DOI: 10.19666/j.rlfd.202504057

基于燃煤机组的新型卡诺电池系统热力学性能分析与优化

李 玲[1]，夏大伟[1]，张步庭[1]，支长双[1]，赵世飞[2]
（1. 国网河南省电力公司电力科学研究院，河南 郑州 450052；
2. 华北水利水电大学能源与动力工程学院，河南 郑州 450045）

［摘 要］基于燃煤发电机组的卡诺电池系统可在高效接纳新能源弃电的同时，利用现役燃煤机组的设备完成释能过程，以应对高比例可再生能源接入对电力供应侧调节能力的挑战。基于分流膨胀的思想提出了一种新型“超临界二氧化碳逆布雷顿-朗肯循环”卡诺电池系统，并借助 EBSILON Professional 平台对系统进行建模，分析其热力学性能和关键参数敏感性，最后通过遗传算法获得了系统的最优设计参数。结果表明：在设计工况下，新型系统储能循环的透平做功量和余热回收量较原系统分别提高了 59.84%和 43.23%；储能过程能效系数（COP）和储能往返效率（RTE）分别为 1.32 和 57.68%，较参考系统提高了 0.10 和 4.37 百分点；随着压比和分流比的升高和回热器 2 上端差的降低，新型系统的 COP 和 RTE 均提高；当分流比为 0.23、压比为 3.09、回热器 2 上端差为 12.60 ℃时，卡诺电池储能循环的 COP 最高为 1.37，此时卡诺电池 RTE 为 59.87%。研究结果可为燃煤机组提高灵活性和可再生能源的高效接纳提供技术参考。

［关 键 词］卡诺电池；燃煤机组；逆布雷顿循环；热力学性能；敏感性分析

［引用本文格式］李玲，夏大伟，张步庭，等. 基于燃煤机组的新型卡诺电池系统热力学性能分析与优化[J]. 热力发电，2026，55(2)：23-31. LI Ling, XIA Dawei, ZHANG Buting, et al. Thermodynamic performance analysis and optimization of a novel Carnot battery system based on coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 23-31.

Thermodynamic performance analysis and optimization of a novel Carnot battery system based on coal-fired power unit

LI Ling[1], XIA Dawei[1], ZHANG Buting[1], ZHI Changshuang[1], ZHAO Shifei[2]
(1. State Grid Henan Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
2. College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: A Carnot battery system based on coal-fired power units can efficiently absorb curtailed power of new energy while utilizing the existing infrastructure of coal-fired plants for energy release, thereby addressing the challenges posed by high-penetration renewable energy on the power supply-side flexibility. A novel supercritical carbon dioxide reverse Brayton-Rankine cycle Carnot battery system is proposed based on the concept of split-flow expansion, and a comprehensive investigation is conducted through thermodynamic modeling in EBSILON Professional, parameter sensitivity analysis, and multi-objective optimization using genetic algorithms. The results indicate that under design conditions, the turbine power output and waste heat recovery of the novel system are improved by 59.84% and 43.23%, respectively, compared to the reference system. The energy storage cycle achieves a coefficient of performance (COP) of 1.32 and a round-trip efficiency (RTE) of 57.68%, representing an increase of 0.10 in COP and 4.37 percentage points in RTE over the reference system. Both COP and RTE increase with higher pressure ratios, higher flow split ratios, and lower top-end temperature differences in recuperator 2.

收 稿 日 期：2025-04-15 修 回 日 期：2025-05-06 接 受 日 期：2025-05-08 网络首发日期：2025-10-10
基 金 项 目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52206012）
Supported by: Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (52206012)
第一作者简介：李玲（1975），女，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为网源协调、供热机组调峰等相关技术，ll_hust@163.com。
通信作者简介：赵世飞（1991），男，博士，副教授，主要研究方向为燃煤热电联产机组高效灵活运行技术，zhaoshifei@ncwu.edu.cn。

When the flow split ratio is 0.23, the pressure ratio is 3.09, and the top-end temperature difference in recuperator 2 is 12.60 ℃, the COP of the Carnot battery storage cycle reaches a maximum of 1.37, with a corresponding RTE of 59.87%. The study provides a technical reference for enhancing the operational flexibility of coal-fired power plants and optimizing renewable energy integration through advanced thermal storage technologies.

Key words: Carnot battery; coal-fired power unit; reverse Brayton cycle; thermodynamic performance; sensitivity analysis

随着“双碳”目标的推进，能源系统加速向清洁低碳转型，可再生能源与燃煤机组均面临严峻挑战[1]。风电、光伏等可再生能源出力具有强波动性和随机性，导致电网消纳能力不足，弃风弃光现象频发。据统计，我国弃风弃电量长期维持在 4%以上，亟需新型储能技术平抑波动、提升灵活调节能力[2]。燃煤机组作为传统调峰主力，其调节速率与深度难以匹配新能源高渗透率电网的需求。现有煤电机组调峰能力普遍较低，频繁启停或低负荷运行不仅效率骤降，还加剧设备损耗与碳排放。在此背景下，卡诺电池储能技术为破解困境提供了创新路径[3]。其核心通过电热转换与热力循环发电，将电能转化为高温热能存储，并在用电高峰时驱动汽轮机发电[4]。该技术可无缝对接燃煤机组，替代或部分替代燃煤锅炉，保留原有汽轮机及辅机系统，实现“锅炉−储能”耦合改造。

