

储热储冷多场景应用专刊



可再生能源与热泵耦合压缩空气储能系统工程实践及性能优化路径

牛东圣¹, 谭李悦^{2,4}, 王凯轩¹, 程柯楠¹, 音琢², 邓传浩², 付海宇², 韩少华³, 胡坤⁴,
周乐平²

(¹中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; ²华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; ³河南省科学院物理研究所, 河南 郑州 450046; ⁴中电建新能源集团股份有限公司, 北京 100101)

摘要: 压缩空气储能(CAES)技术作为支撑高比例可再生能源并网和实现“双碳”目标的关键大规模储能方案, 通过与风能、水能、太阳能、生物质能、地热能、氢能及热泵的耦合实现系统性能跃升。本文系统回顾了多能耦合机制: 风电/光伏-CAES通过功率平滑提升并网率至71%; 抽水蓄能耦合压缩空气储能电站突破地理约束, 提高装机规模; 光热-CAES通过太阳能直接辅热提升膨胀机入口温度; 生物质/地热耦合实现燃料替代与冷热电联供; 氢能耦合通过冷能协同与氢燃发电实现高效储能; 热泵在串联耦合中回收膨胀排气余热、压缩余热及工艺废热等驱动蒸气压缩/吸收式循环, 系统效率提升3.75%~29.96%, 在并联耦合中消纳弃风并解耦热电联产限制。性能分析表明, 效率差异源于热回收优化程度(如热泵耦合COP>3)与系统集成复杂度, 经济性受设备投资与场景适配性制约。尽管面临储气库密封疲劳、热管理熵增损耗、热泵-余热动态匹配难题等瓶颈, 未来需发展仿生密封材料、超临界CO₂循环及热泵-CAES智能算法, 通过政策与标准体系推动规模化高价值应用。

关键词: 压缩空气储能; 可再生能源; 热泵耦合; 系统性能; 多能互补; 余热回收

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0986

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1090-19

Engineering practice and performance co-optimization pathways for renewable energy-coupled and heat pump-integrated compressed air energy storage systems

NIU Dongsheng¹, TAN Liyue^{2,4}, WANG Kaixuan¹, CHENG Kenan¹, YIN Zhuo²,
DENG Chuanhao², FU Haiyu², HAN Shaohua³, HU Kun⁴, ZHOU Leping²

(¹Northwest Engineering Corporation Limited, PowerChina, Xi'an 710065, Shaanxi, China; ²School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ³Institute of Physics, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, Henan, China; ⁴PowerChina Renewable Energy Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Compressed air energy storage (CAES) is a vital technology for large-scale energy storage, facilitating the integration of high levels of renewable energy and helping to achieve

收稿日期: 2025-11-03; 修改稿日期: 2025-12-28。

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目 (2023KJXX-086)。

第一作者: 牛东圣 (1987—), 男, 博士, 副总工程师, 研究方向为储能技术, E-mail: niudongsh@nwh.cn; 通信作者: 周乐平, 教授, 研究方向为传热传质学及储能技术, E-mail: lpzhou@ncepu.edu.cn。

引用本文: 牛东圣, 谭李悦, 王凯轩, 等. 可再生能源与热泵耦合压缩空气储能系统工程实践及性能优化路径[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1090-1108.

Citation: NIU Dongsheng, TAN Liyue, WANG Kaixuan, et al. Engineering practice and performance co-optimization pathways for renewable energy-coupled and heat pump-integrated compressed air energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1090-1108.

carbon peak and neutrality goals. Integrating CAES with wind, hydropower, solar, biomass, geothermal, hydrogen, and heat pump energy significantly enhances system performance. This systematic review examines several multi-energy coupling mechanisms. For instance, wind/solar-CAES improves grid integration rates to 71% through power smoothing. PH-CAES overcomes geographical constraints and boosts installed capacity. Solar thermal-CAES raises the expander inlet temperature through direct solar auxiliary heating. Biomass/geothermal coupling achieves fuel substitution and enables combined cooling, heating, and power generation. Hydrogen-CAES improves energy storage efficiency by synergistically utilizing cold energy and hydrogen combustion for power generation. In series coupling, heat pumps recover waste heat from sources, including the expansion exhaust and compression processes as well as process waste heat, to drive vapor compression or absorption cycles, resulting in a system efficiency increase of 3.75%—29.96%. In parallel coupling, heat pumps utilize curtailed wind power and decouple combined heat and power constraints. Performance analysis reveals that efficiency variations derive from the extent of heat recovery optimization (e.g., heat pump COP > 3) and the complexity of system integration. Economic viability is affected by equipment investment and adaptability to different scenarios. Despite challenges such as air storage reservoir sealing fatigue, increased entropy losses in thermal management, and difficulties in dynamically aligning heat pumps with waste heat sources, future advancements should focus on developing biomimetic self-healing sealing materials, supercritical CO₂ cycles, and intelligent heat pump-CAES coordination algorithms. These developments must be supported by policy and standardization frameworks to foster large-scale, high-value applications.

Keywords: compressed air energy storage; renewable energy; heat pump coupling; system performance; multi-energy complementarity; waste heat recovery

随着“双碳”目标(2030年前碳达峰、2060年前碳中和)推进,中国能源结构加速向低碳清洁转型,但可再生能源(风能、太阳能、水能等)的间歇性、低能量密度及气候依赖性严重制约其大规模应用^[1]。储能技术成为破解这一瓶颈的关键支撑,现有储能技术包括机械储能(如压缩空气储能和抽水蓄能)、电磁储能、热能储能和化学储能等^[2-3]。根据国家能源局发布的《中国新型储能发展报告(2025)》,截至2024年底,中国新型储能装机达7376万千瓦/1.68亿千瓦时,占全球总量超40%。其中,压缩空气储能(CAES)因储能容量大、周期长、安全性高、受地理限制小等优势,成为替代抽水蓄能的优选方案,为最大化可再生能源消纳提供新路径^[4-5]。值得注意的是,CAES系统性能优化需突破传统储热技术局限。热泵作为核心协同单元,通过两种机制释放价值。其中,串联耦合通过回收CAES膨胀排气余热、压缩余热或工艺废热,驱动

热泵提升热能品位,实现冷热电联产,解决余热浪费问题^[6-8];并联耦合通过热泵作为可控负荷消纳弃风,同时解耦热电联产机组“以热定电”约束,为风电并网腾出空间,显著提升系统经济性^[9]。本文系统综述CAES与风能、水能、太阳能、生物质能、地热能、氢能及热泵(地源/水源/吸收式/蒸汽压缩式)的耦合机制,解析其工程应用进展与技术路线,为规模化高价值应用提供理论支撑。

1 压缩空气储能系统概述

1.1 工作原理

CAES通过压缩空气储存能量,其储能容量取决于储气容器体积及空气压力与温度^[10]。系统核心部件包括压缩机、储气室和膨胀机,工作原理为:低谷期电能驱动压缩机将低压空气压缩为高压空气存储;高峰期高压空气释放驱动膨胀机发电^[11]。为提升能量经济性与场景适应性,研究者开发了多种

技术路线。其中,传统补燃式(D-CAES)如图1所示,依赖化石燃料加热膨胀空气;先进绝热式(AA-CAES)如图2所示,回收压缩热用于膨胀前加热,实现无燃料运行;其他新型路线包括等温压缩(I-CAES)、液态空气储能(LAES)、超临界压缩(SC-CAES)、水下储能(UW-CAES)及湿空气透平(CASH)等。

