

储热储冷多场景应用专刊



基于 TRNSYS 的制氢工厂中梯级储能自治系统的模拟研究

惠文贤¹, 肖 鑫¹, 徐 剑², 冯慧华³, 周锦文², 邵雪锋³

(¹东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; ²中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; ³中国船舶集团有限公司第七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对制氢工厂的能源需求, 设计了一套集成电解槽余热回收的能源自治系统。该系统采用三级梯级潜热储能(CTES)装置, 回收利用电解槽产生的余热, 为吸收式制冷及生活热水供应提供稳定热源, 从而实现制氢过程中的冷热联供。在材料层面, 选用 3 种以石蜡为基材的复合相变材料, 并测试其热物性参数; 通过 Ansys Fluent 软件对 CTES 单元的热响应特性进行数值模拟, 并基于 TRNSYS 动态仿真平台开展系统运行特性分析。系统集成 CTES 前后的对比结果表明, 系统运行稳定, 制冷量满足需求, 热泵 COP 偏差小于 5%。经济性上, CTES 的全生命周期成本为 534 万元, 较单级系统降低明显, 动态投资回收期仅 3.5 年, 且采用复合相变材料使储能单元投资下降约 53%, 显著提升了系统能效与经济竞争力。该系统成功实现了制氢过程中余热的梯级回收与冷热联供的结合, 为工业领域提供了一种高效、经济且稳定的能源自治解决方案, 显著提升了氢能生产的综合能效与经济竞争力。

关键词: 电解槽; 梯级潜热储能; 能源自治; TRNSYS 动态仿真

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1098

中图分类号: TK 02; TB 657.5; TU 831 文献标志码: A 文章编号: 2095-4239 (2026) 03-942-11

Study of a self-consistent cascade energy storage system for hydrogen production plants using a TRNSYS simulation

HUI Wenxian¹, XIAO Xin¹, XU Jian², FENG Huihua³, ZHOU Jinwen², SHAO Xuefeng³

(¹College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; ²CSSC Design and Research Institute of Nine Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China; ³Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: The present study introduces a self-consistent energy system designed to recover waste heat from electrolytic cells, thereby addressing the energy demands of hydrogen production plants. The system incorporates a three-stage latent heat storage (CTES) device that captures and utilizes waste heat generated by the electrolytic cell, providing a reliable heat source for absorption refrigeration and domestic hot water supply. This integration facilitates the combined supply of cooling and heating during hydrogen production. At the material level, three composite phase change materials (CPCMs) based on paraffin were selected, and the thermal physical properties were tested. The thermal response characteristics of the CTES unit were simulated using Ansys Fluent software, and the

收稿日期: 2025-12-10; 修改稿日期: 2026-01-12。

基金项目: 上海市浦江人才计划 (20PJ1400200), 中央高校基本科研业务费专项基金 (2232021D-11)。

第一作者: 惠文贤 (2001—), 男, 硕士, 研究方向为制氢余热梯级蓄能, E-mail: 2232485@mail.dhu.edu.cn; 通信作者: 肖鑫, 副教授, 研究方向为相变蓄能及热湿管理, E-mail: xin.xiao@dhu.edu.cn。

引用本文: 惠文贤, 肖鑫, 徐剑, 等. 基于 TRNSYS 的制氢工厂中梯级储能自治系统的模拟研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 942-952.

Citation: HUI Wenxian, XIAO Xin, XU Jian, et al. Study of a self-consistent cascade energy storage system for hydrogen production plants using a TRNSYS simulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 942-952.

operational performance of the system were analyzed based on the TRNSYS dynamic simulation platform. Comparative results before and after CTES integration reveal the stable systematic operation, with cooling capacity meeting demand and the coefficient of performance deviation of the heat pump being less than 5%. Economically, the total life cycle cost of the CTES is ¥5.34 million, significantly lower than that of a single-stage system, with a dynamic payback period of only 3.5 years. In addition, the application of CPCMs has reduced investment in energy storage units by approximately 53%, significantly improving the energy efficiency and economic viability of the system. Overall, this system effectively integrates cascade waste heat recovery from the hydrogen production process with combined cooling and heating supply, providing an efficient, cost-effective, and stable energy-autonomous solution for the industrial sector. This approach significantly enhances the overall energy efficiency and economic competitiveness of hydrogen production.

Keywords: electrolyzer; cascaded latent thermal energy storage; combined heating and cooling supply; TRNSYS dynamic simulation

可再生能源发电制氢作为实现能源结构低碳转型和提升可再生能源消纳水平的重要途径,在应对弃风弃光问题方面具有显著优势^[1]。其中,碱性电解槽因其技术成熟度高、制造成本低、运行寿命长以及对原材料依赖程度相对较低等优势,已成为当前工业规模制氢系统中应用最为广泛的主流方案^[2-5]。尤其在大规模可再生能源发电系统耦合时,碱性电解槽在容量扩展性和工程可靠性方面展现出较强的适应能力,为构建可再生能源制氢及其下游综合利用系统奠定了坚实基础^[6]。

然而,在实际运行过程中,碱性电解槽在电化学反应及欧姆损耗作用下会持续产生大量反应热和焦耳热,导致槽体内部温度不断升高。若这些热量不能被及时、均匀且高效地排出,电解槽内部将出现明显的温度梯度和局部过热现象,不仅会加速电极材料和隔膜的老化与性能衰减,还可能引发隔膜变形、失效甚至破裂,从而增加氢氧混合和爆炸等严重安全事故的风险^[7]。因此,电解槽的热管理问题已成为制约其安全性、稳定性和长期可靠运行的关键因素之一。在可再生能源波动工况下,电解槽频繁启停和负荷变化进一步加剧了热量积聚与传热不均的问题,对散热系统的响应速度和调控能力提出了更高要求。因此,如何在保障电解效率的同时,实现反应热的高效导出与余热的合理利用,是推动可再生能源制氢系统规模化、安全化运行亟需解决的核心科学与工程问题^[8-11]。

