

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403118

利用液化天然气冷能的冷热电联供系统 热力分析与优化

王长顺¹, 宋昕洋², 杨帆¹, 乔焱¹, 李洋¹, 高月¹, 李鹏飞¹

(1.辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001;

2.朝阳红山化工有限责任公司, 北京 122300)

[摘要] 为解决以甲烷作为燃料的固体氧化物电池余热利用、碳捕集以及液化天然气冷能利用问题, 建立了一种新型的冷热电联供系统。该系统包括改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环、跨临界 CO₂ 回热朗肯循环和二级混合工质有机朗肯循环, 对循环系统进行热力学分析、设备焓分析、经济成本分析, 并利用遗传算法对系统参数进行多目标优化。仿真分析结果表明: 提升改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环的膨胀机入口压力、跨临界 CO₂ 回热朗肯循环的膨胀机入口温度与二级朗肯循环中 R14 的质量分数可提升系统循环净功、热效率、焓效率并降低平均单位成本; 在最优工况条件下, 系统热效率、焓效率、平均单位成本分别为 64.70%、47.85%、24.20 美元/GJ。

[关键词] 液化天然气; 冷热电联产; 混合工质; 多目标优化; 经济分析

[引用本文格式] 王长顺, 宋昕洋, 杨帆, 等. 利用液化天然气冷能的冷热电联供系统热力分析与优化[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 21-30. WANG Changshun, SONG Xinyang, YANG Fan, et al. Thermal analysis and optimization of combined cooling, heating and power system using LNG cold energy[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 21-30.

Thermal analysis and optimization of combined cooling, heating and power system using LNG cold energy

WANG Changshun¹, SONG Xinyang², YANG Fan¹, QIAO Yan¹, LI Yang², GAO Yue¹, LI Pengfei¹

(1.College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

2.Chaoyang Hongshan Chemical Co., Ltd., Beijing 122300, China)

Abstract: In order to solve the problems of waste heat utilization, carbon capture and liquid natural gas (LNG) cold energy utilization of solid oxide batteries fueled by methane, a new type of combined cooling, heating and power system was established. The system includes the improved recompression supercritical mixed working fluid Brayton cycle, the transcritical CO₂ heat recovery Rankine cycle and the secondary mixed working fluid organic Rankine cycle. The thermodynamic analysis, equipment exergy analysis, economic cost analysis of the circulation system, and the multi-objective optimization of the system by using the genetic algorithm in MATLAB. The results show that, increasing P₁, T₁₆ and the mass fraction of R14 in the second-stage Rankine cycle can improve the network, thermal efficiency, and exergy efficiency of the system, and reduce the average unit cost. P₁ is the pressure at inlet the expander in the compressed supercritical mixed working fluid Brayton cycle, T₁₆ is the inlet temperature of the expander in the transcritical CO₂ regenerative Rankine cycle. Under the optimal working conditions, the thermal efficiency, exergy efficiency and average unit cost of the system are 64.70%, 47.85% and 24.20 dollars/GJ.

Key words: liquefied natural gas; combined cooling heating and power supply; mixed working medium; multi-objective optimization; economic analysis

收稿日期: 2024-03-31 网络首发日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52006094); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220725)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52006094); Liaoning Provincial Department of Education Fundamental Research Project (LJKMZ20220725)

第一作者简介: 王长顺(2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为液化天然气冷能的综合利用, 2635545056@qq.com.

通信作者简介: 杨帆(1981), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为液化天然气冷能综合利用, yangfanfan0902@126.com.

为深入贯彻落实“双碳”目标，减少温室气体排放，我国不断地推动能源转型。提高天然气等替代能源的利用率对实现“双碳”目标具有重要的意义^[1]。液化天然气(liquefied natural gas, LNG)是天然气经处理后在常压下冷却至 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所形成的液体，因此 LNG 具有巨大的冷能储备^[2-4]。以甲烷作为直接燃料的固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)具有系统简单、效率高等优点，但反应后会有温度较高的排气余热，能量未完全利用。因此，将 LNG 与 SOFC 余热相结合，对低温冷能与高温余热进行有效地梯级利用具有重大实践意义。

在利用 LNG 冷能与 SOFC 余热的研究上，许多学者提出了不同的系统模型。大部分学者采用超临界 CO_2 布雷顿循环与朗肯循环相结合的方式对 SOFC 余热梯级回收利用。Wu 等人^[5]将 LNG 冷能与 SOFC 余热相结合，提出将超临界 CO_2 再压缩布雷顿循环和有机闪蒸朗肯循环(organic flash Rankine cycle, OFRC)相结合的多联产系统，提高了循环系统的热效率。Dilek 等人^[6]提出了一种联合电力系统，利用 LNG 冷能，将超临界 CO_2 布雷顿循环与二级有机朗肯(organic Rankine cycle, ORC)循环相结合，在系统最优工况点下热效率可达到 46.33%，焓效率为 33.26%。Chen 等人^[7]研究了利用 SOFC 余热、燃气轮机与超临界 CO_2 布雷顿循环相结合并对系统进行优化，结果表明在最优解工况下，具有较低的成本与较好的焓效率。还有一些学者采用多级串并联 ORC 循环的方式对高温余热梯级回收利用。乔焱等^[8]利用 LNG 冷能与烟气余热，提出将 CO_2 跨临界回热朗肯循环与三级 ORC 相结合，系统净输出功可达 2 425.57 kW。Zhao 等人^[9]提出了一种新型的 LNG 冷热电结合冷能利用系统，将燃气轮机、4 个 ORC 循环和天然气直接膨胀结合，在较低的大气温度下通常具有较高的焓效率。

为了使循环系统能够更好地匹配热源温度，许多学者通过改进循环形式，筛选混合工质的方式，提升系统热效率，减少能源浪费。郭嘉琪等^[10]提出在高温工况下， CO_2 混合工质布雷顿循环可以有效提高循环发电效率，并对比了不同混合工质的气体种类，结果表明氙气(Kr)与 CO_2 混合可以有效地提高布雷顿循环的热效率。Robert 等人^[11]分析了超临界 CO_2 布雷顿循环不同的混合工质对系统影响，结果发现氦气(He)、Kr 等工质的加入可以降低 CO_2 临界温度，从而提升热效率。Kr 等作为惰性气体，可以有效避免设备材料腐蚀，具有较好的经济性。