作为一种新型储能技术，卡诺电池具有储能密度高，建设不受地理位置限制，储能周期长等优势[5-7]。赵永亮等[8]对基于跨临界 CO_2 的卡诺电池储能系统进行了热力学性能分析，从热力学性能和经济性角度得出系统最优构型。Tafur-Escanta 等人[9]提出了一种基于超临界 CO_2（S-CO_2）的热泵储能系统，得出系统的往返效率为 59.63%。Xi 等人[10]研究了 4 种基于有机朗肯循环和蒸汽压缩热泵的卡诺电池系统，构建了能量、㶲和经济（3E）模型，分析了不同系统配置的热力学性能和经济性能。Dostal 等人[11]从热力学和经济性两方面比较了 S-CO_2、氦气布雷顿循环、过热蒸汽循环和超临界蒸汽循环，分析了 S-CO_2 的特点以及未来的研究方向。Geyer 等人[12]提出将即将退役的燃煤电厂改造为熔盐卡诺电池储能系统。卢沛等[13]提出将余热与有机朗肯循环耦合的全时段耦合余热的卡诺电池系统。韩瑞等[14]将传统燃煤电厂与熔盐卡诺电池相耦合，探究了以氩气、氮气和 CO_2 作为循环工质，以及有无回热系统对往返效率的影响。Hu 等人[15]提出了一种基于熔盐储能的热电联产系统，通过将低谷电价转化为热能并储存建立了经济学模型和热力学模型并进行了参数分析。Zhang 等人[16]提出了从火电厂中提取蒸汽用于辅助卡诺电池，提高其热泵能效系数和储能往返效率。孙瑞强等[17]对 S-CO_2 工质的热泵储电系统展开研究，建立了热力学与技术经济性分析模型。封官斌等[18]分析了高温卡诺电池储热、电加热和双向循环系统的优势与挑战，指出其在地理独立性和大规模储能中的潜力。Zhang 等人[19]提出了基于 CO_2混合物的跨临界储能系统，并进行了多参数优化和蒙特卡洛经济性分析。林小杰等[20]提出基于相变材料的蒸汽卡诺电池热力学循环，通过优化参数和多级压缩结构，循环效率和供热㶲效率分别达到 56.96%和 68.74%。

可见，卡诺电池储能系统具有很高的研究价值和广泛的应用前景。但是，目前基于燃煤机组的卡诺电池研究都还处在初级阶段，循环工质多以氩气、空气和 CO_2 为主[21]。相较于其他气体，S-CO_2 具有临界点接近环境温度，高密度，来源广泛和成本低等优势[22]。同时，S-CO_2 在临界点位置比热容较大，且膨胀过程无液化，在工程上更方便实现。但目前为止，对以 S-CO_2 为工质的卡诺电池研究多以简单布雷顿循环或带回热的布雷顿循环为主，较少涉及进一步的流程优化。

鉴于此，本文提出了一种基于燃煤发电机组的新型“S-CO_2 逆布雷顿-朗肯循环”卡诺电池系统。利用 EBSILON Professional 软件对系统进行建模，在此基础上开展热力学和敏感性分析，最后利用遗传算法对关键参数进行优化。

1 系统介绍

1.1 基于 S-CO_2 逆布雷顿循环和燃煤机组的卡诺系统

选取 S-CO_2 逆布雷顿循环为储能循环，熔盐储热罐作为储热系统，燃煤发电机组作为释能循环，构成卡诺电池系统（简称参考系统），系统示意如图 1 所示。在 S-CO_2 逆布雷顿循环中，弃电和透平共同驱动压缩机将 S-CO_2 进行压缩后经熔盐加热器对熔盐放热，完成储热过程。之后 S-CO_2 经回热器放热后进入透平做功，透平出口的 S-CO_2 依次经冷源加热器和回热器加热后，进入压缩机完成储能循环。其

中，冷源加热器的热源为燃煤机组乏汽，实现了燃煤机组的余热回收。储能循环的主要热力学参数见表 1。储热系统以二元盐（60%的硝酸钠＋40%的硝酸钾）为介质，储、释热温度分别为 320、560 ℃。储热时，冷罐的熔盐经熔盐加热器加热后存入热罐；释热时，热罐中的熔盐分流经过再热器和过热器对蒸汽加热后汇合，之后进入蒸发器和预热器加热锅炉给水。燃煤发电机组选取典型 300 MW 亚临界燃煤机组，机组型号为 N300-16.67/537/537，汽轮机型式为一次中间再热、单轴、凝气式汽轮机，回热系统采用“三高四低一除氧”运行，机组背压为 5.39 kPa。表 2 给出了燃煤机组 THA 工况下的关键参数。

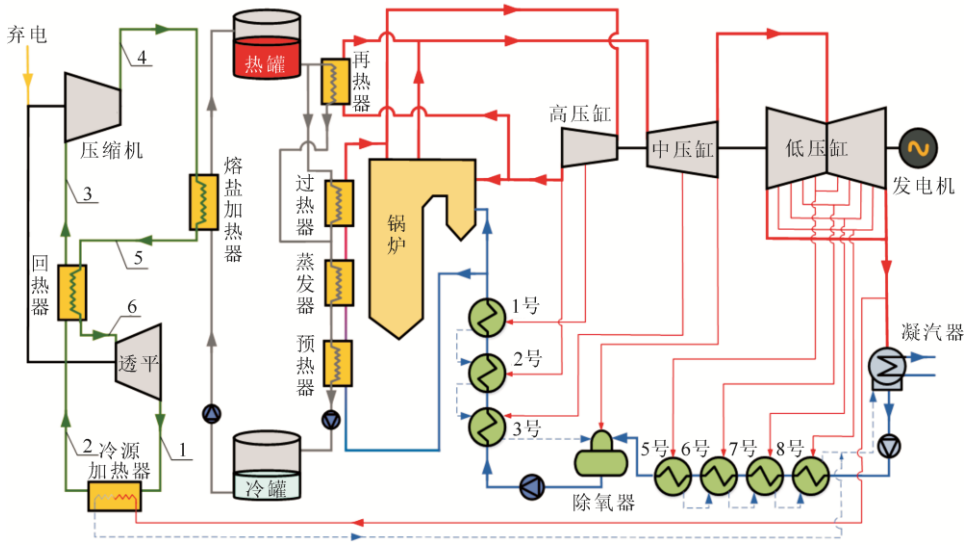


图 1 基于燃煤机组的卡诺电池系统（参考系统）示意

Fig.1 Schematic diagram of the Carnot battery system based on a coal-fired power unit (reference system)

