

储热储冷多场景应用专刊



热泵与电加热耦合的卡诺电池电转热过程建模与性能研究

王天堃¹, 殷文兴², 邢刚¹, 韩小寒³, 王志得³, 乔永辉²

(¹国电电力发展股份有限公司, 北京 100101; ²西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安 710129; ³北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

摘要: 为提升高比例可再生能源电力系统的调峰能力, 本研究针对火电机组灵活改造场景, 构建了热泵与电加热耦合的卡诺电池电转热过程模型, 研究了不同耦合方式下的系统热力学性能。基于 Aspen HYSYS 软件, 建立以空气为工质的逆布雷顿循环稳态热力学模型, 系统分析了串联与并联两类耦合方式下的运行特性及性能差异。串联系统中, 分别研究了电加热器在压缩机前、压缩机后及换热器后的三种布置形式。结果表明: 在无回热系统中, 电加热器置于压缩机后时能实现最佳性能, 制热系数(COP)最高达2.065; 在有回热系统中, 电加热器置于熔盐换热器后时, 系统能效最优, COP最高为1.292。本研究进一步构建了两种并联系统模型: 两热泵并联系统与热泵电加热并联系统。研究结果显示, 两热泵系统在额定负荷下具有更高的产热能力, 而热泵电加热系统在部分负荷下的能效提升更显著, COP随输入功率降低由1.182上升至1.230, 表现出优异的调节灵活性。综合分析表明, 电加热与热泵的耦合形式显著影响系统的能量品位匹配与运行效率: 紧密耦合有利于提升协同效率, 解耦设计则能在复杂系统中维持高效稳定运行。本研究揭示了热泵与电加热协同运行的关键机理与优化方向, 为火电机组灵活改造及卡诺电池储能系统工程应用提供了理论依据。

关键词: 卡诺电池; 热泵; 电加热; 耦合模型; 热力学分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1003

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-806-11

Modeling and performance study of the electricity-to-heat process in a Carnot battery coupled with a heat pump and electric heating

WANG Tiankun¹, YIN Wenxing², XING Gang¹, HAN Xiaohan³, WANG Zhide³, QIAO Yonghui²

(¹GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China; ²School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China; ³National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: This study aims to improve the peak-shaving capabilities of power systems with a high proportion of renewable energy by exploring the flexible retrofitting of thermal power units. We develop a model for the electricity-to-heat conversion process in a Carnot battery integrated with a heat pump and electric heating. The thermodynamic performance of the system is analyzed under various coupling configurations. A steady-state thermodynamic

收稿日期: 2025-11-05; 修改稿日期: 2025-11-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52406195)。

第一作者: 王天堃(1982—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为清洁低碳节能灵活智能燃煤发电, E-mail: tiankun.wang@chnenergy.com.cn;

通信作者: 乔永辉, 教授, 主要研究方向为能源动力领域的多相流动数值模拟, E-mail: yhqiao@nwpu.edu.cn。

引用本文: 王天堃, 殷文兴, 邢刚, 等. 热泵与电加热耦合的卡诺电池电转热过程建模与性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 806-816.

Citation: WANG Tiankun, YIN Wenxing, XING Gang, et al. Modeling and performance study of the electricity-to-heat process in a Carnot battery coupled with a heat pump and electric heating[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 806-816.

model utilizing an air working fluid reverse Brayton cycle is constructed using Aspen HYSYS. We systematically evaluate the operating characteristics and performance differences of two coupling types: series and parallel. In the series configuration, we examine three arrangements of the electric heater: before the compressor, after the compressor, and after the heat exchanger. Results show that in the system without recuperation, optimal performance is achieved when the electric heater is positioned after the compressor, yielding a maximum coefficient of performance (COP) of 2.065. In the recuperated system, the best configuration is with the electric heater positioned after the molten salt heat exchanger, which yields a maximum COP of 1.292. In addition, we develop two parallel system models: a dual heat pump parallel system and a heat pump-electric heater parallel system. The results reveal that the dual heat pump system provides higher heat output under rated load conditions, whereas the heat pump-electric heater parallel system shows a more significant increase in energy efficiency under part-load conditions, with the COP increasing from 1.182 to 1.230 as input power decreases, thus demonstrating excellent operational flexibility. Our comprehensive analysis shows that the coupling configuration between electric heating and the heat pump significantly affects energy-grade matching and system efficiency. More specifically, tight coupling enhances synergistic performance, whereas decoupled designs promote stable and efficient operation in complex systems. This study elucidates the key mechanisms and optimization pathways for heat pump-electric heating synergy, offering theoretical support for the flexible retrofitting of thermal power units and the engineering application of Carnot battery energy storage systems.

Keywords: Carnot battery; heat pump; electric heating; coupling model; thermodynamic analysis

随着化石能源的逐步枯竭以及环境问题的日益严重,以传统火力发电为主的能源供应体系正经历深刻变革,逐步向以风能和太阳能等清洁能源为主的新型体系过渡^[1-2]。然而,可再生能源发电固有的间歇性与波动性,将其高比例纳入电网后,对电力系统的安全稳定运行造成了显著冲击^[3]。为了平衡此种波动带来的供需矛盾,迫切要求传统火电机组提升其灵活调峰能力,即能够快速、灵活地变动负荷以适应电网需求^[2-3]。在此背景下,对现有火电机组进行灵活性改造已成为保障新型电力系统稳定运行的关键技术路径之一。

耦合储能技术的火电机组改造是实现机组灵活调峰的一种主要解决方案^[4]。卡诺电池,又名热泵储电技术,本质上是一种基于热能存储与动力循环的大规模长时储能技术,其系统主要由电转热(P2H)、储热(TES)和热转电(H2P)三部分构成^[4-6]。面向火电厂的改造应用,该技术方案的核心在于最大限度地利用电厂现有资产——保留并沿用其原有

的发电循环作为系统的热转电部分,仅需新增电转热设备与熔盐储热系统^[6]。这种改造模式显著降低了项目的前期投资成本,使得熔盐卡诺电池成为一种极具经济性优势的大规模储能系统,有望在未来高比例可再生能源的电力系统中扮演关键角色,显著提升电网对可再生能源发电的消纳能力^[7]。