相较于现有依赖于即时热循环耦合或复杂吸收

式热泵的碱式电解槽热管理方案,热能存储技术(TES)提供了一种更具优势的解决方案^[12]。它能够将电解过程中产生的间歇性余热以高能量密度的形式储存起来,实现热量在时间上的削峰填谷,有效解决了传统方案对产热与用热瞬时匹配的依赖^[13];此外,相变材料(PCM)在蓄/放热过程中近似恒温的特性,能更精确、稳定地将电解槽温度维持在高效区间,从而在简化系统的同时,显著提升了热管理的品质与整体能源利用效率^[14]。Zhong等^[15]针对波动性可再生能源驱动的商业规模碱性水电解制氢系统,开发了一种基于电化学原理及传热传质定律的机理动态模型,该模型对电压和温度的预测误差分别低于3%和5%。通过模拟分析发现,集成储热罐并减少散热可使系统冷启动时间缩短25%,同时将电堆温度维持在365K的高温下可将系统整体能效提升2.4%。此外,研究比较了模型预测控制与比例积分控制策略,表明前者在响应时间和控制精度上更具优势。这些发现凸显了热管理和控制优化在提升大规模碱性水电解系统与可再生能源整合性能方面的重要性。

TES技术作为能源高效利用的核心环节,其发展高度依赖PCM性能与储热系统设计的协同优化^[16]。以工程中广泛应用的壳管式储热系统为例,其凭借结构紧凑、耐高压及低维护成本等优势,成为工业余热回收和太阳能热利用的首选方案^[17]。然而,当采用常规相变材料时,材料固有缺陷显著制约系统效能:PCM导热系数普遍较低,导致蓄/放

热速率下降,严重削弱能量调控的实时性。当前针对壳管式相变储热系统的强化研究聚焦两大技术路径:一是通过纳米粒子掺杂、多孔骨架复合等手段提升相变材料导热系数^[18];二是构建多级相变温度串级系统,通过热力学梯级匹配优化传热驱动力^[19]。

能源自洽系统是指一个通过集成本地可再生能源发电、储能设施和智能能源管理,实现对外部能源网络近似零依赖的闭环能源系统^[20]。在时间和空间维度上完成自我调节与平衡,最终达成能源的自我供给、高效利用和高度韧性^[21]。在制氢工厂等工业场景中,它更进阶为电、热、氢多能流协同的全面自洽,是实现深度脱碳和能源独立的终极路径之一^[22]。其中,Dezhdar等^[23]设计并优化了一个新颖的太阳能多发电系统,该系统集成了太阳能碟形聚光器、有机朗肯循环、热泵、反渗透海水淡化装置以及冷热储能罐。研究结合了TRNSYS进行动态仿真和工程方程求解器进行热力学建模并优化,以最小化生命周期成本、锅炉燃料消耗和用电量,同时最大化热舒适度。结果显示,该系统相比传统的配置,生命周期成本降低了18.4%,每年可减少超过13吨的二氧化碳排放,并能生产符合世界卫生组织标准的淡水。

尽管能源自洽系统的理论框架已较为成熟,但目前针对可再生能源耦合制氢场景的能源自洽系统

研究仍显不足,尤其是在风光发电与制氢余热协同构建综合能源系统方面,尚未形成系统性解决方案。现有研究在能源供需动态匹配、波动条件下系统运行策略优化等方面仍有提升空间。本研究以实际制氢工厂为研究对象,首先对其运行过程中的余热回收潜力进行了分析,采用CFD软件建立了梯级相变储能装置模型,并结合实验对模拟结果进行了验证。将CFD模拟数据导入TRNSYS平台,结合制氢工厂的实际能源需求,构建了集成余热利用的能源自洽系统模型。此外,通过修正热泵模型进一步完善了复合自洽系统的仿真装置,并对系统制冷量和供热量进行了模拟计算与分析。最后,以全生命周期成本和动态投资回收期为核心评价指标,对系统的经济性进行了综合评估,以期为实际工程应用提供参考。

1 冷热联供系统

1.1 组成及运行部分

本研究基于制氢工厂的能源需求,通过TRNSYS软件建立了能源自洽系统中的冷热电联供装置,如图1所示。其中连接主要分为主模块的连接和数据收集与输出模块的连接。并对制氢工厂能源自洽系统进行了系统建模与仿真分析,从技术可行性、运行性能及经济性等方面对梯级相变储能装置(CTES)的应用效果进行了系统评估。

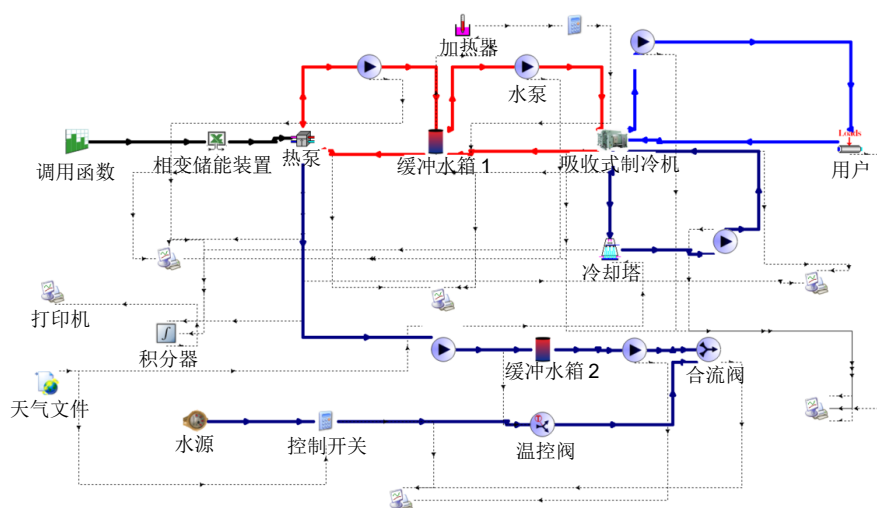


图1 能源自洽系统的冷热联供装置图

Fig. 1 Schematic diagram of cold and heat combined supply device for energy self-consistent system

(1) 系统主模块的连接

制冷系统: 由于相变储能装置的出口温度相对吸收式制冷机所需热源温度偏低, 因此, 本装置通过热泵将原热源提高一定品位供给吸收式制冷机, 由于初始水温较低, 因此使用加热器为水箱提供一定的辅助热量。此系统首先由调用函数模块将相变储能装置模块的温度和流量随时间的变化供给热泵, 通过水泵将加热的水供给缓冲水箱1, 随后将水箱内的恒温水供给吸收式制冷机, 吸收式制冷机通过以此部分热量为动力为用户提供一定数量的冷量; 吸收式制冷机内冷凝器所产生的热量由冷却水带走, 冷却水通过冷却塔降温后, 重新供给吸收式制冷剂的冷凝端。

供热系统: 由于热泵并不能将相变储能装置出口端热水的热量全部吸收, 因此本系统将热泵源侧的出口热源供给制氢工厂的生活用水, 此部分热源通过热泵将热水送到缓冲水箱2中; 由温控阀通过控制冷端自来水的出水量, 再通过合流阀以一定的比例将热水和冷水混合, 最终控制出水温度。