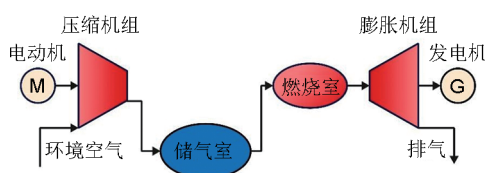


图1 传统补燃式压缩空气储能

Fig. 1 Traditional combustion-assisted compressed air energy storage

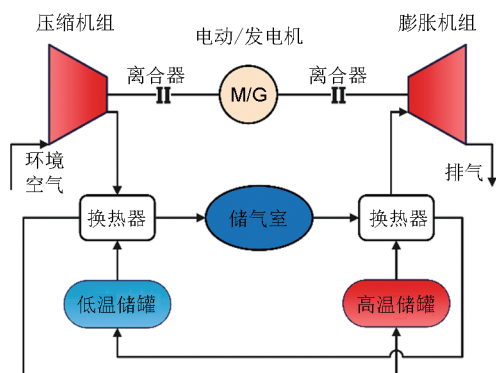


图2 先进绝热压缩空气储能

Fig. 2 Advanced adiabatic compressed air energy storage

1.2 技术研究进展

压缩空气储能技术研究中最早商业化的传统补燃式(图1)受限于当时的换热技术,必须依赖化石燃料补燃加热空气并提升做功,该技术的相关研究广泛涵盖了从系统集成应用(如湿空气透平、燃气轮机混合及冷热电联产等)到理论与性能评估(不同释能模型下系统性能分析、焓分析及CAES系统的热力循环分析等)的多个维度,但这一技术效率较低,依赖化石燃料且存在碳排放与环境局限^[12]。

为突破限制并提升能量利用率,技术重心逐渐转向先进绝热压缩空气储能(图2),通过引入储热装置回收压缩热并用于膨胀再热,实现零碳运行,其研究范围从关键部件特性探究延伸至全系统运行评价,并基于此聚焦于AA-CAES的优化改进及其耦合可再生能源、热泵等多能系统的综合性能分

析^[13]。在此基础上,为进一步解决压缩过程温升过高导致效率下降的问题,I-CAES技术出现,通过液体活塞或喷雾冷却等方法强化传热使压缩/膨胀过程接近等温状态。为实现更高效率及更灵活的选址,LAES利用液化技术将空气高密度存储,摆脱了对特定地质储气库的依赖;SC-CAES则利用工质在超临界态下的特殊物性提升能量密度;UW-CAES则开辟了利用深水静水压力进行恒压存储的新路径。CASH工质变为空气与水蒸气的混合物,减少对压缩空气的需求^[14]。系统架构虽持续创新,但仍受一定地理位置的限制,且在运行过程中气液相变及高压气体的机械能转换受制于热力学能量转换规律,存在不可避免的传热、摩擦及节流焓损,制约系统效率进一步提升。

1.3 应用研究现状

CAES技术自20世纪70年代能源危机起逐步受到关注,成为支撑可再生能源规模化应用的重要大规模储能方式。在国际上,补燃式CAES电站已实现商业化,其中德国Huntorf电站(1978年投运,290 MW)和美国McIntosh电站(1991年投运,110 MW)作为首批商业化项目,均采用传统D-CAES技术并利用盐穴储气,验证了CAES在大规模储能中的可行性,但也因依赖化石燃料和效率较低而限制了进一步推广^[15-16]。为克服这些局限,国际研究转向更高效、环保的新型技术路线,例如英国Highview Power公司于2012年建成2 MW LAES试验电站,通过液态储气降低对地质条件的依赖;同年美国德克萨斯州建成近2 MW的I-CAES装置,实现恒温储气与液压协同;2019年投运的加拿大首个商用绝热压缩空气储能(A-CAES)系统,通过独立储热实现无燃料运行,显著提升系统效率^[17-18]。

国内CAES技术发展呈现阶梯式突破。2014年安徽芜湖500 kW非补燃压缩空气储能发电示范系统填补国内技术空白;2016年青海西宁100 kW光热复合压缩空气储能示范项目为早期集成储能提供数据支撑。2021年,贵州毕节先进压缩空气储能系统(效率60.2%)和山东肥城盐穴先进压缩空气储能国家示范电站(效率70%,年发电1320万度),实现10 MW级工程突破,标志着技术工程化成熟^[19]。2022年进入百兆瓦级商业化阶段,江苏金坛盐穴压缩空气储能电站(金坛盐穴)一期装机容量

60 MW, 成为全球首例非补燃商业项目; 张北县100 MW 先进压缩空气储能国家示范项目(效率70.4%)实现风光耦合; 湖北应城300 MW 压缩空气储能电站示范工程与山东泰安(肥城)350 MW 压缩空气储能创新示范项目相继建成^[20-21]。至2025年, 300 MW 级规模化项目, 如华能金坛2×350 MW 盐穴压缩空气储能发电二期项目(金坛盐穴二期, 效率超70%, 年减排CO₂达52万吨)、淮安盐穴300 MW 压缩空气储能发电项目(熔融盐+带压热媒水储热)相继投运, 完成从千瓦验证到300 MW 级应用的三级跨越。技术突破体现为效率从60%提升至70%以上, 单机功率达350 MW 全球纪录, 形成盐穴、废弃井田、人工硐室三类储气模式, 并实现核心设备全部国产化, 使我国300 MW 级CAES 电站装机规模位居世界前列。

在“双碳”目标与能源转型的宏观推动下, CAES 作为长时储能的核心技术, 正由单纯的技术验证加速迈向商业化运营初期。国家发展改革委与国家能源局联合印发的《新型储能规模化建设专项行动方案(2025—2027年)》, 确立了加速商业化与拓展多能互补场景的路径。在破解可再生能源消纳难题上, 部分地区已经通过推行风光基地强制配储, 并优先调度具备长时调节能力的CAES 资源, 为系统的规模化落地开辟了直接通道。然而在宏观政策利好的背景下, 产业仍面临专用标准体系滞后及激励机制重建设奖励、轻运行实效等结构性短板, 制约了跨项目经济性评估与产业链标准化协同。

总体来看, 全球CAES 技术正向规模化(单机超300 MW)、高效化(A-CAES 效率>70%)、系统集成化(储热/冷回收)及多能耦合(风光储协同)方向发展, 已成为储能领域的研究与投资热点。随着技术成熟与成本下降, CAES 在能源转型中的作用日益凸显, 而与可再生能源系统耦合将进一步拓展其应用场景与综合性能。

2 可再生能源系统与压缩空气储能耦合

随着可再生能源发电比例的持续提升, 电力系统对灵活性与稳定性的需求日益迫切。单一储能技术难以满足复杂多变的运行要求, 促使研究人员将CAES 与风能、太阳能等可再生能源系统耦合, 形

成协同优化机制。这种耦合系统通过平抑可再生能源波动性、优化传统能源运行效率, 实现能源梯级利用与综合效益最大化。其应用场景广泛覆盖电网侧大规模调峰调频、可再生能源基地配套储能、分布式能源系统及工业园区综合供能等领域^[22]。通过集成多能源优势, 耦合系统显著提升效率、降低成本、增强响应速度并扩大规模, 同时减少碳排放, 在调峰、调频与备用等多场景中发挥关键作用。

