

储热储冷多场景应用专刊



耦合余热回收的高温热泵储能供热系统研究

章颖缤^{1,2,3}, 梅炜光³, 胥博文¹, 李闽华¹, 孟奕融¹, 徐超¹

(¹华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; ²浙江绿储科技有限公司, 浙江湖州 313002; ³湖州工业控制技术研究院, 浙江湖州 313098)

摘要: 为提高可再生能源消纳能力并实现工业余热的高效回收与再利用, 本研究提出了一种基于高温热泵储能(pumped thermal energy storage, PTES)技术的工业余热回收与高温蒸汽供热系统。该系统通过在电网低谷时段利用高温热泵回收工业废水中的低温热量, 结合固体储能单元实现热能的储存与释放, 提供全天候高温蒸汽供热。基于 Aspen Plus 与 MATLAB 平台建立了热泵储能系统的热力学仿真模型, 涵盖压缩机、膨胀机、换热器、蒸汽发生器及固体储能模块, 模拟不同工况下能量流动与性能响应。仿真结果显示, 在工业废水温度为 60℃ 的条件下, 空气、氦气、氮气和二氧化碳 4 种循环工质的系统性能系数(COP)分别为 1.519、1.478、1.523 和 1.327。在固体储能单元分析中, 孔隙率为 0.35, 颗粒粒径为 0.03~0.05 m 时可获得最优热效率和 COP 性能。进一步以空气为工质开展系统敏感性分析, 评估系统关键参数对性能的影响。结果显示, 较高的余热温度与较低的压缩机出口温度有助于系统性能提升。当余热温度为 100℃、压缩机出口温度为 400℃ 时, 系统 COP 可达到 1.658。此外, 设备成本估算结果显示, 压缩机和电动机成本占比最大, 这表明压缩与功率转换单元是经济性优化的关键环节。研究结果可为高温热泵储能系统在工业供热领域的工程设计与可行性分析提供理论依据与参考。

关键词: 多能互补; 储能系统; 余热回收; 高温热泵; 热力学仿真

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0963

中图分类号: TK 123

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-769-12

High-temperature heat pump energy storage system with industrial wastewater heat recovery

ZHANG Haobin^{1,2,3}, MEI Weiguang³, XU Bowen¹, LI Minhua¹, MENG Yirong¹, XU Chao¹

(¹School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ²Zhejiang Green Storage Technology Co., Ltd., Huzhou 313002, Zhejiang, China; ³Huzhou Industrial Control Technology Research Institute, Huzhou 313098, Zhejiang, China)

Abstract: To enhance the renewable energy utilization and improve the recovery and reuse of industrial waste heat, this study proposes a high-temperature steam supply system utilizing pumped thermal energy storage (PTES) with wastewater heat recovery. The system adopts a high-temperature heat pump to extract low grade heat from wastewater during off-peak periods. It integrates a solid thermal storage unit to accumulate and release heat to achieve continuous high-temperature steam supply. A thermodynamic model of the PTES system was

收稿日期: 2025-10-27; 修改稿日期: 2025-11-14。

基金项目: 湖州市重点研发计划项目新材料专项 (2024ZD2037)。

第一作者: 章颖缤 (1976—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新一代光热发电技术和储能技术, E-mail: zhanghaobin@hiict.org.cn; 通信作者: 徐超, 博士, 教授, 主要研究方向为太阳能发电及中、高温储能换热技术等, E-mail: mechxu@ncepu.edu.cn。

引用本文: 章颖缤, 梅炜光, 胥博文, 等. 耦合余热回收的高温热泵储能供热系统研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 769-780.

Citation: ZHANG Haobin, MEI Weiguang, XU Bowen, et al. High-temperature heat pump energy storage system with industrial wastewater heat recovery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 769-780.

developed in Aspen Plus and MATLAB. The model comprises a compressor, an expander, heat exchangers, a steam generator, and a solid storage module for simulating the energy transfer. Using the model, the system performance under various operating conditions was assessed. The simulation results show that when the wastewater temperature is 60°C, the coefficients of performance (COP) for air, argon, nitrogen, and carbon dioxide are 1.519, 1.478, 1.523 and 1.327, respectively. For the solid thermal storage unit, a porosity of 0.35 and particle diameters between 0.03 and 0.05 m yield the optimal thermal efficiency and COP. A sensitivity analysis using air as the working fluid evaluated the influence of key parameters. The results show that higher wastewater temperatures and lower compressor outlet temperatures enhance system performance. When the waste heat temperature reaches 100°C and the compressor outlet temperature 400°C, the system COP increases to 1.658. An equipment cost estimation shows that the compressor and the electric motor contribute the largest shares in the total cost, suggesting that compression and power conversion units should be the main targets of economic optimization. The results provide technical support and useful references for the feasibility assessment and engineering design of high-temperature PTES systems for industrial heating.

Keywords: multi-energy complementarity; energy storage system; waste heat recovery; high-temperature heat pump; thermodynamic simulation

随着全球能源结构向低碳化转型加速,以风电、光伏为代表的高渗透率可再生能源并网对电力系统灵活性提出了更高要求。热泵储能技术(pumped thermal energy storage, PTES)因其独特的“电-热-电”能量转换特性,在新能源消纳、火电灵活性改造、独立储能电站及工业余热提质等领域展现出显著技术优势^[1-3]。热泵储能技术可以将富余电能转换为高温热能储存,通过热机循环实现能量回馈电网,被视为未来大规模储能和电力系统调峰的理想解决方案^[4-5]。

基于布雷顿循环的PTES系统采用可正反转的透平机与压缩机,形成一个闭环的高效储能-释能系统^[6]。Hassan等^[7]提出了一种新型高温热泵储能系统并进行了热力学分析,理论上该系统在热源与冷源温度分别为100°C和25°C时,可以达到1.34的功率比。路唱等^[8]基于布雷顿循环建立热泵系统热力学仿真模型和焓分析模型,针对大规模PTES系统进行了建模仿真、热力学分析和动态特性分析。斯伟等^[9]推导了热泵蒸汽机计算模型,然后利用Aspen Plus软件仿真模拟了高温热泵蒸汽机系统,其热泵COP最优值能达到2.279。现有研究对逆布雷顿循环系统的性能优化进行了大量探索,但多数集中于循环本身的热力学改进^[10]。相比之下,

