doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2026. 144

高炉冲渣水余热驱动的冷热电三联供系统热力学性能

董　辉[1]，汪　昊[1]，赵　亮[1]，冯军胜[2]，李明明[3]
（1. 东北大学 冶金学院，沈阳 110819；2. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院，合肥 230601；
3. 沈阳东大三建工业炉制造有限公司，沈阳 110102）

摘　要：针对钢铁行业高炉冲渣水余热品位较低，难以实现余热梯级利用的问题，本文提出了一种耦合有机朗肯循环（ORC）与吸收式制冷循环（ARC）的冷热电三联供（CCHP）系统，并基于能量守恒与㶲平衡原理，建立了 CCHP 系统热力学计算模型.另外，选用 R245fa 和氨水溶液分别作为 ORC 和 ARC 循环工质，分析了 ORC 蒸发温度、冷凝温度和工质过热度，以及 ARC 蒸发温度对 CCHP 系统㶲效率与热量利用系数的影响.结果表明：ORC 蒸发温度升高可有效提升系统㶲效率与热量利用系数，而 ORC 冷凝温度升高则会降低系统㶲效率；ORC 工质过热度对系统性能影响较弱，而 ARC 蒸发温度影响较为明显；当热源温度超过 150 ℃时，CCHP 系统热量利用系数可达 70%以上，能够实现中低温余热向电、冷、热能的高效梯级转化.该研究结果可为高炉冲渣水余热高效回收与多能联供系统的设计与运行提供理论参考.

关键词：高炉渣；余热回收；有机朗肯循环；吸收式制冷循环；热力学特性
中图分类号：TF 521　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0468-08

Thermodynamic performance of combined cooling, heating and power system driven by waste heat from blast furnace slag flushing water

Dong Hui[1], Wang Hao[1], Zhao Liang[1], Feng Junsheng[2], Li Mingming[3]
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
3. Shenyang Dongda Sanjian Industrial Furnace Manufacturing Co., Ltd., Shenyang 110102, China)

Abstract: In view of the relatively low grade of waste heat from blast furnace slag flushing water in the steel industry, which makes it difficult to achieve stepwise utilization of waste heat, a combined cooling, heating and power (CCHP) system that coupled the organic Rankine cycle (ORC) with the absorption refrigeration cycle (ARC) has been proposed in this study, and based on the principles of energy conservation and exergy balance, the thermodynamic calculation model of the CCHP system has been established. In addition, R245fa and ammonia-water solution are selected as the working fluids for the ORC and ARC systems, respectively. The influence laws of ORC evaporation temperature, condensation temperature, and working fluid superheat degree, as well as the ARC evaporation temperature, on the exergy efficiency and heat utilization coefficient of the CCHP system have been analyzed. The results show that an increase in the ORC evaporation temperature can effectively enhance the system exergy efficiency and heat utilization coefficient, while an increase in the ORC condensation temperature reduces the exergy efficiency of the system. The superheat degree of ORC working fluid has a relatively weak impact on system performance, while the ARC evaporation temperature has a more obvious influence. When the heat source temperature exceeds 150 ℃, the heat utilization coefficient of the CCHP system can reach over 70%, and the efficient stepwise conversion of medium- and low-temperature waste heat into electricity, cooling, and thermal energy can be achieved. The research results can provide theoretical references for the high-efficiency recovery of blast furnace slag flushing water waste heat and the design and operation of the multi-energy combined supply system.

Key words: blast furnace slag; waste heat recovery; organic Rankine cycle; absorption refrigeration cycle; thermodynamic characteristics

收稿日期：2026-05-28.
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202307）；安徽省自然科学基金资助项目（1908085QE203）.
作者简介：董辉（1969—），男，博士，教授，E-mail：Dongh@ mail. neu. edu. cn.

引文格式：董辉，汪昊，赵亮，等. 高炉冲渣水余热驱动的冷热电三联供系统热力学性能［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：468-475.（Dong Hui，Wang Hao，Zhao Liang，et al. Thermodynamic performance of combined cooling，heating and power system driven by waste heat from blast furnace slag flushing water［J］. Journal of Materials and Metallurgy，2026，25（5）：468-475.）

近年来，降低生产成本和提升能源利用效率已成为提升我国钢铁行业核心竞争力的关键举措[1]. 目前，钢铁行业能源消耗约占工业总量的 15%[2]，但整体能源利用率仅为 30%～50%，大量能量以余热形式流失，造成严重的资源浪费与环境压力[3]. 在各类余热资源中，冶金渣余热占据相当大比重，尤其是高炉工序产生的低温余热具备巨大的回收利用空间[4]. 高炉冲渣水作为高炉生产过程中产生的低温余热资源，量大且温度稳定在 80～95 ℃[5]. 然而，高炉冲渣水存在能量品质偏低的固有缺陷，传统利用方式受工艺影响，能量梯级利用水平低，难以实现电冷热协同供应，制约了其余热价值的充分发挥[6-7].