表 1 $S\text{-}CO_2$ 逆布雷顿循环热力学参数

Tab.1 Thermodynamic parameters of the $S\text{-}CO_2$ reverse Brayton cycle

项目	数值
冷源加热器出口工质温度/℃	32
压缩机入口压力/MPa	7.40
压缩机出口压力/MPa	20.00
压缩机出口温度/℃	570
熔盐加热器出口温度/℃	431
透平等熵效率	0.90
压缩机等熵效率	0.90

表 2 燃煤发电机组 THA 工况主要热力学参数

Tab.2 Main thermodynamic parameters of the coal-fired power unit

项目	数值
主蒸汽流量/(t·h^{-1})	915.09
主蒸汽压力/MPa	16.67
主蒸汽温度/℃	537
再热蒸汽流量/(t·h^{-1})	756.12
再热蒸汽压力/MPa	3.20
再热蒸汽温度/℃	537
乏汽流量/(t·h^{-1})	541.20
乏汽损失/MW	362.13
发电量/MW	300.15
背压/kPa	5.39

图 2 为参考系统储能循环的温度−比熵（*T*-*s*）图。由于 $S\text{-}CO_2$ 在临界点附近等压线较为密集，导致透平做功过程（6-1）的比功较小，为 21.25 kW/kg。若在回热环节（5-6）中部分工质提前做功，有助于提高单位工质在透平的比功。

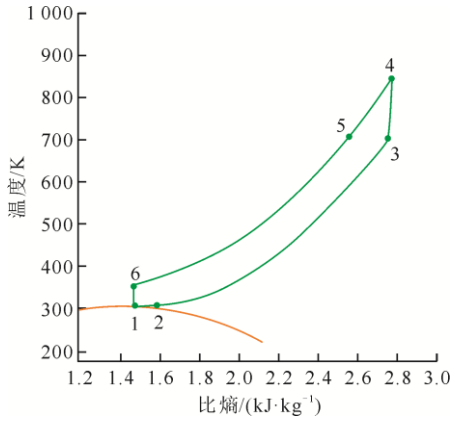


图 2 $S\text{-}CO_2$ 逆布雷顿循环 *T*-*s* 图

Fig.2 *T*-*s* diagram of the $S\text{-}CO_2$ reverse Brayton cycle

1.2 新型“$S\text{-}CO_2$ 逆布雷顿−朗肯循环”卡诺电池系统

鉴于此，本文提出一种新型“$S\text{-}CO_2$ 逆布雷顿−朗肯循环”卡诺电池系统（简称新型系统），其流程示意如图 3 所示。相较于参考系统，新型系统将回

热器分为 2 个，并在回热器 1 后增加了分流膨胀。此时，经回热器 1 放热后的工质一部分进入回热器 2 继续回热并进入透平 2 做功；另一部分则直接通过透平 1 膨胀做功。两部分工质在冷源加热器之后汇合。此时，透平 1 中的工质在远离临界点的状态膨胀，可显著提高工质膨胀过程的比功。

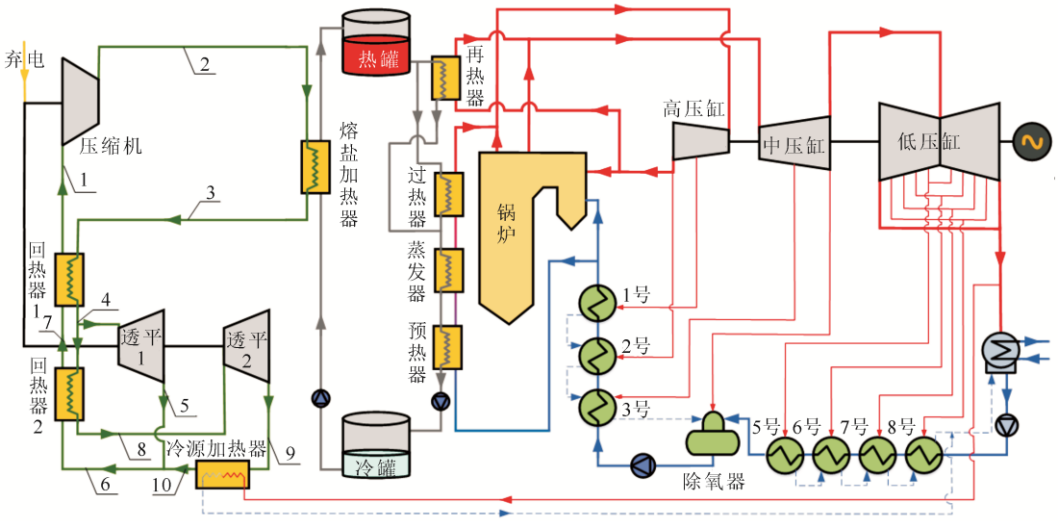


图 3 新型“S-CO_2 逆布雷顿-朗肯”卡诺电池（新型系统）示意

Fig.3 Schematic diagram of the novel “S-CO_2 reverse Brayton-Rankine” Carnot battery (novel system)

2 建模方法和热力学评价指标

2.1 建模方法

采用 EBSILON Professional 软件对新型系统进行建模[23]，该软件被广泛用来模拟热力循环过程，并对热力系统进行设计和优化。新型系统的模型建构如图 4 所示。模型主要假设：

1）工质在压缩机中的压缩和工质在透平中的膨胀均为绝热过程；

2）忽略管道和换热器中的散热损失；

3）所有过程均达到稳定状态；

4）熔盐储释热过程均不考虑最小不凝结流量；

5）熔盐储热罐无散热损失；

6）电动机效率、锅炉效率和发电效率分别为 99%、93%和 99%。

新型系统中 CO_2 的物性参数来源于美国国家标准与技术研究所（NIST）的物性数据库 Refprop。压缩机耗功 W_C 和透平输出功 W_T 分别可表示为[24]：