针对目前国内外研究现状，SOFC 余热回收与 LNG 冷能结合利用结构相对简单，但对 SOFC 余热与 LNG 冷能梯级利用的效果并不理想，导致大量能量被浪费。系统内换热较少，仅利用 SOFC 余热导致系统内工质膨胀后余热被大量浪费，联合循环系统单一工质导致发电效率不高。

本文提出了一种新型的冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统，将改进后的超临界混合工质布雷顿循环、跨临界 CO_2 回热朗肯循环与二级混合工质 ORC 相结合，利用多种混合工质提高循环系统性能，梯级利用 SOFC 余热与 LNG 冷能，对甲烷燃烧后产生的 CO_2 进行回收利用。分析了关键参数对联合循环热效率、焓效率、净输出功以及平均单位成本的影响，对各设备进行焓分析与经济分析，并结合多目标优化确定系统最佳运行工况。研究成果能够有效梯级利用 SOFC 余热与 LNG 冷能，在冷热电联供的同时实现碳捕集，为 LNG 冷能利用方式提供了新思路。

1 系统描述与假设

1.1 系统介绍

图 1 为 CCHP 联合循环系统流程。本文中 CCHP 系统包括改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环、跨临界 CO_2 回热朗肯循环与二级混合工质 ORC，以 LNG 作为系统循环冷源对 SOFC 余热进行回收利用(只利用烟气，不考虑 SOFC 其他配置)，相较于基础构型的再压缩超临界布雷顿循环，改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环在工质预压缩后进行分流冷却，并在冷凝器前将工质的高温余热用于跨临界 CO_2 回热循环预热，减少工质进入冷凝器前的温度，Kr 的加入降低了工质的临界参数，循环更容易达到超临界状态，系统耗功更少，热效率更高。与常规跨 CO_2 临界循环相比，热交换器利用超临界循环余热，强化系统间换热，循环系统内部热量损失降低，提高系统热效率。联合系统主要模拟参数见表 1。

在改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环中，低温低压的气态 CO_2 与 Kr 混合工质经压缩机 1 加压，一股进入压缩机 2 再压缩，另一股经冷凝器 1 预冷后进入压缩机 3 加压，再进入低温回热器 1，与压缩机 2 出口的气体混合依次进入高温回热器 1、蒸发器 1 后进入膨胀机 1 做功，经回热器预冷后进入热交换器，最后进入冷凝器 2 冷却为低温低压的气态 CO_2 与 Kr 混合气体。

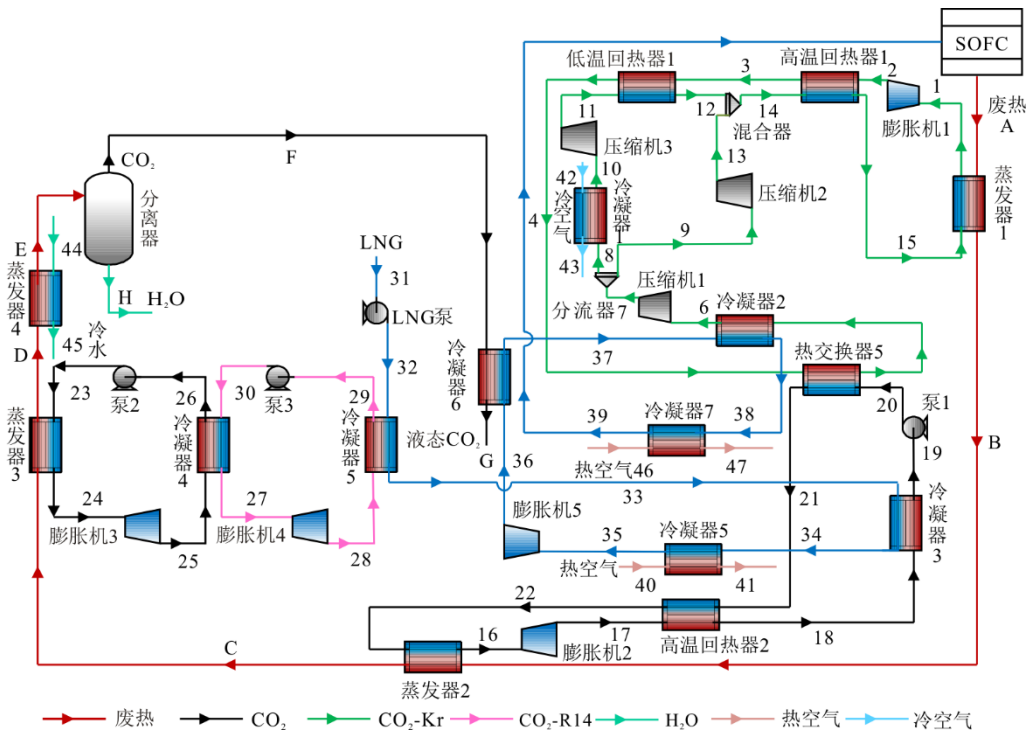


图 1 CCHP 联合循环系统流程
Fig.1 Flow chart of the CCHP combined circulation system

表 1 模拟主要参数

Tab.1 Main parameters of the simulation

项目	数值
环境压力/kPa	101.325
环境温度/K	298.15
SOFC 烟气初始温度/K	853.15
SOFC 烟气压力/kPa	101.325
LNG 入口温度/K	111.15
LNG 入口压力/kPa	101.325
CO ₂ -Kr 质量流量/(kg·s ⁻¹)	4.20
CO ₂ 质量流量/(kg·s ⁻¹)	4.50
烟气出口温度/K	288.15
LNG 质量流量/(kg·s ⁻¹)	9.40
CO ₂ -CF ₄ 质量流量/(kg·s ⁻¹)	16.50
膨胀机等熵效率/%	85.00
压缩机等熵效率/%	85.00
泵等熵效率/%	85.00

在跨临界 CO₂ 回热朗肯循环中，接近临界状态的饱和液态 CO₂ 经泵 1 加压至超临界压力状态后进入热交换器换热，经高温回热器 2 预热，再进入蒸发器 2 至膨胀温度，进入膨胀机 2 膨胀做功，利用高温回热器 2 提高循环余热利用率，最后进入冷凝器 3 冷却。