当前,针对熔盐卡诺电池的研究主要涵盖集成系统构建与效率分析^[8]、技术经济性论证^[9],以及电网调峰性能评估^[10]等多个方面。在电转热技术路径方面,Soo Kim等^[11]证实热泵碳排放量与平准化成本均优于传统电加热。然而,电加热凭借其快速响应特性,在提升机组调峰深度方面展现出独特价值,Ma等^[12]通过“中压缸排汽+电加热”方案将调峰深度提升至90.2%,Trevisan等^[13]的实验研究进一步验证了电加热器可在5秒内完成5 MWe功率爬升的优异动态性能。在系统集成优化方面,Zhou等^[14]提出的梯级储热系统通过电加热提升熔盐温度,使循环效率达76.22%,Yong等^[15]的研究

系列展示了不同技术路径的潜力,其中纯电阻加热方案在满负荷下实现41.8%的往返效率,而热泵-电加热混合系统^[16]在优化工况下更将效率提升至53%~56%。Vinnemeier等^[17]也指出热泵与电加热器的串联配置虽会使系统效率降低2%~5%,但能有效缓解高温热泵的技术挑战。

综上所述,现有研究在系统构型与性能分析方面积累了丰富的成果,但对不同电转热耦合方式在灵活调峰场景下的适应性规律仍缺乏系统研究,特别是热泵与电加热的协同运行机制及其在不同运行场景下的优化配置尚待深入探讨。因此,本研究对耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统开展研究,重点研究电转热环节的优化配置问题,通过建立详细的热力学模型,系统分析串联和并联等不同耦合方式下系统的运行特性,深入研究电加热器布置位置对系统性能的影响规律,并探讨各构型在不同运行场景下的适应性,为卡诺电池系统工程实践提供理论依据。

1 热力系统耦合模型构建

1.1 系统总体描述与边界条件

系统摒弃单一产热方式,采用热泵循环与直接电加热器相结合的复合结构。其核心在于利用电能驱动以空气为工质的热泵循环,从环境热源中吸收低品位热能,并将其提升至可加热熔盐储热介质的高温状态。为适应不同运行工况下对系统效率与调节能力的需求,本工作重点研究有回热与无回热两种热泵构型,并分析其与电加热器在不同串联、并联耦合方式下的性能特性。尽管直接电加热器的电热转换效率理论上限为100%,低于高性能热泵的制热系数,但其具备快速响应、结构简单及可稳定输出高温等优势,有效弥补了热泵在应对极端功率波动或实现更高温度输出时的不足。

为实现对上述复合系统的精确建模与定量分析,需明确系统边界与关键运行参数。本研究将电转热单元界定为以空气为闭式循环工质的独立系统,系统能量输入为电网电能,有效输出为存储于熔盐中的热能。系统与环境热源间存在热量交换,但工质无质量跨边界流动。系统中循环工质空气的温度在-50~570℃范围内变化,循环压力在1000~4000 kPa区间内波动,压缩机压比区间为2.5~5.0。模型中压缩机与膨胀机的等熵效率分别取为

85%与90%^[18];各换热器压降统一设为12 kPa^[9],电加热器效率设置为100%。

1.2 串联与并联耦合模型设计

1.2.1 串联模型

串联耦合模型通过将电加热器以不同形式接入热泵循环,实现电能输入的合理分配与系统性能的灵活调节。基于无回热与有回热两种基础热泵构型,本工作分别研究了电加热器在三种不同串联位置下的系统特性,形成多种耦合方案。无回热热泵模型与三种串联耦合模型如图1所示。图1(b)为将电加热器置于压缩机前,用于预热进气并改变压缩功耗;图1(c)为将电加热器置于压缩机后,对压缩后工质进行补热以直接提升其温度;图1(d)为将电加热器置于熔盐换热器后,对储热介质熔盐进行直接加热,储存热量。

为进一步分析系统内部能量集成对耦合效果的影响,引入有回热模型。该模型在系统中设置回热器,利用系统内部余热对工质进行预冷与预热,从而改变循环的基础能量分布。在此模型基础上,对上述三种电加热器位置进行重新定义与研究,系统模型如图2所示。图2(b)为有回热热泵将电加热器置于压缩机前,图2(c)为有回热热泵将电加热器置于压缩机后,图2(d)为有回热热泵将电加热器置于熔盐换热器后。回热器的引入使电加热器在不同位置产生的热力作用更趋复杂,其与回热过程的相互作用将直接影响各构型在系统效率与调节能力方面的表现差异。

1.2.2 并联模型

为提升系统对波动性电源的适应能力与运行灵活性,继续构建两种并联耦合模型,分别为两热泵并联系统及热泵与电加热并联系统。两种模型均通过功率分配实现对输入电能的灵活调配,形成具有不同热力学特性与运行特点的耦合方案。系统建模过程中,为准确模拟实际运行条件下的能量平衡关系,特别引入了平衡器这一逻辑单元,该平衡器基于热力学第一定律,通过计算实现系统内部能量的平衡。

图3(a)所示为两热泵并联系统,该系统包含两套独立的热泵循环单元,共享同一低温热源与高温熔盐储热回路。输入电能分别驱动两台压缩机,带动两套热泵循环同时运行。各热泵单元工质在压缩后进入各自的高温换热器与熔盐进行热交换,释放

