

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

卢沛 王晋 陈锴煌 罗向龙 陈健勇 梁颖宗 陈颖

(广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006)

摘 要 卡诺电池 (CB) 是可同时实现储电和余热回收利用的新兴储电技术。当前耦合余热卡诺电池 (TI-CB) 仅在充电环节利用余热, 余热利用不充分。本文提出一种全时段耦合余热的卡诺电池系统 (DTI-CB), 通过将余热与有机朗肯循环 (ORC) 耦合, 实现余热与卡诺电池全时段高效集成, 并对其热—经济性能进行评估。相比 TI-CB 系统, DTI-CB 最高可提高 95.67% 的发电能力和降低 30.90% 的平准化度电成本; 相比 ORC 发电和 CB 独立系统, DTI-CB 在高负荷条件下具有更高的热经济性优势。

关键词 卡诺电池; 耦合余热; 热泵; 有机朗肯循环; 热经济性能

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2023)11-3084-07

Thermo-Economic Evaluation of a Novel Carnot Battery With Thermal Integration During Charging and Discharging Process

LU Pei WANG Jin CHENG Kaihuang LUO Xianglong CHEN Jianyong
LIANG Yingzong CHEN Ying

(Institute of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract Carnot battery (CB) is a novel electricity storage technology which could realize electricity storage and waste heat recovery simultaneously. The thermal integrated CB (TI-CB) only utilizes the waste heat energy during the charging process in previous study. The waste heat energy utilization is insufficient. A CB with thermal integration during charging and discharging process (DTI-CB) is proposed in this paper. The waste heat energy is effectively integrated with DTI-CB in all periods through being coupled to the Organic Rankine cycle (ORC). A thermo-economic evaluation of the proposed DTI-CB is conducted. Compared with TI-CB, the power output capacity could be increased 95.67% and the Levelized cost of storage could be reduced 30.90%. The thermo-economic performance of the proposed DTI-CB performs better than those of the single ORC and CB under the conditions with relatively higher heat utilization load.

Key words carnot battery; waste heat utilization; heat pump; organic Rankine cycle; thermo-economic performance

0 引 言

“双碳”目标的提出明确了国家绿色低碳发展战略, 一方面, 世界能源结构正逐渐向新能源等可再生能源为主的新格局转变, 然而因可再生能源发电的间歇性和波动性使得电力系统的灵活调节能力面临巨大挑战^[1]; 另一方面, 自然界和工业生产中存在种类和数量丰富的低品位热能 (太阳能、地热能、工业余热及发动机排烟热等), 充分回收和利用这些低品位热能, 具有提高能源利用效率的巨大潜力^[2]。然而由于低品位热能温位低、来源广且分散、投资回收期长等, 虽总量巨大但利用率不足 30%^[3]。

因此, 解决可再生能源发电产用不平衡和低品位热能回收利用率低的问题, 对实现“双碳”目标意义重大^[4]。

储电是实现电能的灵活调节和精确控制的关键技术, 对于促进能源转型起着至关重要的作用^[5]。现有规模化储电系统按能量转换形式可分为物理储能、化学储能和电磁储能。化学储能和电磁储能拥有可观的储能密度和响应速度, 常用于备用电源、平抑发电尖峰及往复性功率波动, 但成本昂贵、寿命短且安全性差。从储能规模、使用寿命和安全方

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51876043)

作者简介: 卢沛 (1996-), 男, 博士研究生, 主要从事能源系统优化研究。通信作者: 罗向龙, 教授, lxl-dte@gdut.edu.cn。

面考虑, 物理储能是现阶段最适用于可再生能源电网调峰、调频、填谷以及紧急事故备用的大规模储电方式^[6]。抽水蓄能和压缩空气储能是典型的基于电能 \rightarrow 机械能 \rightarrow 电能的规模化储能技术, 具有较高的往返效率和成熟度, 但其灵活应用受地理因素限制^[7]。基于热泵 (HP) 和有机朗肯循环 (ORC) 组成的卡诺电池 (CB) 是基于电能 \rightarrow 热能 \rightarrow 电能的储电技术, 具备不受地理条件限制、储存容量大、效率高和储能周期长等优点^[8]。由于卡诺电池的运行温度温和, 易于耦合低品位热能提高往返效率。耦合低品位热能卡诺电池 (TI-CB) 可同时实现储电和低品位热能深度回收利用, 具备其它储电形式不可比拟的优势^[9]。

