

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-438-08

抛物面槽式太阳能直接汽化 有机朗肯循环系统热经济性能评价

魏泰保 穆永超 赵胜宇

(河北工程大学能源与环境工程学院 邯郸 056000)

【摘要】 基于抛物面槽式太阳能直接汽化有机朗肯循环系统, 研究蒸发温度、冷凝温度及过热度对系统热效率、炯效率、总炯损失与平准化能源成本的影响。结果显示: 系统热效率、炯效率与蒸发温度、过热度呈正相关, 和冷凝温度呈负相关; 总炯损失与蒸发温度、过热度呈负相关, 和冷凝温度呈正相关; 在经济性能中, 随着蒸发温度的升高, 平准化能源成本呈先下降后上升的趋势, 而与冷凝温度呈正相关、与过热度呈负相关。在关键参数变化范围内, R141b 的系统热效率、炯效率最大, 而总炯损失最小, 表现出较好的热力学性能, 而 R123 的 LCOE 最小, 显示出较好的经济性能。

【关键词】 抛物面槽式; 有机朗肯循环; 平准化能源成本; 系统热效率

中图分类号 TK 123 文献标志码 A

Thermo-Economic Performance Evaluation of A Parabolic Trough Solar Direct Vaporization Organic Rankine Cycle System

Wei Taibao Mu Yongchao Zhao Shengyu

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056000)

【Abstract】 This study is based on a parabolic trough solar direct vaporization Organic Rankine Cycle (ORC) system, investigating the effects of evaporation temperature, condensation temperature and superheat degree on the system's thermal efficiency, exergy efficiency, total exergy loss and levelized cost of energy (LCOE). The results show that: the system's thermal efficiency and exergy efficiency are positively correlated with evaporation temperature and superheat degree, but negatively correlated with condensation temperature; the total exergy loss is negatively correlated with evaporation temperature and superheat degree, yet positively correlated with condensation temperature. In terms of economic performance, the LCOE first decreases and then increases with the rise of evaporation temperature, while it is positively correlated with condensation temperature and negatively correlated with superheat degree. Within the variation range of key parameters, the working fluid R141b achieves the maximum thermal efficiency and exergy efficiency as well as the minimum total exergy loss, thus exhibiting superior thermodynamic performance; whereas R123 yields the minimum LCOE, demonstrating preferable economic performance.

【Keywords】 Parabolic trough; Organic Rankine Cycle; Levelized cost of energy; System thermal efficiency

0 引言

能源行业的脱碳是向低碳和可持续未来发展

的关键要素^[1,2]。因此, 近年来, 在关注高品位热能的同时, 低品位热能的转化也受到了广泛关注。

作者简介: 魏泰保 (2002.09-), 男, 硕士研究生, E-mail: 473755935@qq.com

通讯作者: 穆永超 (1986.01-), 男, 博士, 副教授, E-mail: muyongchao@hebeu.edu.cn

收稿日期: 2026-01-02

太阳能热能是低品位热能的潜在来源之一^[3]。过去有多种将低品位热能转化为电能的技术被报道,如卡琳娜循环、斯特林循环、水蒸气朗肯循环以及有机朗肯循环^[4,5]。其中,有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)似乎是中低热能应用中最受欢迎且最具前景的技术之一^[6,7]。以太阳能热能为动力的有机朗肯循环是将太阳辐射转化为电能的一种极具吸引力的选择。太阳能有机朗肯循环系统通常分为两种,即直接蒸汽发生(DVG)太阳能有机朗肯循环系统和间接式太阳能有机朗肯循环系统^[8,9]。与间接式太阳能有机朗肯循环系统相比,直接蒸汽发生太阳能有机朗肯循环系统具有更高的热效率、更低的复杂性和更低的成本等优势^[10]。

目前对于抛物面槽式太阳能直接汽化有机朗肯循环系统研究较少,主要集中在工质的研究。Alvi Jahan Zeb 等^[11]研究了三种相变材料对基于直接蒸汽发电的太阳能 ORC 系统的动态性能影响,同时选取了 12 种干性工质在一种嵌入相变储能的直接蒸汽发电的太阳能 ORC 中研究了对蓄热水箱及整体系统性能的影响。Manoj Kumar 等^[12]选择工质 R134a 和 R717,评估和比较了直接蒸汽太阳能 ORC 与基于相变材料的潜热储存系统的关键热力学性能指标。V M Maytorena 等^[13]研究了 benzene 在使用 PTC (Parabolic Trough Collector) 的 DVG-ORC 的换热特性。K E Dami 等^[14]以 acetone 作为工质研究了使用真空管 DVG-ORC 系统在不同热流密度时系统的性能,结果得到该系统能够得到 218kWh/年的发电量。Jing Li 等^[15]研究了 17 种干工质和等熵工质对直接蒸汽太阳能有机朗肯循环的 ORC 效率、集热器效率和系统效率的影响。G Xu 等^[16]评估了使用线性菲涅尔集热器的超临界 DVG-ORC 系统,结果得到饱和温度的提高能够提高系统效率,其中 cyclohexane 有着最高的系统效率,达到了 19.65%,同时在较高温度时有着最大的净输出功,被认为是该系统中最合适的工质。