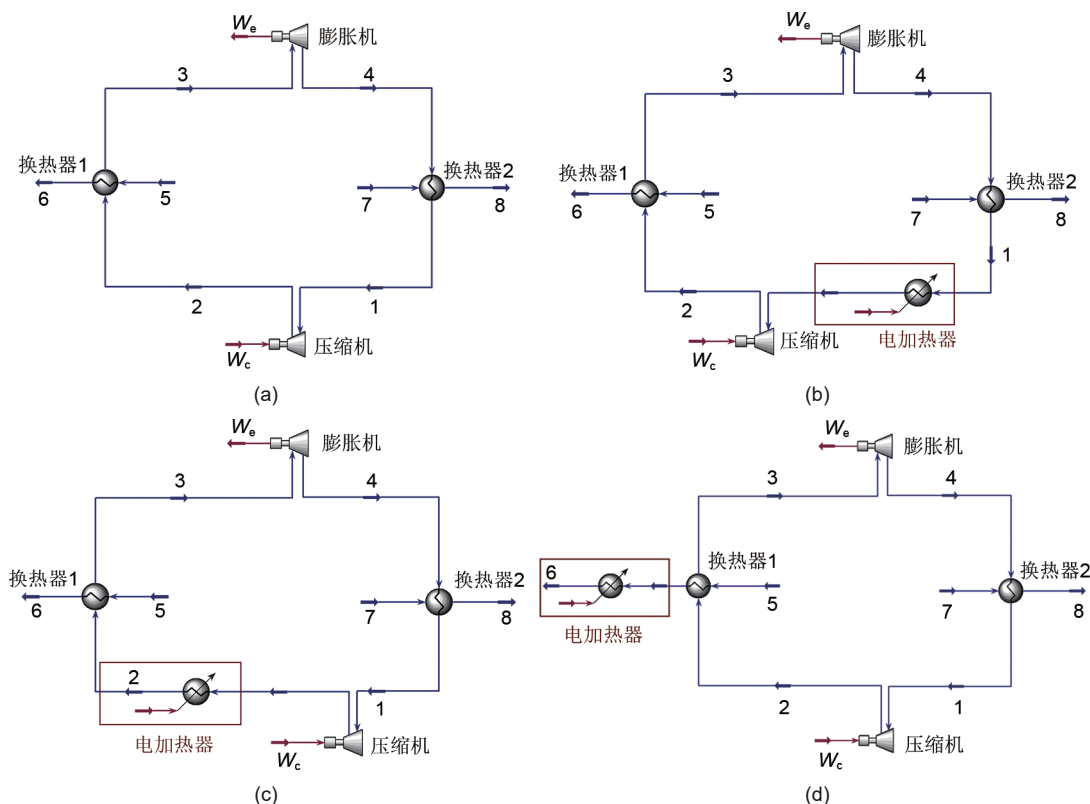


图1 无回热热泵模型与三种串联耦合模型 (a) 无回热热泵模型; (b) 耦合模型一: 电加热置于压缩机前; (c) 耦合模型二: 电加热置于压缩机后; (d) 耦合模型三: 电加热置于换热器后

Fig. 1 Non-recuperative heat pump model and three series coupling models (a) Non-recuperative heat pump model; (b) Coupling model 1: electric heater placed before the compressor; (c) Coupling model 2: electric heater placed after the compressor; (d) Coupling model 3: electric heater placed after the heat exchanger

热量后流经回热器与低温换热器完成循环。两路被加热的熔盐汇流后进入储热系统, 实现热能的合并存储。

图3(b)所示为热泵与电加热并联系统, 该系统采用一路热泵循环与一路直接电加热器并联的模型。输入电能分配后分别输送至热泵单元的压缩机与电加热器。热泵单元按逆布雷顿循环运行, 从低温热源吸取环境热量并提升其品位; 电加热器则将输入电能直接转化为热能。两路产热工质在混合器中混合后, 共同进入高温换热器将热量传递至熔盐储热介质, 完成能量的存储。

1.3 建模方法与评价指标

为准确模拟系统在多种耦合模式下的热力学性能, 本工作选用 Aspen HYSYS 软件搭建稳态过程模型。鉴于系统工质为空气, 运行压力范围较宽, 本模型物性方法采用 Peng-Robinson 状态方程。该方程适用于烃类及轻气体体系的气相与液相平衡计算, 其计算精度在高压条件下表现良好, 能够满足本系统工质在宽泛温压范围内的物性计算需求^[9]。

为量化评估不同耦合系统的性能, 本研究定义了以下关键评价指标。

①系统总产热 Q 为通过高温换热器传递给熔盐储热介质的总热功率, 是系统的有效能量输出。

②系统输入净功率 W_{net} 为驱动整个电转热单元所消耗的总电功率。

③热泵性能系数(COP)是衡量其制热效率的核心参数, 其定义为热泵系统的总产热与输入净功率之比, 计算公式为:

$$\text{COP} = \frac{Q}{W_{\text{net}}} \quad (1)$$

$$W_{\text{net}} = W_c - W_e \quad (2)$$

考虑电加热后:

$$W_{\text{net}} = W_c - W_e + W_{\text{eh}} \quad (3)$$

其中, W_c 为压缩机总耗功率, W_e 为膨胀机总回收功率, W_{eh} 为电加热器总耗功率。

1.4 模型验证与可靠性分析

为验证所建立热力学模型的准确性, 对无回热

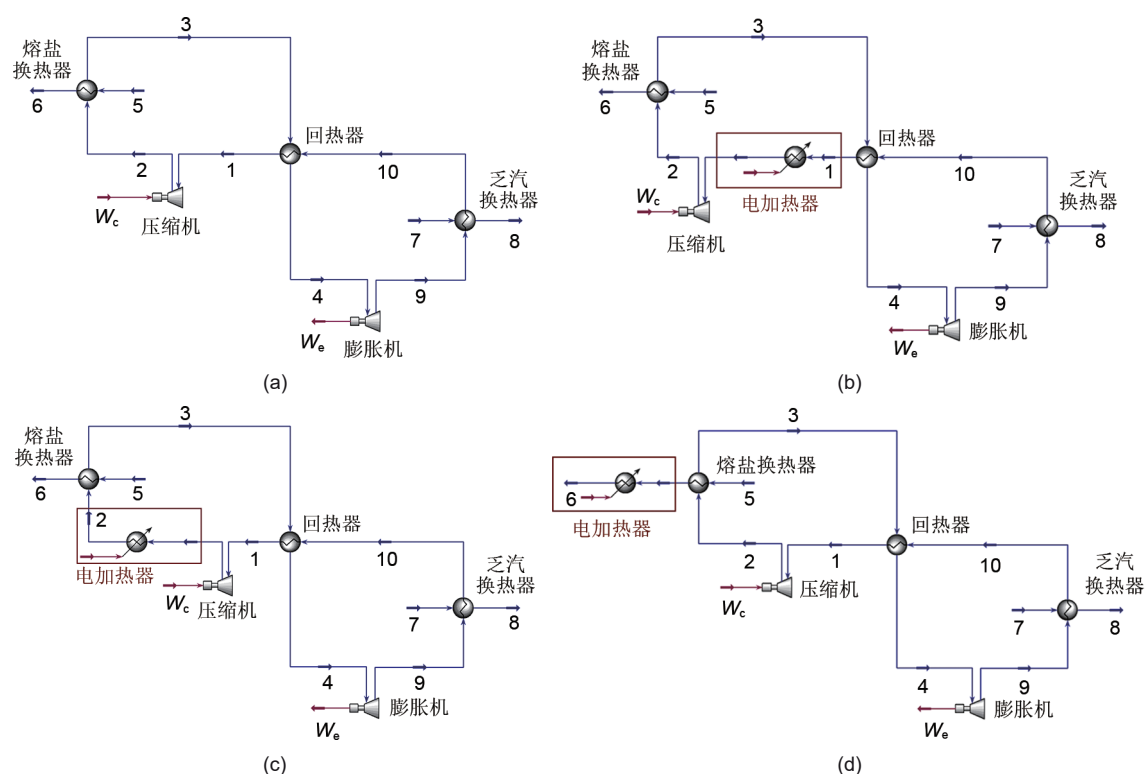


图2 有回热热泵模型与三种串联耦合模型 (a) 有回热热泵模型; (b) 耦合模型一: 电加热置于压缩机前; (c) 耦合模型二: 电加热置于压缩机后; (d) 耦合模型三: 电加热置于换热器后

Fig. 2 Recuperative heat pump model and three series coupling models (a) Recuperative heat pump model; (b) Coupling model 1: electric heater placed in front of the compressor; (c) Coupling model 2: electric heater placed after the compressor; (d) Coupling model 3: electric heater placed after the heat exchanger

基础模型及电加热器置于压缩机前的耦合模型进行了理论计算与模拟结果对比。理论计算采用与实际模拟相同的参数, 基于热力学基本定律计算循环净功与COP。结果表明: 理论计算结果与模拟值高度吻合, 两者在循环净功与COP上的相对误差均小于1%。证明了本模型在反映实际部件性能及系统能量转换方面的准确性, 确保了基于本模型开展各类耦合方案对比分析及参数研究的可靠性。

2 串联耦合模型的性能分析

2.1 无回热串联模型的运行特性

为分析无回热条件下电加热器布置方式对系统性能的影响, 本研究对三种串联耦合模型进行了系统的模拟研究。各模型关键节点参数设置如表1所示, 表中各流股状态点对应于图1和图2, 其中1、2、3点的状态参数参考文献[9]、[18]设定, 高温换热器熔盐侧进出口温度分别设定为290℃与565℃, 在此温度区间内, 熔盐较为稳定, 假设相同流量为

1100000 kg/h, 保证三个模型换热量相同, 系统循环工质为空气, 采用逆布雷顿循环。

表2展示了三种模型在不同电加热温差下的性能指标。研究表明, 在相同运行条件下, 无论电加热器温差如何变化, 模型二的COP值都最高, 表现出更优的性能。数据趋势表明, 在相同制热量的情况下, 模型二能够以更低能量输入完成热量的转移和转化。

图4展示了系统性能参数的变化规律。图4(a)显示, 随着电加热温差的增大, 三种模型的等效COP均呈单调递减趋势, 这主要是电加热功率占比增加导致系统整体能效下降。模型二的COP曲线始终位于其他两种模型之上, 且在较大温差范围内保持较为平缓的下降趋势。图4(b)功率分配图表明, 随着电加热温差的增大, 电加热器输入功率显著增加, 而压缩机输入功率相应减少。在三种模型中, 当电加热功率增加时, 模型二的压缩机输入功率减少更多, 模型二展现出更优的性能。

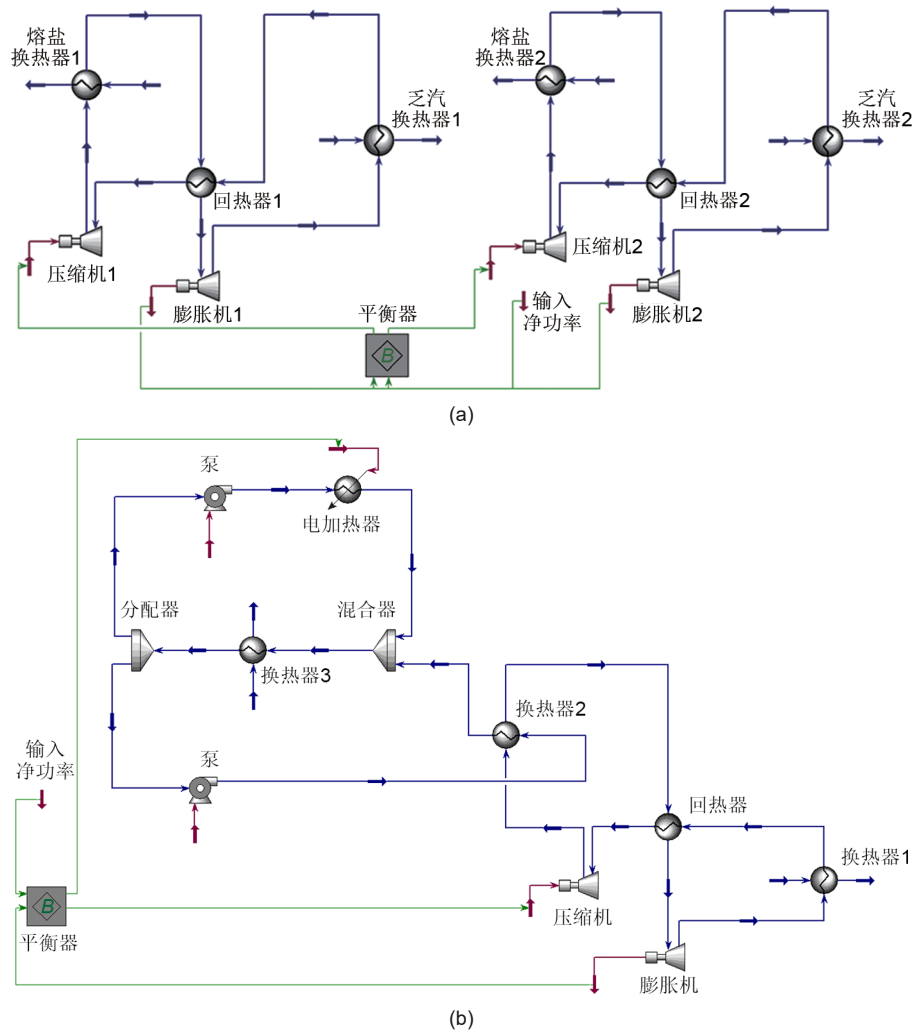


图3 并联耦合模型 (a) 两热泵并联模型；(b) 热泵与电加热并联模型
Fig. 3 Parallel coupling models (a) Dual heat pump parallel model; (b) Heat pump-electric heater parallel model