近年来，有机朗肯循环(ORC)已成为工业低品位余热利用的核心技术之一[8-9]. ORC 系统能够在较低热源温度下实现稳定高效运行，因此，在钢铁行业的余热利用中展现出良好的应用前景[10-11]. 目前，国内外学者已针对 ORC 系统开展了大量研究工作. Fu 等[12]研究了 ORC 系统在非设计工况温度下的性能表现，结果表明，系统输出功与热效率均随热源温度升高近似呈线性增长趋势. Feng 等[13]对比研究了不同工质下系统关键运行参数对热力性能的影响，指出 R245fa 工质是中低温余热回收场景下的优选工质之一. 吴俐俊等[14]建立了高炉冲渣水低温 ORC 发电系统冷凝器传热模型，探究了过热度、过冷度及进口干度对换热与压降的影响.

单独采用 ORC 系统回收高炉冲渣水余热仅可实现电能产出，无法同步匹配企业冷热多元负荷，余热综合利用水平受限[15]. 而吸收式制冷循环(ARC)凭借直接利用低品位余热的特点，能够与 ORC 耦合构建冷热电三联供(CCHP)系统，为冲渣水余热的梯级高效利用提供新的技术途径. 目前，ORC-ARC 耦合冷热电联供系统的研究大多聚焦于燃气轮机系统内的高温烟气余热利用[16]，而针对冲渣水余热利用的 CCHP 系统热力循环特性研究还鲜有文献报道. 基于此，本文提出一种高炉冲渣水闪蒸提质后驱动的 CCHP 系统，并基于能量守恒与㶲平衡原理，建立 CCHP 系统热力学模型，深入研究关键运行参数对系统㶲效率和热量利用系数的影响. 该研究结果以期为钢铁企业高炉冲渣水余热的高效回收利用提供理论支撑，进一步提升能源利用效率，推动钢铁行业绿色低碳转型.

1　系统描述

高炉冲渣水余热利用系统示意图如图 1 所示. 冲渣水先进入负压闪蒸器中进行负压闪蒸，以去除其中杂质，然后进入冷凝器中冷凝形成 70～80 ℃的热水. 热水进入中温换热器内，吸收中温烟气的热量，被加热至 150～180 ℃，随后送入 ORC 发电系统进行发电，ORC 发电系统排出的热水进入 ARC 系统驱动制冷. ARC 排出的热水与中温换热器出口的烟气共同进入低温换热器进行换热，最终产出 60～80 ℃的可利用热水，实现中低温余热的“电－冷－热”梯级利用，使能源利用效率得到大幅提升.

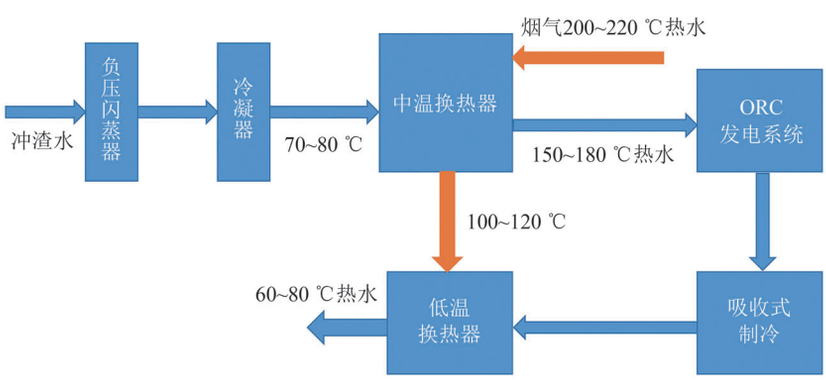


图 1　冲渣水余热利用系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of waste heat utilization system for slag flushing water

图 2 为集成 ORC 和 ARC 的 CCHP 系统示意图. 其中，ORC 系统由 4 个热力过程组成，ORC 工质在蒸发器内与中温换热器排出的 150～180 ℃热水进行热量交换，被定压加热成高温过热蒸汽；随后，气态工质进入膨胀机内对外做功发电；膨胀后的工质乏汽进入冷凝器，向低温冷媒释放热量，被冷凝为饱和液态；液态工质在工质泵中完成加压，重新送入蒸发器循环利用.