DVG-ORC 发生系统以太阳能集热器为蒸发器,以地埋管循环水为冷源,同时利用冷凝热可对土壤进行补热,有效减少焓损失^[17]。基于此,本文以 PTC 作为太阳能集热器,基于 DVG-ORC 系统,在以地埋管循环水为冷源,冷却水出水温度为 30℃ 的工况下^[18],以 R1233zd(E)、R1224yd(Z)、R245fa、R600、R141b、R123 作为循环工质,探

究不同关键参数对 DVG-ORC 系统热经济性能的影响。

1 DVG-ORC 系统原理

1.1 系统描述

图 1 所示为 DVG-ORC 系统原理图。DVG-ORC 系统由抛物面槽式太阳能集热器、工质泵、膨胀机、冷凝器等组成。系统工作流程:吸热过程 2-4,抛物面槽式太阳能集热器充当蒸发器直接汽化有机工质,有机工质由液态转变为过热气态;膨胀过程 4-5,过热气态工质推动螺杆膨胀机做功发电;冷凝过程 5-1,做功后的乏气经冷却水循环系统中的冷却水冷凝后变成低温低压液态有机工质;加压过程 1-2,低温低压液态工质通过工质泵加压后再次进入抛物面槽式太阳能集热器,开始下一次循环。

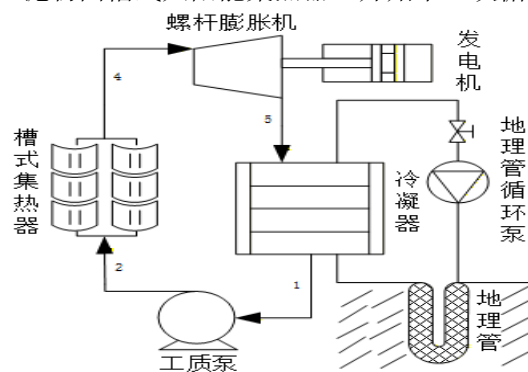


图 1 DVG-ORC 系统图

Fig.1 DVG-ORC system diagram

1.2 工质选择

干工质相较于湿工质能够得到较高的效率,同时能够避免由于膨胀机内气体夹杂液滴对膨胀机产生损害。另一方面,由于 PTC 能够达到较高温度,所选工质应具有较高的临界温度。同时还应考虑工质的安全性要求,应尽量选择无毒不易燃烧、不爆炸且与设备材料和润滑油有良好的兼容性,要有较低的臭氧消耗潜力(Ozone Depletion Potential, ODP)和全球变暖潜力(Global Warming Potential, GWP),以避免对环境造成危害。R245fa 具有不可燃、稳定性好等优点,且在 80~150℃ 温区效率较高;R141b 和 R123 临界温度较高,与 PTC 热源匹配性好。综上,为平衡环保性、安全性与热力学性能,本文选用 R1233zd(E)、R1224yd(Z)、R245fa、R600、R141b、R123 共六种工质作为候选工质,其热物性参数如表 1 所示。

表 1 工质参数

Table 1 Working medium parameters

工质	临界温度/°C	ODP	GWP
R1233zd(E)	165	0.00034	1
R1224yd(Z)	150.54	0.00023	0.88
R245fa	154.01	0	820
R600	151.9	0	0.1
R141b	204.5	0.11	700
R123	183.7	0.02	770

2 系统数学模型

2.1 系统热力性能模型

为简化数学模型,作出如下假设:循环过程始终处于稳定状态,以便进行能量平衡分析;忽略管道及设备热损失的影响且换热器及管道中的压力损失忽略不计,突出工质热力循环过程对系统的影响;膨胀机效率为恒定值,并采用 EES 软件自带工质热物性参数,确保不同工质做功能力对比的可靠性。表 2 为 DVG-ORC 系统计算条件。