2.1 风能耦合

风能因显著的间歇性和波动性, 与CAES 耦合成为提升风电消纳能力和电网稳定性的关键手段^[23]。该系统可在风电过剩时储能, 在缺风或负荷高峰时释能, 实现“削峰填谷”与稳定输出^[24-25], 有效促进风电大规模并网。耦合形式主要分为两类, 即串联耦合(风机与CAES 压缩机通过传动轴直接连接, 风能→机械能→内能存储)、并联耦合(风电场与CAES 共接直流母线或区域电网, 弃风时储能、缺风时释能补电)。构型的选择影响能量转换环节、并网责任与控制策略。因而需重点关注风储功率协调控制与一体化集成: 开发基于风速/功率预测的模型预测控制(MPC)或人工智能的算法, 来协调风场、压缩/放气速率与电网出力, 实现削峰填谷、减少弃风并保障机械设备的运行边界与寿命, 保障风储系统收益^[26-27]; 分析风机与压缩机机械直连(省去发电-电动环节)的耦合性能, 优化系统拓扑, 降低能量转换损失。对于A-CAES 系统, 若能在充电阶段高效回收并储存风电产生的压缩热, 还可显著提升系统全循环效率, 减少对外部热源的依赖^[28]。

在平抑风电功率波动方面, 研究覆盖从单机到风场级别。例如, Hasan 等^[29]基于2 MW 永磁直驱风机与CAES 的仿真表明, 并联耦合系统可平滑并网功率, 且与串联相比压缩空气耗功更小。谭靖等^[30]提出滤波控制方法, 通过优化时间常数降低储能成本, 实测显示CAES 调峰经济性优于火电; Zhang 等^[28]针对内蒙古国电新能源赤峰翁牛特旗五分地风电场一期49.5 MW 工程项目设计变配置绝热CAES(VC-ACAES), 如图3所示, 实现18.64 MW 恒定功率输出, 系统往返效率60.79%, 风电并网率由26.29%跃升至71.02%; Jin 等^[31]验证2 MW 机组耦合小型CAES 可降低功率波动率38%, 稳定运行延长3小时; Ammal Dhanalakshmi 等^[32]将

5 kW 风机与 CAES 集成于塔架, 省去地下储气洞室, 简化系统结构并验证模块化可行性。

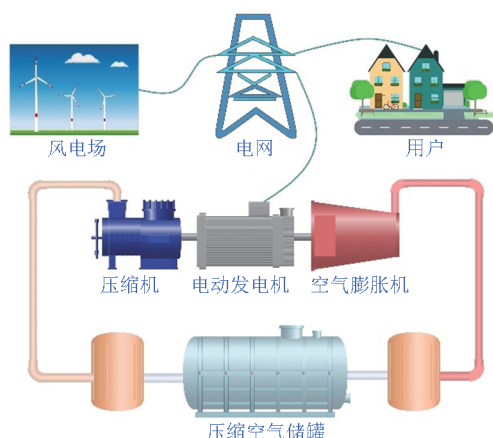


图3 风电并联耦合绝热压缩空气储能系统

Fig. 3 Adiabatic compressed air energy storage system parallel-coupled with wind power

创新设计可进一步解决弃风问题与经济性瓶颈。例如, 文贤旭等^[33]提出风电-CAES 废弃能量回收系统(结构示于图4), 通过啮合切换装置在低风速时段储能, 显著提升风场利用率; Meng 等^[34]建模表明变轴转速 CAES 相比定轴模式多利用风能 49.25 MWh, 平准化度电成本低于核电、天然气等主流能源。另外, 海上风电耦合展现巨大潜力。例如, Astolfi 等^[35]耦合水下 CAES(UW-CAES), 仿真显示全局往返效率约 75%, 减少电网非计划能量注入 10%~15%; Bennett 等^[36]采用喷水注入近等温压缩/膨胀技术, 咸水含水层储气使系统效率 61%~82%, 风场收益提升 55%, 成本较锂离子电池低 79%。

2.2 水能耦合

水力发电虽具备高效可靠的优势, 但对气候条件依赖性强, 雨季易产生弃电问题^[37-38]。水能与

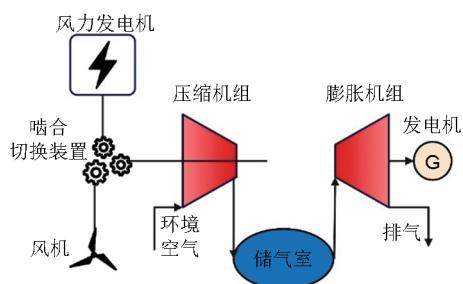


图4 风电-压缩空气储能耦合发电系统

Fig. 4 Wind power-compressed air energy storage coupled with power generation system

CAES 耦合的技术核心在于实现水力与气动系统的深度融合, 构建互补的复合储能体系。其关键突破点包括: 在系统集成层面, 发展基于水电站既有地下洞室的洞室资源改造与地质评估技术, 通过精准勘探、围岩稳定性监测及热-力-流多场耦合仿真, 保障储气库安全; 在控制层面, 针对抽水压缩空气储能(PHCA)系统, 需实现水泵水轮机与 CAES 压缩机/膨胀机的协同运行, 通过水-气交界面优化与恒压控制, 维持系统稳定并提升电能-势能-压力能转换效率^[39-40]; 同时, 研究液体活塞近等温压缩过程, 以解耦热压约束^[41]。系统配置需综合考虑效率、可靠性与成本进行多目标优化^[42], 从而有效提升电网灵活性。洞室资源复用是利用水电站闲置地下洞室(导流洞、施工洞)改造为储气库, 依托优良地质条件与基础设施降低建设周期与投资成本, 湖南平江抽水蓄能电站花岗岩洞室改造研究通过热力耦合仿真验证围岩周期性响应安全性, 验证改造可行性^[43-44]。PHCA 创新是通过水压维持储气库恒定压力(图5), 消除传统恒容储气库气压波动导致的节流损失^[45]。该技术能够实现能量多级利用, 且突破地理限制, 上下水库仅需具有 100 m 以上高度差即可建设 PHCA 电站, 极大降低常规抽水蓄能电站的选址条件^[46-47]。工程应用如山东泰安二期抽水蓄能电站(泰安 PH-CAES)与加拿大 Hydrostor 公司新南威尔士州 200 MW/1600 MWh 电站^[48]。

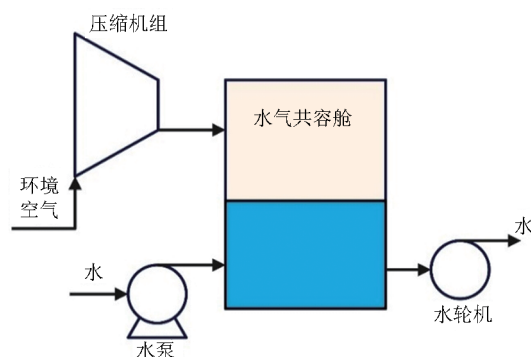


图5 抽水压缩空气储能技术原理图

Fig. 5 Schematic diagram of pumped air energy storage technology

PHCA 技术通过电能-势能-压力能转换实现效率跃升。Camargos 等^[49]小规模实验测得能量转换效率 45%; Chen 等^[50]恒压型系统电往返效率达 51%, 近等温运行下可提升至 63%; 姚尔人等^[47]提出压缩空气与抽蓄复合系统(CA-PHES), 热力学分

析显示效率可达 71.82%；郑开云等^[46]创新设计将下水库改为承压容器，替换水泵水轮机为 CAES 机组(图 6)，能量密度达传统抽蓄 4 倍以上，效率 65.68%~70.81%，单位造价相当且建设周期缩短。