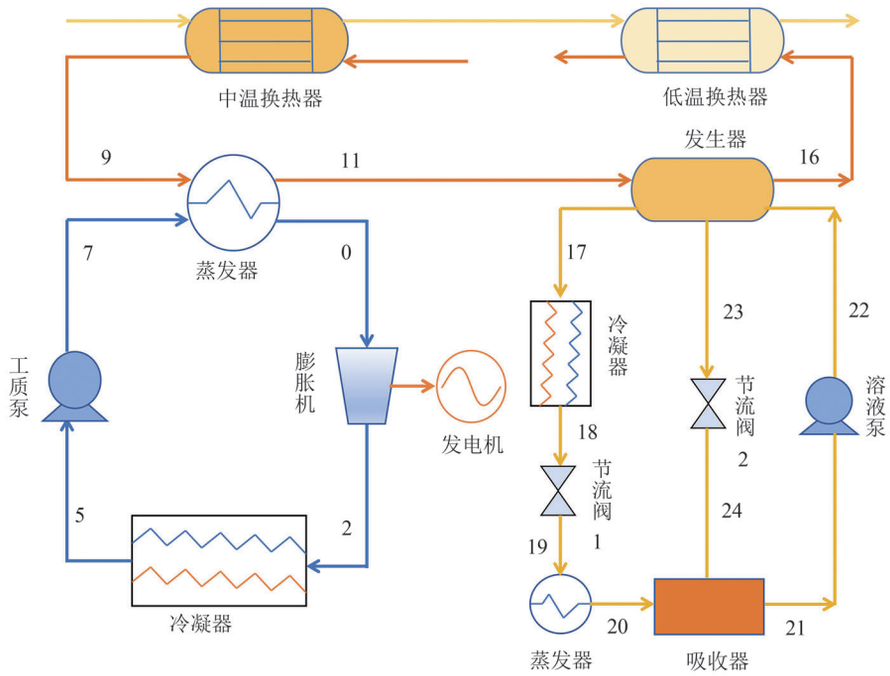


图 2 CCHP 系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CCHP system

在本研究中,综合热源温度、制冷需求与工质热力学特性,ARC 系统优选氨水溶液作为循环工质.相较于溴化锂水溶液,氨水体系适配 70 ~ 130 ℃区间的低品位冲渣余热,不存在结晶堵塞风险,可制取 0 ℃以下工业低温冷水,满足钢铁厂区工艺冷却需求[17].工质利用 ORC 系统排出的热水余热实现制冷,具体过程如下:ORC 蒸发器出口的余热进入 ARC 发生器,加热浓氨水溶液,使氨从溶液中蒸发变为饱和蒸汽;氨蒸气进入冷凝器,向环境释放热量,冷凝为液态氨;液态氨经节流阀减压后变成低温低压流体,进入蒸发器从低温对象吸收热量变成饱和蒸汽,进而产生制冷效应;氨蒸气进入吸收器内,并在低温条件下被稀氨水溶液吸收,形成浓氨水溶液;浓氨水溶液经泵加压后,重新回到发生器内循环利用.

2 系统模型建立

为了便于系统仿真计算,针对耦合系统运行工况做出如下假设[18-19]:① 系统稳态运行,各点热力参数恒定;② 工质泵、膨胀机的等熵效率统一取 0.85;③ 忽略换热器散热与管路压力损失;④ ARC 发生器出口满足气液平衡.

2.1 热力学模型

ORC 工质泵耗功量为

$$W_{\text{pump,ORC}}=m_{\text{f}}(h_7-h_5) \tag{1}$$

式中:m_{f}为 ORC 工质流量,kg/s;h 为工质比焓,kJ/kg;下标 i 为图 2 中工质所处的具体位置.

ORC 蒸发器换热量为

$$Q_{\text{eva,ORC}}=m_{\text{f}}(h_0-h_7)=m_{\text{w}}c_{\text{w}}(T_9-T_{11}) \tag{2}$$

式中:m_{w}为冲渣水流量,kg/s;T_9和 T_{11}分别为冲渣水进出口温度,K.

ORC 膨胀机输出功率为

$$W_{\text{exp,ORC}}=m_{\text{f}}(h_0-h_2) \tag{3}$$

ORC 冷凝器换热量为

$$Q_{\text{cond,ORC}}=m_{\text{f}}(h_2-h_5) \tag{4}$$

ORC 系统净输出功率为

$$W_{\text{n}}=W_{\text{exp,ORC}}-W_{\text{pump,ORC}} \tag{5}$$

ARC 系统计算模型以能量守恒和质量守恒定律进行建立,系统主要部件模型如下:

ARC 发生器内换热量为

$$Q_{\text{gen}}=m_{\text{ag}}h_{17}+m_{\text{ds}}h_{23}-m_{\text{cs}}h_{22} \tag{6}$$

$$m_{\text{cs}}=m_{\text{ag}}+m_{\text{ds}} \tag{7}$$

$$m_{\text{cs}}\times a=m_{\text{ag}}+m_{\text{ds}}\times b \tag{8}$$

式中:m_{cs} 和 m_{ds} 分别为浓溶液和稀溶液流量,kg/s;m_{ag}为发生器内蒸发出氨气流量,kg/s;a 和 b 分别为浓溶液和稀溶液中氨气的质量分数,%.

ARC 冷凝器内换热量为

$$Q_{\text{cond,ARC}}=m_{\text{ag}}(h_{17}-h_{18}) \tag{9}$$

ARC 蒸发器内换热量为

$$Q_{\text{eva,ARC}}=m_{\text{ag}}(h_{20}-h_{19}) \tag{10}$$

ARC 系统制冷性能系数(COP)被定义为蒸发器内获得制冷量与发生器内换热量之间的比值,其计算公式为

$$\mathrm{COP}=\frac{Q_{\mathrm{eva,ARC}}}{Q_{\mathrm{gen}}} \tag{11}$$

CCHP 系统㶲效率为[20]

$$\eta_{\mathrm{ex}}=\frac{E_{\mathrm{x,e}}+E_{\mathrm{x,c}}+E_{\mathrm{x,h}}}{E_{\mathrm{x,w}}+E_{\mathrm{x,g}}} \tag{12}$$

式中：$E_{\mathrm{x,e}}$为发电输出㶲，kW；$E_{\mathrm{x,c}}$为制冷输出㶲，kW；$E_{\mathrm{x,h}}$为制热输出㶲，kW；$E_{\mathrm{x,w}}$为冲渣水输入㶲，kW；$E_{\mathrm{x,g}}$为中温烟气输入㶲，kW.