$$W_C = m(h_{out,C} - h_{in,C}) = m(h'_{out,C} - h_{in,C})\eta_{s,C} \quad (1)$$

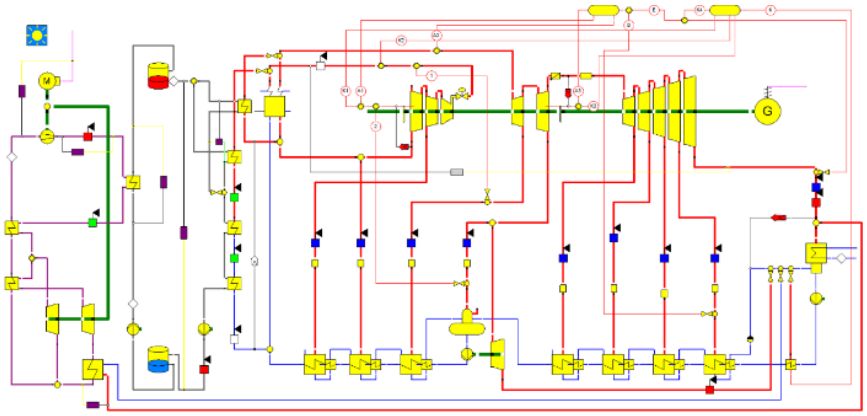


图 4 基于 EBSILON Professional 平台的新型系统模型示意

Fig.4 Schematic diagram of the model of the novel system based on the EBSILON Professional platform

$$W_T = m(h_{in,T} - h_{out,T}) = m(h_{in,T} - h'_{out,T})\eta_{s,T} \quad (2)$$

式中：下标 C 和 T 分别代表压缩机和透平；m 为通过压缩机和透平的质量流量，kg/s；h_{in} 和 h_{out} 分别为进、出口实际比焓，kJ/kg；h'_{out} 为出口的理想比

焓（定熵过程），kJ/kg；η_s 为等熵效率，%。

压比β定义为：

$$\beta=\frac{p_{\mathrm{out,C}}}{p_{\mathrm{in,C}}}=\frac{p_{\mathrm{in,T}}}{p_{\mathrm{out,T}}} \tag{3}$$

式中：p_{in} 和 p_{out} 分别代表压缩机和透平的进、出口压力，MPa。

分流比α定义为进入透平 1 的工质的流量比例，可表示为：

$$\alpha=\frac{M_{\mathrm{in,T}}}{M} \tag{4}$$

式中：$M_{\mathrm{in,T}}$ 和 M 分别代表直接进入透平 1 的工质质量流量和工质总的质量流量，kg/s。

回热器、熔盐换热器和冷源换热器的换热量 Q 可表示为：

$$Q=m_{\mathrm{c}}(h_{\mathrm{out,c}}-h_{\mathrm{in,c}})=m_{\mathrm{h}}(h_{\mathrm{in,h}}-h_{\mathrm{out,h}}) \tag{5}$$

式中：下标 c 和 h 分别代表换热器冷侧和热侧。

蒸汽吸热量 Q_{S} 为：

$$Q_{\mathrm{S}}=Q_{\mathrm{B}}+Q_{\mathrm{R}} \tag{6}$$

式中：Q_{B} 和 Q_{R} 分别为蒸汽在燃煤锅炉和储热系统放热过程的吸热量，kW。

蒸汽在燃煤锅炉中吸热量 Q_{B} 可表示为：

$$\begin{aligned}Q_{\mathrm{B}}&=Q_{\mathrm{coal}}\eta_{\mathrm{B}}=\\&[m_{\mathrm{ms}}(h_{\mathrm{out,ms}}-h_{\mathrm{in,ms}})+m_{\mathrm{rs}}(h_{\mathrm{out,rs}}-h_{\mathrm{in,rs}})]\end{aligned} \tag{7}$$

式中：下标 ms 和 rs 分别代表进入燃煤锅炉的主蒸汽和再热蒸汽；Q_{coal} 为锅炉消耗燃煤热量，kW；η_{B} 为锅炉效率。

蒸汽在熔盐放热过程的吸热量 Q_{R} 可表示为：

$$Q_{\mathrm{R}}=m'_{\mathrm{ms}}(h_{\mathrm{out,ms}}-h_{\mathrm{in,ms}})+m'_{\mathrm{rs}}(h_{\mathrm{out,rs}}-h_{\mathrm{in,rs}}) \tag{8}$$

式中：m'_{ms} 和 m'_{rs} 分别为进入熔盐放热过程过热器和再热器的蒸汽质量流量，kg/s。

汽轮机膨胀做功为：

$$W=\sum_{i=1}^{n}W_i=\sum_{i=1}^{n}(m_i\Delta h_i\eta_{\mathrm{s},i}\eta_{\mathrm{m},i}) \tag{9}$$

式中：n 为汽轮机膨胀级数；W_i 为第 i 级膨胀级做功量，kW；Δh_i 为第 i 级膨胀级理想焓降，kJ/kg；η_{m} 为机械效率。

膨胀级变工况遵循弗留格尔公式：

$$\frac{m_{\mathrm{A}}}{m_{\mathrm{B}}}=\sqrt{\frac{p_{\mathrm{in,A}}^2-p_{\mathrm{out,A}}^2}{p_{\mathrm{in,B}}^2-p_{\mathrm{out,B}}^2}}\sqrt{\frac{T_{\mathrm{in,B}}}{T_{\mathrm{in,A}}}} \tag{10}$$

式中：下标 A、B 分别代表 2 种工况；T_{in} 表示膨胀级进口温度，K。

基于上述公式和模型，表 3 给出了不同工况下汽轮机发电功率模拟值和实际值的对比。可以看出模拟值与电厂汽轮机的实际值具有高度的一致性。表 4 给出了热泵系统各状态点参数与现有文献数据的对比。表 4 数据表明本文模型具有较高的准确性。

表 3　不同工况下汽轮机发电功率模拟值和实际值对比

Tab.3 Comparison of the simulated and actual values of the steam turbine's power generation capacity under different operating conditions

工况	主蒸汽流量/(t·h^{-1})	实际值/MW	模拟值/MW	误差/%
THA	915.09	300.15	300.13	0.01
75%THA	666.57	226.22	226.62	0.18
50%THA	453.83	151.77	151.23	0.36
40%THA	373.80	121.67	121.49	0.15
30%THA	290.70	91.43	91.01	0.46

表 4　热泵系统模型验证[9]

Tab.4 Validation of the heat pump system models[9]