其在解决实际能源利用问题,尤其是工业低品位余热回收方面的研究仍显不足^[11]。

工业余热通常以废气、废液等形式存在,其大多为低温热源,直接利用难度较大^[12]。根据统计,低品位工业余热的年总量相当于5亿吨标准煤^[13]。然而,我国当前工业余热的回收率仅为30%左右^[14]。通过热泵技术充分回收并高效利用这些余热,不仅能大幅度减少能源消耗,还将成为推动节能减排的重要手段^[15-18]。周娇娇^[19]对高温热泵在冷却水余热回收中的应用进行了热力学分析,结果表明相较于传统的蒸汽加热制备热水,高温热泵回收余热具有更高的经济和环境效益。张若瑜^[20]提出了基于电动热泵余热回收结合热水蓄热器联合供热的热电调峰一体化系统,建立了机组热力系统与供热系统的变工况模型。孙健等^[21]提出一种电动热泵和蓄热装置联用的热电机组及其调峰方法,其根据电厂调峰需要,进行蓄热模式和放热模式切换使用,以达到电网调峰的目的。

本研究提出了一种结合工业余热回收与生产高温蒸汽耦合的高温热泵储热系统,旨在提升新能源的消纳率并减少工业园区对天然气等备用热源的依赖,达到绿色低碳供热。该系统在电网低谷时段利用热泵回收工业废水中的热量并转化为高温蒸汽,

同时借助固体储能装置实现能量转移,在高峰时段持续供热,无须额外电力输入。与现有研究相比,本研究通过将逆布雷顿循环型高温热泵与工业余热回收及蒸汽供热过程耦合,构建了兼具储能与供热功能的一体化系统。进一步通过多工质与固体储能结构参数的分析,揭示了系统性能优化的影响机制,为PTES系统在工业供热领域的工程应用提供了新思路。

1 高温热泵供热系统简介

本研究建立的热泵储能(PTES)系统模型如图1所示,面向工业余热的高效回收与园区全天候供热。系统主要部件包括压缩机、膨胀机、吸热器、回热器、蒸汽发生器与固体储能装置等,分为储能循环与释能循环两阶段。储能循环(谷电充热):工质自吸热器吸收工业余热后进入回热器冷端预热,随即进入压缩机升压升温;高温工质分两路,一路进入蒸汽发生器与给水换热产汽,另一路进入固体

储能装置蓄热,两路换热后的工质在汇合点并流,流入回热器热端把余热回馈冷端后,进入膨胀机做功以回收部分压缩功,最终回到吸热器,完成充热回路。释能循环(峰电放热):停止压缩机与膨胀机,开启风机维持循环流量;工质经固体储能装置取热升温后进入蒸汽发生器与给水换热产汽,放热降温后返回固体储能装置,直至储热耗尽。在释能阶段,无压缩机耗电、无外部热输入(仅需风机等辅助功),系统仍可稳定产汽以支撑园区连续供热。

此系统中使用的固体储能装置为岩石填充床储罐。填充床储能装置主要由垂直的圆柱形储罐以及内部的传热流体工质和固体储热材料组成,储热材料选用石英岩。罐体顶部和底部有进、出口,用于冷热工质的流动。圆柱形储罐外部包裹保温层,以减少储热系统的热量损失。系统中的循环工质分别选取空气(Air)、氩气(Ar)、氮气(N_2)和二氧化碳(CO_2)进行热力学特性的对比分析。4种循环工质标况下的物性参数见表1。

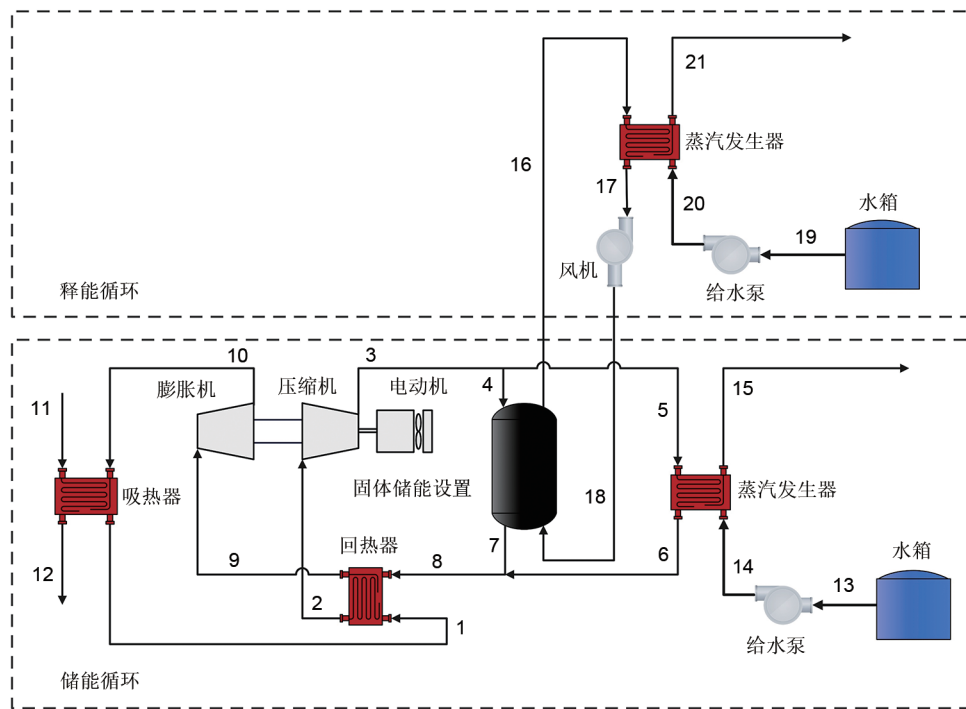


图1 PTES系统模型

Fig. 1 PTES system model

2 系统物理模型

2.1 系统建模过程

此热泵储能系统仿真模型使用 Aspen Plus 结

合 MATLAB 平台进行搭建。在建模过程中采用以下假设：

(1) 工质热力学参数变化满足 Peng-Robinson 方程, 自由水满足 Steam-Ta 方程;