CCHP 系统热量利用系数[21]

$$\eta_{\mathrm{hu}}=\frac{W_{\mathrm{n}}+Q_{\mathrm{eva,ARC}}+Q_{\mathrm{h}}}{Q_{\mathrm{tot}}} \tag{13}$$

式中：Q_{tot}为系统的总输入热量，kW；Q_{h}为低温换热器出口供热的热量，kW.

2.2　系统循环工质筛选

在本研究中，选择 R245fa 作为 ORC 系统循环工质，主要基于其优异热力学特性与环境友好性.从环保角度考量，R245fa 的臭氧消耗潜能值(ODP)为 0，对臭氧层无破坏作用，全球变暖潜能值(GWP)较低，符合当前工业领域对工质环保性的要求，主要热物性参数见表 1[19].

表 1　工质的物性参数

Table 1　Physical properties of working medium

工质参数	R245fa
工质类型	干
摩尔质量/(g·mol^{-1})	134.05
沸点/℃	15.14
临界温度/℃	154.05
临界压力/MPa	3.651
ODP	0
GWP	1 030

2.3　模型验证

为验证本文高炉冲渣水余热驱动 CCHP 系统热力学模型的计算可靠性，选取文献[22]中热源进口温度为 150 ℃的工况进行对比，结果如表 2 所列.

表 2　模型验证结果

Table 2　Model verification results

性能指标	文献[22]	模拟结果	误差/%
COP	0.619 6	0.609 6	1.61
η_{hu}/%	67.6	66.79	1.19

由表 2 可知，系统 COP 与热量利用系数的相对误差均在 2%以内，整体数据吻合程度高，充分体现了本文所建立计算模型的可靠性.

3　结果与讨论

本文采用热力学计算软件和 Refprop 物性数据库对上述模型进行求解，同时选取 ORC 蒸发温度、ORC 冷凝温度、ORC 过热度、ORC 蒸发器节点温差及 ARC 蒸发温度为系统运行特性的影响因素，研究系统㶲效率和热量利用系数的变化.表 3 中展示了系统初始计算参数[11,23].

3.1　ORC 蒸发温度

图 3 示出了不同热源温度下 CCHP 系统㶲效率随 ORC 蒸发温度的变化.由图 3 可知，当热源温度一定时，系统㶲效率随 ORC 蒸发温度的升高均呈先增后减的变化趋势.从传热不可逆机理分析，低蒸发区间(80~110 ℃)工质饱和温度偏低，热源与工质间传热温差大，蒸发器内部温差㶲损失剧烈.此时，逐步提升蒸发温度可缩小冷热介质换热温差，削弱由有限温差传热带来的不可逆耗散，循环做功能力也同步提升，系统总㶲产出持续增长，㶲效率逐步抬升.当蒸发温度超过 110 ℃后，㶲效率回落，这主要受限于 ORC 系统自身循环性能，过高的蒸发温度会导致透平出口干度降低、泵耗功增加，反而削弱了整体㶲收益.当蒸发温度一定时，热源温度升高会导致蒸发器传热温差增大，不可逆㶲耗散加剧.

表 3　系统计算初始参数

Table 3　Initial parameters for system calculation

设计参数	数值	设计参数	数值
热水进口流量/(kg·s^{-1})	100	膨胀机等熵效率/%	80
烟气进口温度/℃	200	环境温度/℃	20
烟气出口温度/℃	100	ARC 发生温度/℃	40
ORC 蒸发器节点温差/℃	10	热水出口温度/℃	50
ORC 冷凝器节点温差/℃	5	发生器出口浓溶液质量分数/%	60

续表

设计参数	数值	设计参数	数值
ORC 蒸发温度/℃	100	吸收器出口稀溶液质量分数/%	40
ORC 冷凝温度/℃	35	吸收温度/℃	10
冷却水进口水温/℃	20	ARC 冷凝温度/℃	40
工质泵等熵效率/%	80	ARC 蒸发温度/℃	−5

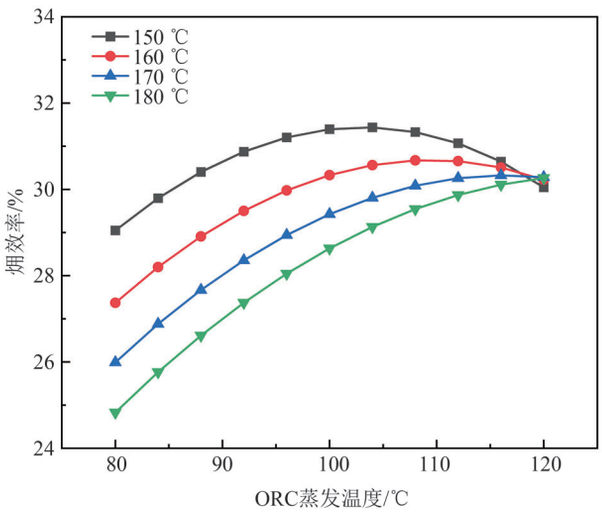


图 3 系统㶲效率随 ORC 蒸发温度的变化

Fig. 3 Change of system exergy efficiency with ORC evaporation temperature

图 4 反映了 CCHP 系统热量利用系数随 ORC 系统工质蒸发温度的变化特性.由图可知,在 150~180 ℃的热源进口温度区间内,系统热量利用系数均随 ORC 蒸发温度的升高呈单调递增趋势.这是因为提升 ORC 蒸发温度可提高余热向电能的转化比例,减少 ORC 系统内传热损失.