此外，Besharat 等^[61]提出瞬态流诱导 CAES(TI-CAES)，通过水力瞬态过程直接储能，无需压缩机与大型硐室，适用于分布式场景，在较高雷诺数下具有优越恢复特性与经济性。

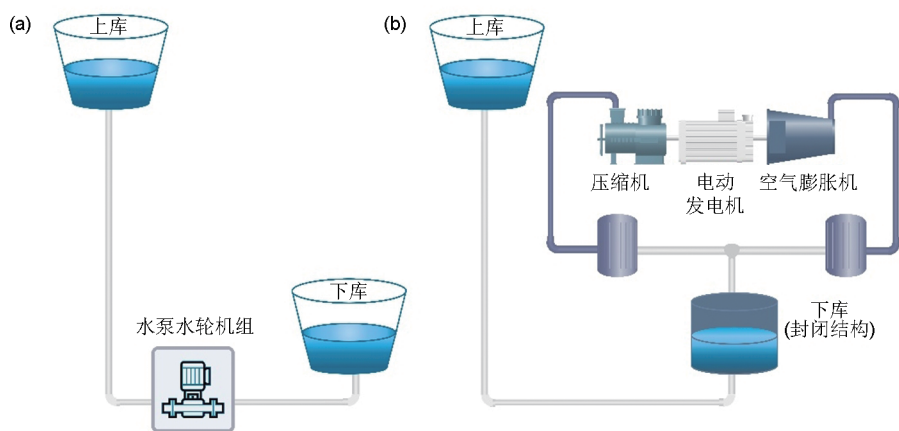


图 6 (a) 常规抽水蓄能与 (b) 耦合抽水蓄能的压缩空气储能对比

Fig. 6 Comparison of (a) conventional pumped hydro energy storage and (b) compressed air energy storage coupled with pumped hydro

2.3 光伏与光热耦合

太阳能作为增速显著的可再生能源主力^[52]，与 CAES 的耦合主要分为光伏(PV)与光热(CSP)两种形式。光伏发电耦合 CAES 通过储存过剩电能减少弃光、提升电网稳定性。其涵盖系统集成与智能调控两个层面。后者的核心是构建源-储-荷协同的智能能量管理系统，建立考虑光伏出力不确定性、电价和负荷的随机优化模型，以实现 CAES 充放电策略的日前调度与实时滚动优化^[53-54]。前者需根据应用场景选择直流侧直接耦合或交流侧并网耦合方式，并研发适用于分布式场景的小型化、模块化装置，同时解决效率、噪声等工程难题，探索与超级电容器、电化学电池的协同策略^[55-56]及高效逆变技术^[57-58]。若系统集成储热(TES)，则可利用光伏高峰时段的压缩热，在放电阶段提升膨胀效率，从而平滑出力并提高经济性。大型集中式系统如巴西 100 MWp 光伏-CAES 实现年均效率 16.2% 且运行成本优势显著^[59]，浮式光伏(FPV)与 CAES 集成理论效率可达 60%~80%^[60]；分布式场景中，小型系统耦合形成微电网并通过优化系统配置降低能源成本(图 7)^[61]，3 kWp 住宅系统循环电效率 11.6% 且环保性优于电池^[62]，区域建筑群应用可减排 50% 以上，投资回收期 12~14 年^[63]。近年研究更注重多能协同与智能调度，如风-光-储-氢系统实现弃电率仅 2%^[64]，风光

储优化模型降低弃光率至 1.77%~2.29%^[65]，校园光伏-CAES 通过改进调度提升性能^[66]。

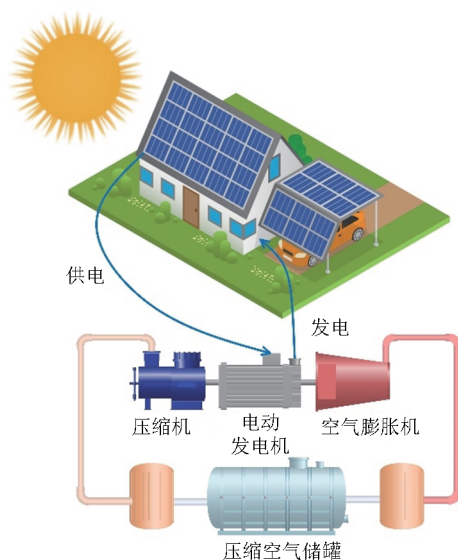


图 7 分布式光伏耦合绝热压缩空气储能系统
Fig. 7 AA-CAES coupled with distributed photovoltaics

光热耦合 CAES 适用于日照充足地区，利用 CSP 热能预热膨胀空气或补充余热，可减少化石燃料消耗、提升系统效率，并可联合生物质锅炉实现可持续热电联供，但其应用受限于集热器成本与精度要求^[67]。该系统的关键技术集中于高温储热集成

与动态协同控制：在热力集成方面，需重点研究储热介质(熔盐、热油等)选型^[68]、换热器设计^[69]与寿命评估^[70]，以解决大温差、变流量下的传热与结构问题^[71]；在系统控制方面，需开发CSP与CAES及其他热力循环(如ORC)的多时间尺度动态协同策略，以发挥CSP的日内可调度性，实现稳定高效的热电输出^[72-73]。系统级优化需统筹热、电性能与经济性目标^[74]。光热耦合CAES通过熔盐储热与有机朗肯循环(ORC)集成实现热电联供突破。例如，太阳盐介质储能密度较导热油介质提升31.5%，焓效率达76.8%；CSP加热熔盐分流至CAES换热器(图8)，直接预热高压空气提高膨胀机入口温度^[76]；

膨胀机余热驱动ORC(R123工质)回收中低温热量，系统焓损降低^[75]。经济性方面，50 MW光伏、50 MW光热与10 MW压缩空气储能耦合的系统在甘肃峰谷电价模型下动态回收期仅3.1年，年净收益924.84万元^[77]；引入太阳能集热模块缓解CHP机组供热压力以优化配置容量，较传统调度场景总运行成本降低19.17%^[78]。工程应用中，AA-CAES与CSP集成提升循环效率7.9%^[76]，CAES-CSP-制冷机复合系统往返效率67.5%且回收期1.7年^[79]，与燃煤电厂耦合实现日节煤9.88吨、CO₂减排27.95吨^[80]，严寒地区仿真弃光率仅0.03%，但需供热需求支撑经济性^[78]。

