, 提高蒸汽发电能力, 同时还可实现冬季防冻和对排汽余热的回收利用。从热力学角度对原系统和新耦合系统进行了比较, 主要结论如下。

1) 能量分析结果显示, 当驱动蒸汽流量从 0 增加到 160 kg/s 时, 相比于原系统, 新发电系统在 50%THA、75%THA 和 100%THA 负荷下的输出功率增加了 27.18、19.12、15.54 MW, 煤耗率分别降低了 27.72、12.88、7.92 g/(kW·h), 余热回收率分别达到 64.57%、25.64%和 15.40%, 热效率分别提高了 3.48 百分点、1.72 百分点和 1.08 百分点。

2) 焓分析结果显示, 当驱动蒸汽流量从 0 增加到 160 kg/s 时, 50%THA、75%THA 和 100%THA 负荷下的焓损失分别减少了 27.18、19.12、15.54 MW, 焓效率分别提高了 3.38 百分点、1.68 百分点和 1.05 百分点。

由此可见, 所提方案可显著提高现有燃煤电厂的热力学性能, 新耦合方式可为进一步提高现有燃煤电厂性能提供新的途径。

[参 考 文 献]

- [1] SHANDIZ S C, RISMANCHI B, FOLIENTE G. Energy master planning for net-zero emission communities: State of the art and research challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110600.
- [2] YASIR A S, CHENG L S, SYED A A S. Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: an integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach[J]. Renewable Energy, 2021, 173: 209-222.
- [3] 徐顺智, 赵瑞形, 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 Ruixing, 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.
- [4] DAWO F, EYERER S, PILI R, et al. Experimental investigation, model validation and application of twin-screw expanders with different built-in volume ratios[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116139.
- [5] BĂLĂNESCU D, HOMUTESCU V. Performance analysis of a gas turbine combined cycle power plant with waste heat recovery in organic Rankine cycle[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 32: 520-528.
- [6] GUO X R, ZHANG H C, HU Z Y, et al. Energetic, exergetic and ecological evaluations of a hybrid system based on a phosphoric acid fuel cell and an organic Rankine cycle[J]. *Energy*, 2021, 217: 119365.
- [7] MOREIRA L F, ARRIETA F R P. Thermal and economic assessment of organic Rankine cycles for waste heat recovery in cement plants[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109315.
- [8] ZHI L H, HU P, CHEN L X, et al. Performance analysis and optimization of engine waste heat recovery with an improved transcritical-subcritical parallel organic Rankine cycle based on zeotropic mixtures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181: 115991.
- [9] JIN Y L, GAO N P, ZHU T. Techno-economic analysis on a new conceptual design of waste heat recovery for boiler exhaust flue gas of coal-fired power plants[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 200: 112097.
- [10] LIAO G L, LIU L J, ZHANG F, et al. A novel combined cooling-heating and power (CCHP) system integrated organic Rankine cycle for waste heat recovery of bottom slag in coal-fired plants[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 186: 380-392.
- [11] LIAO G L, E J Q, ZHANG F, et al. Advanced exergy analysis for organic Rankine cycle-based layout to recover waste heat of flue gas[J]. *Applied Energy*, 2020, 266: 114891.
- [12] ZHANG H S, LIU Y F, LIU X G, et al. Energy and exergy analysis of a new cogeneration system based on an organic Rankine cycle and absorption heat pump in the coal-fired power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 223: 113293.
- [13] 张洪笙. 热电联产系统低品位热利用方式及热力特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019: 1.
ZHANG Hongsheng. Research on low-grade thermal energy utilization and thermodynamic characteristics of cogeneration systems[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019: 1.
- [14] ZHANG H S, HAO R J, LIU X G, et al. Thermodynamic performance analysis of an improved coal-fired power generation system coupled with geothermal energy based on organic Rankine cycle[J]. *Renewable Energy*, 2022, 201: 273-290.
- [15] WANG C Y, SONG J W. Performance assessment of the novel coal-fired combined heat and power plant integrating with flexibility renovations[J]. *Energy*, 2023, 263: 125886.
- [16] ZHANG X J, WU L J, WANG X L, et al. Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 1427-1439.
- [17] PENG P, YUAN Y B, GE H, et al. Thermodynamic and life cycle assessment analysis of polymer-containing oily sludge supercritical water gasification system combined with organic Rankine cycle[J]. *Energy*, 2024, 305: 132359.

(责任编辑 邓玲惠)