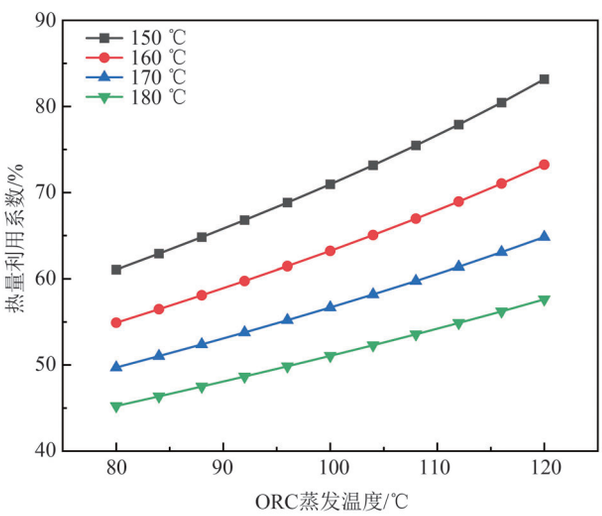


图 4 系统热量利用系数随 ORC 蒸发温度的变化

Fig. 4 Change of system heat utilization coefficient with ORC evaporation temperature

同时,ORC 循环平均放热温度上升,供给发生器的余热品位提升,ARC 内部换热温差减小、制冷能力增强,电、冷两类有效能量同步增加,系统热量综合利用率持续提升.在相同 ORC 蒸发温度下,热量利用系数随热源进口温度的升高而减小,高品位热量更多转化为电能,分配给吸收制冷支路的低品位余热占比被压缩,冷热总产出同步降低.

3.2 ORC 冷凝温度

图 5 示出了不同热源温度下系统㶲效率随 ORC 冷凝温度的变化.

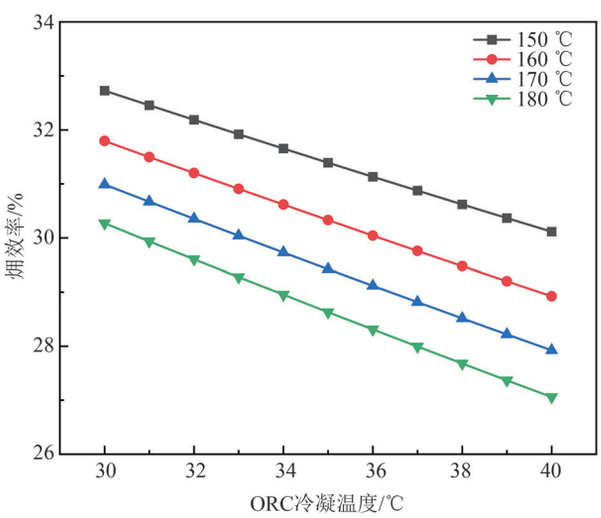


图 5 系统㶲效率随 ORC 冷凝温度的变化

Fig. 5 Change of system exergy efficiency with ORC condensation temperature

由图 5 可知,在各热源工况下,系统㶲效率均随冷凝温度的升高呈线性下降.这是因为冷凝温度的升高会抬高工质饱和冷凝压力,使 ORC 循环高低压侧压差缩小,透平膨胀做功能力大幅衰减;同时,冷凝器冷热流体平均温差扩大,冷却侧不可逆㶲损失增加,双重作用下系统净输出㶲持续降低.在相同的冷凝温度条件下,热源温度越高,系统㶲效率越低,且各曲线越近似平行,这表明冷凝温度对㶲效率的影响幅度在不同热源品位下基本一致.

图 6 展示了系统热量利用系数随 ORC 冷凝温度的变化特性.

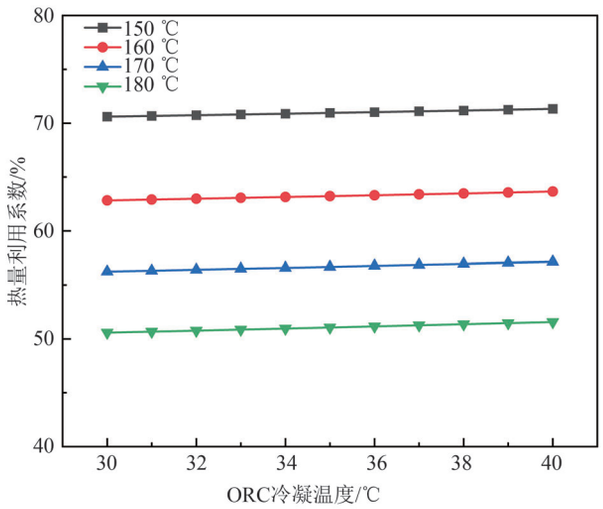


图 6　系统热量利用系数随 ORC 冷凝温度的变化

Fig. 6　change of system heat utilization coefficient with ORC condensation temperature

由图 6 可知，热源温度越高，热量利用系数越低.热量利用系数可以反映系统对输入热量的综合利用程度，其稳定性源于“ORC 发电+ARC 制冷”的耦合平衡.冷凝温度升高虽会降低 ORC 发电效率，但增加了余热供给量，使得制冷量同步提升，二者的能量分配变化相互抵消，因此，热量利用系数基本保持稳定.热源温度的升高会增强 ORC 的发电占比，压缩余热制冷的能量分配比例，导致系统对热量的综合利用程度随热源温度升高而降低.在 150 ℃工况下，热量利用系数始终维持在 70%以上的较高水平，且随冷凝温度升高基本保持稳定.