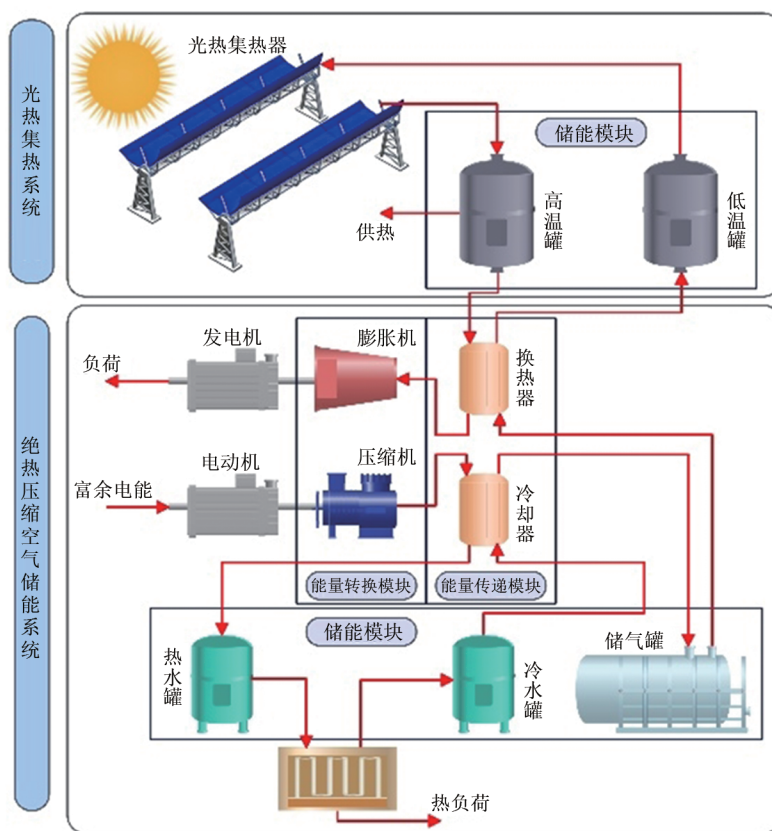


图8 AA-CAES耦合CSP系统

Fig. 8 AA-CAES coupled CSP system

2.4 其他可再生能源耦合

生物质耦合系统中生物质替代传统燃料参与CAES，关键技术在于燃料灵活性与系统集成，核心是适配多类生物质的气化/燃烧装置及烟气与CAES热量的高效热交换优化^[81]，同时需考量气化产物影响换热器材料、燃料供应链波动影响系统可靠性，以及电/热/冷多用途系统的实时调度与经济

性^[82-83]。生物质能耦合展现高效低碳潜力：作为不依赖天气的可靠清洁能源^[84]，其创新系统设计显著提升性能。Razmi等^[81]研究证实，木屑原料发电效率最优(45%)，城市固废则支持系统总效率达70%。薛小军等^[85]提出新型生物质气化联合循环耦合CAES系统(结构示于图9)，省去传统膨胀机与储热罐，利用给水冷却压缩空气并通过烟道旁路预

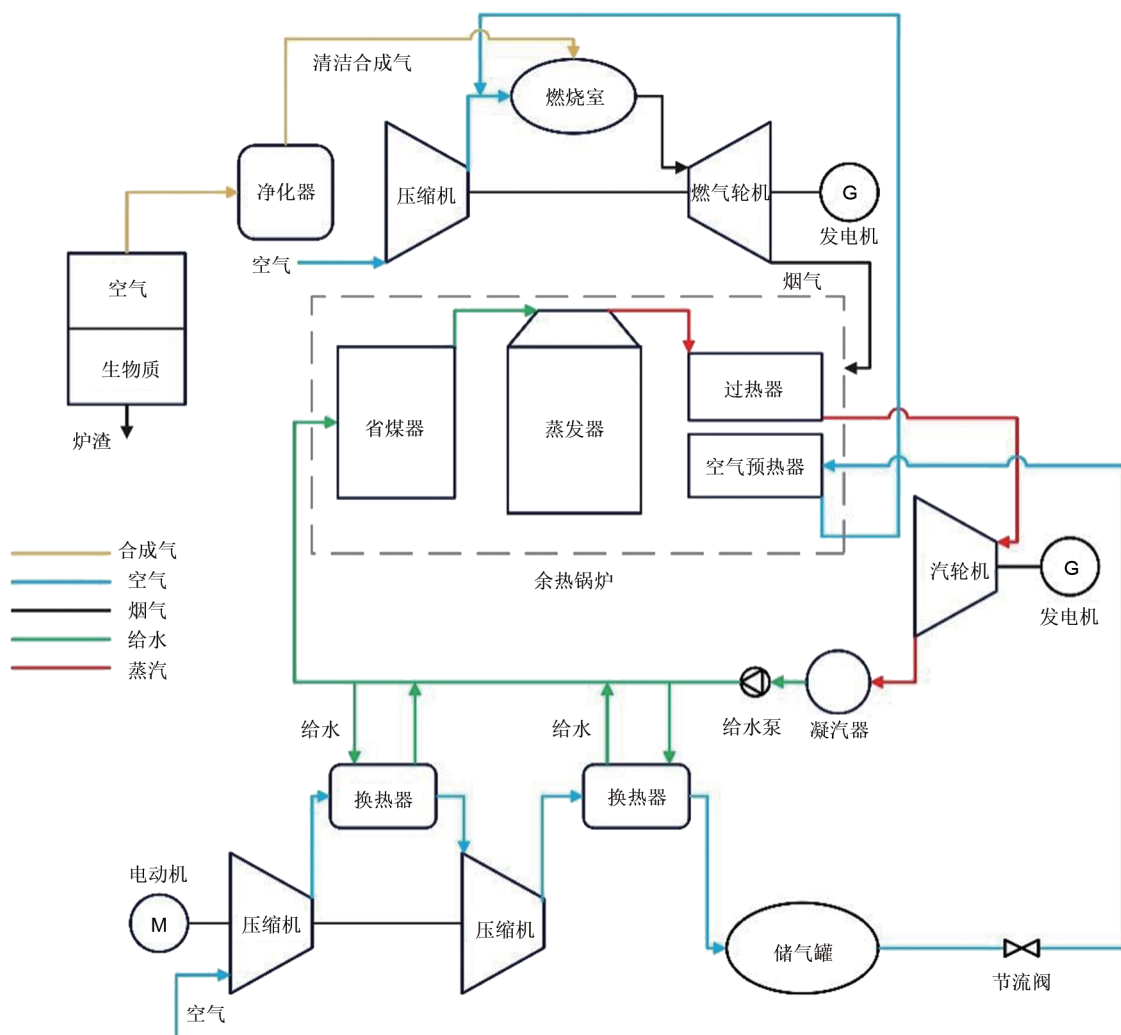


图9 生物质气化循环耦合压缩空气储能系统
 Fig. 9 Biomass gasification cycle coupled with compressed air energy storage system

热空气，实现往返效率 86.14%、储能密度 7.48 MJ/m³，动态回收期仅 3.73 年。

地热耦合 CAES 系统的核心技术在于实现地热能与压缩空气储能的高效协同，其中地下端关键技术包括裂隙网络中的传热优化及注采回灌策略设计，需通过渗流-传热耦合模拟精准控制地层温度动态^[86]；地面端需优化蓄热系统结构与热管理流程，采用填充床、相变材料等调节热品位，并精确匹配地热取热流量、膨胀机进口参数，以提升系统稳定性与整体能效^[87-88]。地热能耦合依托干热岩资源实现零碳互补：梁健等^[89]提出的增强型地热系统 (EGS) 耦合方案在冷热电联产设计下能量效率达 94.38%，焓效率 45.15%，优化后可提至 55.73%。Zhang 等^[90]进一步集成生物质与地热构建冷热电联供系统，往返效率 90.06%，动态回收期 3.032 年

且受峰时电价显著影响。Mousavi 的多能耦合模型 (图 10) 则显示，提高地热温度或 CAES 压力可进一步提升焓效率至 29%^[90]。

氢能耦合压缩空气储能主要包括冷能利用、电氢联产、氢气直燃发电和氢气甲烷化后燃烧发电 (图 11) 四种形式实现能量协同与效率提升^[91]。其关键技术涵盖电-氢-热多能流协同与关键设备集成，包括高效、快响应质子交换膜 (PEM) 电解槽与固体氧化物燃料电池 (SOFC) 的匹配应用^[92]、氢气掺混或甲烷化燃料在 CAES 膨胀机中的安全稳定燃烧技术，以及覆盖制氢-储氢-发电/供热全流程的多能流协同优化调度平台^[64, 93-94]。通过电解槽制氢储氢、固体氧化物燃料电池 (SOFC) 发电与 CAES 释能的三联供架构，SOFC 的蒸汽循环低温给水回收 CAES 排气余热和储热罐余热，实现整体效率