表 2 DVG-ORC 系统计算参数

Table 2 DVG-ORC system calculation parameters

参数	数值
环境温度/°C	15
冷却水出水温度/°C	30
冷凝器窄点温度/°C	5
膨胀机等熵效率/%	85
机械效率/%	97
太阳表面热力学温度/°C	5500
工质泵效率/%	70
太阳能辐射强度/(W/m ²)	1000
系统发电量/kW	100

本文以热电效率、炯效率、总炯损失作为评价指标进行讨论。系统热效率由式(1)计算。

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{el}}}{Q_{\text{sol}}} \quad (1)$$

式中: P_{el} 为系统发电量, kW; Q_{sol} 为太阳辐射能量, kW。

$$P_{\text{el}} = P_e - P_p \quad (2)$$

式中: P_e 为膨胀机发电量, kW; P_p 为工质泵的耗电量, kW。

$$P_e = m(h_4 - h_5)\eta_e \quad (3)$$

式中: m 为工质质量流量, kg/s; h_4 为膨胀机进口比焓, kJ/kg; h_5 为膨胀机出口比焓, kJ/kg; η_e 为机械效率。

$$P_p = \frac{m(h_2 - h_1)}{\eta_{\text{mot}}} \quad (4)$$

式中: h_2 为泵出口比焓, kJ/kg; h_1 为泵进口比焓, kJ/kg; η_{mot} 为工质泵效率。

$$Q_{\text{sol}} = \frac{m(h_4 - h_2)}{\eta_{\text{sol}}} \quad (5)$$

式中: h_4 为集热器出口比焓, kJ/kg; η_{sol} 为集热器效率。

太阳能集热器效率拟合公式如式(6)所示。

$$\eta_{\text{sol}} = 0.7408k_o - \frac{0.0432(T_2 - T_0)}{G_{\text{sol}}} - 0.00503G_{\text{sol}} \left(\frac{T_2 - T_0}{G_{\text{sol}}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: k_o 为入射角修正系数; T_2 为工质泵出口温度, °C; T_0 为环境温度, °C; G_{sol} 为太阳辐射强度, W/m²。

入射角修正系数计算公式如式(7)所示。

$$k_o = \cos(O) - \frac{5.25091 \times 10^{-4} \times 3.14O}{180} - 2.859621 \times 10^{-5} \times \left(\frac{3.14O}{180} \right)^2 \quad (7)$$

式中: O 为入射角, °。

炯效率由式(8)计算:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{P_{\text{el}}}{Ex_{\text{sol}}} \quad (8)$$

式中: Ex_{sol} 为太阳能辐射炯, kW。

太阳能辐射炯:

$$Ex_{\text{sol}} = Q_{\text{sol}} - \frac{4Q_{\text{sol}}(T_o + 273)}{3(T_s + 273)} + \frac{Q_{\text{sol}}}{3} \left(\frac{T_o + 273}{T_s + 273} \right)^4 \quad (9)$$

式中: T_o 为环境温度, °C; T_s 为太阳表面热力学温度, °C

各状态点炯计算公式:

$$Ex_{\text{sol}} = m[(h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o)] \quad (10)$$

式中: h_i 为各状态点工质对应的焓, kJ/kg; s_i 为各状态点工质对应的熵, kJ/(kg·K); h_o 、 s_o 为环境状态下工质的焓、熵, kJ/kg、kJ/(kg·K)。

抛物面槽式太阳能集热器损失:

$$Ex_{PTC} = Ex_{sol} + Ex_{2-4} - Ex_{4} \quad (11)$$

膨胀机损失:

$$Ex_{exp} = Ex_{4-5} - Ex_{5} - P_{el} \quad (12)$$

冷凝器损失:

$$Ex_{con} = Ex_{5-1} - Q_{dw,ex} \quad (13)$$

式中: $Q_{dw,ex}$ 为冷却水焓值, kW。

$$Q_{dw,ex} = m(h_5 - h_1) \left[1 - \left(\frac{T_0 + 273}{T_H + 273} \right) \right] \quad (14)$$

式中: T_H 为冷却水平均温度, °C

工质泵损失:

$$Ex_{pump} = Ex_{1-2} + P_p - Ex_{2} \quad (15)$$

总损失为:

$$Ex_{total} = Ex_{PTC} + Ex_{exp} + Ex_{con} + Ex_{pump} \quad (16)$$

2.2 系统经济性能模型

平准化能源成本 (LCOE) 是一个重要的系统经济性能指标, 即系统净输出功为 1kWh 时的总投资成本。系统总投资成本为四个部件的投资成本, 各部件投资成本公式如表 3^[19]所示。