在二级 ORC 循环中，顶循环工质为纯 CO₂，经泵 2 加压，进入蒸发器 3 吸热至膨胀温度后做功，

在冷凝器 4 中冷却为饱和液态 CO₂。底循环工质为四氟化碳 (R14) 与 CO₂ 混合工质，经泵 3 加压后进入冷凝器 4 利用顶循环膨胀后余热加热，进入膨胀机 4 做功，然后进入冷凝器 5 冷却为低温低压的液态混合工质。

在 SOFC 烟气循环中，SOFC 高温烟气依次经蒸发器 1、蒸发器 2、蒸发器 3 为各部分循环提供热量，经蒸发器 4 换热至低温后进入分离器，烟气中水从分离器下方收集，气态的 CO₂ 从分离器上方排出进入冷凝器 5，与低温 LNG 换热至液态 CO₂ 捕集利用^[12]。

在 LNG 循环中，常压的 LNG 经泵加压后进入冷凝器 5 将 CO₂ 和 R14 混合气体冷却为液态，进入冷凝器 3，将 CO₂ 液化，经冷凝器 5 为外界提供冷能可用于冷库制冷，进入膨胀机 5 做功，在冷凝器 6 中利用 LNG 冷能将气态 CO₂ 液化捕集再利用，最后进入冷凝器 2 与冷凝器 7，将超临界混合工质布雷顿循环预冷后为外界环境提供冷能，可用于空调制冷。

1.2 模型假设

为了简化计算，更方便地探究该 CCHP 联合循环的系统性能，本文采用 Aspen Hysys 及 Peng-Robinson 物性方法对系统进行模拟分析，同时做出

如下假设:

- 1) 系统始终处于稳定状态^[13];
- 2) LNG 的组分为纯甲烷^[14];
- 3) 压缩机、膨胀机及泵的等熵效率为恒定;
- 4) 认为管道、换热器、混合器无压降变化;
- 5) 空气组分为 79% 的氮气和 21% 的氧气;
- 6) 烟气的组分为水蒸气和 CO₂, 且水蒸气和 CO₂ 的摩尔分数为 2:1。

1.3 热力性能模型

膨胀机做功:

$$W_T = \dot{m}_{in}(h_{in} - h_{out}) \quad (1)$$

泵和压缩机消耗功:

$$W_P = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (2)$$

$$W_C = \dot{m}_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (3)$$

循环净输出功:

$$W_{net} = W_T - W_P - W_C \quad (4)$$

系统净输出功:

$$\sum W_{net} = \sum W_T - \sum W_P - \sum W_C \quad (5)$$

系统热效率:

$$\eta_{th} = \frac{\sum W_{net}}{Q_{in}} \quad (6)$$

式中: W 为输出/消耗功量, kW; 下标 T、P、C、net 分别表示膨胀机、泵、压缩机、净输出功^[15]; h 为比焓, kJ/kg。

烟气向系统输入热量:

$$Q_{in} = \dot{m}_A(h_A - h_B) \quad (7)$$

式中: Q 为热量, kW; \dot{m} 为质量流量, kg/s; 下标为图 1 中各节点。

各部分工质的焓定义为:

$$E_i = \dot{m}_i[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)] \quad (8)$$

式中: E 为焓值, kW; s_i 为 i 节点的流体比焓, kJ/(kg·K); 下标 0 表示环境状态 (温度 298.15 K, 压力 101.325 kPa)。

CO₂ 吸收冷焓为:

$$E_{CO_2} = E_{37} - E_{36} \quad (9)$$

热空气吸收冷焓为:

$$E_{Air1} = E_{40} - E_{41} \quad (10)$$

$$E_{Air2} = E_{46} - E_{47} \quad (11)$$

冷水吸收热焓为:

$$E_{H_2O} = E_{45} - E_{44} \quad (12)$$

烟气输入系统的焓为:

$$E_{Exhaust\ gas} = \dot{m}_A[(h_A - h_0) - T_0(s_A - s_0)] \quad (13)$$

式中: 下标 Exhaust gas 为烟气。

LNG 的焓为:

$$E_{LNG} = \dot{m}_{31}[(h_{31} - h_0) - T_0(s_{31} - s_0)] \quad (14)$$

循环系统焓效率为^[16]:

$$\eta_{ex} = \frac{W_{net} + E_{cold} + E_{heart} + E_{CO_2}}{E_{LNG} + E_{Exhaust\ gas}} \quad (15)$$

循环系统中设备焓损为^[17]:

$$I_i = E_X - E_S \quad (16)$$

式中: I_i 为设备 i 的焓损; E_X 、 E_S 分别为消耗焓、收益焓, kW。

循环系统中每个设备的焓损率为:

$$\eta_{ex-i} = \frac{I_i}{I_{tot}} \quad (17)$$

式中: η_{ex-i} 为设备 i 的焓损率; I_{tot} 为所有设备的总焓损, kW。

循环系统中设备焓损失系数为:

$$\zeta_i = \frac{I_i}{E_X} \quad (18)$$

1.4 系统经济模型

循环系统内各设备投资成本 Z_K 由式(19)一式(27)给出^[18]。

膨胀机投资成本为:

$$Z_{Turbine} = 4\ 405W_T^{0.7} \quad (19)$$

泵投资成本为:

$$Z_{Pump} = 3\ 540W_P^{0.71} \quad (20)$$

压缩机投资成本为:

$$Z_{Com} = 9\ 624.2W_{com}^{0.46} \quad (21)$$

循环系统中换热器的换热面积为:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} \quad (22)$$

蒸发器的投资成本为:

$$Z_{Evaporator} = 30\ 000 + 750A_{Evaporator}^{0.81} \quad (23)$$

冷凝器的投资成本为:

$$Z_{Condenser} = 30\ 000 + 750A_{Condenser}^{0.81} \quad (24)$$

热交换器投资成本为:

$$Z_{HX} = 30\ 000 + 750A_{HX}^{0.81} \quad (25)$$

回热器的投资成本为:

$$Z_{Recuperator} = 30\ 000 + 750A_{Recuperator}^{0.81} \quad (26)$$

设备总投资成本为:

$$Z_{tot} = \sum Z_{Turbine} + \sum Z_{Pump} + \sum Z_{Com} + \sum Z_{Evaporator} + \sum Z_{Condenser} \quad (27)$$