表1 无回热模型各流股状态参数
Table 1 State parameters for each stream in the non-recuperative model

流股	1	2	3	5	6
设定值	$T=300^{\circ}\text{C}$ $P=1250\text{ kPa}$	$T=570^{\circ}\text{C}$	$T=310^{\circ}\text{C}$	$T=290^{\circ}\text{C}$ $P=600\text{ kPa}$ $m=1100000\text{ kg/h}$	$T=565^{\circ}\text{C}$ $P=588\text{ kPa}$

2.2 有回热串联模型的运行特性

引入回热器后，系统的能量利用特性发生了显著变化。回热器在系统内部建立热联系，有效回收了系统的余热，从而大幅提升了基础循环效率。

各模型关键节点参数设置与无回热模型相同，表3展示了有回热条件下三种模型在不同电加热温

表2 不同温差设定下不同模型性能参数
Table 2 Performance parameters of different models under various temperature differences

假定温差/ $^{\circ}\text{C}$	模型	COP	压缩机输入功率 W_c/kW	电加热输入功率 W_{eh}/kW	膨胀机输出功率 W_e/kW	输入净功率 W_{net}/kW
10	一	2.040	98980	3709	54059	48630
	二	2.065	98800	3883	54643	48040
	三	2.047	98880	3664	54084	48460
20	一	1.955	95280	7428	51968	50740
	二	2.001	94930	7762	53102	49590
	三	1.968	95090	7324	52014	50400
40	一	1.805	87840	14890	47760	54970
	二	1.879	87220	15500	49910	52810
	三	1.828	87530	14630	47880	54280

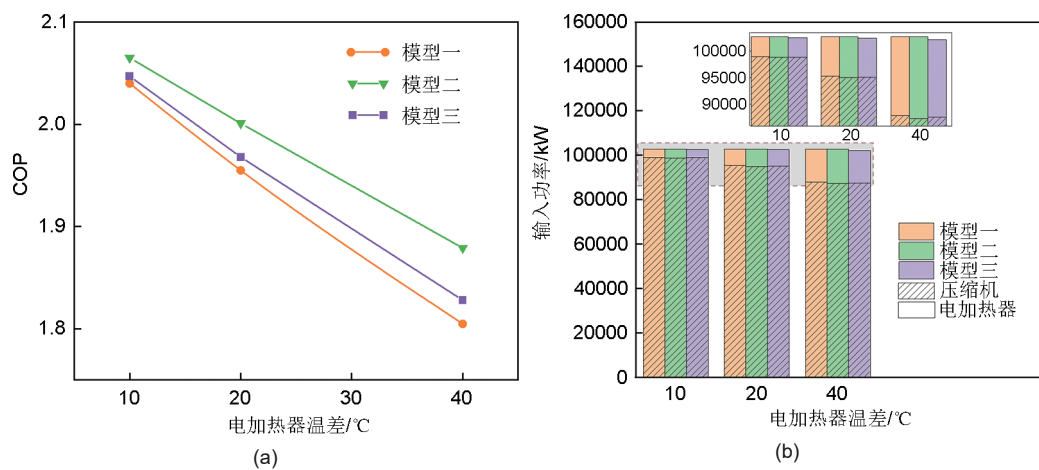


图4 不同模型性能参数随电加热器温差的变化规律 (a) 三种模型的COP对比; (b) 三种模型的输入功率对比 (含局部放大图)

Fig. 4 Variation of performance parameters of different models with electric heater temperature difference (a) Comparison of COP among the three models; (b) Comparison of input power consumption among the three models (with local magnification)

表3 不同温差设定下不同模型性能参数表

Table 3 Table of performance parameters of different models at different temperature differences

假定温差/℃	模型	COP	压缩机输入功率	电加热输入功率	膨胀机输出功率	输入净功率 W_{net} /kW
			W_c /kW	W_{eh} /kW	W_e /kW	
40	一	1.260	94580	16030	25830	84780
	二	1.283	93900	16690	27360	83230
	三	1.292	94170	15820	27320	82670
50	一	1.238	90560	20070	24370	86260
	二	1.265	89760	20850	26180	84430
	三	1.276	90100	19750	26140	83710
60	一	1.218	86530	24110	22940	87700
	二	1.247	85610	25010	24990	85630
	三	1.260	86030	23680	24960	84750
80	一	1.180	78540	32220	20270	90490
	二	1.213	77340	33300	22600	88040
	三	1.230	77920	31520	22610	86830
100	一	1.147	70330	40360	17560	93130
	二	1.181	69100	41570	20210	90460
	三	1.201	69840	39330	20260	88910

差下的性能表现。研究结果显示,在电加热温差为40℃时,模型三COP达到1.292,明显高于模型一的1.260和模型二的1.283;当温差增大至100℃时,模型三COP仍保持1.201,优于模型一的1.147和模型二的1.181。模型三(电加热器置于熔盐换热器后)展现出最优的性能。从功率分配数据看,模型三在各级温差下都表现出较低的输入净功

率。在40℃温差时,模型三的输入净功率为82670 kW,而模型一和模型二分别为84780 kW和83230 kW。这一优势在100℃温差时更为明显,模型三的输入净功率为88910 kW,较模型一的93130 kW和模型二的90460 kW有显著降低。值得注意的是,随着电加热温差的增大,模型三的输入净功率增长幅度最小,从40℃到100℃温差仅增加了6240 kW,而模型一和模型二分别增加了8350 kW和7230 kW,这表明模型三在应对大范围功率波动时具有更好的能量保持能力。