TI-CB 系统在 2014 年首次提出^[10]。作者 Steinmann 讨论了该系统理论上的运行范围, 提出该系统可以通过热集成低品位热能作为 HP 系统的热源, 提高 HP 系统的 COP , 从而提高 TI-CB 的往返效率。Steinmann 等^[11]还在后续的研究中讨论了变种 TI-CB 应对不同应用场景下运行的可行性。Jockenhofer 等^[12]研究了 TI-CB 系统的能量转换情况, 指出 CB 系统由于能量转换环节较多, 其不可逆损失较大, 可利用耦合余热进行补偿, 耦合余热后的卡诺电池最大效率可从 52% 提高至 59%。Frate 等^[13]发现热集成对 TI-CB 系统有积极的影响, R1233zde 是 TI-CB 系统的工质最佳选择, 当热源温度达到 110°C, 使用 R1233zde 作为工质的系统往返效率可突破 100%。Hu 等^[14]讨论了不同低品位热能类型对 TI-CB 热经济性能的影响, 发现地热水是作为 TI-CB 热源的最佳的余热类型。

然而, 从节能减排的角度看, 当前卡诺电池研究中仅在充电循环耦合余热, 造成在放电循环中余热未得到利用而浪费, 因为有必要探索全时段耦合余热的卡诺电池系统。本文提出一种全时段耦合余热的卡诺电池系统 (DTI-CB), 将余热耦合进 ORC 发电循环中, 实现余热与卡诺电全时段高效集成, 并对其热经济性能进行评估。

1 系统描述

TI-CB 的系统结构如图 1 所示, 卡诺电池系统由 HP、ORC 和蓄热系统组成。在充电环节, 压缩机将谷电转换成机械能, 将工质压缩成高温高压气体 (1 \rightarrow 2) 进入冷凝器, 将热能存储进蓄热系统 (2 \rightarrow 4) 后通过节流阀减压进入蒸发器中吸收余热热量 (5 \rightarrow 1), 值得注意的是, 如果没有耦合余热, CB 的热源一般为空气。在放电过程, ORC 工质泵将工质加压 (6 \rightarrow 7) 送入蒸发器中吸收蓄热系统储藏的

热量 (7 \rightarrow 9), 工质在蒸发器中形成高压高温蒸汽进入膨胀机将热能转换成电能 (9 \rightarrow 10) 通过电网输送至用户端, 最终工质在冷凝器中完成冷凝 (10 \rightarrow 6) 重新回到工质泵。而 DTI-CB 系统中 ORC 系统需要增设一套预热器, 结构如图 2 示, 工质泵将加压后的工质送入预热器中吸收余热热量进行预热 (7 \rightarrow 11), 预热后的工质再进入蒸发器吸收蓄热系统的热量 (11 \rightarrow 9), 其他环节与 TI-CB 系统相同。增加预热器的好处在于可减少 ORC 蒸发器中工质与蓄热介质的换热温差, 减少能量损耗, 另外, 耦合余热也可以提高 ORC 系统的吸热量, 从而提高 ORC 系统的膨胀机输出能力。

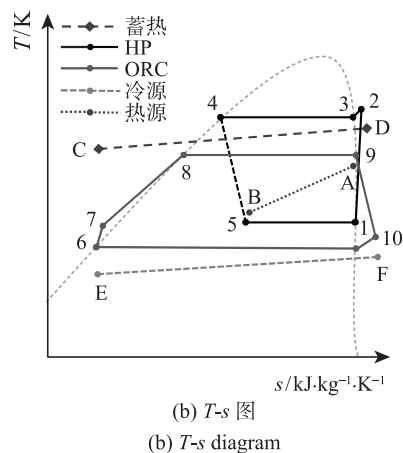
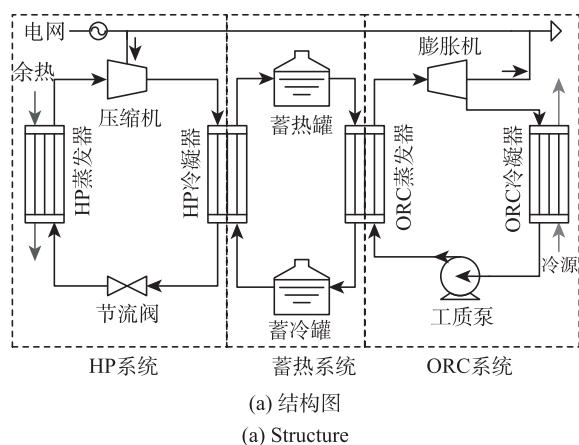