式中： Z 为每个设备的投资成本，美元； A 为换热器面积， m^2 ； U 为传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； ΔT 为系统中换热器的平均对数温差， K 。

循环系统中设备 K 的总投资成本 \dot{Z}_K 由两部分组成，分别为设备的投资成本率 \dot{Z}_K^{CI} 和每个设备的运行成本率 \dot{Z}_K^{OM} ，计算公式为：

$$\dot{Z}_K = \dot{Z}_K^{OM} + \dot{Z}_K^{CI} \quad (28)$$

其中设备的投资成本率 \dot{Z}_K^{CI} 和每个设备的运行成本率 \dot{Z}_K^{OM} 的计算公式为：

$$\dot{Z}_K^{CI} = \frac{Z_K \cdot CRF \cdot \varphi}{3600N} \quad (29)$$

$$\dot{Z}_K^{OM} = 1.5\% \dot{Z}_K^{CI} \quad (30)$$

式中： CRF 为每年的资本回收率，计算方法为式(31)； Z_K 为设备 K 的投资成本，美元；设备的维护系数 φ 设定为 1.06； N 为整个循环系统的运行时间，设定为 8 400 h。

设备每年资本回收率为：

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (31)$$

式中： i 为利率，设定为 0.1； n 为循环系统极限运行时长，假设为 20 年^[19]。

系统各设备的焓成本平衡方程为：

$$\sum \dot{C}_{in,K} + \dot{C}_{q,K} + \dot{Z}_K = \sum \dot{C}_{out,K} + \dot{C}_{w,K} \quad (32)$$

式中： $\dot{C}_{in,K}$ 为进入设备 K 的物流焓成本； $\dot{C}_{q,K}$ 为进入设备 K 的能量焓成本； $\dot{C}_{out,K}$ 为设备 K 出口的物流焓成本； $\dot{C}_{w,K}$ 为设备 K 产出能量焓成本。

物流的焓成本计算公式为：

$$\dot{C}_{f,K} = c_{f,K} \cdot E_{f,K} \quad (33)$$

式中： $c_{f,K}$ 为燃料的单位焓成本； $E_{f,K}$ 为燃料焓。

故系统单位平均成本为：

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_K} \dot{Z}_K + \sum_{i=1}^{n_f} \dot{C}_{f,i}}{\sum_{i=1}^{n_p} \dot{E}_{p,i}} \quad (34)$$

式中： $\sum_{i=1}^{n_K} \dot{Z}_K$ 为系统中所有设备的成本； $\sum_{i=1}^{n_f} \dot{C}_{f,i}$ 为所有焓流的燃料费用； $\sum_{i=1}^{n_p} \dot{E}_{p,i}$ 为所有产品焓^[20]。系统单位平均成本是利用焓经济模型评估循环系统的重要经济性指标之一。

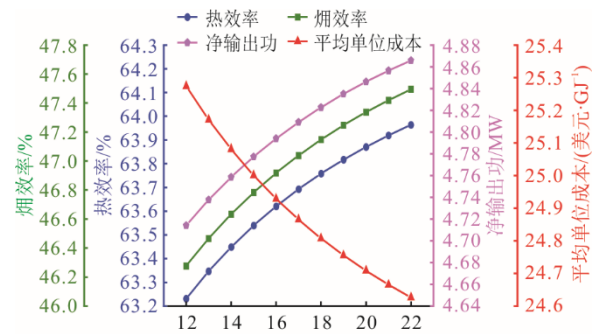
2 结果与分析

2.1 热力学分析

本节针对联合循环中的改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环，分析膨胀机入口压力、 Kr 的质

量分数 N 、预冷再压缩分流比、跨临界 CO_2 回热朗肯循环的膨胀机入口温度、二级 ORC 混合工质质量分数等参数对系统热力学性能即系统热效率、烟效率、净输出功、产品平均单位成本等参数的影响。

改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环膨胀机入口压力对系统热力学性能的影响如图 2 所示。由图 2 可见，膨胀机入口压力增大，系统热效率、烟效率、净输出功均上升，产品平均单位成本出现下降的趋势。因为膨胀机入口压力的增大会引起膨胀机 1 做功量的增大，但同时会引起压缩机组耗功量增大，由于做功量大于耗功量，因此循环净输出功不断增大，热效率增大，膨胀机入口压力每上升 1.00 MPa，系统循环净输出功最大上升 0.03 MW，热效率最大提高 0.18%。膨胀机入口压力的增大对 LNG 和烟气向系统的输入焓并没有影响，而循环净输出功增大，因此烟效率随膨胀机入口压力的增大而增大，且膨胀机 1 入口压力每上升 1.00 MPa，系统烟效率最大增大 0.19%，由于压缩机耗功量增加，所以设备投资成本会随着压力的上升而增加，但净输出功的增加量大于设备投资成本，所以系统单位平均成本逐渐减小。



超临界混合工质布雷顿循环膨胀机入口压力/MPa

图 2 超临界混合工质布雷顿循环膨胀机入口压力对系统热力学性能的影响

Fig.2 Effects of inlet pressure of Brayton cyclic expander of supercritical mixed working fluid on thermodynamic properties of the system

超临界 CO_2 布雷顿循环利用 CO_2 的临界参数较低的特性，使得工质比较容易达到且维持超临界状态，从而减少压缩机耗功，提升净输出功进而提升热效率。采用 CO_2 与 Kr 混合作为超临界布雷顿循环的工质，能够降低工质的临界参数，工质临界压力的降低意味着更大的膨胀比，也就是可以达到更高的膨胀机入口压力，临界温度的降低意味着压缩机入口温度的降低，进而在提升净输出功的同时，降低压缩机耗功量，提升系统循环热效率。

图3为Kr质量分数对系统热力学性能的影响。由图3可见，Kr质量分数增加，系统热效率与产品平均单位成本均增大，焓效率与净输出功均下降。热效率增加的先快后慢，当加入Kr的质量分数超过0.5时，提升相对不明显，同时焓效率和净输出功呈现出下降的趋势。因为当Kr的质量分数增加后，膨胀机1做功减少，循环净功减少，同时超临界布雷顿循环的吸热量减少，且吸热量减少的比例大于净功减少的比例。Kr质量分数增加带来的温度的改变会提高热交换器的换热温差，提升跨临界CO₂循环效率，进而明显提升系统总热效率。平均单位成本因为压缩机耗功量的提高而增大，净输出功减少，呈现出下降的趋势。因此CO₂与Kr混合后的系统效率要大于CO₂纯工质的循环效率，循环效率随着加入Kr的质量分数的增加而增大，且最小提升为0.73%。而当添加的Kr的质量分数小于0.5时，提升较明显。