力学第一定律对本研究所搭建的模型进行热平衡分析。系统对外输出的能量为热能，即储能与释能阶段蒸汽发生器产蒸汽利用的热量；系统消耗的能量为压缩机消耗功率减去膨胀机输出功率。系统循环效率为：

$$\eta_{xt} = \frac{Q_{zj}t_c + Q_{recov}t_s}{(E_{ys} - E_{pz})t_c} \quad (3)$$

式中， η_{xt} 为热泵储能系统的循环效率，%； t_c 为储能过程用时，h； t_s 为释能过程用时，h； Q_{recov} 为释能阶段固体储能装置供给蒸汽发生器的热量，kW。系统释能阶段供给蒸汽发生器的热量定义如下：

$$Q_{recov} = \text{Eff}_{\text{overall}} (E_{\text{inp}} + E_{\text{pump, ch}} + E_{\text{pump, disch}}) \quad (4)$$

式中， $\text{Eff}_{\text{overall}}$ 为固体储能装置的循环效率，%； $E_{\text{pump, disch}}$ 为释能过程固体储能装置消耗的泵功，kW。

2.3 模型验证

为保证后续结果的准确性，对系统中关键部件的热力学模型进行了验证。验证对象包括固体储能装置^[23]、压缩机和膨胀机^[24]。验证所采用的初始参数设置见表 2 与表 3。固体储能装置以岩石填充床为研究对象，设置相应的几何尺寸、热物性参数及运行边界条件；压缩机与膨胀机以氮气为循环工质，设置统一的质量流量和等熵效率，分别输入进口温度、压力及出口压力，用于计算输出功率。模型验证结果见表 4。验证阶段与文献的计算方法与参数设置一致，各运行参数均在验证范围内。

对于固体储能装置，比较了其充放热循环下的循环效率，仿真值与文献值误差仅为-0.4372%。这表明所构建的岩石填充床模型在能量守恒与传热模拟方面具备良好的准确性。对于压缩机和膨胀机，采用输入参数(进口温度与压力、出口压力)进行稳态仿真，输出计算功率与文献值进行对比。结果显示，最大相对误差为 1.78%，验证了压缩机与膨胀机模型的可靠性。误差主要来源于膨胀机在高温工况下的热力性能变化，模型对温度的敏感性略有差异。

3 结果与讨论

3.1 系统建模过程

本研究设计的热泵系统中，整个循环系统的输出功率全部供给蒸汽发生器工作运行，生产园区所

表 2 固体储能装置初始参数
Table 2 Initial parameters of solid energy storage device

参数	固体储能装置
罐体高度/m	7.376
罐体体积/m ³	650
岩石孔隙率	0.22
密度/(kg/m ³)	2500
岩石热导率/[W/(m·℃)]	5
岩石比热容/[J/(kg·K)]	830

表 3 压缩机与膨胀机初始参数
Table 3 Initial parameters of compressor and expander

参数	压缩机	膨胀机
循环工质	氮气	氮气
质量流量/(kg/s)	10	10
等熵效率/%	90	90
进口温度/℃	552	293
进口压力/MPa	2.44	10.50
出口压力/MPa	10.60	2.47

表 4 模型验证结果
Table 4 Validation results of model

参数	部件	仿真值	文献值	误差/%
功率/MW	压缩机	4.9318	4.9808	-0.984
	膨胀机	1.8295	1.7975	+1.780
循环效率	固体储能装置	0.911	0.915	-0.4372

需的热水。因此以设计蒸汽发生器换热量为 4 MW 为前提，即能够把质量流量为 1.46 kg/s 的水加热产生 200℃的水蒸气，供给园区供热。蒸汽发生器进出口压力均为 0.8 MPa，进口温度为 20℃。在此标准下对仿真模型系统进行变循环工质初始参数调试，使换热器不会出现温度交叉的情况，且温度耦合。固定工业余热温度为 60℃，在原有压力设置基础上，对压缩机的压缩比及热泵的部分设备压力进行调整。不同循环工质下的系统初始参数情况见表 5。考虑到二氧化碳的绝热指数较小，为满足高压侧温度与回热器夹点要求，在不改变高压侧压力的前提下将其压缩机入口压力设为 35 kPa，以提高有效压比并避免温度交叉。

不同循环工质会影响系统内蒸汽发生器的换热性能表现。通过绘制不同循环工质的蒸汽发生器的 TQ 曲线，可以对比其夹点。夹点是指换热器中冷热流股之间传热温差最小的点，限制了进一步回收

表5 不同工质下系统初始参数

Table 5 Initial system parameters under different working

参数	空气	氩气	氮气	二氧化碳
质量流量/(kg/s)	28.5	56.5	27.5	28.0
工业余热温度/℃	60	60	60	60
环境温度/℃	25	25	25	25
压缩机入口压力/kPa	80	88	80	35
压缩机入口温度/℃	117	50.5	116.5	122
压缩机压比	6.06	5.48	6.06	14.30
膨胀机入口压力/kPa	454	454	454	454
膨胀机压比	4.54	4.54	4.54	4.54
分流比	0.463	0.464	0.462	0.464
等熵效率/%	90	90	90	90

过程系统中的能量。图3为空气工质分别在储能阶段蒸汽发生器SGM1和释能阶段蒸汽发生器SGM2的TQ曲线。两个蒸汽发生器的冷热流股的夹点处温差均控制在5℃以内,符合设计要求。同样地,可以得到不同循环工质下蒸汽发生器的夹点坐标。

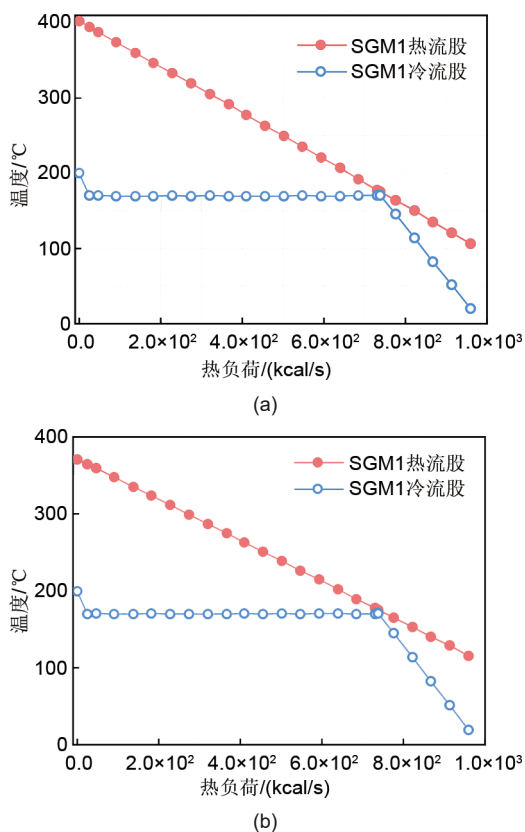


图3 空气工质下的蒸汽发生器TQ曲线: (a) SGM1; (b) SGM2

Fig. 3 TQ curves of the steam generator using air as the working fluid: (a) SGM1; (b) SGM2