(2) 数据收集与输出模块的连接

模拟中数据的收集与处理主要是打印机与积分器模块, 将热泵源侧进口温度、热泵源侧出口温度、热泵负荷侧出口温度、吸收式制冷机的热端进口温度和吸收式制冷机的热端出口温度连接到热端打印机模块; 将辅助加热量、热泵负荷侧供热量、热泵源侧供热量、热泵功率、吸收式制冷机的热端热量等连接到能量打印机侧; 将热泵的COP和吸收式制冷机的COP连接到COP打印机模块; 将冷冻水进口温度、冷冻水出口温度、冷却水进口温度和冷却水出口温度连接到冷端打印机侧; 将自来水温度、热源温度、用户温度和用户流量连接到用水侧打印机模块; 将热泵负荷侧供热量和辅助加热量连接到积分器模块, 再将积分器模块连接到打印机模块。

1.2 运行参数定义

(1) 热泵制热时的COP定义如下^[24]:

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{P_h} \quad (1)$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_h - P_h \quad (2)$$

式中, COP为热泵制热效率; Q_h 为高温热泵制热量, W; Q_{abs} 为热泵吸热量, W; P_h 为热泵功率, W。

(2) 全生命周期成本(life cycle cost, LCC)是

评估项目在其生命周期内的经济效益的最普遍接受的方法。本工作对能源自洽系统的LCC进行了对比分析, 其费用包括设备购置费用、安装费用、运行费用、维护费用、退役拆除费用以及报废收益费(其值按设备购置费的10.0%计算)^[25]。LCC按如下公式计算^[26]:

$$\text{LCC} = \text{INV} + \sum_{i=1}^N C_{\text{out}} (1 + \text{DR})^{-i} \quad (3)$$

$$C_{\text{out}} = \text{OC} + \text{MC} + \text{DC}/N \quad (4)$$

式中, LCC为全生命周期成本; INV为初投资; C_{in} 和 C_{out} 分别为年现金流入和流出; DR为贴现率(本工作取5.0%); N 为使用、服务年限20年; OC和MC分别为年运行费用和年维护费用; DC为拆除费用。

(3) 动态投资回收期(dynamic investment payback time, DPBT)较静态投资回收期考虑了资金的时间价值, 计算结果更切合实际, 其计算过程如下式所示^[27]:

$$\text{INV} = \sum_{i=1}^{\text{DPBT}} (C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) (1 + \text{DR})^{-i} \quad (5)$$

$$C_{\text{in}} = \text{IE} + \text{SI}/N \quad (6)$$

式中, C_{in} 为年现金流入; IE为运行收益; SI为报废收益。

2 模型的建立

2.1 梯级相变储能装置

基于某集团公司开发的CDQ-2000/2.0系列碱性电解水制氢装置, 单台电解槽每日运行8 h, 每槽电解体积为6.55 m³, 碱液循环量为24 m³/h, 氢气产量达2000 m³/h, 碱液出口温度约为90℃。为最大化CTES装置的储能量, 并确保管内流动处于层流状态, 系统设计采用一台电解槽对应两个CTES单元, 每单元总入口流量设定为12 m³/h。壳侧填充PCM, 内管束侧为碱液。由于碱液的物理参数与水相差不大, 因此采用纯水来模拟热交换流体。每根内管的水流速率 u 为0.00205 m/s, Re 为1481, 为非等温层流, 管间距 d_p 可导出为500 mm。图2为基于Ansys Fluent构建的CTES器件的结构示意图。该装置由三种具有不同相变温度的CPCMs分别均匀填充于罐体的三个独立区域构成。其中, CPCPM以碳化玉米秸秆多孔材料为载体, 以PW为相变储能介质, 通过复合方式实现高效蓄/放热性能, 其中材料的物性参数如表1所示^[28]。

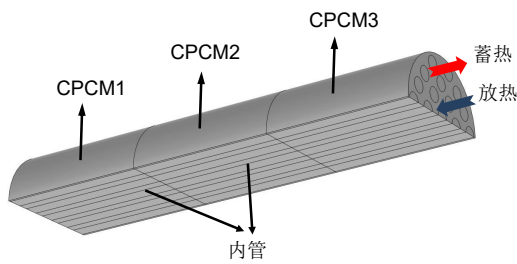


图2 CTES 装置模型
Fig. 2 Model of CTES device

表1 纯PWs和CPCMs的热物理性质^[28]

Table 1 Thermophysical properties of pure PWs and CPCMs^[28]

样品	熔化温 度/℃	凝固温 度/℃	熔化焓 /(kJ/kg)	凝固焓 /(kJ/kg)	热导率 /[W/(m·K)]
PW60	60.25	60.43	202.72	203.67	0.359
PW64	64.71	64.41	238.42	239.25	0.367
PW70	71.45	72.05	229.50	232.00	0.374
CNCS8-EG2/ PW60	58.16	60.32	169.98	170.83	1.427
CNCS8-EG2/ PW64	63.12	64.61	191.13	192.21	1.434
CNCS8-EG2/ PW70	69.72	72.85	184.51	186.83	1.469

为了验证模型的准确性，将数值计算结果与实验数据进行了比较。在文献[29]中，PCM为十六烷，流速为0.0315 kg/s，HTF为水，充注过程中传热流体入口温度恒定为310.7K。相变温度为300.7K。数值结果与实验数据的对比如图3所示，结果表明，两者的误差在5%以内。该偏差主要归因于外部环境条件的波动、实验测量的不确定性以及建模方法的必要简化。总体而言，本研究的数值结果与实验数据吻合较好，表明所建立的壳管式CTES装置数值模型具有足够的准确性，适合进一步的工程应用和系统分析。

2.2 天气模块

TRNSYS能够使用各种格式的气象数据。用户可以自定义天气文件，以适应特定的模拟需求。天气模块允许用户设置多个气象参数，如温度、湿度、风速、辐射等。这些参数影响建筑的热负荷、空调需求、能源消耗等。TRNSYS可以对输入的气象数据进行处理，生成模拟所需的时间序列数据。支持不同时间步长的模拟。本工作气象数据由Type15-3读取上海气象数据文件，得到逐时环境温度及室外湿球温度如图4所示。