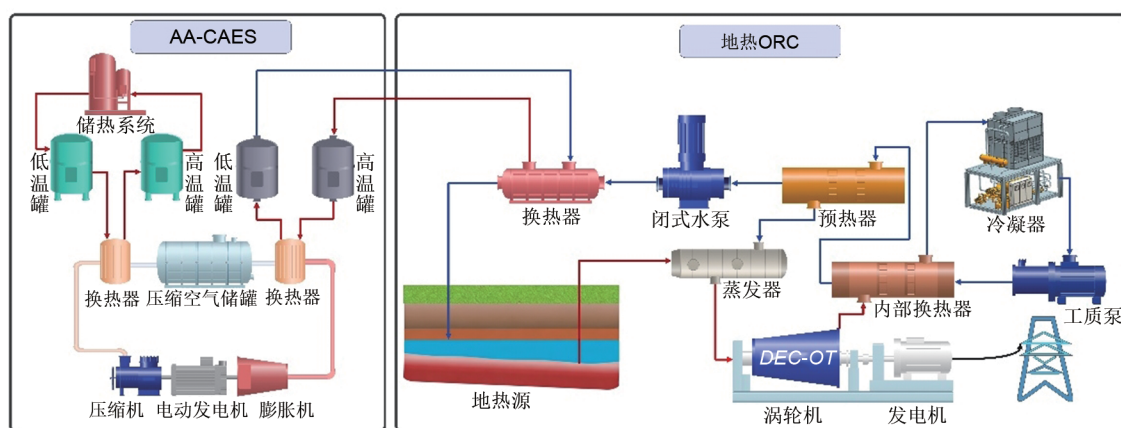


图 10 地热 ORC 耦合绝热压缩空气储能系统

Fig. 10 Adiabatic compressed air energy storage system coupled with geothermal ORC

39.31%(较基准增加 1.19%), CAES 焓效率 66.39%。依托杭州峰谷电价(低谷 0.29 元/kWh、高峰 1.10 元/kWh)实现动态回收期 3.36 年,整个过程碳零排放^[92]。郑昊宇等^[64]针对风光波动与电解槽

制氢集成的绿氢系统与 CAES 系统耦合进行容量优化配置,优化后弃电率仅为 0.02%,平准化氢气成本 LCOE 受 CAES 设备成本影响大,CAES 设备单位成本每下降 10%,LCOE 下降 0.72 元/kg。

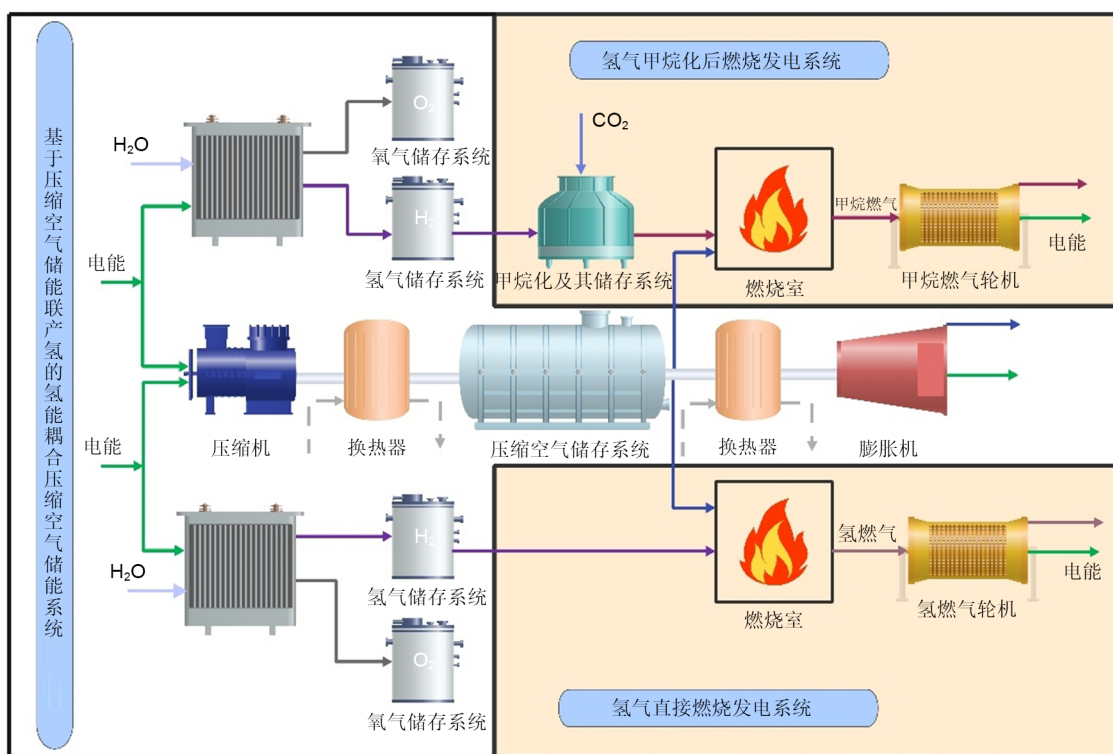


图 11 压缩空气储能与不同氢能耦合系统图

Fig. 11 Schematic diagrams of compressed air energy storage coupled with various hydrogen energy systems

耦合系统综合潜力凸显三大核心优势:耦合效率高(生物质往返效率>86%)、地热/氢能动态回收期普遍较短(生物质 3.73 年、地热 3.03 年、氢能 3.36 年),且生物质碳循环闭合、地热/氢能零碳排

放,为多能互补能源系统提供高效低碳解决方案。

2.5 热泵耦合

热泵作为提升 CAES 系统综合能效的核心单元,通过串联与并联两类耦合模式释放三重价值。

串联耦合的关键技术在于开发适配 CAES 宽范围、间歇性余热特性的高效热泵工质及变工况循环及相应的变工况热泵循环设计，建立余热参数与热泵性能实时映射模型，通过自适应控制最大化焓回收，同时聚焦余热梯级利用：回收 CAES 系统余热(如膨胀排气、压缩热、工艺废热)，驱动热泵实现热能品位跃升^[95]。刘旭等^[7]利用 AA-CAES 末级排气驱动蒸汽压缩热泵(R134A 工质)，产出热水，耦合系统能量效率提升 3.75%；杨绪青等^[6]以大于 250℃ 导热油驱动氨水吸收式热泵 (AHP)，额外供热 5790.53 kW，循环效率跃升 29.96%；武明皓等^[9]集

成余热与水源热泵，构建厂区独立供能系统，利用低温冷却水供暖系统比电锅炉供暖季节电 3.4 GWh。并联耦合强化可再生能源消纳，关键技术是将热泵作为电热网柔性节点，使其具备快速功率调节能力，构建含 CAES、储热罐等的电热综合能源统一优化调度模型^[96]。丁艺楠^[9]提出 GSHP 与 CAES 协同模型，GSHP 在弃风时段消纳过剩风电制热，同时分担热电联产机组热负荷，解除“以热定电”限制，可实现风电完全消纳，CAES 协同平抑波动性。耦合系统按热源与工质差异形成四类技术路线，如表 1 所示。