以储能12 h、释能12 h的设计标准,固定系统内部件进出口参数,计算得出调整后各循环工质下系统的热力学性能表现如图4所示。由图4可以得出,在表5设定的初始参数下,空气、氩气、氮气与二氧化碳4种循环工质的COP值分别为1.519、1.478、1.523与1.327。空气和氮气因物性相近,其压缩机功率分别为8.33 MW和8.30 MW,膨胀机功率分别为3.05 MW和3.03 MW,对应的COP与循环效率同样接近,均在1.52左右。二氧化碳为三原子化合物,绝热系数较小,其压缩机功率仅为8.02 MW,而膨胀机功率为1.97 MW,系统循环效率最小。氩气由于摩尔质量较高、比热容较大,其压缩机与膨胀机功率分别达到了10.30 MW和4.87 MW,系统循环效率略低于空气与氮气,且较高的压缩机功率需求可能会带来更高的设备成本和功率要求。尽管氮气的COP略高于空气,但由于空气无须供应与纯化、成本最低、与设备兼容性好等工程因素,本研究后续的参数分析与工况对比均以空气作为基准工质。

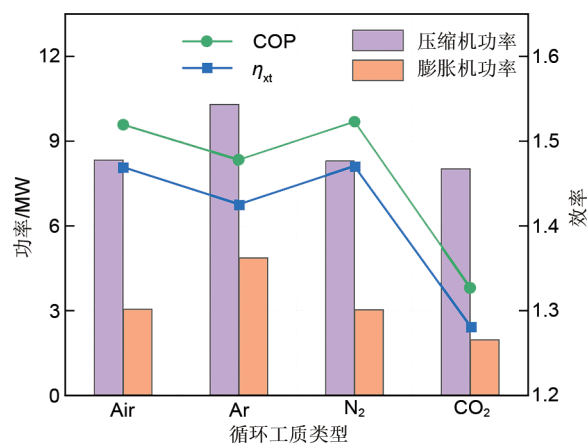


图4 不同工质系统压缩机、膨胀机功率、COP和循环效率变化

Fig. 4 Variations of compressor and expander power, COP, and cycle efficiency under different working fluids

3.2 固体储能装置参数分析

本节对固体储能单元中关键结构参数的影响进行了分析,重点考察孔隙率与颗粒粒径对储热系统性能系数(COP)以及循环效率(η_{xt})的影响。分析过程中选取空气作为工质,保持其他系统参数不变,逐项调整颗粒直径与孔隙率,得到不同工况下系统性能指标的变化趋势,如图5所示。

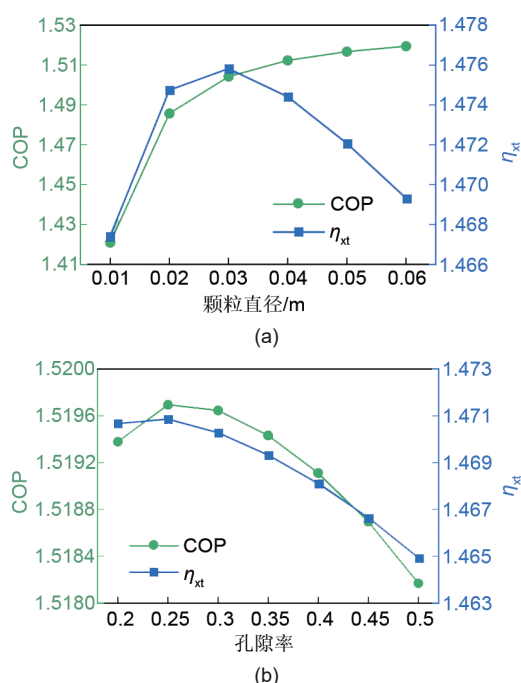


图5 填充床设计参数对系统性能的影响: (a) 颗粒直径; (b) 孔隙率

Fig. 5 Effect of packed bed design parameters on system performance: (a) Particle diameter; (b) Porosity

图5(a)展示了在固定孔隙率为0.35的条件下,颗粒粒径从0.01 m增加至0.06 m时系统性能的变化趋势。可以看出,储能系统COP值逐渐上升;循环效率 η_{xt} 均随颗粒粒径的增大先上升后略微下降,整体变化幅度较小。最大COP出现在颗粒粒径为0.06 m时,为1.519;而热效率在粒径为0.03 m时达到峰值,约为1.475。总体来看,较大的颗粒尺寸有助于降低压降和提升传热均匀性,但过大的粒径会削弱热传导效率,从而对性能产生负面影响。图5(b)进一步分析了在固定颗粒粒径为0.06 m的前提下,孔隙率的变化对系统性能的影响。结果表明,最大COP与循环效率均在孔隙率为0.25时取得,随后随着孔隙率增大至0.5,系统性能呈轻微下降趋势。COP从1.5197下降至1.5182,循环效率 η_{xt} 由1.4709下降至1.4649,变化虽不显著,但体现出较高填充率对于增强换热与储热能力的积极作用。综上,在固体储能单元的设计中,颗粒粒径控制在0.03~0.05 m范围,可以兼顾较低压降与良好的导热性;孔隙率在0.2~0.35的范围内,有助于提升储热密度与系统性能。该结果对储能单元的结构设计具有直接的工程指导