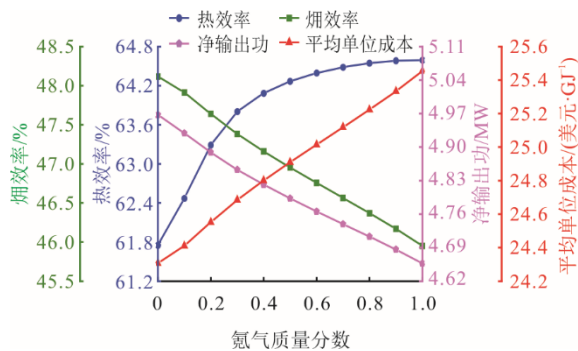


图3 Kr质量分数对系统热力学性能的影响
Fig.3 Effects of Kr mass fraction on thermodynamic properties of the system

图4为分流比对系统热力学性能的影响。由图4可见，随着混合工质超临界布雷顿循环的分流比增加，系统热效率呈现下降的趋势，焓效率和净输出功呈现上升的趋势。因为冷凝器1入口流量增加时，更多的工质进入了冷凝器冷却，压缩机2的流量及耗功量减少。虽然压缩机3的流量增加，但压缩机3的工质入口温度较低，接近混合工质的临界温度，所以压缩机3耗功量的增加量少于压缩机2耗功量的减少量，同时更多工质接连进入低温回热器1和高温回热器1，优化了系统间换热，而系统输入焓不变，所以系统焓效率和循环净输出功均增加，但同时会导致热交换器的热源入口温度的降低，跨临界CO₂回热朗肯循环会吸收更多的废气余热，因此系统热效率

和产品单位平均成本有下降的趋势。

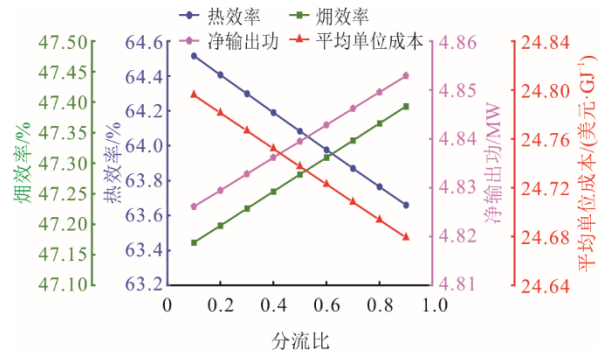


图4 分流比对系统热力学性能的影响
Fig.4 Effects of shunt ratio on thermodynamic performance of the system

跨临界CO₂回热朗肯循环膨胀机入口温度对系统热力学性能的影响如图5所示。由图5可见，随着膨胀机入口温度的增大，系统热效率、焓效率、净输出功均逐渐增大。这是由于温度上升时，膨胀机入口工质16焓值增大，膨胀机做功量增加，循环系统净输出功增大，吸热量增加，温度升高所带来的附加热效率大于原系统热效率，所以循环热效率逐渐增大，循环系统输入焓保持不变，系统净输出功增大，系统焓效率增大。

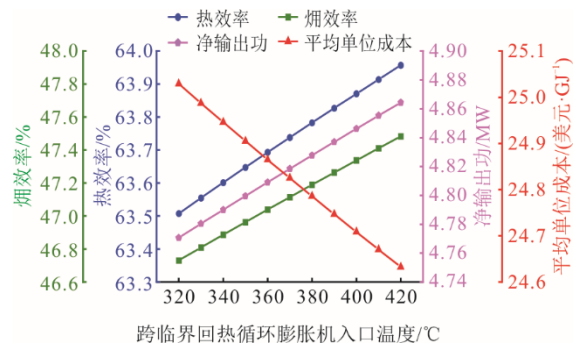


图5 跨临界回热循环膨胀机入口温度对系统热力学性能的影响
Fig.5 Effects of inlet temperature of transcritical recuperation cycle expander on thermodynamic performance of the system

图6为R14与CO₂混合工质温度滑移。对于非共沸混合工质，由于工质在蒸发与冷凝过程中存在温度滑移，增强了工质与热源和冷源之间的传热匹配性，有利于循环性能的提高。相较于采用纯工质，采用非共沸混合工质的区别在于蒸发和冷却过程中存在温度的滑移，其性能受温度滑移的影响，较大的温度滑移能够优化系统性能。因此二级朗肯底循环采用R14和CO₂相结合的方式，更好地匹配

LNG 的低温作为二级朗肯的冷源, 进一步提升系统净输出功、焓效率、系统热效率, 降低设备成本。

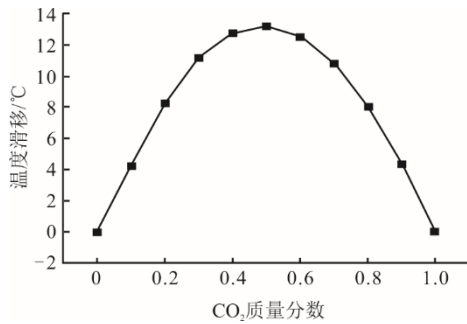


图 6 R14 与 CO₂ 混合工质温度滑移
Fig.6 Temperature slip of R14 mixed with CO₂

在二级混合工质 ORC 底循环工质中 R14 的质量分数逐渐增大时, 系统热效率、焓效率、净输出功均呈现出先增大后减少的趋势, 具体如图 7 所示。因为 R14 的质量分数增大, 膨胀机 3 的做功量不变, 膨胀机 4 的做功量增加, 泵 3 的耗功量增加, 但泵 3 的耗功量远远小于膨胀机增加的做功量, 且系统的输入焓并没有变化, 因此循环净输出功、热效率、焓效率均增加。