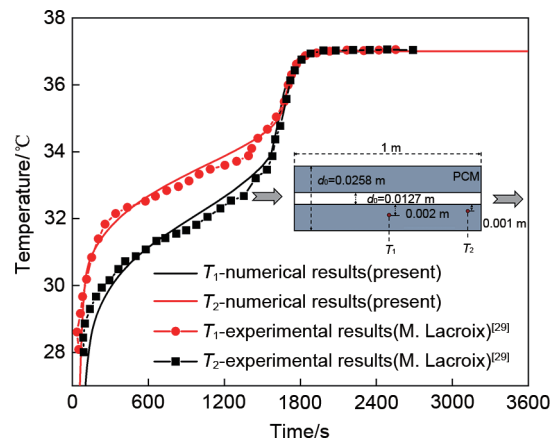


图3 数值结果与实验结果的对比如验证
Fig. 3 Comparisons between numerical and experimental data

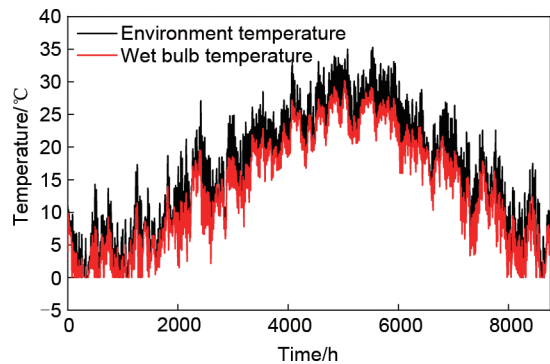


图4 上海地区环境温度和湿球温度
Fig. 4 Ambient temperature and wet bulb temperature in Shanghai region

2.3 热泵机组模块

热泵机组模块使用的是Type 668的水-水热泵，该模块采用固定频率工作，不具备变频调节能力，模型的流程示意如图5所示。其工作原理是通过工质在冷凝器中放热和在蒸发器中吸热的循环过程来实现。因此，模块的正常运行依赖于外部文件。宋亚伟^[30]基于实验数据，拟合出热泵的性能参数，如表2所示。

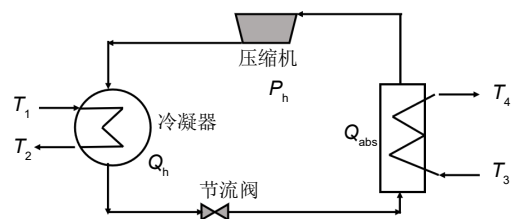


图5 热泵运行流程示意图
Fig. 5 Schematic diagram of operational process of heat pump

为验证热泵系统的有效性与准确性，本工作依据宋亚伟^[30]实验中所采用的装置结构，利用 TRNSYS 搭建了对应的仿真模型。通过将仿真结果中系统的 COP 值及水箱温度数据与实验测量值进行对比，得出结果如图 6 所示。对比结果显示，水箱的实验温度略高于模拟值，且在部分时段内模拟

所得的 COP 略高于实验值。这主要是由于仿真中热泵处于较为理想的运行条件，其吸热性能优于实际实验装置，从而导致模拟中水箱温度较低，相应地提高了仿真计算中的 COP 值。经计算验证，仿真结果与实验数据的偏差在 5% 以内，表明所建模型具有较高的准确性。

表 2 热泵机组性能参数拟合表^[30]
Table 2 Fittings of performance parameters for heat pump units^[30]

性能参数	拟合公式	R^2
COP	$COP = 6.652 + 0.185 \times T_{eva} - 0.001 \times T_{eva}^2 - 0.122 \times T_{con} + 0.001 \times T_{con}^2 - 0.001 \times T_{eva} \times T_{con}$	0.89
压缩机功率	$P_h = 286.962 + 23.166 \times T_{eva} - 0.305 \times T_{eva}^2 + 0.758 \times T_{con} + 0.09 \times T_{con}^2 + 0.151 \times T_{eva} \times T_{con}$	0.99
高温热泵制热量	$Q_h = -2188.12 + 380.583 \times T_{eva} - 2.99 \times T_{eva}^2 + 5.872 \times T_{con} - 0.470 \times T_{con}^2 + 0.632 \times T_{eva} \times T_{con}$	0.99

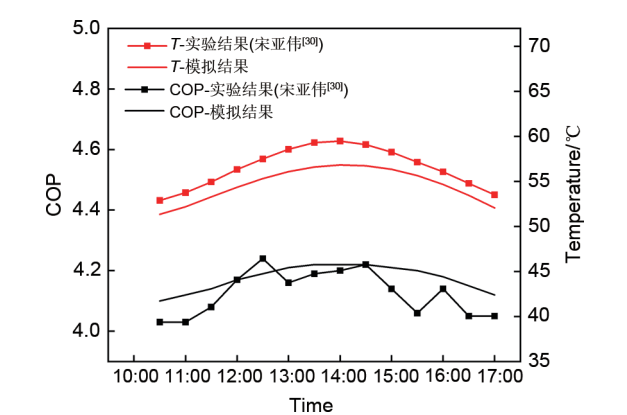


图 6 性能系数和温度的实验与模拟对比
Fig. 6 Comparison of COP and temperature between experimental and simulation data

2.4 吸收式制冷机组模块

吸收式制冷模块采用 Type 909，该模块能够计算在不同条件下的制冷能力、能耗等性能指标，其中吸收式制冷机的工作原理示意图如图 7 所示。吸收式制冷机通过制冷剂循环工作，利用热源来驱动制冷循环。该系统通过吸收剂和制冷剂的相互作用，实现制冷过程。制冷剂在蒸发器中吸收热量，转化为气态，然后在吸收器中与吸收剂结合，并释放热量。

$$COP = \frac{Q_2}{Q_1} \tag{7}$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_0 + Q_3 \tag{8}$$

式中，COP 为吸收式制冷剂的制冷效率， Q_1 为蒸气在热源端吸收的热量， Q_2 为蒸气在蒸发器吸收的热量， Q_0 为在冷凝器中放出的热量， Q_3 为在吸收器放出的热量。

2.5 其他模块

(1) 调用函数。调用函数的作用是将储能装置内的流量和温度随时间调用到能源自洽系统当中，

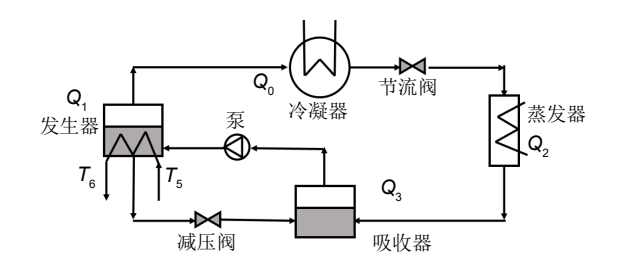


图 7 吸收式制冷机运行流程示意图
Fig. 7 Schematic diagram of operational process of absorption refrigeration machine