意义,为装置放大提供了设计参考。合理匹配颗粒尺寸与孔隙率能够在大型固体储能装置中平衡传热性能与流动阻力,减少压降损失并提升系统稳定性。

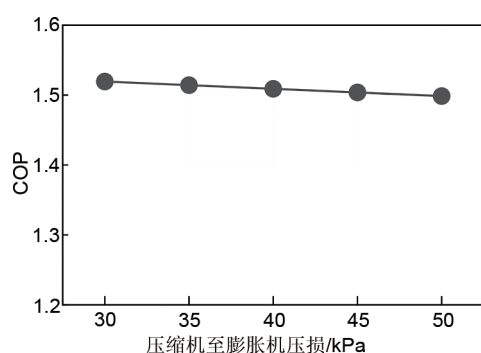
3.3 热泵系统参数敏感性分析

本节选取空气为工质,进行热泵系统内部件参数的敏感性分析。分析内容包括系统内部压损、压缩机和膨胀机等熵效率、压缩机的出口温度和进口压力、吸热源温度、吸热器端差、回热器端差等参数对于COP的影响。在保证基准参数的基础上,分析了系统内部压损对系统性能的影响。按照循环流程分为压缩机出口至膨胀机进口部分与膨胀机出口至压缩机进口部分,两部分压损对系统COP的影响如图6所示。

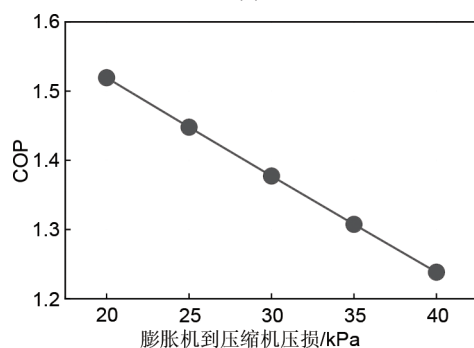
由图6可以看出,系统COP均随压损呈线性变化。压缩机出口至膨胀机进口压损每增加5 kPa,系统COP降低0.5%;膨胀机出口至压缩机进口压损每增加5 kPa,系统COP降低3.5%。压缩机至膨胀机的压损越大,膨胀机能够回收的压力能越少,因此系统总耗电增加,系统COP降低。相似地,膨胀机至压缩机压损越高,压缩机压缩至指定温度所需电能越多,因此系统总耗电增加,系统COP降低。

压缩机和膨胀机等熵效率对系统COP的影响如图7所示。根据压缩机和膨胀机制造水平的区别,压缩机的等熵效率变化区间设置在85%~90%,膨胀机设置在90%~95%^[25]。由图7可以看出,系统COP随压缩机和膨胀机等熵效率的提高而提高,并且提高趋势明显。当膨胀机等熵效率不变,压缩机等熵效率从85%升高到90%时,系统COP从1.382升高至1.469;当压缩机等熵效率不变,膨胀机等熵效率从90%升高到95%时,系统COP从1.469升高至1.518。由此可以看出,压缩机/膨胀机等熵效率对热泵系统COP的影响明显。

余热温度与压缩机压比是影响系统循环性能的2个关键参数。在保证表5基准参数的基础上,分析了余热温度与压缩机压比对系统COP的影响,如图8所示。工业废水作为预热低温流股的热源,决定系统吸热品质,其温度变化对于系统COP具有重要影响。如图8(a)所示,系统COP随余热温度的增高而增加。空气工质下余热温度每提高5℃,系统COP值增加1.4%。



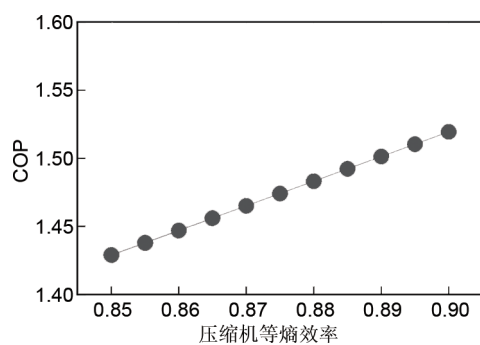
(a)



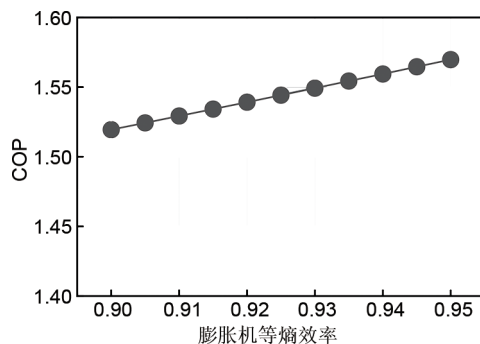
(b)

图6 压损对系统COP的影响

Fig. 6 Effect of pressure drop on the system COP



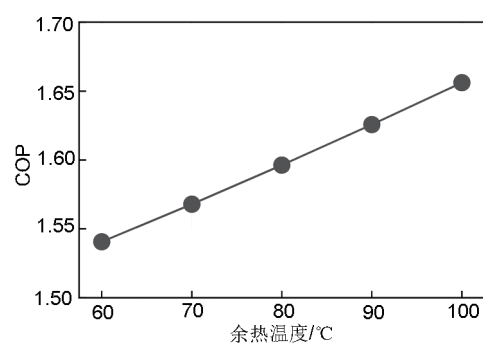
(a)



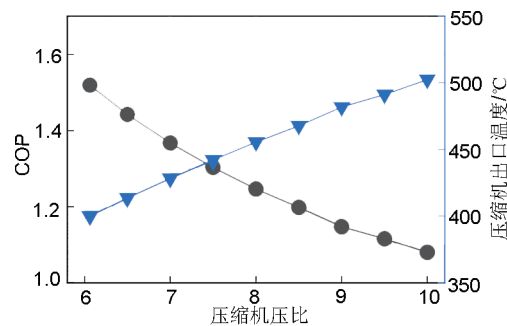
(b)

图7 等熵效率对系统COP的影响: (a) 压缩机; (b) 膨胀机

Fig. 7 Effect of isentropic efficiencies on the system COP: (a) Compressor; (b) Expander



(a)



(b)

图8 循环参数对系统COP的影响: (a) 余热温度; (b) 压缩机压比

Fig. 8 Effects of cycle parameters on the system COP: (a) Waste heat temperature; (b) Compressor pressure ratio

通过调整压缩机压比,可得出压缩机出口温度与COP变化曲线,如图8(b)所示。在压缩机入口压力和压缩机入口温度确定的情况下,改变压缩机压比范围,会改变压缩机出口温度^[26-27]。而在这个过程中,蒸汽发生器的工作状态不会改变。由图8(b)可以得出,该系统的COP随压缩机出口温度的增加而逐渐减小。因此,在其他参数设置不变的情况下,压缩机出口温度为400℃时的压缩比为最佳压缩比。