项目	实际值/MW	模拟值/MW	误差/%
压比	3.78	3.78	0
压缩机入口压力/MPa	7.50	7.50	0
压缩机做功/MW	18.22	18.21	0.05
透平耗功/MW	4.30	4.29	0.23
弃电量/MW	13.91	13.91	0
透平入口温度/℃	146.85	146.36	0.33
压缩机入口温度/℃	435.15	435.15	0
CO_2 质量流量/(t·h^{-1})	287.01	287.65	0.22

2.2 评价指标

选取储能循环的能效系数（coefficient of performance，COP）和新型系统的往返效率（round trip efficiency，RTE）评价储能环节和整个储放电环节的热力学性能。其中储能循环的能效系数 c_{COP} 可表示为：

$$c_{\mathrm{COP}}=\frac{Q_{\mathrm{M}}}{W_{\mathrm{C}}-W_{\mathrm{T}}}=\frac{Q_{\mathrm{M}}}{E_{\mathrm{w}}} \tag{11}$$

式中：Q_{M} 为储能循环熔盐吸热量，kW；E_{w} 为储能循环接纳的弃电功率，kW。

新型系统的往返效率 η_{RTE} 可表示为[25]：

$$\eta_{\mathrm{RTE}}=c_{\mathrm{COP}}\eta_{\mathrm{e}}\eta_{\mathrm{p}}\eta_{\mathrm{m}} \tag{12}$$

式中：η_{e}、η_{m} 和 η_{p} 分别为发电机效率、机械效率和释能过程热转电效率。选取 75%THA 工况为典型释能过程[26]，η_{p} 取 44.59%。

3 结果与讨论

3.1 设计工况热力学性能分析

在新型系统回热器 2 的上端差为 15 ℃、分流比为 0.2 的工况下，图 5 给出了新型系统储能循环的 *T-s* 图。其中，透平 1 中膨胀过程（4—5）的比功为 82.37 kW/kg，透平 2 中膨胀过程（8—9）的比功为

18.75 kW/kg。膨胀过程的平均比功为 31.47 kW/kg，较原系统高 10.22 kW/kg。这使得新型系统在接纳弃电均为 100 MW 且压比不变的情况下，压缩机的工质流量提高。

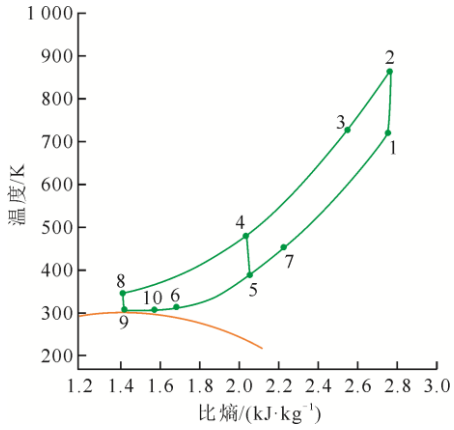


图 5 新型系统储能循环 *T-s* 图

Fig.5 *T-s* diagram of energy storage cycle in the novel system

表 5 进一步给出了参考系统和新型系统储能循环的热力学性能对比。

表 5 参考系统和新型系统储能循环的热力学性能对比

Tab.5 Thermodynamic performance of the energy-storage cycles of the reference system and the novel system

项目	参考系统	新型系统	差值
工质流量/(t·h⁻¹)	2 566.10	2 767.89	201.79
压缩机耗功/MW	115.14	124.20	9.06
回热器 2 上端差/℃	—	15	—
分流比	—	0.20	—
透平做功/MW	15.14	24.20	9.06
透平 1 做功/MW	—	12.67	—
透平 2 做功/MW	—	11.53	—
回热器总回热量/MW	370.55	358.99	–11.56
回热器 1 回热量/MW	—	125.18	—
回热器 2 回热量/MW	—	233.81	—
余热回收量/MW	22.23	31.84	9.61
能效系数 c_{COP}	1.22	1.32	0.10
往返效率 η_{RTE}/%	53.31	57.68	4.37

可以看出，在设计工况下，新型系统的透平做功量、余热回收量和 COP 均较参考系统有所提高。其中新型系统的透平做功量较参考系统提高 9.06 MW，提高了 59.84%。此时，压缩机耗功也相应提高了 9.06 MW。鉴于压缩比功不变，新型系统的工质流量较参考系统提高了 201.79 t/h。因此，虽然有分流膨胀，但新型系统中冷源换热器的余热回收量仍较参考系统高 9.61 MW，提高了 43.23%。此时，新型系统储能循环的 COP 为 1.32，较参考系统提高了 0.10。以燃煤机组发电 75%THA 工况为典型释能工况，新型系统的 RTE 为 57.68%，较参考系统提高了 4.37 百分点。

3.2 关键参数敏感性分析

新型系统中压比β、分流比和回热器 2 上端差均对系统热力学性能有较大影响。鉴于此，在压缩机出口工质温度为 570 ℃，储能循环接纳弃电量为 100 MW 的条件下，针对上述参数开展敏感性分析。