3.3　ORC 工质过热度

图 7 展示了不同热源进口温度下系统㶲效率随 ORC 工质过热度的变化情况.

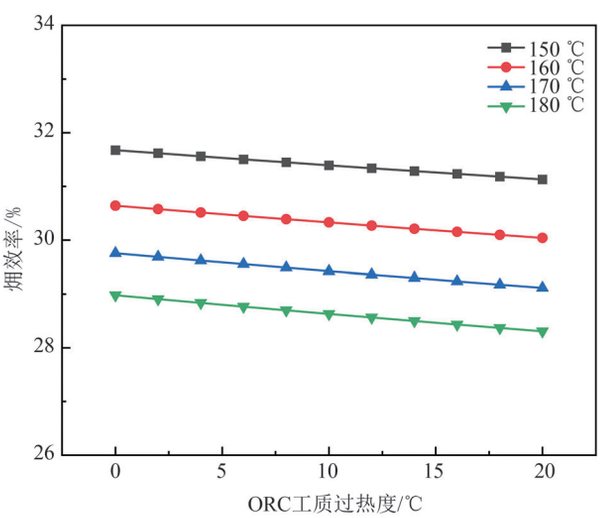


图 7　系统㶲效率随 ORC 工质过热度的变化

Fig. 7　Change of system exergy efficiency with ORC superheat degree

结果表明，在各热源工况下，系统㶲效率均随工质过热度的升高呈单调下降趋势，且变化幅度较为平缓.当过热度由 0 ℃提升至 20 ℃时，各工况㶲效率降幅均为 1%左右.这是因为工质过热度的提升会增大蒸发器内的传热温差，使得不可逆㶲损失随之增加，同时 ORC 循环的净输出功略有降低，最终导致系统整体㶲效率小幅下降.

图 8 展示了系统热量利用系数随 ORC 工质过热度的变化特性.

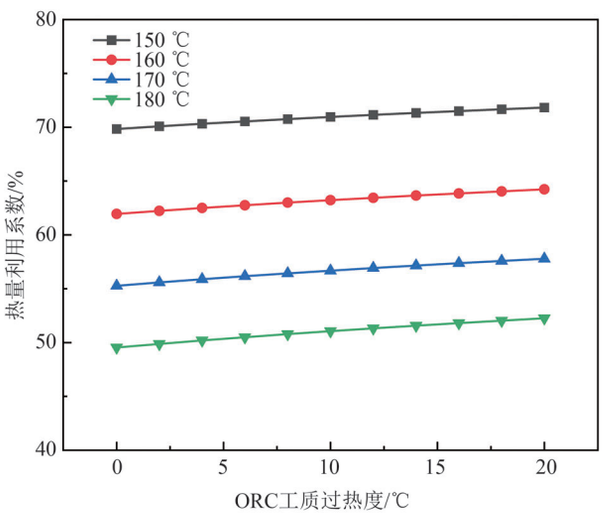


图 8　系统热量利用系数随 ORC 工质过热度的变化

Fig. 8　Change of system heat utilization coefficient with ORC superheat degree

由图 8 可知，当工质过热度一定时，热量利用系数随热源温度的增加而递减，这体现了热源温度对热量利用水平的主导作用.过热度的提升虽会降低 ORC 发电效率、增加制冷量，但二者的能量变化相互抵消，故热量利用系数基本保持稳定；而热源温度越高，ORC 发电的能量占比越大，余热制冷的份额越小，系统对热量的综合利用程度也随之越低.

3.4　ARC 蒸发温度

图 9 呈现了系统㶲效率随 ARC 蒸发温度的变化规律.结果表明，系统㶲效率均随制冷蒸发温度的升高呈单调下降趋势.当蒸发温度由−15 ℃提升至 5 ℃时，各工况㶲效率降幅均超过 2%.该现象的内在机制在于，制冷蒸发温度越高，制冷系统的冷量品位越低，单位制冷量对应的冷㶲显著减小，这直接导致系统对外输出的总㶲降低，最终表现为系统整体㶲效率的下降.