换热器端差对于系统COP同样有重要影响。工程中一般使用换热性能较好的吸热器,尽可能减小换热器端差,从而保证工质能够回收尽可能多的热能。在保证基础参数的基础上,分析了加热器端差与回热器端差对系统COP的影响,如图9所示,二者端差分别影响系统吸热量与压缩机进口温度。如图9(a)所示,在加热器端差12~2℃的变化范围内,端差每降低2℃,系统COP可增加0.6%。如图9(b)所示,在回热器端差20~10℃变化范围内,端差每降低2℃,系统COP可增加1.2%。上述COP变化幅度显示,高温段回热器端差相较于低

温段加热器的端差对于系统性能的影响更大, 这说明回热器部件在此热泵系统中更为关键。

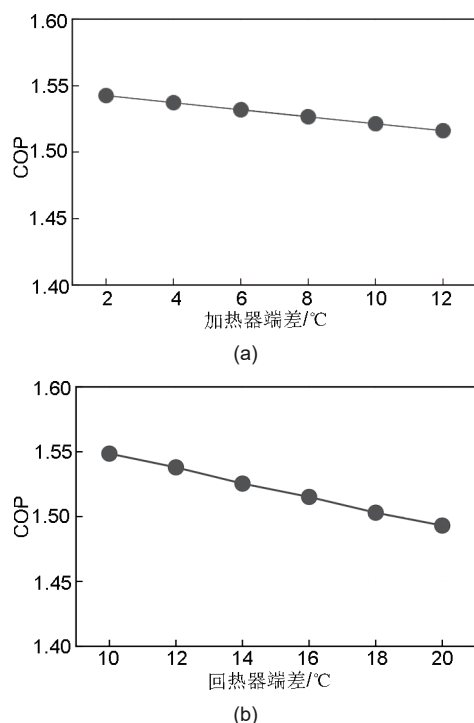


图9 端差对系统COP的影响: (a) 加热器; (b) 回热器
Fig. 9 Effects of temperature differences on the system COP: (a) Heater; (b) Recuperator

以空气作为循环工质, 进一步综合分析多参数对于系统COP的影响。考虑循环温度与换热器端差的影响, 得出了空气工质的COP云图, 如图10所示。图10(a)可以直观体现余热温度与压缩机出口温度对于系统COP的综合影响, 即在压缩机出口温度低、余热温度高的情况下可达到较高的COP值。在本研究的考虑范围内, 系统在余热温度为100℃、压缩机出口温度为400℃的条件下, COP达到1.656的最高值。作为同类工况的参照, 逆布雷顿高温热泵在源温65℃、供热约305℃条件下的COP约为1.364, 与本研究温升量级相近, 表明本研究成果COP处于较高水平^[28]。图10(b)表现了端差对系统COP的影响, 即换热器端差越小, 系统COP越高。在本研究的端差范围内, 系统在加热器端差为2℃、回热器端差为10℃的条件下, COP达到1.569的最高值。综合分析可知, 系统性能主要受压缩比、余热温度及换热端差等关键参数影响。合理选择这些参数可显著提升系统能效与热力学匹配程度。研究结果为高温热泵储能系统的工

程设计与性能优化提供了理论基础, 并为不同工况下的能量利用效率提升作参考。

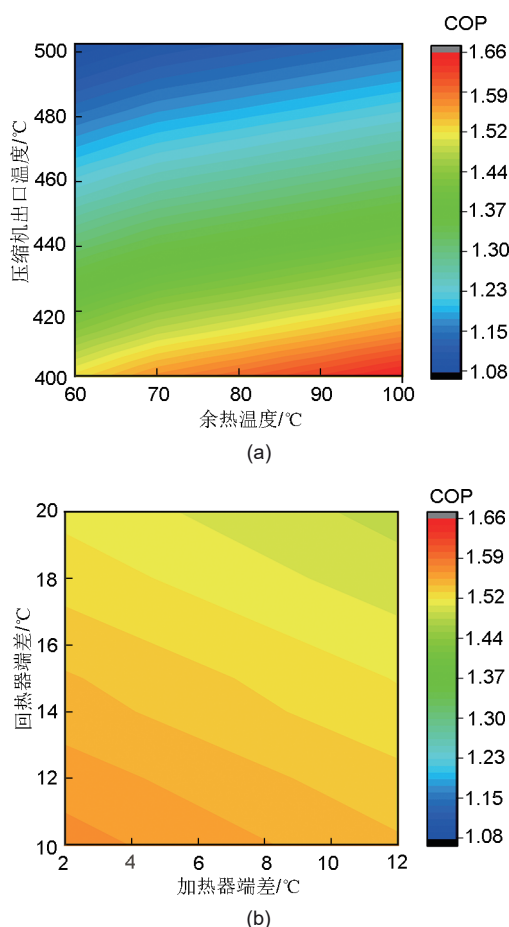


图10 空气工质下热泵系统COP云图

Fig. 10 COP contour maps of the heat pump system using air as the working fluid

3.4 设备成本估算

为了进一步评估所提出的PTES系统的工程可行性和经济性, 基于先前研究中报告的经验公式, 估算了主要设备的购置成本^[29-31]。表6总结了包括压缩机、膨胀机、电动机、换热器和固体储能单元在内的各部件的成本计算方程与设备购置成本。各成本与设计参数密切相关, 如功率输出、换热面积和储热容积等。其中, 固体储热单元的成本主要由储罐成本与储热材料成本两部分组成。这部分成本与储罐容积、岩石密度及孔隙率密切相关, 参数设置与表2保持一致。为保持计算的一致性与可比性, 本研究已按照统一汇率将引用文献中的成本折算为人民币, 并统一以“万元”作为最终成本单位进行展示。

表6 设备购置成本估算

Table 6 Purchase costs estimation of equipment

设备	成本计算方程	成本/万元
压缩机 ^[29]	$Z_{ys} = 7900E_{ys}^{0.62}$	1515
膨胀机 ^[29]	$Z_{pz} = 1100E_{pz}^{0.81}$	530
电动机 ^[30]	$Z_m = 110P_m + 5000$	707
吸热器 ^[29]	$Z_{he} = 16500 \left(\frac{A_{he}}{100} \right)^{0.6}$	19
回热器 ^[29]	$Z_{re} = 12000 \left(\frac{A_{re}}{100} \right)^{0.6}$	10
蒸汽发生器 ^[29]	$Z_{ge} = 25500 \left(\frac{A_{ge}}{100} \right)^{0.6}$	33
固体储能装置 ^[31]	$Z_{esu} = 10^{[3.49 + 0.44\log(V_{esu}) + 0.11(\log(V_{esu}))^2]} + 0.12\rho_s V_{esu}(1 - \varepsilon_s)$	452