表 3 部件投资成本

Table 3 Component investment cost

部件	投资成本/\$
抛物面槽式太阳能集热器	13925 (A_{sol}) 0.17
膨胀机	4750 (P_e) 0.75+60 (P_e) 0.95
冷凝器	150 (A_{con}) 0.8
工质泵	3500 (P_p) 0.41

集热器面积计算如式 (17) 所示。

$$A_{sol} = \frac{1000Q_{sol}}{G_{sol}} \quad (17)$$

冷凝器面积计算如式 (18) 所示。

$$A_{con} = \frac{1000m(h_5 - h_1)}{U\Delta T} \quad (18)$$

式中: U 为总传热系数, W/m², 取 250W/m²^[19];

ΔT 为对数平均温差, °C

$$\Delta T = \frac{(T_5 - T_{out}) - (T_1 - T_{in})}{\ln \frac{(T_5 - T_{out})}{T_1 - T_{in}}} \quad (19)$$

式中: T_5 、 T_1 分别为工质在冷凝器进出口温度, °C; T_{in} 、 T_{out} 为冷却水进出口温度, °C

系统年投资成本:

$$Z_{year} = Z_{tot}CRF \quad (20)$$

式中: Z_{tot} 为系统总投资成本, \$; CRF 为成本回收系数, %。

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (21)$$

式中: i 为年利率, 取 6.15%; n 为系统使用寿命, 取 25a。

系统维护成本:

$$Z_{main} = Z_{year}Q_{wang} \quad (22)$$

式中: Q_{wang} 为系统运行维护成本系数, 取 2.5%。

综上, 平准化能源成本的计算公式如式 (23) 所示。

$$LCOE = \frac{Z_{year} + Z_{main}}{t_{op}P_{el}} \quad (23)$$

式中: t_{op} 为年运行小时数, 取 6500h。

3 结果与分析

3.1 蒸发温度

图 2 所示为蒸发温度对系统热效率的影响。从图 2 可以看出, 随着工质蒸发温度的增加, 系统热效率不断增加, 在蒸发温度相同时, R245fa 和 R124yd (Z) 特性曲线基本重合, 且随着蒸发温度的升高, 系统热效率增加速率不断减小。以 R123 为例, 当工质蒸发温度为 100°C 时, 系统热效率为 8.623%, 当蒸发温度为 150°C 时, 热效率增至 11.6%。在蒸发温度为 150°C 时, R141b 热效率比 R123 高 0.32%, 比热效率最低的 R600 高 1.54%。

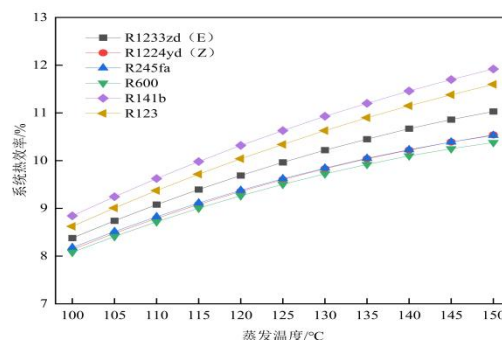


图 2 蒸发温度对系统热效率的影响

Fig.2 Influence of evaporation temperature on system efficiency

图 3 所示为蒸发温度对焓效率的影响。从图 3 可以看出, 工质系统焓效率与蒸发温度变化呈正比关系, 且随着蒸发温度的升高, 增加速率不断降低。

当蒸发温度相同时, R245fa 和 R1244yd (Z) 特性曲线基本重合。以 R123 为例, 当工质蒸发温度为 100℃ 时, 焓效率为 9.185%, 当蒸发温度为 150℃ 时, 焓效率增至 12.35%。在蒸发温度为 150℃ 时, R141b 焓效率比 R123 高 0.34%, 比焓效率最低的 R600 高 1.63%。

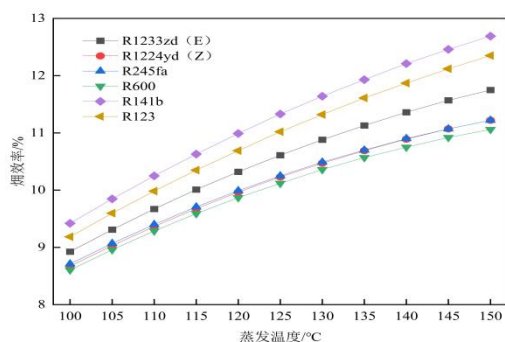


图 3 蒸发温度对焓效率的影响

Fig.3 Influence of evaporation temperature on exergy efficiency

图 4 所示为蒸发温度对总焓损失的影响。从图 4 可以看出, 总焓损失与蒸发温度变化成反比关系, 且随着蒸发温度的升高, 减小速率不断降低。以 R1233zd (E) 为例, 当工质蒸发温度为 100℃ 时, 总焓损失为 1100kW, 当蒸发温度为 150℃ 时, 总焓损失降至 838kW。在蒸发温度为 150℃ 时, 总焓损失最大的 R600 比 R1233zd (E) 高 58.1kW; 总焓损失最小的 R141b 比 R1233zd (E) 低 62.1kW。