模块编号为 Type 14。

(2) 相变储能装置。相变储能装置的作用是表征热源的温度和流量的，模块编号为 Type 62。此模块的数据是由 Ansys Fluent 仿真得到放热过程的流体的出口温度和流量。此模块有两个出口，分别控制着温度和流量的大小。

(3) 水泵。水泵模块选用的是 Type 114，热泵负荷侧水泵的流量为 10000 kg/h，吸收式制冷机热端侧水泵的流量为 8000 kg/h，吸收式制冷机冷源侧水泵的流量为 6000 kg/h，冷却塔侧热泵的流量为 21000 kg/h。

(4) 缓冲水箱。缓冲水箱选用的是 Type 158，形式为两出两进，容积设置为 12 m³，冷流体的比热容设置为 4.19 kJ/(kg·K)，冷流体密度为 1000 kg/m³，水箱内不设置电加热。

(5) 冷却塔。冷却塔采用的是 Type 161，它使用设计入口和出口条件来计算塔的整体传热系数，然后使用该传热系数来估算其他入口条件下的性能。此冷却塔计算的是单速冷却塔的性能，该冷却塔在风扇开启和关闭的情况下为流体提供冷却。在此冷却塔中，离开冷却塔的流体的理想温度是一

个输入值,然后,模型会确定流体速度可产生比设定点更低的温度。如果将流体冷却到设定点所需的能力超过了冷却塔在入口条件下的能力,模型就会计算出风机开启时的流体温度。

3 结果与讨论

3.1 梯级和非梯级储能装置在能源自洽系统的对比

能源自洽系统根据最终用户类型分为制氢工厂的最终冷源供应和员工生活用水供应。根据以上所构建的自洽系统,测试了热泵的COP。由于吸收式制冷机的热端温度恒定,因此当梯级储能装置向热泵供热时,若热泵的COP较大,则辅助加热量更少,更有利于节省能源,进而梯级储能装置更有优势;因此通过对比梯级和非梯级储能装置的热泵COP,来分析梯级和非梯级储能装置的优劣。图8为在一天当中梯级和非梯级供能给热泵的COP的对比图。

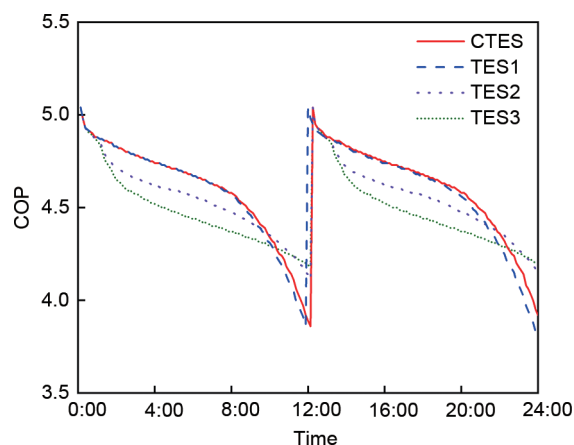


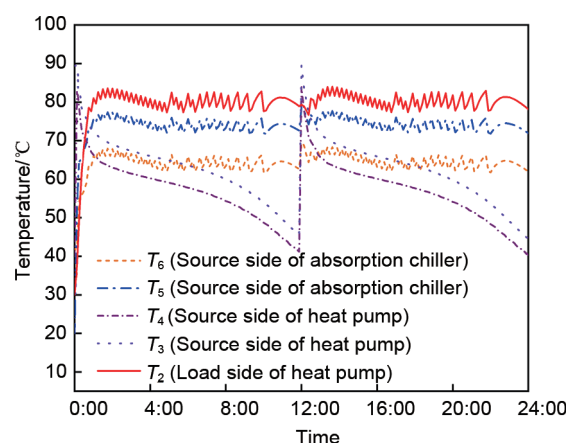
图8 梯级和非梯级供能给热泵的COP对比
Fig. 8 Comparison of COP between stepwise and non-stepwise energy supply to heat pumps

由图8可以看出,随着时间的推移,热泵的COP逐渐降低,但在12:00之后热泵的COP重新到达最大值,并且随着时间的增加,热泵的COP又开始逐渐降低;这是由于在前12 h相变储能装置不断向外放出热量,储能装置内部的热量逐渐减少,最终导致热泵的COP逐渐减小;在12:00时,重新接入蓄满热量的相变储能装置,因此热泵的COP重新达到最大值。从图中可以看出CTES供能给热泵的COP最大,这是由于梯级储能可以在一个更宽的温度区间内实现高效蓄/放热过程。在

放热阶段,高温相变材料首先释放热量,当温度降至其相变点以下时,中低温相变材料开始接力放热,从而在更长的时间内为热泵提供一个相对稳定且温度适宜的热源。这种阶梯式的供能方式,有效缓解了单一相变材料放热后期热源温度骤降的问题,使得热泵更长时间地工作在高效率区间,因此其整体平均COP表现最优。因此,梯级储能装置应用于能源自洽系统的冷热联供更具有优势,故选用梯级储能装置应用于能源自洽系统。

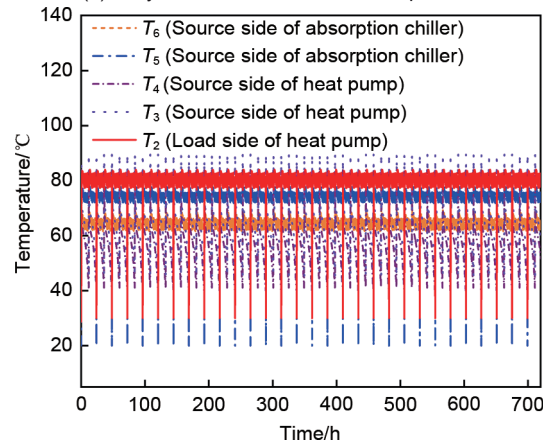
3.2 系统的制冷侧的性能

图9为热泵负荷侧出口温度 T_2 、热泵源侧入口温度 T_3 、热泵源侧出口温度 T_4 、吸收式制冷机热端入口温度 T_5 和吸收式制冷机出口温度 T_6 随时间的变化关系;由图9(a)可以看出热泵负荷侧出口温度 T_2 维持在80℃上下,吸收式制冷机发生器侧的入口