表 1 热泵类型与技术适配性
Table 1 Heat pump types and technical compatibility

类型	热源特征	适用场景	典型案例
地源热泵(GSHP)	地下浅层地热(<400 m)	三北地区弃风消纳	承德风电基地模型 ^[9]
水源热泵(WSHP)	地表水/地下水	厂区供暖	山东 CAES 厂区项目 ^[8]
氨水吸收式热泵(AHP)	高温余热	储热介质余热回收	CH-CAES 耦合系统 ^[6]
蒸汽压缩式(R134A 工质)	中低温余热	膨胀排气余热回收	AA-CAES 优化系统 ^[7]

热泵耦合 CAES 通过场景化设计实现“因地制宜”能源服务。三北地区风电^[9]，GSHP 消纳弃风并解耦热电限制，CAES 调峰储能，弃风率降至零；工业园区综合供能^[9]，103 MW 余热若全部用于驱动水源热泵，供热能力达 132 MW(能量转化率 128%)，实现对 1500 kW 厂区提供 65℃ 供暖，山东项目验证单季比电锅炉节电 3.4 GWh；社区供热升级^[7]，膨胀排气余热驱动蒸气压缩热泵，为居民社区提供生活热水；高温余热回收^[9]，超过 250℃ 的导热油驱动 AHP，额外供热。

两类耦合模式通过四类技术路线(蒸汽压缩式、吸收式、水源、地源)实现能源结构优化，即串联模式将各类型余热转化为高价值热能(供暖/热水)，并联模式将弃电转化为热能(COP>3)，共同破解可再生能源消纳与热电矛盾。未来需突破热源-热泵动态匹配控制与宽温区工质开发，进一步释放耦合潜力。

3 耦合系统的性能分析

3.1 可再生能源耦合系统

可再生能源耦合 CAES 系统通过整合多能源优势，显著提升效率、灵活性与多功能性。如表 2 所示，能量交换方式呈现技术差异化：水电耦合多与抽水蓄能结合，依托水压与气流传递能量；风电/

光电耦合聚焦弃电消纳驱动压缩或协同发电；光热耦合依赖聚光热交换提升膨胀效率；生物质与地热耦合则通过燃烧/气化高温热或地热体直接加热空气替代化石燃料，并适配多能协同集成；氢能耦合通过冷能利用、氢燃发电和甲烷化技术，实现系统增效、清洁发电与碳循环利用。

效率性能方面，光热耦合 CAES 通过提高膨胀机入口温度使循环效率提升 7.9%，往返效率达 63.38%^[76]；生物质耦合系统流程简化实现 86.14% 往返效率^[85]。电解水制氢耦合 CAES 系统再增强型集成氢固体燃料提升往返效率至 70.05%^[92]。水能耦合大幅降低对地理资源条件(高度差、库容)的依赖，但效率受关键设备技术水平显著制约，高性能参数下储能效率 70.81%、低性能参数下降至 65.68%^[46]；光热耦合受储热介质影响，相较于导热油，太阳盐因储热温度更高，使系统储能效率从 88.1% 提升至 115.9%，往返效率提高 6.9%^[75]。

经济性分析揭示，PH-CAES 规模化建造单位造价仅 0.6 万元/kW，与常规抽水蓄能电站造价相近(低于抽蓄电站 1.2 万元/kW)，受益于选址及建造难度降低^[46]；光热-CAES 依托甘肃峰谷电价(储能成本 0.314 元/kWh、释能收益 0.895 元/kWh)实现 3.1 年回收期^[77]。氢能耦合成本受 CAES 的单位容量成本影响极大^[64]。隐性成本方面，生物质耦合面

表 2 可再生能源耦合 CAES 系统关键性能参数

Table 2 Key performance parameters of renewable energy coupled CAES systems

耦合系统	效率范围/%	功率规模/MW	储能密度/(MJ/m ³)	主要优势	主要劣势	适用场景
风电-CAES ^[29-37]	42.44~79.6	0.25~470	—	有效平抑风电波动，提升风电利用率	风电场波动太快可能导致超负荷范围运行	陆上与海上风电场，电网调频
水电-CAES ^[44-51, 97]	45~70.81	0.1~40	1.19~6.01	无需燃料、无排放，建设周期短	地形落差依赖性；液压机械与气动系统耦合控制复杂	调峰电站，抽水蓄能电站的扩容、增效改造
PV-CAES ^[59-66, 98, 99]	54.2~75	0.01~158	—	分布式应用，共享输电设备；降低弃光率	太阳能辐照强度，经济性较差	建筑光伏，微电网，大型风光互补基地
CSP-CAES ^[75-80]	45.65~68.2	10~232.2	19.91~23.33	可实现热电联产，并能与 ORC、吸收式制冷等系统高效集成	系统复杂，初始投资高，且依赖稳定的太阳能辐照资源	高辐照地区，供热需求区
生物质-CAES ^[81, 85]	37.2~90.1	9.92	4.64~7.48	实现了生物质能的稳定化输出和价值提升	有烟气排放；系统运行依赖于可持续获得的生物质资源	生物质电厂、农林废弃物资源化利用项目
地热-CAES ^[88-90]	35.41~97.34	0.13~0.24	1.512	无排放，能实现能源的梯级综合利用	设计与优化难度大，严重依赖特定的地热资源条件	地热资源丰富的区域能源站、温泉度假区
氢能-CAES ^[64, 91, 92]	38.15~70.05	2.4~80	12.10	高效储能，促进氢能的大规模消纳与电网调峰	受限于氢燃机、高效电解槽、催化剂等关键技术与高昂成本	大规模、长时储能及氢能综合利用的可再生能源基地和电网侧

临原料收集的运输成本^[65]，分布式光伏耦合需承担空间安全成本^[62]。初始投资较高问题可通过水电硐室改造降低储气成本^[100]，小型光伏-CAES 建筑场景回收期约 12~14 年^[63]，光热系统在供热稳定区更易实现经济性^[78]。

技术成熟度呈现梯度差异。例如，风电/光伏耦合已有阜康市华能 100 万光伏+压缩空气储能 100 MW/1000 MWh 项目送出线路工程等应用；地热耦合 CAES 处于在建阶段(吉林省洮南市 350 MW 压缩空气储能绿色电站一体化示范项目)；氢能耦合风光 CAES 项目如山西阳高县风光储氢一体化项目在建。

水电硐室耦合虽无工程应用，但中国能建压气储能人工硐室实验室改造(湖南平江)已验证可行性；生物质耦合因系统复杂暂无工程落地。应用场景仍受地理约束(水电需高落差^[46]、地热需资源富集区^[101])、规模阈值及隐性成本限制。未来需通过混储系统、模块化设备及多能互补优化突破瓶颈。

3.2 热泵耦合系统

热泵与 CAES 的协同通过三重路径释放核心价值。效率跃升方面，热泵回收低品位余热实现能量品位跃升，串联耦合系统效率普遍提升 3%~30% (表 3)，其中 AHP 在高温余热回收中实现 29.96%