如图 11 所示, 集成固体储能的 PTES 系统的总购置成本约为 3267 万元。在所有部件中, 压缩机和电动机的成本占比最大, 分别占总成本的 46.4% 和 21.7%, 其次是膨胀机(16.2%)和固体储能单元(13.8%)。换热器的成本占比相对较小(<2%), 反映出其购置成本较低。这些结果表明, 压缩和功率转换部分的成本优化对于提高 PTES 系统的整体经济性能至关重要。同时, 固体储能单元的成本可通过合理设计储罐容积与优化储热材料选择得到有效控制。这为 PTES 系统在工业应用中的经济可行性提供了重要参考。

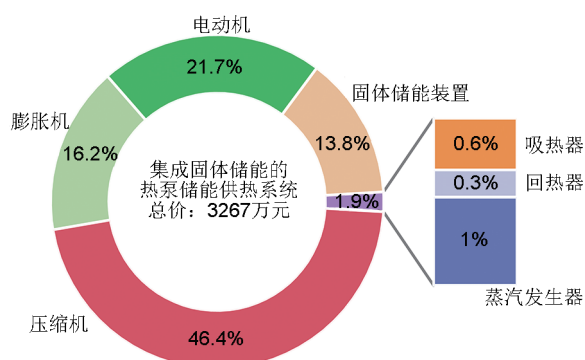


图 11 PTES 系统中各部件购置成本

Fig. 11 Purchase costs of each component in the PTES system

4 结 论

本研究基于热泵储能系统的热力学机理, 构建了高温热泵供热系统的稳态仿真模型, 系统开展了多工质、多参数工况下的性能分析, 主要结论如下:

(1) 在固定系统部件进出口参数的前提下, 不同循环工质对热泵系统性能影响明显。以 60℃ 工业废水为热源时, 氮气和空气的系统 COP 分别为 1.523 和 1.519, 较氩气与二氧化碳系统更具能效优势。

(2) 对固体储能单元的结构参数进行了量化分析, 结果表明系统性能对颗粒粒径和孔隙率变化存在一定敏感性。颗粒粒径在 0.03~0.05 m 范围内可兼顾压降与热传导性能, 孔隙率为 0.2~0.35 时系统效率更优, 有助于提升储热密度与换热能力。

(3) 以空气为工质的参数敏感性分析表明, 余热温度、压缩比与换热端差是影响系统能效的关键因素。当余热温度为 100℃、压缩机出口温度为 400℃ 时, 系统 COP 达到 1.656, 处于同类研究的较高水平。研究结果为系统运行参数优化与能量利用效率提升提供了理论基础。

(4) 基于设备成本估算, 系统总购置成本约为 3267 万元, 其中压缩机与电动机成本占比最大, 这表明功率转换部分是影响经济性的主要因素。固体储能单元的成本可通过优化储罐容积与储热材料选择来有效降低。

综上所述, 本研究通过将逆布雷顿循环型高温热泵与工业余热回收及蒸汽供热过程耦合, 构建了兼具储能与供热功能的一体化系统, 系统性揭示了工质选择、结构参数及运行条件对性能的影响规律。研究结果为高温热泵储能系统在工业供热中的工程设计与应用推广提供了重要理论依据和实践参考。

符号说明

A_{ge}	蒸汽发生器换热面积, m^2
A_{he}	吸热器换热面积, m^2
A_{re}	回热器换热面积, m^2
COP	系统储能阶段的储热量与系统消耗的功率之比, %
c_p	工质定压比热容, $kJ/(kg \cdot K)$
E_{inp}	储能过程输入的热量, kW
$E_{pump, ch}$	储能阶段固体储能装置消耗的泵功, kW
$E_{pump, disch}$	释能过程固体储能装置消耗的泵功, kW
E_{pz}	系统储能过程中膨胀机输出的功率, kW
E_{ys}	系统储能过程中压缩机输出的功率, kW
Eff_{ch}	储能阶段固体储能装置的效率, %
$Eff_{overall}$	固体储能装置的循环效率, %

- P_m ——电动机功率, kW
 Q_{recov} ——释能阶段固体储能装置供给蒸汽发生器的热量, kW
 Q_{store} ——储能阶段固体储能装置储存的热量, kW
 Q_{zj} ——工质加热蒸汽发生器产蒸汽利用的部分热量, kW
 R_g ——气体常数, J/(kg·K)
 t_c ——储能过程用时, h
 t_s ——释能过程用时, h
 Z_{esu} ——固体储能装置购置成本, USD
 Z_{ge} ——蒸汽发生器购置成本, USD
 Z_{he} ——吸热器购置成本, USD
 Z_m ——电动机购置成本, USD
 Z_{pz} ——膨胀机购置成本, USD
 Z_{re} ——回热器购置成本, USD
 Z_{ys} ——压缩机购置成本, USD
 η_{xt} ——热泵储能系统的循环效率, %
 κ ——绝热指数