图5反映了有回热系统的运行特征。图5(a)显示,随着电加热温差的增大,三种模型COP均呈下降趋势,但模型三下降幅度最为平缓,表现出更好的运行稳定性。图5(b)的功率分配情况表明,随着电加热温差的增大,电加热器功率显著增加,展现出良好的功率调节能力。回热器通过回收低温热能,显著降低了系统向环境排放的热量损失,提高了能量的利用程度。

2.3 串联耦合模型对比与热力学机理分析

在无回热系统中,模型二(电加热置于压缩机后)展现出最优的性能,其根本原因在于实现了高品质能量的优化匹配。该配置将电加热器置于循环中能量品位最高的位置——压缩机出口,此时注入的电产能产生双重效益:一方面直接提升工质温度,增强高温换热器的传热效果;另一方面,由于热量注入点位于膨胀机前,提升的工质温度可在膨

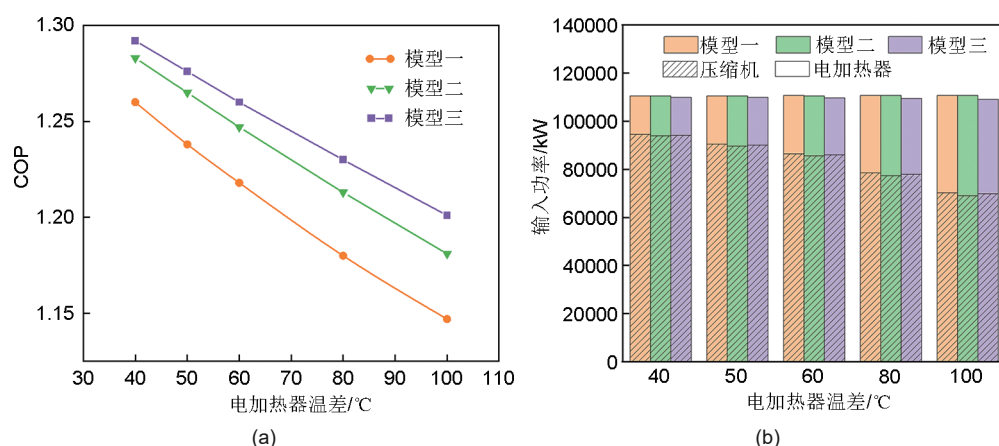


图5 不同模型性能参数随电加热器温差的变化规律 (a) 三种模型的COP对比; (b) 三种模型的输入功率对比

Fig. 5 Variation of performance parameters of different models with electric heater temperature difference
(a) Comparison of COP among the three models; (b) Comparison of input power consumption among the three models

胀过程中转化为额外的机械功。这种布置实现了能量的梯级利用,使得系统效率显著高于其他配置。相比之下,模型一的电加热器置于压缩机入口前,虽然能够预热进气而降低压缩功耗,但由于预热过程发生在系统低温段,其能量品位利用率较低,且在后续压缩过程中会产生额外的不可逆损失。模型三的电加热器仅对熔盐进行补热,完全脱离了空气动力循环,无法利用系统的做功能力实现能量回收,导致其整体能量利用效率较低。这种配置下,电能到热能的转换是直接的,缺乏中间的能量升级过程,因此效率提升有限。

有回热系统中的最优性能出现在模型三(电加热器置于熔盐换热器后),回热器的引入建立了精密的内部热平衡,此时系统运行的首要任务是维持核心循环的稳定高效。模型三通过解耦设计,将电加热器置于熔盐回路,完全避免了其对回热循环的干扰,确保了压缩机、膨胀机和回热器始终在设计最优工况下运行。虽然牺牲了部分协同效应,但通过维持更高的基础循环效率,使系统内部不可逆损失显著降低。

三种耦合模型都展现出良好的功率调节能力,但其调节特性和适用场景存在显著差异。从调节范围来看,通过改变电加热器的工作温差,系统可以实现灵活调节。在无回热系统中,模型二展现出最优的性能,特别适合于需要频繁调节但幅度不大的运行场景。在有回热系统中,模型三则在大范围调节场合表现更佳,由于其解耦特性,系统可以在保

持热泵循环高效运行的同时,通过电加热器实现功率的快速大幅调节。从响应特性分析,模型一和模型二由于电加热器集成在动力循环内部,其调节过程会对系统产生较大扰动,响应速度受到限制,而模型三的电加热器独立于主循环,可以实现更为快速和精确的功率控制,为电网提供更好的辅助服务。

3 并联耦合模型的性能分析

3.1 两热泵并联系统

两热泵并联系统采用双热泵单元并联配置,通过独立的循环回路实现能量的梯级利用。在系统参数设定方面,保持各节点工质状态参数与前述串联模型一致。具体运行策略设定为:压缩机1的输入功率恒定为100 MW,维持其在额定工况下的最优效率运行;压缩机2的输入功率在50~100 MW范围内动态变化,用以模拟实际电网中的波动性电能输入,这种功率分配策略能够有效反映系统在应对不同电力输入情况时的运行特性。

表4详细展示了功率分配对两热泵并联系统性能的影响规律。从数据可以看出,当压缩机2的输入功率从100 MW降低至50 MW时,系统输入净功率从142.1 MW减少至112.3 MW,产热量从193.8 MW下降至145.3 MW。在性能参数方面,系统COP呈现出先下降后略微回升的变化趋势,从初始的1.364降至1.291后回升至1.294。这种变化规律反映了系统在部分负荷工况下的独特运行特性。

表4 功率分配对两热泵并联系统性能的影响				
Table 4 Effect of power distribution on the performance of the dual heat pump parallel system				
压缩机1输入功率/MW	压缩机2输入功率/MW	输入净功率/MW	COP	产热功率/MW
100	100	142.1	1.364	193.8
	90	136.8	1.346	184.1
	80	131.0	1.331	174.4
	70	127.0	1.297	164.7
	60	120.1	1.291	155.0
	50	112.3	1.294	145.3