图 1 耦合余热卡诺电池系统 TI-CB 示意图
Fig. 1 Schematic of TI-CB

2 热-经济分析模型

卡诺电池系统由 HP 和 ORC 系统组成, 表 1 和表 2 为 HP 和 ORC 各部件的热力学计算公式。系统建模假设如下: 1) 系统运行时处于稳定状态; 2) 工质换热器出口状态为饱和状态; 3) 忽略压降和热耗散的影响。

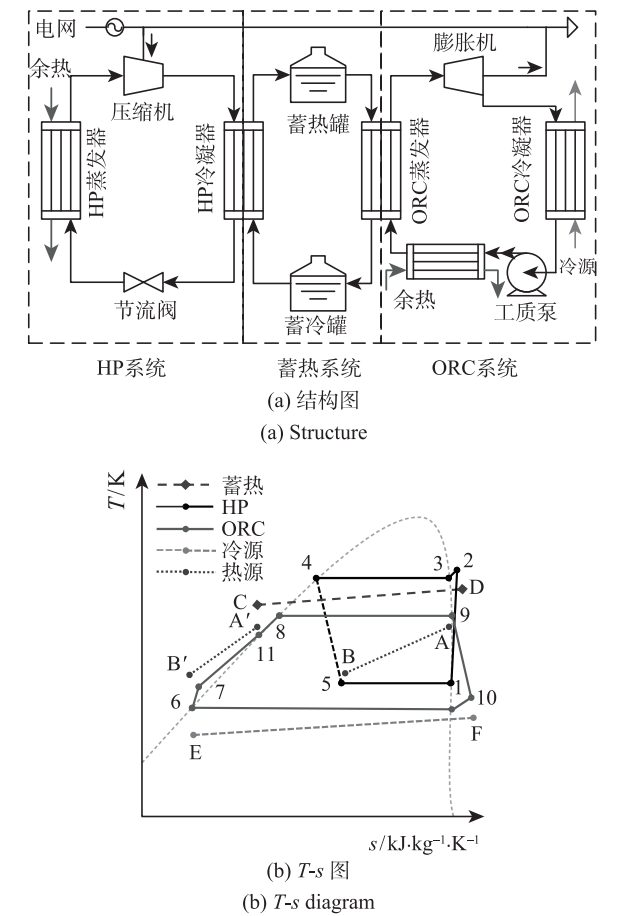


图 2 全时段耦合余热卡诺电池系统 DTI-CB 示意图
Fig. 2 Schematic of DTI-CB

表 1 TI-CB 系统热力学模型
Table 1 Thermodynamic model of TI-CB system

部件	HP	部件	ORC
压缩机	$W_{HP,com} = \dot{m}_{HP}(h_{2,is} - h_1)/\eta_{com}$	工质泵	$W_{ORC,pum} = \dot{m}_{ORC}(h_{7,is} - h_6)/\eta_{pum}$
冷凝器	$Q_{HP,con} = \dot{m}_{HP}(h_2 - h_4)$	蒸发器	$Q_{ORC,eva} = \dot{m}_{ORC}(h_9 - h_7)$
节流阀	$h_4 = h_5$	膨胀机	$W_{ORC,exp} = \dot{m}_{ORC}(h_9 - h_{10,is})\eta_{exp}$
蒸发器	$Q_{HP,eva} = \dot{m}_{HP}(h_1 - h_5)$	冷凝器	$Q_{ORC,con} = \dot{m}_{ORC}(h_{10} - h_6)$

往返效率 η_{rt} 是评估卡诺电池系统性能的指标,可由式 (1) 计算。而 ORC 作为卡诺电池的发电装置,其净输出功 NPO 可由式 (2) 计算。

$$\eta_{rt} = \frac{NPO}{W_{HP,com}} \quad (1)$$

$$NPO = W_{ORC,exp} - W_{ORC,pum} \quad (2)$$

平准化度电成本 $LCOS$ 是评估热力系统应用

潜力的成本指标,如式 (3) 所示。其中 LT 是系统寿命; C_{an} 是维护成本; r 为税率; E_{exp} 是全寿命周期中的总输出电力收入。具体成本计算方法请见文献 [15]。

$$LCOS = \frac{C_{tot} + \sum_{i=1}^{LT} C_{an}/(1+r)^i}{\sum_{i=1}^{LT} E_{exp}/(1+r)^i} \quad (3)$$