图 6 为压比β变化对 2 个系统透平做功、能效系数和往返效率等热力学性能的影响。

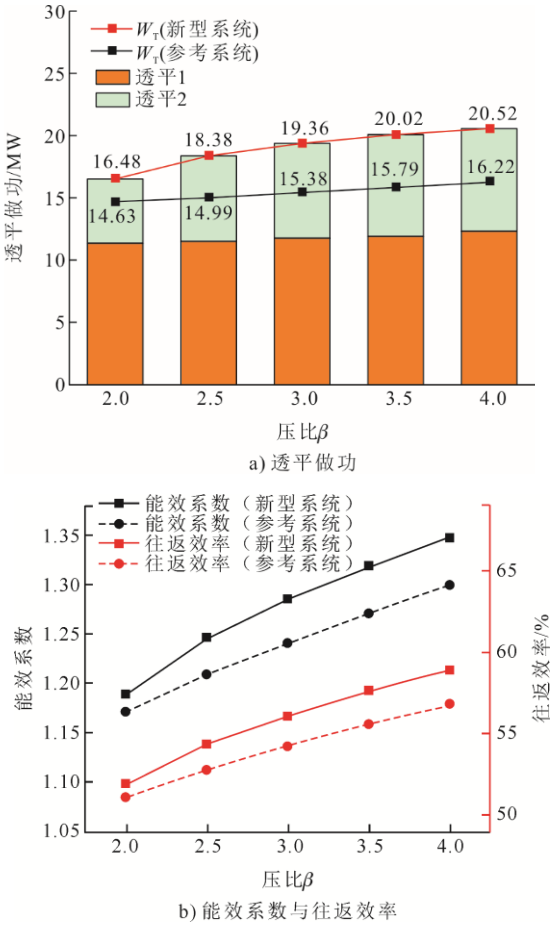


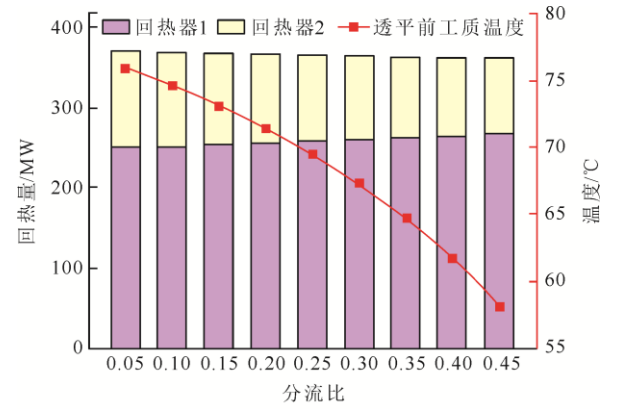
图 6 压比β对 2 个系统热力学性能的影响

Fig.6 Effect of pressure ratio β on thermodynamic performance of the two systems

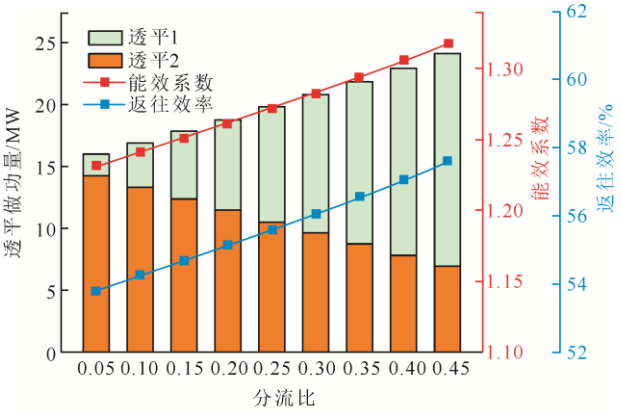
由图 6a)可看出，随着压比β的提高，2 个系统透平做功均增加，且二者差值也在增加。此外，新型系统中透平做功量的提高主要来源于透平 2。当压比由 2.0 提高到 4.0，参考系统的透平做功由 14.63 MW 增加到 16.22 MW，提高了 10.87%。新型系统的透平做功由 16.48 MW 增加到 20.52 MW，提高了 24.51%。2 个系统透平做功的差值由 1.59 MW 提高到 4.04 MW。同时，新型系统中透平 2 的做功量由

11.36 MW 增加到 12.19 MW，提高了 7.31%。由图 6b)可以看出，2 个系统的 COP 和 RTE 都随着压比的增加而增大，且新型系统的 COP 和 RTE 始终都大于参考系统。当压比由 2.0 提高到 4.0，新型系统和参考系统的 COP 分别提高 0.16 和 0.13，RTE 分别提高 6.93 百分点和 5.66 百分点。新型系统的 COP 和 RTE 最大分别为 1.35 和 58.87%。

图 7 展示了分流比对新型系统热力学性能的影响。



a) 回热量和透平前工质温度



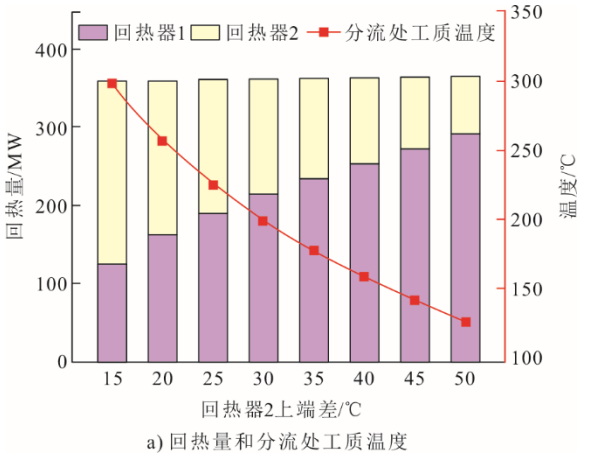
b) 能效系数、返往效率和透平做功量

图 7 分流比对新型系统热力学性能的影响

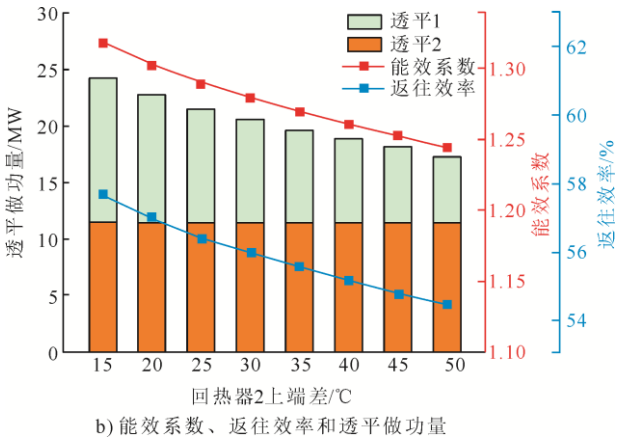
Fig.7 Effect of split ratio on thermodynamic performance of the novel system