3.2 热泵与电加热并联系统

热泵与电加热并联耦合系统采用功率分配与热量汇集的双重并联架构，通过平衡器实现输入功率的灵活分配，并借助分配器和混合器完成热量的高效分配与整合。在系统参数设定方面，总输入净功率与两热泵并联系统保持一致，以确保对比研究的基准统一性。系统的功率分配策略如下：通过平衡器将输入功率分为两个独立支路，其中一路驱动热泵系统的压缩机，另一路输送至直接电加热器。热泵系统始终保持额定工况运行，确保其始终处于最佳效率点；电加热器则承担系统的功率调节功能，通过改变其输入功率实现系统的出力调节。

表5系统展示了功率分配对热泵电加热并联系统性能的影响。数据显示，当系统输入净功率从142.1 MW减少至112.3 MW时，电加热器输入功率从71.04 MW下降至41.24 MW。在性能表现方面，系统COP呈现出持续上升的趋势，从1.182提高至1.230，而系统总产热功率则从168.0 MW减少至138.1 MW。

3.3 并联耦合模型对比与综合分析

通过图6的对比分析，可以清晰地观察到两种

表5 功率分配对热泵电加热并联系统性能的影响				
Table 5 Effect of power distribution on the performance of the heat pump-electric heater parallel system				
压缩机输入功率/MW	输入净功率/MW	电加热输入功率/MW	COP	产热功率/MW
100	142.1	71.04	1.182	168.0
	136.8	65.74	1.194	159.1
	131.0	59.94	1.197	156.9
	127.0	55.94	1.204	152.8
	120.1	49.04	1.215	145.9
	112.3	41.24	1.230	138.1

并联模型在不同输入净功条件下的性能差异。两热泵并联系统COP值明显高于热泵电加热并联系统，随着负荷降低，热泵电加热系统的COP从1.182上升至1.230，而两热泵并联系统COP从1.364降至1.294。在产热能力方面，两热泵并联系统在各个功率水平下均表现出更高的产热值。

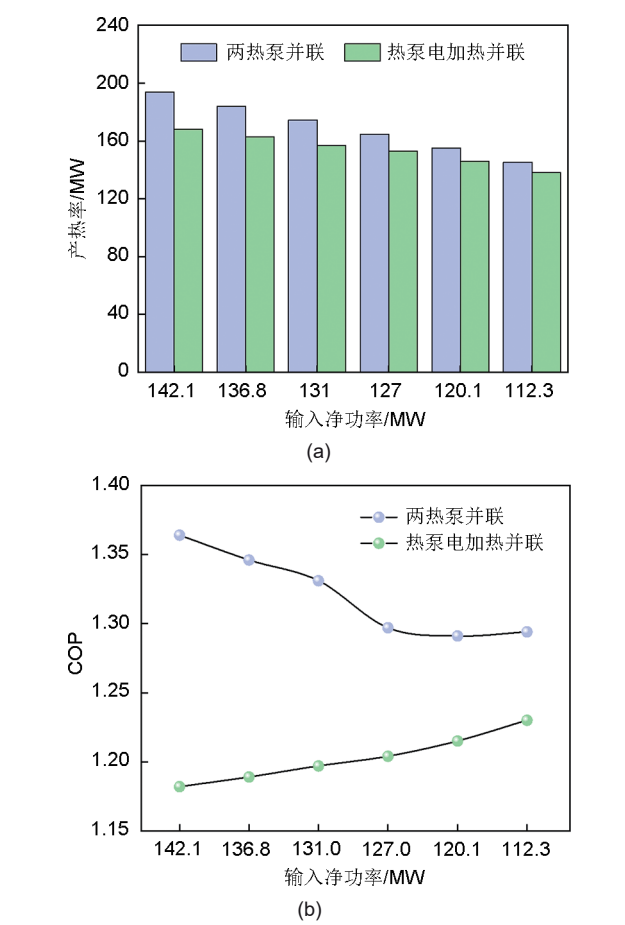


图6 不同输入净功率下两模型性能对比 (a) 两种模型的系统产热量对比; (b) 两种模型的COP对比

Fig. 6 Performance comparison of the two models under different net input powers (a) Comparison of system heat output between the two models; (b) Comparison of COP between the two models

从热力学角度分析，系统的性能变化规律主要受运行工况和能量分配策略的共同影响。在两热泵并联系统中，当压缩机2输入功率降低偏离额定工况时，其压缩机和膨胀机的等熵效率随之下降，导致该单元不可逆损失增大；与此同时，保持额定运行的压缩机1则维持最佳效率，两个单元的效率差异直接影响了系统的整体性能。而在热泵-电加热并联系统中，性能优化机理截然不同：热泵单元持

续在额定工况下稳定运行, 确保了基础制热效率, 同时随着总输入功率降低, 高效率热泵的功率占比相对提升, 而低效电加热的功率占比相应减少, 这种能量分配结构的改善直接促使系统整体COP呈现上升趋势。

从调节灵活性角度分析, 热泵电加热并联系统通过调节电加热器功率, 可实现秒级快速响应, 特别适合应对电网频繁波动。相比之下, 两热泵并联系统通过调整两个热泵单元的负荷分配来实现功率调节, 响应时间在分钟级别, 调节过程较为缓慢。

4 结 论

本工作围绕火电机组灵活改造中的电转热过程, 针对卡诺电池系统中热泵与电加热的协同运行方式进行了系统建模与性能分析。通过构建多种耦合模型并在 Aspen HYSYS 平台上进行热力学模拟, 揭示了不同配置对系统能效、灵活性与能量品质的影响规律, 主要研究结论如下。

(1) 电加热器布置位置对系统性能具有决定性影响。在无回热串联系统中, 电加热器置于压缩机后可实现最佳的功热协同效应, 系统COP最高达2.065; 而在有回热系统中, 电加热器置于熔盐换热器后则通过解耦设计维持了核心循环的稳定高效, 系统COP达1.292。这表明电加热器的优化配置需充分考虑系统热力结构的复杂程度。