参考文献

- [1] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0553.
- [2] 黄源源. 储能技术在新能源电力系统中的应用分析[J]. 中国高科技, 2024(20): 59-61. DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.20.18.
HUANG Y Y. Application analysis of energy storage technology in new energy power systems[J]. China High-Tech, 2024(20): 59-61. DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.20.18.
- [3] 安旭刚, 何青, 张千旭. 热泵储电系统多物理域建模与动态仿真研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(10): 1592-1599. DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2024.230508.
AN X G, HE Q, ZHANG Q X. Research on multi-physics domain modeling and dynamic simulation of pumped thermal electricity storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(10): 1592-1599. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2024.230508.
- [4] 乔龙, 谢立钢, 熊晨, 等. 耦合热泵的压缩超临界二氧化碳储能系统及其热力学分析[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(12): 53-62. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.12.007.
QIAO L, XIE L G, XIONG C, et al. Compressed supercritical carbon dioxide energy storage system coupled with heat pump and thermodynamic analysis[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(12): 53-62. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.12.007.
- [5] 孙健, 陶建龙, 胡芸蓉, 等. 基于热泵型储电技术国内外研究综述[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1963-1976. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0938.
SUN J, TAO J L, HU Y R, et al. Summary of research on power storage technology based on heat pump at home and abroad[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 1963-1976. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0938.
- [6] 张涵, 王亮, 林曦鹏, 等. 基于逆/正布雷顿循环的热泵储电系统性能[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1796-1805. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0330.
ZHANG H, WANG L, LIN X P, et al. Performance of pumped thermal electricity storage system based on reverse/forward Brayton cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1796-1805. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0330.
- [7] HASSAN A H, O'DONOGHUE L, SÁNCHEZ-CANALES V, et al. Thermodynamic analysis of high-temperature pumped thermal energy storage systems: Refrigerant selection, performance and limitations[J]. Energy Reports, 2020, 6: 147-159. DOI: 10.1016/j.egy.2020.05.010.
- [8] 路唱, 史幸平, 贾明祥, 等. 热泵储电系统的动态模型及其启动特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 167-176. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222000.
LU C, SHI X P, JIA M X, et al. Dynamic model and start-up characteristics of pumped thermal electricity storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 167-176. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222000.
- [9] 斯伟, 梁俊宇, 殷捷. 基于 Aspen Plus 的高温热泵蒸汽机仿真模拟[J]. 能源研究与利用, 2020(6): 29-33. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2020.06.003.
SI W, LIANG J Y, YIN J. Simulation of high temperature heat pump steam engine based on aspen plus[J]. Energy Research & Utilization, 2020(6): 29-33. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2020.06.003.
- [10] 杨鹤, 杜小泽. 布雷顿循环热泵储能的性能分析与多目标优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 196-210. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211100.
YANG H, DU X Z. Performance analysis and multi-objective optimization of brayton cycle pumped thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 196-210. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211100.
- [11] MA D D, SUN Y X, MA S, et al. Study on the working medium of high temperature heat pump suitable for industrial waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121642. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121642.
- [12] 许思涵, 王瑞林, 洪慧. "双碳"目标下能源消费全环节工业余热资源应用潜力评估方法[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 752-759. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.24100402.
XU S H, WANG R L, HONG H. Assessment method for application potential of industrial waste heat resource in energy consumption under the "dual-carbon" goals[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(S1): 752-759. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.24100402.
- [13] 王驿凯, 赵栋霖, 杨曙川, 等. 区域能源系统中热泵储能技术研究与应用综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(3): 839-848.

- DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.
- WANG Y K, ZHAO D L, YANG S C, et al. Review of pumped thermal energy storage technology and application in district energy systems[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2025, 55(3): 839-848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2025.03.026.
- [14] 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 Y L. Research on major common basic problems of efficient comprehensive utilization of industrial waste heat[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(17): 1856-1857.
- [15] SHARMA S, MORTAZAVI M. Pumped thermal energy storage: A review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 213: 124286. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124286.
- [16] 冯军胜, 严亚茹, 王璐, 等. 耦合低温余热回收的热泵储电系统热力学性能研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(12): 4384-4395. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0780.
- FENG J S, YAN Y R, WANG L, et al. Thermodynamic performance study of a pumped thermal energy storage system coupled with low-temperature waste heat recovery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(12): 4384-4395. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0780.
- [17] BENATO A. Performance and cost evaluation of an innovative pumped thermal electricity storage power system[J]. *Energy*, 2017, 138: 419-436. DOI:10.1016/j.energy.2017.07.066.
- [18] 杨卫卫, 周福, 闫飞宇, 等. 余热回收利用的高温热泵系统混合工质选择研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(5): 907-913.
- YANG W W, ZHOU F, YAN F Y, et al. Research on zeotropic mixtures as working fluid of high temperature heat pump for waste heat recovery[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(5): 907-913.
- [19] 周娇娇. 高温热泵在冷却水余热回收中的应用分析[J]. *化工与医药工程*, 2024, 45(2): 50-55.
- ZHOU J J. Application analysis of high temperature heat pump utilized in recovering waste heat of cooling water[J]. *Chemical and Pharmaceutical Engineering*, 2024, 45(2): 50-55.
- [20] 张若瑜. 促进风电消纳的燃煤热电厂热电调峰一体化技术研究及其优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- ZHANG R Y. Research and optimization on the heat-power integrated peak-shaving technology in coal-fired thermal power plant to reduce wind power curtailment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [21] 孙健, 戈志华, 杨勇平, 等. 电动热泵和蓄热装置联用的热电联产机组及其调峰方法: CN106287902B[P]. 2019-08-30.
- [22] XU C, WANG Z F, HE Y L, et al. Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 65-75. DOI:10.1016/j.apenergy.2011.11.002.
- [23] TRAHAN J. A technical and economic comparative analysis of sensible and latent heat packed bed storage systems for concentrating solar thermal power plants [D]. Tampa: University of South Florida, 2015.
- [24] FARRES ANTUNEZ P. Modelling and development of thermo-mechanical energy storage[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2019.
- [25] 路唱. 大规模热泵储能系统热力学分析与动态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- LU C. Study on thermodynamic and dynamic characteristics of large-scale pumped thermal energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [26] YANG H, DU X Z. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of pumped thermal electricity storage system with S-CO₂ recompression Brayton cycle[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116821. DOI:10.1016/j.est.2025.116821.
- [27] WHITE A, PARKS G, MARKIDES C N. Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53(2): 291-298. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.030.
- [28] KIM J S, CHUNG I H, KIM T S, et al. Thermal performance design and analysis of reversed brayton cycle heat pumps for high-temperature heat supply[J]. *Energies*, 2024, 17(12): 2953. DOI:10.3390/en17122953.
- [29] SALEH KANDEZI M, MOUSAVI NAEENIAN S M. Thermodynamic and economic analysis of a novel combination of the heliostat solar field with compressed air energy storage (CAES); a case study at San Francisco, USA[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 104111. DOI:10.1016/j.est.2022.104111.
- [30] LI B H, QIAN W, DU X Z. Study on the retrofit of coupled Carnot battery in retired coal-fired power units for grid energy storage transformation[J]. *Applied Energy*, 2025, 401: 126796. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126796.
- [31] MASHAYEKH A, PARK J H, DESAI N B, et al. Thermodynamic and economic analyses of liquid air energy storage systems using packed bed cold thermal energy storage with different storing materials[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 60: 103449. DOI:10.1016/j.tsep.2025.103449.