(a) 热源温度的日变化

(a) Daily variation of heat source temperature



(b) 热源温度的月变化

(b) Monthly variation of heat source temperature

图9 系统热源温度的变化图

Fig. 9 Variation of heat source temperature of the system

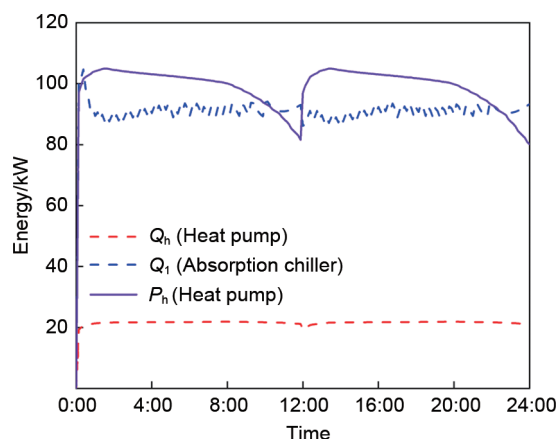
温度 T_s 维持在 75°C 左右, 吸收式制冷机发生器侧的出口温度 T_g 在 65°C 上下波动, 热泵的源侧进出口温差维持在 5°C 左右; 由于水箱内部水的分布不均匀, 故从图中可以看出温度在一恒定值上下波动。图 9(b) 为其月变化, 基本与每日计算结果相差不大。

在保证最终用户的冷冻水进/出水温度为 $14^\circ\text{C}/7^\circ\text{C}$ 的条件下, 供冷量可达 55.56 kW 。图 10 为吸收式制冷机的制冷量、热泵提供的热量以及吸收式制冷机吸收的热量随时间的变化关系; 从图 10(a) 中可以看出, 热泵的功率 P_h 稳定在 20 kW 上下波动, 吸收式制冷机的吸热量 Q_i 大概为 85 kW 。图 10(b) 为吸收式制冷机及热泵的月热量的变化, 由图可知, 整月的制冷总量高达 1666.8 kW , 吸收式制冷机的吸热量为 2550 kW 。该稳定的能效产出, 使得系统具备显著的经济效益与环保效益。同时, 以热泵为核心驱动、吸收式制冷机为供冷末端、并可能整合了高效储能单元的冷热联供系统, 成功实现了在指定工艺要求下的稳定、高效、大容量供冷。

3.3 系统的生活用水侧的性能

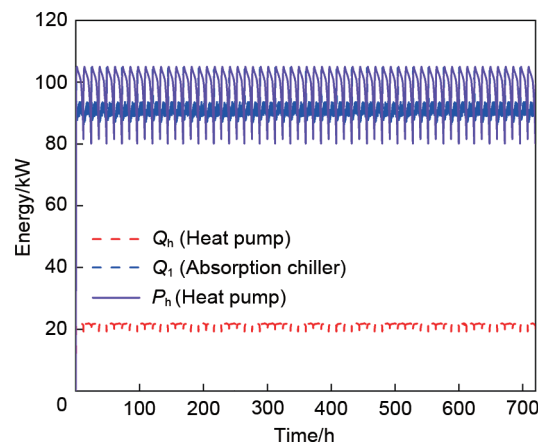
图 11 为热源温度、生活用水温度及流量随时间的变化关系。根据图 11(a), 在 12 h 前, 系统热端温度随时间持续下降, 而生活用水温度 T_{user} 稳定维持在 42°C 左右, 自来水温度恒定为 11°C 。此阶段, 梯级储能装置持续释放其储存的热量, 导致其内部热储量逐渐减少, 可供热泵提取的热量相应降低, 进而引起热泵源侧出口温度下降, 最终表现为系统热端温度的降低。与此同时, 由于梯级储能装置释放热量的速率随时间减缓, 为维持恒定的生活用水出口温度, 温控阀通过调节、减小自来水的混合流量来实现温度控制, 因此生活用水供应流量随时间呈现逐渐下降的趋势。图 11(b) 为供水的流量随时间变化, 由图可见月供水量高达 $1.12 \times 10^7\text{ kg}$ 。

基于以上分析, 此自洽系统整合了相变储能、热泵与智能控制阀的供热系统, 成功解决了间歇性/衰减性热源与稳定恒温用水需求之间的矛盾。它通过主动的、模型化的流量调节技术, 将热源侧的波动有效地隔离在用户感知之外, 确保了用水的舒适性。同时, 其巨大的月度供水量证实了该系统足以满足楼宇、社区等实际场景下的集中生活热水需求。



(a) 系统热量的日变化

(a) Daily variation of system heat



(b) 系统热量的月变化

(b) Monthly variation of system heat

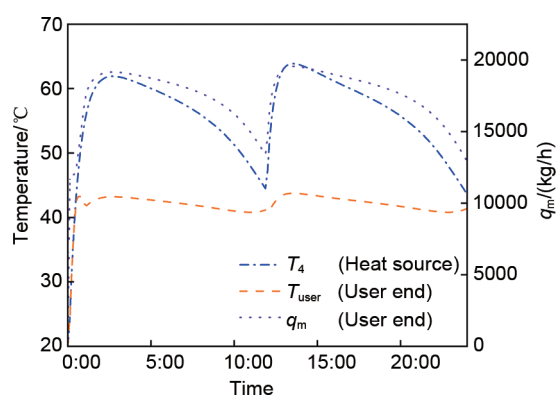
图 10 系统的热量变化图

Fig. 10 Heat variation of the system

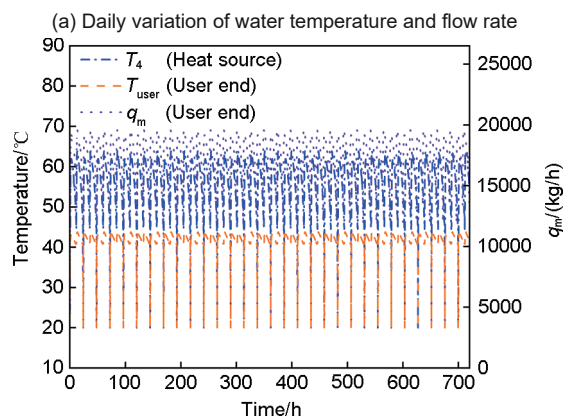
3.4 系统的全生命周期成本及回收周期

由制氢工厂的资料显示, 该制氢工厂配备 10 台电解槽, 每台均连接两个储能装置。本项目整合了 CTES 装置、高温热泵与吸收式制冷的多能耦合系统投资分析。其中采用成本优化后的 CPCM, 单台投资中值估算为 28338 元, 较传统石蜡方案降低 53% , 总投资预算为 566760 元; 高温热泵单元 (200 kW) 采用电厂级设备报价下限, 投资 642520 元; 吸收式制冷机组 (556 kW) 参考工业级均价, 配置成本 544340 元。辅助设备及安装费用按主设备 15% 计 188043 元。