表 2 DTI-CB 系统热力学模型
Table 2 Thermodynamic model of DTI-CB system

部件	HP	部件	ORC
压缩机	$W_{HP,com} = \dot{m}_{HP}(h_{2,is} - h_1)/\eta_{com}$	工质泵	$W_{ORC,pum} = \dot{m}_{ORC}(h_{7,is} - h_6)/\eta_{pum}$
冷凝器	$Q_{HP,con} = \dot{m}_{HP}(h_2 - h_4)$	预热器	$Q_{ORC,pre} = \dot{m}_{ORC}(h_{11} - h_7)$
节流阀	$h_4 = h_5$	蒸发器	$Q_{ORC,eva} = \dot{m}_{ORC}(h_9 - h_{11})$
蒸发器	$Q_{HP,eva} = \dot{m}_{HP}(h_1 - h_5)$	膨胀机	$W_{ORC,exp} = \dot{m}_{ORC}(h_9 - h_{10,is})\eta_{exp}$
-	-	冷凝器	$Q_{ORC,con} = \dot{m}_{ORC}(h_{10} - h_6)$

注: m 为流量, kg/s; Q 为换热量, kW; W 为功率, kW; η 为等熵效率, %; 1~11 为循环状态点; is 指等熵点; com 为压缩机; con 为冷凝器; eva 为蒸发器; exp 为膨胀机; pre 为预热器; pum 为工质泵; thr 为节流阀。

3 结果与讨论

循环工质对卡诺电池性能影响显著。卡诺电池使用的工质必须具有无毒、化学稳定性、不易燃不易爆和安全等特点。现有关于卡诺电池的工质筛选工作中, R1233zd(E) 由于出色的综合性能表现受到广泛的关注。因此, 本文选取 R1233zd(E) 作为卡诺电池系统中 HP 和 ORC 的运行工质, 具体物性参数如表 3 所示。

表 3 R1233zd(E) 物性参数
Table 3 Thermal properties of R1233zd(E)

物性	数值/内容	物性	数值/内容
摩尔质量/(g/mol)	130.5	沸点/°C	18.26
临界温度/°C	165.6	临界压力/MPa	3.5709
ODP	0.00034	GWP	1
毒性	微毒	工质类型	干工质

本文旨在评估全时段耦合余热卡诺电池系统

热-经济性能并验证其优越性。首先,在相同余热利用情况下,将 DTI-CB 与传统 TI-CB 系统进行热经济性能对比;然后,在不同余热利用场景中,将直接利用余热发电的 ORC 系统和不集成余热的独立 CB 与 DTI-CB 进行热经济性能对比,验证卡诺电池系统全时段耦合余热的优势。表 4 为卡诺电池系统热经济性能优化设置参数。根据文献 [14] 的结果,选择地热水作为卡诺电池的热源。蓄热是卡诺电池中的重要环节,可使用相变蓄热或显热蓄热等方式,从经济性、安全性和使用寿命等方面考虑,本文采用 T55 型导热油作为蓄热介质。本文采用遗传算法作为驱动算法,以 $LCOS$ 作为优化目标。

表 4 卡诺电池系统热经济性能优化参数设置

Table 4 Setting parameters of the thermo-economic performance optimization of the CBs

参数	数值/类别	参数	数值/类别
热源介质	地热水	$\eta_{com}/\%$	70
热源温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	$\eta_{pum}/\%$	80
热源流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	20	$\eta_{exp}/\%$	85
热源负荷/MW	1	夹点温差/ $^{\circ}\text{C}$	5
冷源介质	水	冷凝压力/MPa	> 0.1
冷源温度/ $^{\circ}\text{C}$	25	系统寿命/a	25
冷源温升/ $^{\circ}\text{C}$	10	税率/ $\%$	5
蓄热介质	T55 导热油	电价/(USD/kWh)	0.05
蓄热温升/ $^{\circ}\text{C}$	> 10	年运行天数/d	300
蓄热效率/ $\%$	100	充/放电时长/h	12