从图 7a)可以看出，随着分流比的提高，回热器的总回热量变化较小，回热器 1 的回热比重增加，同时，透平 2 前的工质温度逐渐下降。当分流比从 0.05 增至 0.45，回热器 1 的回热量从 250.15 MW 增至 267.70 MW，回热器 2 的回热量从 119.24 MW 降至 93.17 MW。透平前工质温度从 75.90 ℃降至 58.14 ℃。此时，若分流比进一步增大，则透平出口工质将变为液态。分流比的增大会增加透平 1 中工质的流量，由于透平 1 的比功较透平 2 大，随分流比增大，新型系统的透平做功量也增加。由图 7b)可以看出，由于随着分流比的增大进入透平 1 的工质流量增加，透平 1 的做功量从 1.78 MW 增加至 17.18 MW，透平 2 的做功从 14.25 MW 减少到 7.00 MW，透平总做功量从 16.03 MW 增加到 24.12 MW。COP 从 1.23 增加至 1.32，往返效率从 53.83%增至 57.60%。

图 8 给出了分流比和压比一定时回热器 2 上端差对新型系统热力学性能的影响。



a) 回热量和分流处工质温度



b) 能效系数、返往效率和透平做功量

图 8 分流比和压比一定时回热器 2 上端差对新型系统热力学性能的影响

Fig.8 Effect of upper terminal difference of recuperator 2 on thermodynamic performance of the novel system with a certain split ratio and pressure ratio

从图 8a)可以看出，回热器 2 上端差的变化对分流处工质温度的影响较大，随着上端差从 15 ℃增加至 50 ℃，分流处的工质温度从 298.59 ℃降低到 127.69 ℃。回热器回热量变化较小，但回热器 1 的回热比重增加，回热器 1 的回热量从 125.18 MW 增加至 293.44 MW，回热器 2 的回热量从 233.8 MW 减少到 74.25 MW。由图 8b)可以看出，透平做功量、COP 和往返效率随回热器 2 上端差的增大而减小。总透平做功量减少是由透平 1 的做功量减少造成

的，总透平做功量从 24.20 MW 减少到 17.24 MW，减少了 6.96 MW，透平 1 的做功量从 12.67 MW 减少到 5.71 MW，减少了 6.96 MW。端差的增大使得系统的 COP 从 1.32 降低到 1.24，RTE 从 57.61%减小到 54.39%。

3.3 全局参数优化

鉴于分流比、压比以及回热器 2 上端差对新型系统的热力学性能有较大影响，进一步采用遗传算法对上述关键参数进行优化。遗传算法是一种广泛应用于工程设计的优化方法，是基于达尔文生物进化论的算法，通过模拟自然进化过程（选择、交叉和变异）来实现特定对象的优化[26-27]。遗传算法关键参数设置如表 6 所示。

表 6 遗传算法关键参数
Tab.6 Key parameters of the genetic algorithm

项目	数值
种群规模	50
交叉概率	0.60
突变概率	0.50
每代取代的个体	0.75
终止代数	30

在此次优化过程中，以压缩机出口温度 570 ℃和透平 2 的排气干度 x=1 作为约束条件，RTE 被选为目标函数，可以描述为：

$$\mathrm{RTE} = f(\beta, D, \alpha) \tag{13}$$

式中：D 为回热器 2 上端差，℃。

在进化过程中，目标函数（即 RTE）值较高的个体得以存活并被允许产生下一代，而 RTE 值较低的个体则被淘汰。在进化过程之后，将在最后一代中选择最佳值。各关键参数优化范围如表 7 所示。

表 7 各关键参数优化范围
Tab.7 Optimization ranges of key parameters

项目	范围
分流比α	0~1
回热器 2 上端差 D/℃	10~50
压比β	2~4

参数优化前、后系统热力学性能对比见表 8。优化后分流比、回热器 2 的上端差和压比分别为 0.23、12.60 ℃和 3.09。此时，工质流量较优化前减小了 248.78 t/h。分流比的增大使透平 1 的做功增加了 2.77 MW，优化后透平总做功增加了 2.44 MW。同时，冷源加热器处余热回收量增加了 4.91 MW。优化后储能循环的 COP 和系统的 RTE 分别较优化前提高了 0.05 和 2.19 百分点，达到 1.37 和 59.87%。

表 8 优化前、后新型系统热力学性能对比
Tab.8 Thermodynamic performance of the novel system before and after optimization

项目	优化前	优化后	差值
压比	2.70	3.09	0.39
回热器 2 上端差/℃	15.00	12.60	–2.40
分流比	0.20	0.23	0.03
工质流量/(t h^{-1})	2 767.89	2 519.11	–248.78
压缩机耗功/MW	124.20	126.64	2.44
透平做功/MW	24.19	26.64	2.44
透平 1 做功/MW	12.66	15.43	2.77
透平 2 做功/MW	11.53	11.21	–0.32
回热器总回热量/MW	358.99	365.09	6.10
回热器 1 回热量/MW	125.18	76.28	–48.90
回热器 2 回热量/MW	233.81	288.80	54.99
余热回收量/MW	31.84	36.75	4.91
能效系数 c_{COP}	1.32	1.37	0.05
往返效率 η_{RTE}/%	57.68	59.87	2.19

4 结 论

1）采用分流膨胀，新型系统储能循环的透平做功量增加，进而提高系统的 COP 和 RTE。新型系统储能循环的透平做功量较参考系统提高了 9.06 MW，余热回收量提高了 9.61 MW，COP 提高了 0.10。新型系统的 RTE 达到 57.68%，较原系统提高了 4.37 百分点。

2）压比和分流比的增大以及回热器 2 上端差的下降可提高新型系统的 RTE。当压比从 2.0 增加到 4.0，新型系统的 RTE 从 51.94%提高至 58.87%。当分流比从 0.05 提高到 0.45，新型系统的 RTE 从 53.83%提高至 57.60%。当回热器 2 上端差从 15 ℃增大到 50 ℃，新型系统的 RTE 从 57.61%降低至 54.39%。

3）经遗传算法优化，在压比为 3.09、分流比为 0.23、回热器 2 上端差为 12.6 ℃时，新型系统储能循环的 COP 和 RTE 最大可分别达到 1.37 和 59.87%。

[参 考 文 献]

[1] 丁仲礼. 实现碳中和的基本逻辑和可行路径[J]. 中国石油企业, 2024(3): 9-10.
DING Zhongli. The basic logic and feasible path to achieve carbon neutrality[J]. Chinese Petroleum Enterprises, 2024(3): 9-10.