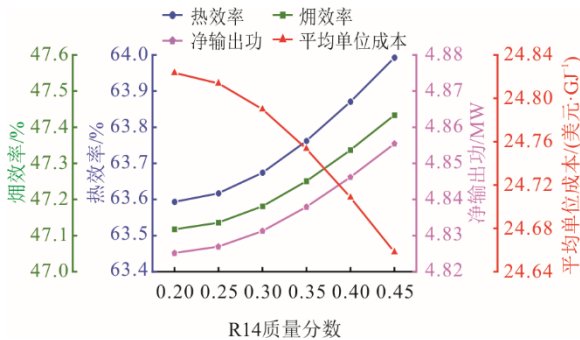


图 7 R14 质量分数对系统热力学性能的影响
Fig.7 Effects of R14 mass fraction on thermodynamic properties of the system

2.2 焓分析

2.2.1 设备焓分析

系统成本中占比较大的就是设备焓损, 高焓损率表明该设备的焓损成本是该设备总成本的主要部分, 若要提高此类设备的焓经济性能, 就应降低设备的焓损成本, 因此对各个设备的焓经济参数进行计算^[21-23]。表 2 为系统设备焓分析。由表 2 可见, 设备焓损率相对来说比较高的是膨胀机 5、蒸发器 3、冷凝器 3、冷凝器 4、冷凝器 5, 其焓损率分别达到了 17.84%、16.73%、11.56%、16.25%、13.05%。这种情况主要是因为膨胀机 5 的有用功量较大, 膨胀机效率一定时, 有用功的增加会带来焓损变量的增

加。蒸发器 3 出入口换热温差较大, 且二级混合工质 ORC 的工质流量较大, 因此蒸发器 3 的焓损率占比相对较大。为了更好地对 LNG 冷能进行梯级利用, 冷凝器 3、冷凝器 4、冷凝器 5 有较大的换热温差, 因为在换热器效率不变的情况下, 冷凝器设备焓损率占比较大。因此, 适当减少工质的流量, 减少换热器出入口的换热温差均可降低以上设备焓损。

表 2 系统设备焓分析
Tab.2 Exergy analysis for device in the system

设备名称	设备焓损 I_i/kW	设备焓损率 $\eta_{ex-i}/\%$	设备焓损失 系数 ζ_i
膨胀机 1	22.01	0.38	0.082
膨胀机 2	46.91	0.81	0.088
膨胀机 3	80.05	1.39	0.137
膨胀机 4	309.06	5.37	0.224
膨胀机 5	1 027.63	17.84	0.277
压缩机 1	6.16	0.11	0.225
压缩机 2	4.06	0.07	0.097
压缩机 3	9.10	0.15	0.107
泵 1	17.85	0.31	0.164
泵 2	6.32	0.11	0.197
泵 3	11.45	0.21	0.369
LNG 泵	50.44	0.88	0.667
蒸发器 1	17.50	0.31	0.094
蒸发器 2	125.78	2.18	0.175
蒸发器 3	963.90	16.73	0.856
蒸发器 4	19.43	0.33	0.719
冷凝器 1	1.19	0.02	0.618
冷凝器 2	24.78	0.43	0.905
冷凝器 3	665.94	11.55	0.937
冷凝器 4	936.07	16.24	0.566
冷凝器 5	751.68	13.04	0.200
冷凝器 6	159.60	2.77	0.382
冷凝器 7	373.66	6.48	0.544
低温回热器 1	0.32	0.01	0.034
高温回热器 1	1.73	0.03	0.023
热交换器 1	14.19	0.25	0.503
高温回热器 2	114.53	1.98	0.340

2.2.2 设备成本分析

循环系统的设备投资成本占比如图 8 所示, 由图 8 可见, 膨胀机的投资成本占比最大, 而压缩机的占比最少。这是因为膨胀机入口前的压力为循环最大压力, 对于膨胀机设备性能要求最高, 设备投资最大达到了 48.56%, 由于混合工质降低了 CO₂ 的临界温度, 因此压缩机入口混合工质温度较低, 工质通过压缩机能耗较低, 对设备性能要求不高, 因此投资成本最低。通过对膨胀机投资占比进行进一步分析, 膨胀机 5 有用功相对于其他膨胀机而言较大。因为膨胀机 5 用于 LNG 直接膨胀发电, LNG

质量流量相对较大,膨胀机 5 产功量较大,设备要求更高,投资成本占比大,适当降低 LNG 的质量流量或降低膨胀机 5 入口压力可降低设备成本。

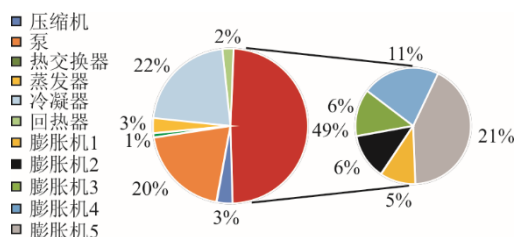


图 8 设备投资成本占比

Fig.8 Proportions of the equipment investment costs

2.3 对比分析

为了证明本文提出的利用 LNG 冷能与 SOFC 余热的 CCHP 系统构型的性能优越性,引入 Taheri 等人^[24]、乔焱等^[25]、Ahmadi 等人^[26]和 Fang 等人^[27]设计的系统中各个组成部分进行比较,选择热效率作为各个循环的评价指标,结果见表 3。

表 3 不同 CCHP 系统构型热效率对比

Tab.3 The thermal efficiencies of CCHP systems with different configurations

本文循环构型	对比文献	热效率/%	
		本文	对比文献
改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环	Taheri 等人 ^[24]	36.14	34.40
跨临界 CO ₂ 回热朗肯循环	乔焱等 ^[25]	30.92	22.64
二级混合工质 ORC	Ahmadi 等人 ^[26]	26.29	21.93
	Fang 等人 ^[27]	26.29	26.13

由表 3 对比结果可见,本文所提出的改进后的系统各循环组成部分的热效率均比常规构型高。针对改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环,工质在进入压缩机 1 之前依次进入热交换器与冷凝器交换热量,降低了工质预压缩耗功量,且分流冷却后,工质进入再压缩机的温度被进一步降低,循环总耗功量较少,因此热效率较高。