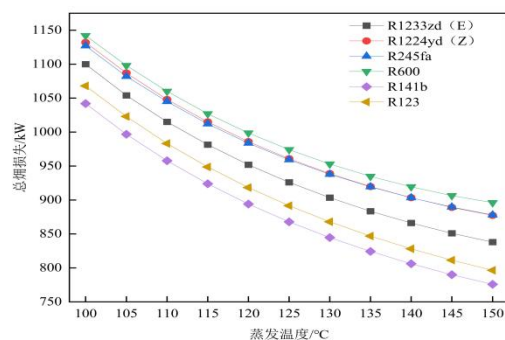


图 4 蒸发温度对总焓损失的影响

Fig.4 Influence of evaporation temperature on total exergy loss

图 5 所示为蒸发温度对平准化能源成本的影响。从图 5 可以看出, 当蒸发温度相同时, 各工质平准化能源成本大小依次为 R600、R245fa、R1224yd (Z)、R1233zd (E)、R141b、R123,

且各工质平准化能源成本随着蒸发温度的升高先降低后增加的趋势。以 R141b 为例, 当蒸发温度为 100℃ 时, 平准化能源成本为 0.02738\$/kWh, 在蒸发温度为 125℃ 时达到最低点为 0.0272\$/kWh, 当蒸发温度为 150℃ 时增至 0.02738\$/kWh。

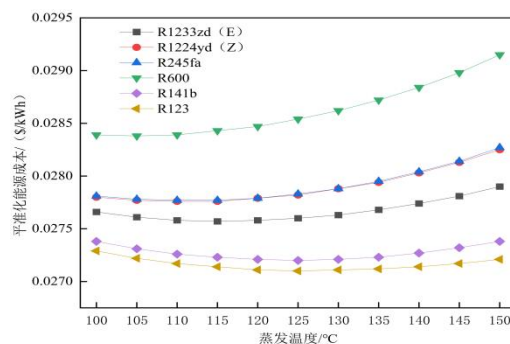


图 5 蒸发温度对平准化能源成本的影响

Fig.5 Influence of evaporation temperature on LCOE

3.2 冷凝温度

图 6 所示为冷凝温度对系统热效率的影响。从图 6 可以看出, 随着冷凝温度的升高, 系统热效率不断下降, R245fa 和 R1224yd (Z) 特性曲线基本重合, R141b 在不同冷凝温度下系统热效率最高, R123 仅次于 R141b, R600 最低。例如, 当冷凝温度为 32℃ 时, 各工质能达到最大系统效率, R141b 为 11.71%, R123 为 11.4%, R600 为 10.18%。

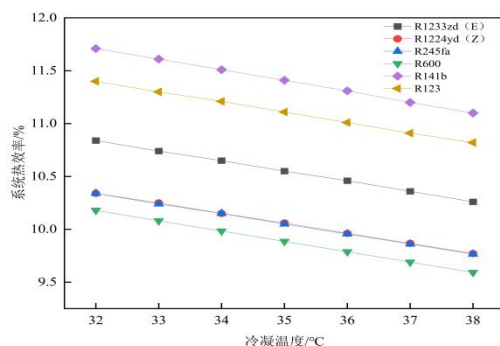


图 6 冷凝温度对系统热效率的影响

Fig.6 Influence of condensation temperature on system efficiency

图 7 所示为冷凝温度对焓效率的影响。从图 7 可以看出, 随着冷凝温度的升高, 系统焓效率不断下降, R141 在不同冷凝温度下焓效率最高, R123 仅次于 R141b, R600 最小。例如, 当冷凝温度为 32℃ 时, 各工质能达到最大焓效率, R141b 为 12.48%, R123 和 R600 分别为 12.14% 和 10.85%。