(2) 并联系统在灵活调节能力方面表现更优。两热泵并联系统具有较高的额定产热能力(193.8 MW), 适合承担稳定基础负荷; 而热泵-电加热并联系统在部分负荷下的能效提升更明显, COP随输入功率下降由1.182提升至1.230, 展现出良好的动态响应特性和调峰潜力, 适用于可再生能源波动电力的快速吸纳与转换。

(3) 系统能效取决于能量品位匹配与负荷分配策略。串联系统通过能量梯级利用提高热能质量, 并联系统则依靠灵活功率分配优化整体性能。合理的控制策略可在效率与灵活性之间取得平衡, 使系统在不同负荷与运行工况下均保持高效稳定。

(4) 热泵电加热协同运行是提升火电机组改造后灵活性的有效途径。该耦合模式不仅能提高卡诺电池系统的能量利用率, 还能在电力系统调峰、调频及可再生能源消纳中发挥关键作用。

本研究验证了热泵与电加热协同设计的可行

性, 为火电机组储能化改造及电转热系统工程应用提供了理论依据。然而, 研究仍存在一定局限性: 首先, 基于稳态模型的分析未能揭示系统动态响应特性; 其次, 缺乏全生命周期经济性评估; 此外, 对电网环境中的运行策略及多能协同潜力研究尚不充分。后续研究将重点开展动态过程建模与全生命周期经济性评估, 进一步完善系统优化设计方法。

符 号 说 明

COP——热泵制热效率

H2P——电转热

m ——质量流量, kg/h

P2H——热转电

P ——压力, kPa

Q ——系统总产热, kW

T ——温度, $^{\circ}\text{C}$

TES——储热

W_{net} ——系统输入净功率, kW

W_c ——压缩机总耗功率, kW

W_e ——膨胀机总回收功率, kW

W_{eh} ——电加热器总耗功率, kW

参 考 文 献

- [1] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.190212.
- LIU C, ZHUO J K, ZHAO D M, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.190212.
- [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(S1): 136-148. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221899.
- MA T S, WANG Y, LYU K, 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(S1): 136-148. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221899.
- [3] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1565-1578. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0347.
- ZHANG X R, XU Y J, YANG L J, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1565-1578. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0347.
- [4] 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. DOI:10.19666/j.rld.202406145.
- FENG G B, LI Y L, CHENG X F, et al. Key technologies and

- current applications of high-temperature Carnot batteries[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(12): 1-9. DOI: 10.19666/j.rlfid.202406145.
- [5] 邢刚, 杨涵, 乔永辉, 等. 卡诺电池分类与关键要素研究进展[J/OL]. *材料导报*, 1-28[2025-11-03]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20251019.1651.006>.
XING G, YANG H, QIAO Y H, et al. Research progress on the classification and key elements of Carnot batteries[J/OL]. *Materials Reports*, 1-28[2025-11-03]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20251019.1651.006>.
- [6] 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. DOI:10.1016/j.est.2020.101756.
- [7] 圣力, 薛新杰, 李衍君, 等. 基于相变储能介质热泵储电系统的模拟与分析[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(11): 3649-3657. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0296.
SHENG L, XUE X J, BO Y J, et al. Simulation and analysis of pumped thermal electricity storage system based on phase change energy storage medium[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(11): 3649-3657. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0296.
- [8] 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. DOI:10.1016/j.rser.2022.113134.
- [9] 赫广迅, 宋业琛. 基于火电站转型储能电站的超高温热泵及熔盐储换热系统工程应用设计[J]. *汽轮机技术*, 2023, 65(2): 93-96, 146.
HE G X, SONG Y C. Engineering application design of ultra-high temperature heat pump and molten salt heat storage and exchange system based on the rmal power station transformation to energy storage power station[J]. *Turbine Technology*, 2023, 65 (2): 93-96, 146.
- [10] XUE X J, ZHAO Y, ZHAO C Y. Multi-criteria thermodynamic analysis of pumped-thermal electricity storage with thermal integration and application in electric peak shaving of coal-fired power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258: 115502. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115502.
- [11] SOO KIM H, SEO J, MOON S, et al. Numerical study on carbon emissions and economics of a high temperature heat pump system for an industrial process[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 322: 119150. DOI:10.1016/j.enconman.2024.119150.
- [12] MA T S, LI Z K, LV K, et al. Design and performance analysis of deep peak shaving scheme for thermal power units based on high-temperature molten salt heat storage system[J]. *Energy*, 2024, 288: 129557. DOI:10.1016/j.energy.2023.129557.
- [13] TREVISAN S, PATHI S, BROWN J, et al. Thermal performance and dynamic response assessment of an industrial molten salts based power-to-heat system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 342: 120131. DOI: 10.1016/j. enconman. 2025.120131.
- [14] ZHOU J, WU W T, BELLAMY L, et al. Thermal energy storage-coupled heat pump systems: Review of configurations and modelling approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 226: 116226. DOI:10.1016/j.rser.2025.116226.
- [15] YONG Q Q, TIAN Y P, QIAN X, et al. Retrofitting coal-fired power plants for grid energy storage by coupling with thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 119048. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.119048.
- [16] YONG Q Q, JIN K Y, LI X B, et al. Thermo-economic analysis for a novel grid-scale pumped thermal electricity storage system coupled with a coal-fired power plant[J]. *Energy*, 2023, 280: 128109. DOI:10.1016/j.energy.2023.128109.
- [17] VINNEMEIER P, WIRSUM M, MALPIECE D, et al. Integration of heat pumps into thermal plants for creation of large-scale electricity storage capacities[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 506-522. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.10.045.
- [18] 赵瀚辰, 韩伟, 姚明宇, 等. 熔盐储热耦合压缩空气储能系统经济性分析[J]. *热力发电*, 2024, 53(8): 1-8. DOI:10.19666/j.rlfid.202405103.
ZHAO H C, HAN W, YAO M Y, et al. Economic analysis of a compressed air energy storage system coupled with molten salt thermal storage system[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53 (8): 1-8. DOI:10.19666/j.rlfid.202405103.
- [19] 谢蓉, 于健尧. 基于Aspen的超临界CO₂布雷顿循环性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(10): 2544-2552.
XIE R, YU J Y. Study on the performance of supercritical CO₂ Brayton cycle based on Aspen[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(10): 2544-2552.