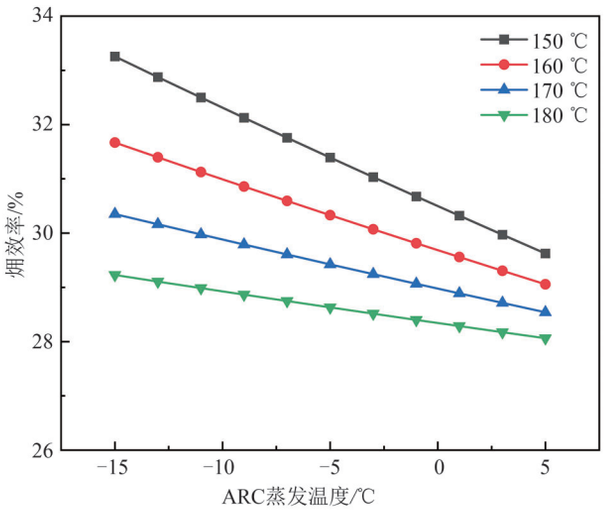


图9 系统㶲效率随ARC蒸发温度的变化

Fig. 9 Change of system exergy efficiency with ARC evaporation temperature

图10展示了热量利用系数随ARC系统蒸发温度的变化特性.由图10可知,在同一蒸发温度下,热量利用系数随热源进口温度的升高依次递减,体现了热源品位对系统热量综合利用水平的固有约束.蒸发温度升高虽会提升ARC系统的能效比,但ORC系统供给的余热总量由热源温度决定并保持相对稳定,故制冷量的变化幅度极小.此外,输入热量与有效利用的热量的同步稳定,使得热量利用系数基本不受蒸发温度变化的影响.这一特性表明,在-15~5 ℃内,ARC系统的蒸发温度并非影响热量利用系数的关键参数.

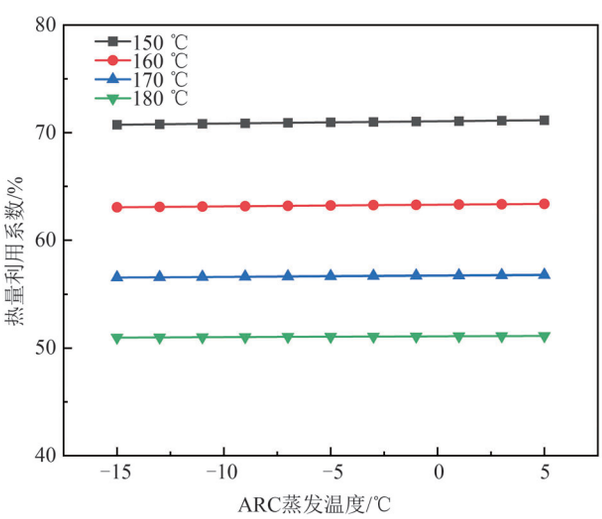


图10 系统热量利用系数随ARC蒸发温度的变化

Fig. 10 Change of system heat utilization coefficient with ARC evaporation temperature

4 结论

(1)ORC蒸发温度是影响系统性能的核心参数.在80~120 ℃,系统㶲效率随蒸发温度升高先增后减.蒸发温度每提高10 ℃,㶲效率可提升1.0%~1.5%.提高蒸发温度能够有效减小蒸发器内传热不可逆损失,是提升系统能效的关键举措.

(2)当ORC冷凝温度由30 ℃升至40 ℃时,系统㶲效率均呈近似线性下降趋势,降幅为2%~3%.在相同冷凝温度下,热源进口温度越高,系统㶲效率越高.

(3)ORC工质过热度在0~20 ℃,㶲效率随过热度升高而下降,整体降幅约为1%;ARC蒸发温度则具有较明显影响,在-15~5 ℃,㶲效率随蒸发温度升高呈单调下降趋势. ORC工质过热度对系统运行性能影响最小,实际运行中可按设备运行范围选取.

(4)系统热量利用系数随热源温度升高呈递减趋势,150 ℃热源工况下系统热量利用系数可达70% 以上,更侧重制冷与供热输出;180 ℃热源工况下系统发电占比提升,㶲效率更高.实际运行中可根据厂区电、冷、热负荷需求,通过调控ORC关键参数实现多能输出灵活匹配,提升系统适应性与经济性.

5 参考文献

[1] 张琦, 田硕硕, 沈佳林. 中国钢铁行业碳达峰碳中和时间表与路线图[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 59-68.
(Zhang Qi, Tian Shuoshuo, Shen Jialin. Roadmap and timetable for achieving carbon peak and carbon neutrality of China's iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2023, 58(9): 59-68.)

[2] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等."双碳"目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505-513.
(Yao Tonglu, Wu Wei, Yang Yong, et al. Analysis on low-carbon development of China's steel industry under dual-carbon goal[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(6): 505-513.)

[3] 龚奂彰, 黄秀玉. 钢铁行业碳减排技术应用与展望[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 53-58.
(Gong Huanzhang, Huang Xiuyu. Application and prospect of carbon emission reduction technology in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 53-58.)

[4] 谭煜,王亿,李晓鹏,等.化学法回收高炉渣余热的现状及展望[J].材料与冶金学报,2025,24(3):207-214.
(Tan Yu, Wang Yi, Li Xiaopeng, et al. Current status and prospects of recovering high-temperature heat from blast furnace slag by chemical methods [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2025, 24(3): 207-214.)

[5] 李晨晓, 姚鑫, 林岩, 等. 高炉渣余热回收数值模拟研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(5): 12-21.