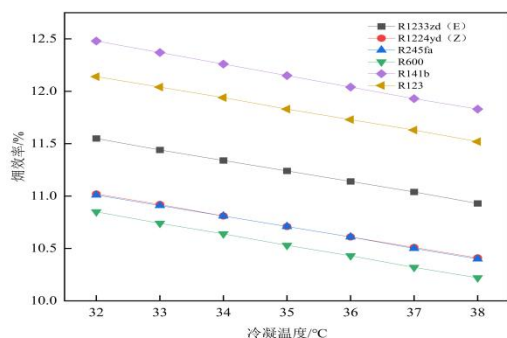


图 7 冷凝温度对炯效率的影响

Fig.7 Influence of condensation temperature on exergy efficiency

图 8 所示为冷凝温度对总炯损失的影响。从图 8 可以看出, 随着冷凝温度的升高, 总炯损失不断增加, 且当冷凝温度相同时, 各工质总炯损失大小依次为 R600、R245fa、R1224yd (Z)、R1233zd (E)、R123、R141b。以 R1233zd (E) 为例, 当冷凝温度为 32℃ 时, 总炯损失为 851.3kW, 当冷凝温度为 38℃ 时, 增至 893.8kW。当冷凝温度为 32℃ 时, R1233zd (E) 总炯损失比 R141b 高 63.3kW, 比 R600 低 60.3kW。

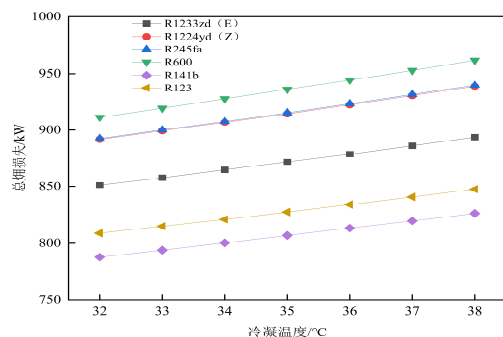


图 8 冷凝温度对总炯损失的影响

Fig.8 Influence of condensation temperature on total exergy loss

图 9 所示为冷凝温度对平准化能源成本的影响。从图 9 可以看出, 随着冷凝温度的升高, 平准化能源成本不断增加, 且当冷凝温度相同时, 各工质平准化能源成本大小依次为 R600、R245fa、R1224yd (Z)、R1233zd (E)、R141b、R123。以 R141b 为例, 当冷凝温度为 32℃ 时, 平准化能源成本为 0.02741\$/kWh, 当冷凝温度为 38℃ 时, 增至 0.02751\$/kWh。当冷凝温度为 32℃ 时, R141b 平准化能源成本比 R123 高 0.00016\$/kWh, 比 R600

低 0.00182\$/kWh。

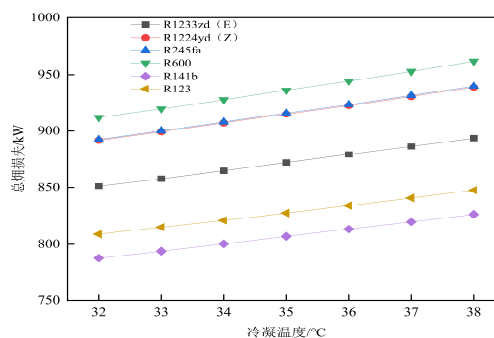


图 9 冷凝温度对平准化能源成本的影响

Fig.9 Influence of condensation temperature on LCOE

3.3 过热度

图 10 所示为过热度对系统热效率的影响。从图 10 可以看出, 系统热效率随着过热度的升高呈现上升趋势, 且在相同的过热度下, 系统热效率越高的工质上升速率越慢。以 R141b 和 R600 为例, 当过热度为 3℃ 时, 系统热效率分别为 11.64%、9.942%, 当过热度为 4℃ 时, 系统热效率分别增至 11.65%、9.994%。当过热度为 10℃ 时, R1233zd (E) 系统热效率为 10.84%, 比 R600 高 0.66%, 比 R141b 低 0.87%。

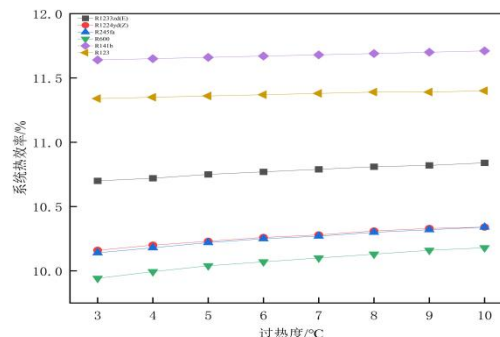


图 10 过热度对系统热效率的影响

Fig.10 The effect of overheating on system efficiency

图 11 所示为过热度对炯效率的影响。从图 11 可以看出, 随着过热度的升高, 炯效率不断增加, 且在相同的过热度下, 炯效率越高的工质上升速率越慢。以 R141b 和 R600 为例, 当过热度为 3℃ 时, 炯效率分别为 12.4%、10.59%, 当过热度为 4℃ 时, 炯效率分别增至 12.41%、10.65%。当过热度为 10℃ 时, R1233zd (E) 炯效率为 11.55%, 比 R600 高 0.7%, 比 R141b 低 0.93%。