3.1 DTI-CB 与 TI-CB 热经济性能对比

为验证 DTI-CB 在热经济性能上的优越性,与传统 TI-CB 进行热经济性能对比。图 3 和图 4 分别为 TI-CB 与 DTI-CB 的 $T-H$ 图和成本分布图。如图 3 所示,两个卡诺电池系统的 HP 系统表现几乎一致,主要区别在放电过程。由于 DTI-CB 在放电过程中可以充分利用余热对工质进行预热,DTI-CB 的 ORC 吸热量远远大于 TI-CB 的吸热量,因此提高了 ORC 膨胀机的输出能力。相比 TI-CB,DTI-CB 的 NPO 提高了 69.27%。但同样也会增加 DTI-CB 的成本,如图 4 所示,膨胀机和蓄热罐是卡诺电池系统中成本占比最高的两个部件,这是由于膨胀机的制造工艺较为复杂、显热蓄热方式需要较大的蓄热空间造成的。由于两个卡诺电池系统的充电过程表现基本一致,HP 系统和蓄热系统的成本基本相同,而 DTI-CB 的 NPO 大,大幅度提高了 DTI-CB 的 ORC 系统的成本,与 TI-CB 系统相比,DTI-CB 的总成本提高了 19.48%。但由于 DTI-CB 出色的输出能力,其 $LCOS$ 仅为 0.36USD/kWh,相比 TI-CB 系统 ($LCOS=0.53\text{USD/kWh}$),降低

了 30.90%。

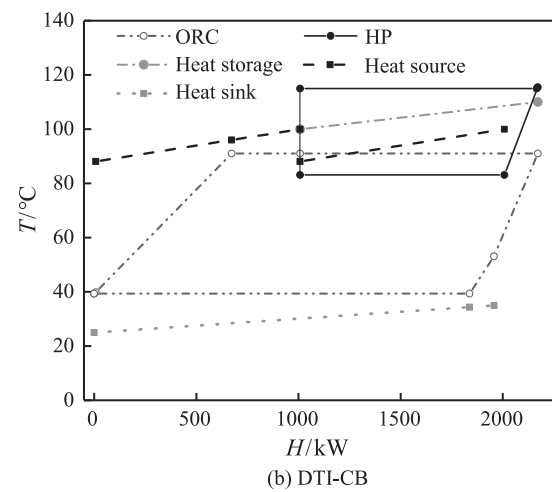
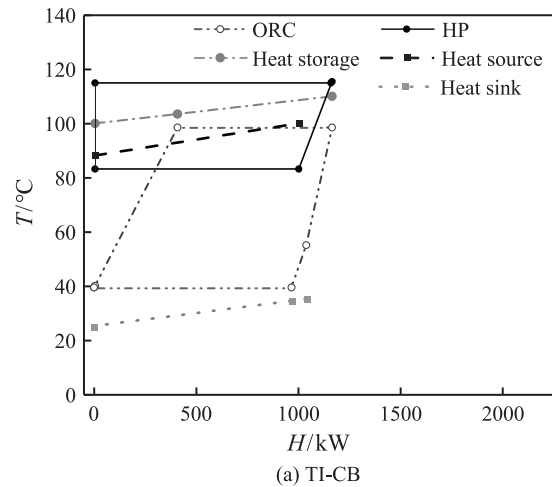