(Li Xiaochen, Yao Xin, Lin Yan, et al. Research progress in numerical simulation of waste heat recovery from blast furnace slag[J]. Iron & Steel, 2024, 59(5): 12-21.)

[6] 苏福永, 倪佩韦, 温治, 等. 基于闪蒸换热的高炉冲渣水余热利用热效率及火用效率分析[J]. 冶金能源, 2020, 39(4): 17-21.
(Su Fuyong, Ni Peiwei, Wen Zhi, et al. Thermal efficiency and efficiency analysis of waste heat utilization of blast furnace slag flushing water based on flash heat exchange[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2020, 39(4): 17-21.)

[7] 黄志甲, 胡耀, 孙凤, 等. 高炉冲渣水余热驱动的双吸收式热泵系统优化设计与耦合研究[J]. 过程工程学报, 2025, 25(11): 1143-1155.
(Huang Zhijia, Hu Yao, Sun Feng, et al. Optimization design and coupling study of a double absorption heat transformer system driven by waste heat from blast furnace slag flushing water[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2025, 25(11): 1143-1155.)

[8] 黄惠兰, 陈强, 李刚. 低品位能源发电系统研究进展[J]. 热力发电, 2015, 44(8): 8-13.
(Huang Huilan, Chen Qiang, Li Gang. Research progress in low grade energy generation systems[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 8-13.)

[9] Mahmoudi A, Fazli M, Morad M R. A recent review of waste heat recovery by organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 660-675.

[10] 冯军胜, 裴刚, 董辉, 等. 烧结冷却废气余热有机朗肯循环发电系统性能分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 466-473.
(Feng Junsheng, Pei Gang, Dong Hui, et al. Performance analysis of organic Rankine cycle power generation system with sinter cooling gas waste heat[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 466-473.)

[11] 洪云川, 江文豪, 冯军胜, 等. 烧结环冷机中低温冷却废气ORC系统热经济性能分析[J]. 冶金能源, 2025, 44(4): 44-49.
(Hong Yunchuan, Jiang Wenhao, Feng Junsheng, et al. Thermal-economic performance analysis of ORC system driven by medium-low temperature exhaust gas in sintering annular cooler[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2025, 44(4): 44-49.)

[12] Fu B R, Hsu S W, Lee Y R, et al. Effect of off design heat source temperature on heat transfer characteristics and system performance of a 250-kW organic Rankine cycle system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 7-12.

[13] Feng J S, Cheng X N, Wang H H, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of organic Rankine cycle for low-grade sinter waste heat recovery[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 53: 103915.

[14] 吴俐俊, 梁星原, 韦增志, 等. 高炉冲渣水有机朗肯循环波纹板式冷凝器传热特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1778-1788.
(Wu Li-Jun, Liang Xing-Yuan, Wei Zeng-Zhi, et al. Heat transfer characteristics of a corrugated plate type condenser in the organic Rankine cycle for blast furnace slag water treatment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(12): 1778-1788.)

[15] 李孟想. 冶金企业低品位余热回收技术的创新与优化[J]. 能源与节能, 2024, (5): 84-87.
(Li Mengxiang. Innovation and Optimization of low-grade waste heat recovery technology in metallurgical enterprises[J]. Energy and Energy Conservation, 2024, (5): 84-87.)

[16] 郭宝鑫. 集成 ORC 和双效 ARC 的 SOFC-CCHP 系统的热力学分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
(Guo Baixin. Thermodynamic analysis of SOFC-CCHP system integrating ORC and dual-efficiency ARC [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.)

[17] 徐梦凯, 李舒宏, 金正浩. 氨-水-溴化锂三元工质氨吸收式制冷性能[J]. 化工学报, 2021, 72(增刊1): 127-133.
(Xu Mengkai, Li Shuhong, Jin Zhenghao. Performance of ammonia-water-lithium bromide tri-component working fluid ammonia absorption refrigeration system [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 72(S1): 127-133.)

[18] Zhou T, Liu J, Ren J, et al. Conceptual design, modelling and optimization of an integrated system by combining organic Rankine cycle and absorption refrigeration cycle for efficient energy recovery [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022, 133: 104276.

[19] 谢攀, 隆瑞, 刘政, 等. 低温工业余热利用 ORC 工质选择[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(9): 1834-1837.
(Xie Pan, Long Rui, Liu Zheng, et al. Selection of ORC working fluid for low-temperature industrial waste heat utilization [J]. Chinese Journal of Engineering Thermology, 2016, 37(9): 1834-1837.)

[20] 段文婷, 张桥. 煤基冷热电联供优化方法[J]. 化工学报, 2026, 77(4): 2138-2146.
(Duan Wenting, Zhang Qiao. Optimization method for coal-based combined cooling, heating and power generation [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2026, 77(4): 2138-2146.)

[21] Yang S C, Hung T C, Feng Y Q, et al. Experimental investigation on a 3 kW organic Rankine cycle for lowgrade waste heat under different operation parameters[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 756-764.

[22] Mohammadi A, Kasaeian A, Pourfayaz F, et al. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 397-406.

[23] 万玥汝. 基于海洋温差能的氨水吸收式制冷研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
(Wan Yuyu. Research on ammonia water absorption refrigeration based on ocean thermal energy[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.)