[2] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 136-148.
MA Tingshan, WANG Yan, LYU Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology of coupled energy storage for thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Suppl.1): 136-148.

[3] 牟春华, 居文平, 黄嘉驷, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7.
MU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation,

2018, 47(5): 1-7.
[4] DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: a state-of-the-art review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101756.
[5] 李扬, 王赫阳, 王永真, 等. 碳中和背景、路径及源于自然的碳中和热能解决方案[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 5-14.
LI Yang, WANG Heyang, WANG Yongzhen, et al. Carbon neutral background, pathways and nature-derived carbon neutral thermal solutions[J]. Huadian Power Technology, 2021, 43(11): 5-14.
[6] 郭苏, 何意, 阿依努尔·痒尔班, 等. 基于多储能技术经济性比较的可再生能源发电系统多目标容量优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 424-431.
GUO Su, HE Yi, AYINUR Kurban, et al. Multi objective capacity optimization of renewable energy generation systems based on economic comparison of multiple energy storage technologies[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(10): 424-431.
[7] MUHAMMAD H A, TAUSEEF-UR R, MÜSLÜM A, et al. Advances in thermal energy storage: fundamentals and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101109.
[8] 赵永亮, 王朝阳, 刘明, 等. 基于跨临界循环的卡诺电池储能系统构型优化[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(7): 1659-1666.
ZHAO Yongliang, WANG Chaoyang, LIU Ming, et al. Configuration optimization of Carnot battery energy storage system based on transcritical cycle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(7): 1659-1666.
[9] TAFUR-ESCANTA P, et al. Electrical energy storage using a supercritical CO_2 heat pump[J]. Energy Reports, 2022, 8: 502-507.
[10] FAN R, XI H. Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different Carnot battery systems for energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115037.
[11] DOSTAL V, HEJZLAR P, DRISCOLL M J. The supercritical carbon dioxide power cycle: comparison to other advanced power cycles[J]. Nuclear Technology, 2006, 154: 283-301.
[12] GEYER M, GIULIANO S. Conversion of existing cola plants into thermal storage plants[J]. Encyclopedia of Energy Storage, 2022, 2: 122-132.
[13] 卢沛, 王晋, 陈锴煌, 等. 新型全时段耦合余热的卡诺电池系统构建及热–经济性评估[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(11): 3084-3090.
LU Pei, WANG Jin, CHEN Kaihuang, et al. Construction and thermal-economic evaluation of a new Carnot battery system with full-time coupled waste heat[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(11): 3084-3090.
[14] 韩瑞, 廖志荣, 于博旭, 等. 面向火电厂改造的熔盐卡诺电池储能系统仿真研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3605-3615.
HAN Rui, LIAO Zhirong, YU Boxu, et al. Simulation study of molten salt Carnot battery energy storage system for thermal power plant retrofit[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3605-3615.
[15] HU W, SUN R, ZHANG K, et al. Thermoeconomic analysis and multiple parameter optimization of a combined heat and power plant based on molten salt heat storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108698.
[16] ZHANG X, SUN Y, ZHAO W, et al. The Carnot batteries thermally assisted by the steam extracted from thermal power plants: A thermodynamic analysis and performance evaluation[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 297: 117724.
[17] 孙瑞强, 李延兵, 刘明, 等. 集成外热源的超临界二氧化碳热泵储电系统性能研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(11): 1469-1476.
SUN Ruiqiang, LI Yanbing, LIU Ming, et al. Performance study of supercritical carbon dioxide heat pump power storage system with integrated external heat source[J]. Journal of Power Engineering, 2023, 43(11): 1469-1476.
[18] 封官斌, 李跃林, 程孝峰, 等. 高温卡诺电池关键技术及应用现状[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 1-9.
FENG Guanbin, LI Yuelin, CHENG Xiaofeng, et al. Key technologies and current applications of high-temperature Carnot batteries[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 1-9.
[19] ZHANG Y, YIN S, YAN X, et al. Performance of a CO_2-based mixture cycled transcritical pumped thermal energy storage system[J]. Renewable Energy, 2025, 238: 121893.
[20] 林小杰, 徐家豪, 孙鹏, 等. 基于相变材料的蒸汽卡诺电池热力学循环设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(1): 161-168.
LIN Xiaojie, XU Jiahao, SUN Peng, et al. Thermodynamic cycle design of steam Carnot battery based on phase change material[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(1): 161-168.
[21] 张琼, 王亮, 徐玉杰, 等. 热泵储电技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2018, 47(1): 178-185.
ZHANG Qiong, WANG Liang, XU Yujie, et al. Research progress on heat pump energy storage technology[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 47(1): 178-185.
[22] 佟勇婧. 超临界 CO_2 布雷顿循环发电系统设计优化与性能分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 5.
TONG Yongjing. Research on design optimization and performance analysis of supercritical CO_2 Brayton cycle power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 5.
[23] ZHAO S, WANG W, GE Z. Thermodynamic, operational, and techno-economic analysis of the cascade heating system with a double-unit[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113558.
[24] SALOMONE-GONZÁLEZ D, GONZÁLEZ-AYALA J, MEDINA A, et al. Pumped heat energy storage with liquid media: thermodynamic assessment by a Brayton-like model[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113540.
[25] BLANQUICETH J, CARDEMIL J M, HENRÍQUEZ M, et al. Thermodynamic evaluation of a pumped thermal electricity storage system integrated with large-scale thermal power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113134.
[26] 于博旭, 韩瑞, 刘倩, 等. 耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1461-1470.
YU Boxu, HAN Rui, LIU Qian, et al. Thermodynamic performance of flexible retrofit Carnot battery energy storage system in coupled thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1461-1470.
[27] XI H, LI M J, HE Y L, et al. Economical evaluation and optimization of organic Rankine cycle with mixture working fluids using R245fa as flame retardant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 1056-1070.

（责任编辑　李园）