为直观揭示不同余热回收配置对 DPBT 的影响, 本研究基于 MATLAB 软件对关键公式进行编程计算, 并将相应参数代入模型求解, 结果如图 12 所示。通过对比梯级储能方案与传统单级方案的经



(a) 水温及流量的日变化



(b) 水温及流量的月变化

(b) Monthly variation of water temperature and flow rate

图 11 用户侧水温及流量变化图

Fig. 11 Variation of water temperature and flow rate at user side

济性表现发现: CTES 方案的 LCC 为 534 万元, 其中各项详细成本参数如表 3 所示, 显著低于 3 种传统单级方案的 674 万元、873 万元和 956 万元。在能源回收效率方面, 梯级系统凭借多环节储能与多用途余热利用的协同优势, 实现了 3.5 年的最短 DPBT; 而三种传统单级方案因回收效率受限, DPBT 分别延长至 4.4 年、6.7 年和 8.1 年。对比分析表明, 多级储能结构与多模式能量利用策略能有效提升制氢工厂的整体能源效率, 不仅将投资回收期缩短 35%~57%, 更为工厂实现“零碳”目标提供了兼具经济性与技术可行性的解决方案。

4 结 论

本工作基于 TRNSYS 软件对氢能工厂能源自洽系统进行了系统建模与仿真分析, 从技术可行性、运行性能及经济性等方面对梯级相变储能装置的应用效果进行了系统评估。通过对系统主要模块

表 3 生命周期成本与回收期计算参数

Table 3 Calculation parameters of life cycle cost and payback period

各项费用参数	各参数投资占比/%	金额/元
年运行费用	5.0	87681
年维护费用	2.5	43840
年收益费用	28.8	1535714
拆除费用	5.0	87681
报废收益	10.0	175362

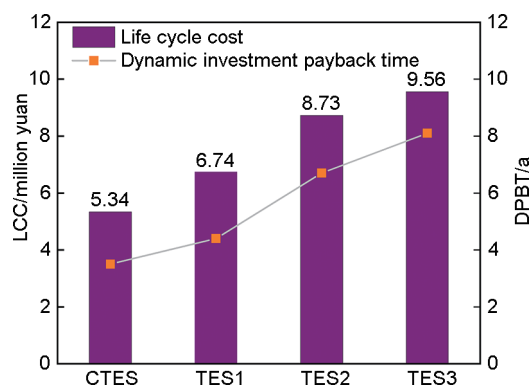


图 12 不同系统的全生命周期成本及动态回收期

Fig. 12 Full life cycle costs and dynamic payback periods of different systems

的功能构建、参数设定及结果对比分析, 验证了所建模型的准确性, 并揭示了梯级储能在提升系统能效与经济性方面的显著优势。主要结论如下:

(1) 在 TRNSYS 平台上分别建立了天气模块、热泵机组、吸收式制冷机、相变储能装置、水泵、冷却塔、缓冲水箱及控制阀等多个功能模块, 并通过信号函数及打印机模块实现了系统数据的交互与输出。模型的结构清晰、数据传递合理, 为后续的性能分析提供了可靠的仿真基础。模型验证结果表明, 热泵系统的仿真 COP 值与实验结果偏差控制在 5% 以内, 说明模型具有较高的准确性和适用性, 可用于能源自洽系统的动态性能研究。

(2) 在制冷侧性能分析中, 仿真结果显示热泵负荷侧出口温度约维持在 80°C, 吸收式制冷机热端入口温度稳定在 75°C 左右, 出口温度维持在 65°C 上下波动, 系统运行稳定, 温差控制合理。供冷能力方面, 系统在保持冷冻水进出温度 14°C/7°C 的条件下可实现 55.56 kW 的制冷负荷, 表明所设计的多能耦合系统能够满足制氢工厂夏季工况下的冷量需求。整月累计制冷量高达 1666.8 kW, 吸收式制冷机吸热量达 2550 kW, 热量传递过程高效且能量利用充分。

(3) 基于LCC和DPBT对系统的经济可行性进行了评估, CTES的LCC为534万元, 显著低于传统单级方案的674~956万元; 同时, 其DPBT仅为3.5年, 较单级系统缩短35%~57%。CTES方案通过多级能量回收与多用途能量利用的协同效应, 显著提高了能源利用效率并降低了运行成本。投资分析发现, 系统初投资主要由储能装置、热泵及吸收式制冷机构成, 占总成本的80%以上, 而采用成本优化的复合相变材料后, 储能单元投资成本降低约53%, 进一步提升了系统的经济竞争力。

符号说明

C_{in} , C_{out} ——年现金流入和流出

COP——热泵制热效率

DC——拆除费用

DR——贴现率

DPBT——动态投资回收期

INV——初投资

LCC——全生命周期成本

MC——年维护费用

N ——年数

OC——年运行费用

P_h ——热泵功率

Q_0 ——在吸收式制冷机中的冷凝器中放出的热量

Q_1 ——在吸收式制冷机中的发生器中吸收的热量

Q_2 ——在吸收式制冷机中的蒸气在蒸发器吸收的热量

Q_3 ——在吸收式制冷机中的吸收器放出的热量

Q_{abs} ——热泵吸热量

Q_h ——高温热泵制热量

q_m ——质量流量

T_1 ——热泵负荷侧入口温度

T_2 ——热泵负荷侧出口温度

T_3 ——热泵源侧入口温度

T_4 ——热泵源侧出口温度

T_5 ——吸收式制冷机热端入口温度

T_6 ——吸收式制冷机出口温度

T_{con} ——冷凝温度

T_{eva} ——蒸发温度

下标:

abs——吸热

con——冷凝器

eva——蒸发器

h——高温

in——流入

m——质量

out——流出

user——用户

缩写:

CNCS——碳化玉米秸秆

CPCM——复合相变材料

CTES——梯级储能装置

EG——膨胀石墨

PCM——相变材料

PW——石蜡

TES——潜热储能系统

参考文献

- [1] SHIN Y, PARK W, CHANG J, et al. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10/11): 1486-1491. DOI:10.1016/j.ijhydene.2006.10.028.
- [2] FRAGIACOMO P, PIRAINO F, GENOVESE M, et al. Strategic overview on fuel cell-based systems for mobility and electrolytic cells for hydrogen production[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 1254-1263. DOI:10.1016/j.procs.2022.01.326.
- [3] AKTEKIN M, GENÇ M S, AZGİN S T, et al. Assessment of techno-economic analyzes of grid-connected nuclear and PV/wind/battery/hydrogen renewable hybrid system for sustainable and clean energy production in Mersin-Türkiye[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 190: 340-353. DOI:10.1016/j.psep.2024.07.032.
- [4] KHALIL M, DINCER I. Development and assessment of integrated hydrogen and renewable energy systems for a sustainable city[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104794. DOI:10.1016/j.scs.2023.104794.
- [5] MASHY C E, CARVAJAL D, OLIVA H S. Impact of delivery time, local renewable sources, and generation curtailment on the levelized cost of hydrogen[J]. Applied Energy, 2024, 364: 123143. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.123143.
- [6] LIU L T, ZHAI R R, HU Y D. Performance evaluation of wind-solar-hydrogen system for renewable energy generation and green hydrogen generation and storage: Energy, exergy, economic, and enviroeconomic[J]. Energy, 2023, 276: 127386. DOI:10.1016/j.energy.2023.127386.
- [7] BENGHANEM M, ALMOHAMADI H, HADDAD S, et al. The effect of voltage and electrode types on hydrogen production powered by photovoltaic system using alkaline and PEM electrolyzers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 57: 625-636. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.12.232.
- [8] HURTUBIA B, SAUMA E. Economic and environmental analysis of hydrogen production when complementing renewable energy generation with grid electricity[J]. Applied Energy, 2021, 304: 117739. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117739.
- [9] CLARKE D P, AL-ABDELI Y M, KOTHAPALLI G. The impact of renewable energy intermittency on the operational characteristics

- of a stand-alone hydrogen generation system with on-site water production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38 (28): 12253-12265. DOI:10.1016/j.ijhydene.2013.07.031.
- [10] KAVOUSIGHAHFAROKHI A, HANNAN M A, KER P J, et al. Techno-economic analysis of hydrogen integrated microgrid and hydrogen refueling systems application: A sustainable energy solution[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 226: 116379. DOI:10.1016/j.rser.2025.116379.
- [11] ZHAO Y M, XUE H Q, JIN X, et al. System level heat integration and efficiency analysis of hydrogen production process based on solid oxide electrolysis cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(77): 38163-38174. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.105.
- [12] 见禹, 陈宝明, 朱彭真, 等. 含梯度孔密度骨架石蜡方腔相变传热特性[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(6): 1968-1980. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0744.
- JIAN Y, CHEN B M, ZHU P Z, et al. Study on phase change heat transfer characteristics of paraffin square cavity with gradient pore density skeleton[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(6): 1968-1980. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0744.
- [13] SARBU I, SEBARCHIEVICI C. A comprehensive review of thermal energy storage[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1): DOI: 10.3390/su10010191.
- [14] 杨耿, 肖鑫, 王云峰. 基于焓优化的梯级潜热储能装置的模拟研究[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(12): 3770-3779. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0531.
- YANG G, XIAO X, WANG Y F. Numerical study of a cascade latent heat energy storage system based on exergy optimization[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(12): 3770-3779. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0531.
- [15] ZHONG Z Q, DING Y T, CHEN Y X, et al. Improving commercial-scale alkaline water electrolysis systems for fluctuating renewable energy: Unsteady-state thermodynamic analysis and optimization[J]. *Applied Energy*, 2025, 395: 126183. DOI:10.1016/j.apenergy.2025.126183.
- [16] KWASI-EFFAH C C, UNUAREOKPA O, EGWARE H O, et al. Enhancing thermal conductivity of novel ternary nitrate salt mixtures for thermal energy storage (TES) fluid[J]. *Progress in Engineering Science*, 2024, 1(4): 100020. DOI: 10.1016/j.pes.2024.100020.
- [17] SADEGHI H, JALALI R, SINGH R M. A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 192: 114236. DOI:10.1016/j.rser.2023.114236.
- [18] DEEPAK C N, BEHURA A K. Thermophysical characterization and reliability analysis of binary composite nano doping on stearic acid-acetamide eutectic PCM[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 26: 100804. DOI:10.1016/j.mtsust.2024.100804.
- [19] ZHOU W N, LI S, FENG Y H, et al. Evaluation and optimization on heat transfer performance of a composite phase change material embedded in porous ceramic skeleton: A lattice Boltzmann study[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 188: 108214. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2023.108214.
- [20] KOTEGOV R, ABOKERSH M, MATEU C, et al. Multi-method optimization of solar district energy systems with battery and thermal energy storage via real-time TRNSYS-Python coupling[J]. *Applied Energy*, 2025, 400: 126528. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126528.
- [21] LIU C, WANG B Y, LI F H, et al. A comparative life cycle assessment of photovoltaic/thermal, flat plate collector and electric domestic hot water systems based on TRNSYS simulation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 279: 127641. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127641.
- [22] DU G, HASSAN W H, SINGH N S S, et al. Design, transient simulation, and multi-objective optimization using artificial neural networks and genetic algorithms of a solar-assisted building energy system integrating energy storage: A case study of Xi'an, China[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 139: 118647. DOI: 10.1016/j.est.2025.118647.
- [23] DEZHDAR A, ASSAREH E, ALAGARASAN J K, et al. Dynamic simulation and optimization of an innovative cogeneration system using TRNSYS, EES, and response surface methodology as a machine learning method[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2026, 180: 106461. DOI: 10.1016/j.jtice.2025.106461.
- [24] 廖祖仁. 产品寿命周期费用评价法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- LIAO Z R. Product life cycle cost evaluation method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.
- [25] 郭晓超. 家庭废水资源化利用样机开发与性能试验[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- GUO X C. Research and development on the prototype of domestic wastewater resource utilization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [26] STEC A, KORDANA S, SŁYŚ D. Analysing the financial efficiency of use of water and energy saving systems in single-family homes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 151: 193-205. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.071.
- [27] GHOLAMI H, NILS RØSTVIK H, MANOJ KUMAR N, et al. Lifecycle cost analysis (LCCA) of tailor-made building integrated photovoltaics (BIPV) façade: Solsmaragden case study in Norway[J]. *Solar Energy*, 2020, 211: 488-502. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.087.
- [28] HUI W X, XIAO X. Study on waste corn stover-based shape-stabilized composite phase change materials for thermal management of alkaline water electrolyzer[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 146: 119876. DOI:10.1016/j.est.2025.119876.
- [29] LACROIX M. Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit[J]. *Solar Energy*, 1993, 50(4): 357-367. DOI:10.1016/0038-092X(93)90029-N.
- [30] 宋亚伟. 间接膨胀式太阳能高温热泵系统性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
- SONG Y W. Study on performance of indirect expansion solar high temperature heat pump system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.