对于跨临界 CO₂ 回热朗肯循环,由于热交换器提升了系统间换热,预热过程不需要系统外提供热量,因此在相同参数条件下,具有更高的系统热效率。二级混合工质 ORC 与 Ahmadi 等人^[26]设计的热效率为 21.93% 的 ORC 相比,热效率上升了 4.36%,这是由于二级 ORC 强化了系统间换热,与 LNG 匹配后大幅降低了冷却后工质温度,热效率有较大提升。由于本文设计的二级混合工质 ORC 与 Fang 等人^[22]具有相同的循环构型,当设置相同参数时,热

效率误差不超过 1%。

3 模型优化

在循环系统的研究中,系统参数的变化对循环性能的影响是多样的,本文采用遗传算法的多目标优化方法对系统进行优化^[28]。由于净输出功是影响焓效率的主要因素,因此净输出功与焓效率在决策变量变化时的趋势大体相同,本文利用焓效率、热效率以及产品平均单位成本 3 个参数指标评估本文联合循环的性能。

超临界混合工质布雷顿循环膨胀机入口压力、Kr 质量分数以及跨临界膨胀机入口温度的大小变化对循环热效率、焓效率以及平均单位成本的影响较大,为了进一步对系统进行优化,同时实现热效率、焓效率最大化与成本最小化^[29],选择 P_1 、 N 、 T_{16} 3 个参数作为决策变量,取值范围为: $P_1 \in [12, 22]$, $N \in [0, 1]$, $T_{16} \in [320.15, 420.15]$ 。目标函数约束关系式为式(35)~式(37),遗传算法最大迭代次数为 300,适应度函数偏差为 0.000 1,解集大小为 50。

$$\eta_{th} = f(P_1, N, T_{16}) \quad (35)$$

$$\eta_{ex} = g(P_1, N, T_{16}) \quad (36)$$

$$C_p = h(P_1, N, T_{16}) \quad (37)$$

图 9 为基于遗传算法的多目标优化输出的帕累托前沿。其中理想点满足同时达到系统热效率最大化,焓效率最大化,平均单位成本最小化^[29],但在实际参数变化之中并不能达到理想点,故在帕累托前沿中距离理想点最近的输出点即为系统最优解,在最优工况点下的循环系统热效率、焓效率以及平均单位成本分别为 64.70%、47.85%、24.20 美元/GJ。

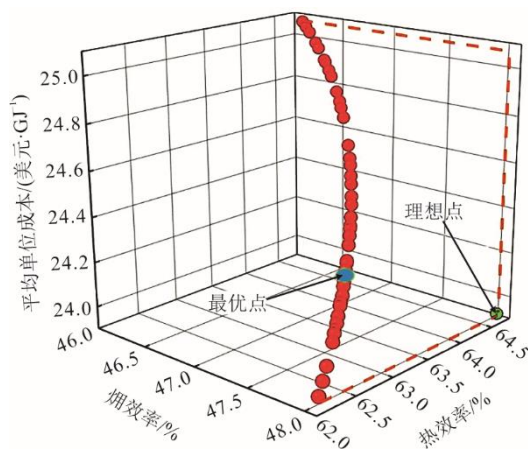


图 9 帕累托前沿结果

Fig.9 The Pareto front result

4 结 论

本文针对甲烷燃料电池余热回收及 LNG 冷能梯级利用建立了一种新型 CCHP 循环系统,改进循环构型,将改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环、跨临界 CO₂ 回热朗肯循环与二级混合工质 ORC 相结合,进行了热力学分析、设备焓分析、设备经济性分析,并对系统进行多目标优化,得出以下结论。

1) 提升改进再压缩超临界混合工质布雷顿循环的膨胀机入口压力、跨临界 CO₂ 回热朗肯循环的膨胀机入口温度与二级 ORC 中 R14 的质量分数可提升系统循环净功、热效率、焓效率并降低平均单位成本。增加 Kr 质量分数,会提高系统热效率,降低焓效率,增加成本。增加分流比,会提升系统循环净输出功与焓效率,降低热效率与产品平均单位成本。

2) 膨胀机 5 与蒸发器 3 的焓损率最高分别为 17.84%、16.73%,膨胀机设备投资占比最大为 48.56%,压缩机投资占比最少为 3.25%。通过降低冷凝器换热温差、膨胀机入口压力和循环工质的质量流量可降低焓损率以及设备投资成本。

3) 经遗传算法的多目标优化后,在系统最优工况点下的循环系统热效率、焓效率以及平均单位成本分别为 64.70%、47.85%、24.20 美元/GJ。

【参 考 文 献】

- [1] 周莹,叶嘉乐,于姗,等. “双碳”目标下天然气分布式能源发展现状及机遇[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 23-29.
ZHOU Ying, YE Jiale, YU Shan, et al. Development status and opportunities of natural gas distributed energy resource under the goal of “dual carbon”[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 23-29.
- [2] 牟文彪,王征,傅洪军,等. 基于燃机余热和 LNG 冷能的 SCO₂ 朗肯循环系统构建[J]. 动力工程学报, 2023, 43(12): 1599-1606.
MOU Wenbiao, WANG Zheng, FU Hongjun, et al. Development of SCO₂ rankine cycle system based on gas turbine waste heat recovery and LNG cold energy[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(12): 1599-1606.
- [3] 杨枫桐,张丽,田宇航,等. 一种发电和 CO₂ 捕集相结合的 LNG 冷能利用系统[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(6): 54-60.
YANG Fengtong, ZHANG Li, TIAN Yuhang, et al. An LNG cold energy utilization system combining with power generation and CO₂ capture[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2019, 39(6): 54-60.
- [4] 张锦坤,王渡,任鑫,等. 基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/超临界二氧化碳循环关键参数经济性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 109-118.
ZHANG Jinkun, WANG Du, REN Xin, et al. Economic