图 3 卡诺电池 $T-H$ 图
Fig. 3 $T-H$ diagram of CBs

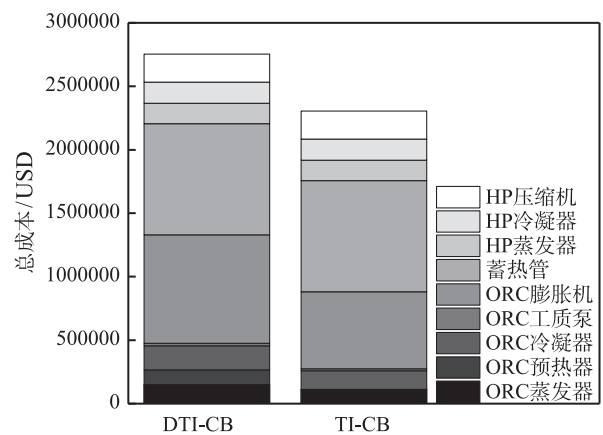


图 4 卡诺电池系统热力学性能
Fig. 4 Thermo-economic performance of CB

可见在同样的边界条件下,DTI-CB 有更出色的热经济性能。由于 DTI-CB 是通过集成余热的方

式实现了性能的提升,因此对 DTI-CB 和 TI-CB 系统在不同余热利用程度下的运行性能进行敏感性分析,余热供热量从 1 MW 提升到 4 MW,其他参数维持不变。图 5 和表 5 展示了不同余热利用程度下的卡诺电池热经济性能和热力学性能。随着余热供热量的提高,两个卡诺电池系统的发电量显著上升,其中,DTI-CB 的 NPO 上升幅度远大于 TI-CB,相比 TI-CB,DTI-CB 的 NPO 最高可提高 95.67%。两个系统的 $LCOS$ 均呈现先下降后上升的趋势,当余热供热量从 1MW 提升到 2MW 时,余热出口温度降低,其与工质的热匹配逐渐提升, $LCOS$ 呈现下降趋势,而当余热供热量超过 2MW,由于夹点温差的限制,较低的余热排放温度会降低 ORC 系统的蒸发温度,ORC 工质与热源的热匹配逐渐变差,结合表 5 数据,余热供热量越大 ORC 系统的热效率更低,从而导致 $LCOS$ 呈现上升趋势。整体上看,DTI-CB 的 $LCOS$ 均低于 TI-CB,降低幅度随余热供热量的提升而减少。另一方面,即使两个卡诺电池系统的 NPO 均随着余热供热量的提升而升高,但余热排放温度的降低也会造成 HP 系统压缩机吸入压力的下降,从而导致 COP 随余热供热量的提升而减少,因此两个卡诺电池的往返效率随着余热供热量的提升而减少,整体上看,DTI-CB 的往返效率均优于 TI-CB,最大可提高 69.25%,但往返效率随余热供热量提升的下降幅度比 TI-CB 大。

3.2 DTI-CB 与 ORC 发电 +CB 独立系统热经济性能对比

DTI-CB 除了可实现储电功能,其全时段耦合余热的方式可实现节能减排。为探讨该系统的应用潜力,将 DTI-CB 分别拆分成一个直接利用余热发电的 ORC 系统和一个无集成余热的独立 CB 系统,并与它们进行热经济性能比较。将余热供热量从 1 MW 到 4 MW 由小到大划分成 7 个案例,如表 6 所示,在每个案例中,ORCD 与 TI-CB 有相同的余热供热量,CB 与 DTI-CB 有相同的储电量。CB 的蒸发温度设置为 20℃,值得注意的是,ORC 的每天的发电时长为 24 h,为确保对比基准的一致性,ORC 和 CB 使用的工质同样为 R1233zd(E),其他边界参数维持与表 4 一致。

图 6 是 DTI-CB 与 ORC+CB 热经济性能对比图。图 6(a) 中展示了 3 个热力系统的全寿命周期的总发电量,从案例 1 到案例 7,ORC+CB 系统的总发电量逐渐增大。在 7 个案例中,由于 CB 系统的压缩机压缩比较大,换热环节繁多,其转换热储存的有用能较低,其往返效率极低(约 21.53%),因此

CB 的发电量低于 DTI-CB,但由于 ORC 发电时长比 DTI-CB 长,在案例 4 之前,ORC+CB 系统的总发电量比 DTI-CB 系统高 1.32% 到 3.50%。在案例 4 到 7,ORC 系统的发电量逐渐超过 CB,这是由于 ORC 的吸热量增加使得膨胀机有更高的输出能力,而 CB 中能量转换环节较多,其损耗在更大的充电量下更明显,相比之下,DTI-CB 系统利用余热可以补偿多层能量转换之间的损耗,在更大的