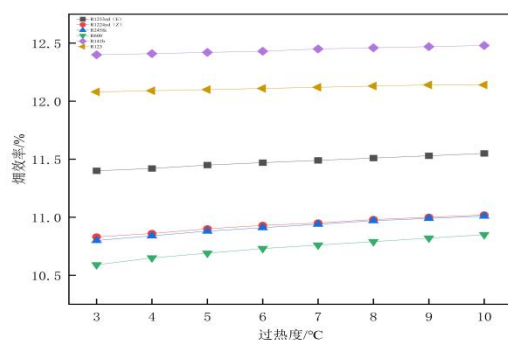


图 11 过热度对炯效率的影响

Fig.11 Influence of overheating on exergy efficiency

图 12 所示为过热度对总炯损失的影响。从图 12 可以看出,随着过热度的升高,总炯损失不断降低,且在相同的过热度下,总炯损失越高的工质下降速率越快。以 R141b 和 R600 为例,当过热度为 3°C 时,总炯损失分别为 792.9kW、933.2kW,当过热度为 4°C 时,总炯损失分别为 792.2kW、928.5kW。当过热度为 10°C 时, R1233zd (E) 总炯损失为 851.3kW,比 R141b 高 63.3kW,比 R600 低 60.3kW。

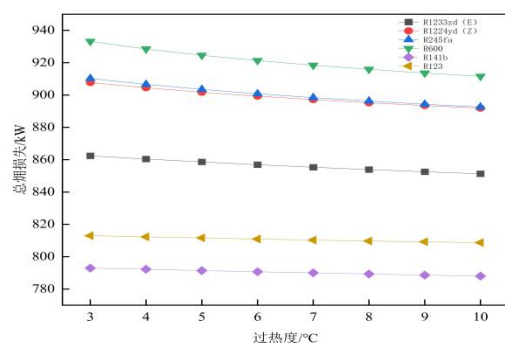


图 12 过热度对总炯损失的影响

Fig.12 Influence of overheating on total exergy loss

图 13 所示为过热度对平准化能源成本的影响。从图 13 可以看出,随着过热度的升高,平准化能源成本不断降低,且在相同的过热度下,平准化能源成本越高的工质下降速率越快。以 R123 和 R600 为例,当过热度为 3°C 时,平准化能源成本分别为 0.02739\$/kWh、0.02972\$/kWh,当过热度为 4°C 时,分别降至 0.02737\$/kWh、0.02961\$/kWh。当过热度为 10°C 时, R1233zd (E) 平准化能源成本为 0.02795\$/kWh,比 R123 高 0.0007\$/kWh,比 R600 低 0.00128\$/kWh。

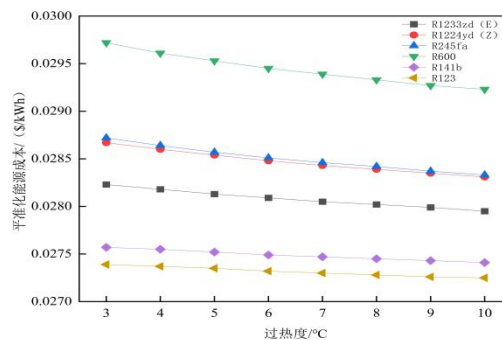


图 13 过热度对平准化能源成本的影响

Fig.13 Influence of overheating on LCOE

4 结论

(1) 对于给定的 ORC 关键参数,系统热效率、炯效率与蒸发温度均呈正相关,总炯损失与蒸发温度呈反比关系,而随着蒸发温度的升高,平准化能源成本呈先下降后上升的趋势。在蒸发温度变化过程中, R141b 的系统热效率、炯效率最大,总炯损失最小,而 R123 的系统 LCOE 最小。

(2) 当蒸发温度一定时,系统热效率、炯效率与冷凝温度呈反比关系,而总炯损失、平准化能源成本与冷凝温度呈正比关系。在冷凝温度变化范围内,工质 R141b 的系统热效率、炯效率最大,总炯损失最小,表现出较好的热力学性能。

(3) 当蒸发温度、冷凝温度一定时,系统热效率、炯效率与过热度呈正相关,而总炯损失、平准化能源成本与过热度呈负相关。在关键参数变化范围内, R123 表现出较好的经济性能。

参考文献:

- [1] 毛静雯,徐斌,胡宜康,等.太阳能有机朗肯循环研究与应用综述[J].低温与超导,2020,48(6):77-83.
- [2] 和婷,李瑞芳,黄峻伟,等.不同工质对有机朗肯循环热电联产系统热力性能影响的研究[J].电力科技与环保,2025,41(4):593-600.
- [3] 郭东奇,王怀信,潘利生.余热发电有机朗肯循环系统性能实验研究[J].太阳能学报,2015,36(6):1325-1330.
- [4] 吴志祥,冯辉君,陈林根,等.基于热效率最大的卡琳娜-有机朗肯联合循环构形热力学优化[J].工程热物理学报,2023,44(1):31-37.
- [5] 徐晓虹.低品位热源驱动朗肯循环和卡琳娜循环的性能对比[J].现代盐化工,2018,45(5):58-59.

- [6] 韩中合,叶依林,刘赞.不同工质对太阳能有机朗肯循环系统性能的影响[J].动力工程学报,2012,32(3):229-234.
- [7] 郭丛,杜小泽,杨立军,等.地热能有机朗肯循环发电系统性能分析[J].热力发电,2014,43(6):11-16.
- [8] V M Maytorena, D A Buentello-Montoya. Multiphase simulation and parametric study of direct vapor generation for a solar organic Rankine Cycle[J]. Appl. Therm. Eng, 2022,216:119096.
- [9] Zeb J A, Yu J, Yongqiang F, et al. Performance Assessment of Direct Vapor Generation Solar Organic Rankine Cycle System Coupled with Heat Storage[J]. Sustainability, 2022,14(22):15296-15296.
- [10] XU Guoqiang, SONG Gu, ZHU Xiaoxun, et al. Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator[J]. Appl. Therm. Eng, 2015,80:196-204.
- [11] Zeb J A, Yongqiang F, Qian W, et al. Effect of working fluids on the performance of phase change material storage based direct vapor generation solar organic Rankine cycle system[J]. Energy Reports, 2021:7348-7361.
- [12] Kumar M, Ray K A, Rakshit D. Comparative thermodynamic analysis of a direct vapor generation solar organic Rankine cycle synergistically integrated with latent heat storage for different working fluids[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025,47(5):206-206.
- [13] Maytorena V M, Buentello-Montoya D A. Multiphase simulation and parametric study of direct vapor generation for a solar organic Rankine Cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2022,216.
- [14] Emmanuel K D, Ricardo C B, Saul I, et al. Numerical Simulation of Direct Solar Vapor Generation of Acetone for an Organic Rankine Cycle Using an Evacuated Tube Collector[J]. J. Sol. Energy Eng, 2021,143(2):021010.
- [15] Li J, Alvi Z J, Pei G, et al. Effect of working fluids on the performance of a novel direct vapor generation solar organic Rankine cycle system[J]. Applied Thermal Engineering, 2016:98786-98797.
- [16] Xu G, Song G, Zhu X, et al. Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator[J]. Applied Thermal Engineering, 2015:80196-80204.
- [17] 吴国策,朱兴仪,赵英汝.一种新型的太阳能驱动 ORC-HP 热电联产耦合系统[J].化工进展,2017,36(B11):195-202.
- [18] Yuzhu C, Jinzhao X, Dandan Z, et al. Exergo-economic 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.
- [19] Boyaghchi A F, Chavoshi M, Sabeti V. Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations[J]. Energy, 2018:14538-14551.

(上接第 363 页)

- [19] 陈良洲,伍昊,杨浩,等.基于 XGBoost 和证据距离的空调机组故障诊断集成模型方法[J/OL].华中科技大学学报(自然科学版),2026,54(5):9-15.
- [20] Deru M, Hayes M, Vrabel K, et al. Long and Winding Road to Higher Efficiency-The RTU Story: Preprint[J]. Renewable Energy, 2021.
- [21] Fenaughty K, Parker D. Evaluation of air conditioning performance degradation: opportunities from diagnostic methods[C]. 2018 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2018.
- [22] Llopis-Mengual B, Navarro-Peris E. Supplementary material - Selection of relevant features to detect and diagnose single and multiple simultaneous soft faults in air-source heat pumps[DS/OL]. Mendeley Data, 2023. <https://data.mendeley.com/datasets/tns57t4gmg/2>.
- [23] Xu Y, Hu C, Wu Q, et al. Research on particle swarm optimization in LSTM neural networks for rainfall-runoff simulation[J]. Journal of Hydrology, 2022,608: 127553.
- [24] Li S, Jin X, Xuan Y, et al. Enhancing the Locality and Breaking the Memory Bottleneck of Transformer on Time Series Forecasting[C]. arXiv, 2020.