- study on key parameters of gas turbine/supercritical carbon dioxide cycle based on LNG cold energy utilization[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 109-118.
- [5] WU J, PAN Z, BINAMA M, et al. Exergoeconomic analysis and multi - objective whale optimization of an integrated solid oxide fuel cell and energy storage system using liquefied natural gas cold energy[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15): 24208-24228.
- [6] OZEN D N, UÇAR I. Energy, exergy, and exergo - economic analysis of a novel combined power system using the cold energy of liquified natural gas (LNG)[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, 39(4): 13377.
- [7] CHEN Y, WANG M, LISO V, et al. Parametric analysis and optimization for exergoeconomic performance of a combined system based on solid oxide fuel cell-gas turbine and supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 66-81.
- [8] 乔焱,姜文全,杨帆,等. 一种冷热电联供和 CO₂ 捕集的联合动力循环[J]. 化学工程, 2023, 51(2): 46-50.
QIAO Yan, JIANG Wenquan, YANG Fan, et al. A combined power cycle of cold, heat and electricity and CO₂ capture[J]. Chemical Engineering (China), 2023, 51(2): 46-50.
- [9] ZHAO L, ZHANG J L, WANG X, et al. Dynamic exergy analysis of a novel LNG cold energy utilization system combined with cold, heat and power[J]. Energy, 2020, 212: 118649.
- [10] 郭嘉琪,王坤,朱含慧,等. 超临界 CO₂ 及其混合工质布雷顿循环热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(4): 695-702.
GUO Jiaqi, WANG Kun, ZHU Hanhui, et al. Thermodynamic analysis of Brayton cycles using supercritical carbon dioxide and its mixture as working fluids[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(4): 695-702.
- [11] VALENCIA-CHAPI R, COCO-ENRÍQUEZ L, MUÑOZ-ANTÓN J. Supercritical CO₂ mixtures for advanced Brayton power cycles in line-focusing solar power plants[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 55.
- [12] GHORBANI B, MEHRPOOYA M, OMID E. Hybrid solar liquefied natural gas, post combustion carbon dioxide capture and liquefaction[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112512.
- [13] 付文锋,王金樞,王蓝婧,等. 基于燃机余热和地热能的联合发电系统优化设计及热力性能分析[J]. 动力工程学报, 2024, 44(2): 328-338.
FU Wenfeng, WANG Jinying, WANG Lanjing, et al. Optimal design and thermal performance analysis of combined power generation system based on gas turbine waste heat and geothermal energy[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(2): 328-338.
- [14] FANG Z, SHANG L, PAN Z, et al. Exergoeconomic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on organic Rankine and Kalina cycles using liquified natural gas cold energy[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114148.
- [15] 何依,邹斌,张丽,等. 基于 LNG 冷能的双循环-卡琳娜冷热电联供系统[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(1): 43-51.
HE Yi, ZOU Bin, ZHANG Li, et al. Dual-loop cycle-Kalina combined cooling and power generation system based on LNG cold energy[J]. Journal of

- Liaoning Petrochemical University, 2020, 40(1): 43-51.
- [16] 王渡, 王志刚, 张锦坤, 等. 燃气轮机/超临界二氧化碳联合循环余热利用及动态特性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 67-75.
WANG Du, WANG Zhigang, ZHANG Jinkun, et al. Analysis of waste heat utilization and dynamic characteristics of gas turbine/supercritical carbon dioxide combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 67-75.
- [17] 韩冰川, 陈永东, 于改革, 等. 全回热超临界二氧化碳布雷顿联合循环特性及焓经济性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 76-84.
HAN Bingchuan, CHEN Yongdong, YU Gaige, et al. Study on characteristics and exergo-economic analysis of completely recuperative supercritical carbon dioxide Brayton combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 76-84.
- [18] ZHOU A, LI X, REN X, et al. Improvement design and analysis of a supercritical CO₂/transcritical CO₂ combined cycle for offshore gas turbine waste heat recovery[J]. Energy, 2020, 210: 118562.
- [19] 方震华, 李丁帅, 何依, 等. 两种冷热电联供系统的热经济对比分析[J]. 化学工程, 2021, 49(12): 12-16.
FANG Zhenhua, LI Dingshuai, HE Yi, et al. Comparative thermoeconomic analysis of two combined cooling, heating and power systems[J]. Chemical Engineering (China), 2021, 49(12): 12-16.
- [20] AALI A, POURMAHMOUD N, ZARE V. Exergo-economic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 143: 377-390.
- [21] 封康, 郑蕾燕, 仇中柱, 等. 超临界二氧化碳动力循环余热利用方案优化研究[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 119-126.
FENG Kang, ZHENG Puyan, CHOU Zhongzhu, et al. Study on optimization of supercritical carbon dioxide power cycle schemes in waste heat utilization[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 119-126.
- [22] 韩中合, 郭董阳, 陈东旭, 等. 部分冷却二氧化碳循环燃煤发电系统热力学性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 63-70.
HAN Zhonghe, GUO Dongyang, CHEN Dongxun, et al. Thermodynamic performance analysis for coal-fired power generation system with partial cooling carbon dioxide cycle[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 63-70.
- [23] JIANG Y, ZHAN L, TIAN X, et al. Thermodynamic performance comparison and optimization of sCO₂ Brayton cycle, tCO₂ Brayton cycle and tCO₂ Rankine cycle[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(2): 611-627.
- [24] TAHERI M H, KHANI L, MOHAMMADPOURFARD M, et al. Multi-objective optimization of a novel supercritical CO₂ cycle-based combined cycle for solar power tower plants integrated with SOFC and LNG cold energy and regasification[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(9): 12082-12107.
- [25] 乔焱, 姜文全, 杨帆, 等. 液化天然气冷能利用及固体氧化物燃料电池余热回收系统模拟与优化[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-10[2024-08-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232650>.
QIAO Yan, JIANG Wenquan, YANG Fan, et al. Simulation and optimization of liquefied natural gas cold energy utilization and solid oxide fuel cell waste heat recovery system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-10[2024-08-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232650>.
- [26] AHMADI M H, SADAGHIANI M S, POURFAYAZ F, et al. Energy and exergy analyses of a solid oxide fuel cell-gas turbine-organic Rankine cycle power plant with liquefied natural gas as heat sink[J]. Entropy, 2018, 20(7): 484.
- [27] ZHENHUA F, JING C, XIAOLONG J, et al. Repair of fused silica damage using selective femtosecond laser-induced etching[J]. Crystals, 2023, 13(2): 309-309.
- [28] HOSEINZADEH S, YARGHOLI R, KARIMAN H, et al. Exergoeconomic analysis and optimization of reverse osmosis desalination integrated with geothermal energy[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, 39(5): 13405.
- [29] KESHAVARZZADEH A H, AHMADI P. Multi-objective techno-economic optimization of a solar based integrated energy system using various optimization methods[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 196-210.

(责任编辑 杜亚勤)