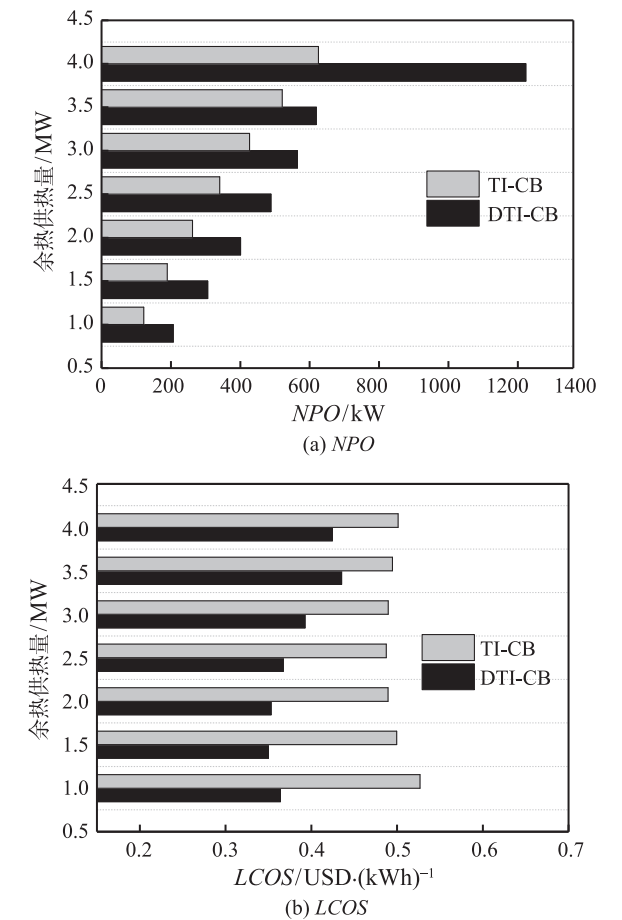


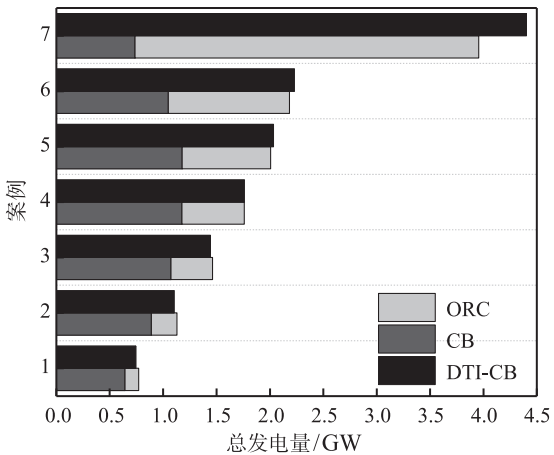
图 5 卡诺电池热经济性能
Fig. 5 Thermo-economic performance of CBs

表 5 卡诺电池系统热力学性能
Table 5 Thermodynamic performance of the CBs

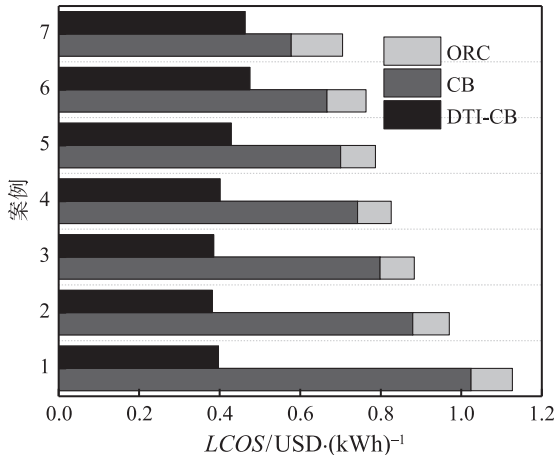
余热供 热量/MW	COP		$\eta_{ORC}/\%$		$\eta_{rt}/\%$	
	TI-CB	DTI-CB	TI-CB	DTI-CB	TI-CB	DTI-CB
1	7.10	7.10	10.49	9.55	74.58	126.24
1.5	5.89	5.88	10.49	9.25	61.77	99.61
2	5.00	5.00	10.49	8.90	52.46	80.15
2.5	4.33	4.33	10.49	8.50	45.43	65.09
3	3.80	3.81	10.49	7.99	39.94	52.84
3.5	3.38	3.38	10.49	7.31	35.51	42.21
4	3.04	3.04	10.49	7.25	31.93	32.54

表 6 案例设置
Table 6 Case Settings

案例	余热供热量/MW	卡诺电池充电量/kW
1	1	163.71
2	1.5	307.08
3	2	499.79
4	2.5	750.48
5	3	1069.01
6	3.5	1466.57
7	4	4152.23



(a) 总发电量



(b) LCOS

图 6 DTI-CB 与 ORC+CB 热经济性能对比

Fig. 6 Comparison of thermo-economic performance between DTI-CB and ORC+CB

余热供热量下该系统的优势更加明显, 从能量转换层面看, DTI-CB 中热量转换次数比 ORC+CB 更少, 且预热段与蒸发段与余热和蓄热介质的匹配更佳, 能量损耗远小于 ORC+CB 系统, 因此 DTI-CB 的总发电量比 ORC+CB 系统高 3.42% 到 30.63%。对于经济性而言, ORC 系统的部件数量远远少于卡诺电池系统, 且仅有膨胀机一个成本较高的部件,

但由于 CB 的较差往返效率, 其 HP 系统成本较高, 因此 CB 系统的 *LCOS* 远高于 DTI-CB, 在 7 个案例中, DTI-CB 系统的 *LCOS* 比 ORC+CB 系统低 39.81% 到 67.69%。综合上看, DTI-CB 在高负荷条件下更具有热经济性能上的优势。

4 结 论

本文提出一种全时段耦合余热的卡诺电池系统 (DTI-CB), 将余热耦合进 ORC 发电循环中, 实现余热与卡诺电池全时段高效集成, 并对其热经济性能进行评估并验证其优越性。结论如下:

在相同余热利用情况下, 将 DTI-CB 与传统 TI-CB 系统进行热经济性能对比, 两个卡诺电池系统的 HP 系统表现几乎一致, 而 DTI-CB 在放电过程中可以充分利用余热对工质进行预热, 其 ORC 吸热量远远大于 TI-CB 的吸热量, 随着余热供热量从 1MW 提升到 4MW, 两个卡诺电池系统的发电量显著上升, 其中, DTI-CB 的 *NPO* 上升幅度远大于 TI-CB, 相比 TI-CB, DTI-CB 的 *NPO* 最高可提高 95.67%, 往返效率均优于 TI-CB, 最大可提高 69.25%。两个系统的 *LCOS* 均呈现先下降后上升的趋势, DTI-CB 的 *LCOS* 均低于 TI-CB, 最高可便宜 30.90%。可见, 全时段耦合余热的方法可全面提高卡诺电池系统的热经济性能。

将 DTI-CB 和 ORC 发电 +CB 独立系统在 7 个案例中进行热经济性能对比, 当余热供热量在 1 MW 到 3 MW 之间, 由于 ORC 发电时长比 DTI-CB 长, ORC+CB 系统的总发电量比 DTI-CB 系统高 1.32% 到 3.50%。当余热供热量超过 3 MW, DTI-CB 系统利用余热可以补偿多层能量转换之间的损耗, 能量损耗远小于 ORC+CB 系统, 因此 DTI-CB 的总发电量比 ORC+CB 系统高 3.42% 到 30.63%。在 7 个案例中, DTI-CB 系统的 *LCOS* 比 ORC+CB 系统低 39.81% 到 67.69%。综合上看, DTI-CB 在高负荷条件下更具有热经济性能上的优势。

参 考 文 献

- [1] Østergaard P A, Duic N, Noorollahi Y, et al. Sustainable Development Using Renewable Energy Technology [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2430–2437
- [2] 朱杰人, 曹先常, 陈志良, 等. 低品位热能有机朗肯循环发电技术进展 [J]. 低温与超导, 2021, 49(1): 73–80
ZHU Jieren, CAO Xianchang, CHEN Zhiliang, et al. Review on The Progress of Organic Rankine Cycle Generation Technology Using Low-Grade Heat Energy [J]. Refrigeration, 2021, 49(1): 73–80
- [3] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究 [J].

- 科学通报, 2016, 61(17): 1856–1857
- HE Yaling. Research on Major Common Basic Problems of Efficient and Comprehensive Utilization of Industrial Waste Heat [J]. Science China Press, 2016, 61(17): 1856–1857
- [4] Barbour E, Wilson I A G, Radcliffe J, et al. A Review of Pumped Hydro Energy Storage Development in Significant International Electricity Markets [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 61: 421–432
- [5] Olympios V A, McTigue D J, Farres A, et al. Progress and Prospects of Thermo-Mechanical Energy Storage—a Critical Review [J]. Progress in Energy, 2021, 3(2): 022001
- [6] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy Storage Systems—Characteristics and Comparisons [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1221–1250
- [7] Luo X, Wang J H, Dooner M, et al. Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology [J]. Energy Procedia, 2014, 62: 603–611
- [8] 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
- [9] Frate G F, Ferrari L, Desideri U. Rankine Carnot Batteries with the Integration of Thermal Energy Sources: a Review [J]. Energies, 2020, 13(18): 4766
- [10] Steinmann W D. The CHEST (Compressed Heat Energy Storage) Concept for Facility Scale Thermo-Mechanical Energy Storage [J]. Energy, 2014, 69: 543–552
- [11] Steinmann W D, Bauer D, Jockenhöfer H, et al. Pumped Thermal Energy Storage (PTES) as Smart Sector-Coupling Technology for Heat And Electricity [J]. Energy, 2019, 183: 185–190
- [12] Jockenhöfer H, Steinmann W D, Bauer D. Detailed Numerical Investigation of a Pumped Thermal Energy Storage With Low Temperature Heat Integration [J]. Energy, 2018, 145: 665–676
- [13] Frate G F, Antonelli M, Desideri U. A Novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) System with Thermal Integration [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 1051–1058
- [14] Hu S Z, Yang Z, Li J, et al. Thermo-Economic Analysis of The Pumped Thermal Energy Storage with Thermal Integration in Different Application Scenarios [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114072