循环效率跃升，非制冷场景额外输出供热，创新应用显著^[6]。经济性优化方面，GSHP 耦合模型通过全生命周期成本优化，依托三北地区日收益及日煤耗成本优化容量配置，实现动态回收期约 27 年^[9]；余热利用系统较电锅炉初始投资增加 200 万元但单供暖季节电 340 万 kWh^[9]。技术创新聚焦系统设计与协同控制。例如，集成储热水箱+地源/水源热泵解决余热间歇性问题^[9]；通过储热放热速率与 GSHP/CAES 功率的临界关系式推导，验证弃风完全消纳^[9]；油气换热器 1 和 2 占系统焓损 33.61% 的关键瓶颈，需针对其进行优化，并量化环境温度影响热泵(低温环境焓效率提升 1.09 个百分点)^[7]。热泵耦合 CAES 在效率提升幅度(3.75%~29.96%)和供热经济性(COP>3)均优于传统储热方案，但需针对余热温度/连续性匹配热泵类型以突破动态协同瓶颈。

4 技术挑战与未来展望

尽管 CAES 与可再生能源的耦合技术已取得显著进展，但在迈向大规模商业化应用过程中仍面临多重技术挑战，未来发展需在关键领域寻求突破。

4.1 关键技术瓶颈

CAES 系统在效率提升方面仍面临显著瓶颈，

表 3 热泵耦合 CAES 系统关键性能参数

Table 3 Key performance parameters of heat pump coupled CAES systems

耦合系统	系统效率	较基准系统提升值	核心机制
蒸汽压缩式	能量效率 65.42%，焓效率 54.30% ^[7]	能量效率提升 3.75%	回收膨胀机排气余热
吸收式	循环效率 81.70%，焓效率 53.61% ^[6]	循环效率提升 29.96%	利用超过 250℃ 的导热油驱动 AHP
水源热泵	制热 COP3.34 ^[8]	单供暖季节电 340 万 kWh	省去电锅炉，增加余热储水箱及水源热泵机组
地源热泵	制热 COP3.5 ^[9]	可降低弃风率至零	消纳弃风-解耦热电约束

尽管 AA-CAES、I-CAES 等新型系统效率有所改进，但整体仍落后于抽水蓄能等成熟技术。系统焓损主要源于压缩/膨胀过程的不可逆性、换热损失及节流效应，例如 AA-CAES 耦合 CSP 系统中压缩机、节流阀和膨胀机的焓损占比分别达 32%、23% 和 22%^[75]，而 LAES 系统中压缩机焓损在储能阶段高达 55.7%^[102]。为解决这些问题，需开发高熵效压缩机与膨胀机、优化换热系统并集成 ORC 等热回收技术^[75]。储气库工程层面，盐穴蠕变疲劳问题突出，压缩空气储能盐穴运行中腔体内压周期性变化（注采周期约 1 天，循环次数多），围岩需同时承受蠕变与疲劳作用，且循环荷载产生的损伤与蠕变损伤相互促进^[103]；金坛盐穴储气库数值模拟显示其稳定性受采气速率、下限压力影响大，夹层与腔顶平直处是薄弱位置，长期盐岩蠕变还会影响容积与经济性^[104]。

政策机制不完善进一步制约发展，耦合系统回收期受峰谷电价影响大，地区电价导致不同项目之间的可比性不足；标准体系缺失导致设备兼容性差，如金坛盐穴与泰安 PH-CAES 的储气库运行压力差异使安全性评估以及经济效益提升的难度变高^[104]。其他瓶颈包括控制复杂度高，风光氢多能耦合需协调多种能量流，对系统监测及控制能力提出挑战；设备材料可靠性方面，高温系统面临腐蚀与热疲劳，低温系统需保障绝热性能；地理约束限制选址，依赖盐穴或硬岩地质；初始投资大、回收期长，以及标准化不足导致项目可比性低。需综合研发耐高低温材料、自修复密封技术^[105]、数字孪生等智能调控手段^[106]，并强化政策支持以突破约束。

热泵耦合 CAES 存在特有瓶颈，串联耦合中余热温度波动与热泵工质（如 R134A）参数难以实时匹配，换热器焓损大^[7]，且系统复杂性可能增加控制响应延迟；并联耦合中，GSHP 依赖地下浅层地热（<400 m），存在钻孔成本^[9]，WSHP 对水源水质特性有要求。共性成本挑战包括热泵系统增量成本

（如水源热泵系统初投资比电锅炉高 200.5 万元）^[8]，全生命周期成本（LCC）分析缺失，且热泵寿命与 CAES 寿命的匹配性不足，加剧设备更换压力^[9]。

4.2 未来发展方向

CAES 与可再生能源及热泵耦合的研究已覆盖多种构型与场景，显示出在削峰填谷、减少弃能和提升系统往返效率方面的巨大潜力。未来，该领域将向集成化、智能化与多元化演进，核心在于突破关键材料与高效机组等器件级瓶颈^[36]，并着力推进多能流协同与多技术融合的系统级创新^[79]，依托 AI 与数字孪生的全流程智能管控^[106]，以及模块化示范与规范制定^[32]，推动技术向工程转化。为解决各类能源特性的差异与互补问题，未来的工程实践与性能优化将主要围绕波动性电源平抑、热化学协同利用以及热泵能效增强三个维度展开深度探索。

针对风能、太阳能及水能等波动性与环境依赖型能源，未来的耦合路径将聚焦于广域场景适应性与毫秒级协同控制。对于风能及太阳能的耦合，面对其高渗透率下的波动挑战，需构建基于气象大数据与 AI 的超短期精准预测模型，实现“风/光-储-荷”的毫秒级动态响应与协同^[26]；同时，通过研发宽电压逆变器与高效耦合接口，解决风电、光伏接入的电能质量问题。在硬件集成方面，应推进机械直连与深远海应用技术的突破，例如研发风机与压缩机机械直连装置以优化传动效率，并结合水下 CAES 与漂浮式风电/光伏技术，攻克海底地质选址与抗腐蚀难题，从而支撑深远海能源的大规模消纳^[35]。对于水能耦合，重点在于复用既有设施与挖掘灵活性，包括利用数字孪生平台监测地下储气库安全性^[104]，以及研发适配频繁变工况的水泵-CAES 联合机组^[40]，还可以在山区、岛屿等微小型分布式场景中探索液体活塞技术与自然落差的结合^[39]。

地热、生物质与氢能的深度耦合实现热化学协同利用，将推动系统向多能流梯级利用与低碳化转型。地热耦合的突破点在于地下-地面系统的协同

热管理与碳循环集成,可建立多场耦合模型以优化地下渗流传热机制^[87],并在地面通过 ORC 等技术实现热能多级利用。生物质耦合则应聚焦于气化工工艺优化与碳捕集技术的集成,在利用余热提升系统效率的同时实现负碳运行^[89]。而对于氢能耦合,构建电-氢-热一体化网络是未来的关键趋势,通过盐穴大规模跨季节储氢与电氢热集成技术,可将 CAES 耦合系统打造为集调峰、加氢与供能于一体的综合能源枢纽,并推动绿氢示范项目的规模化落地^[106]。

热泵与 CAES 的耦合将从单一工况匹配转向全生命周期的动态优化,提升系统能效。未来的创新在技术层面将集中于突破温区限制与控制难点,研发适应宽温区的新型工质与吸收式热泵技术,以匹配不同压缩热特性^[9];同时,在系统集成方面可构建涵盖“成本最小、消纳最优、炯效率最高”的多目标联合优化模型^[7,9],设计能适应源荷双侧波动的功率柔性调节算法。在工程化路径上,需推动项目从千瓦级示范向百兆瓦级园区扩展,利用实际运行数据训练故障预警模型,并建立涵盖地源热泵钻井参数与水质标准在内的规范体系,最终形成以 CAES 为核心的区域清洁供热与工业余热回收网络^[9]。

5 结 语

CAES 技术作为支撑高比例可再生能源并网和实现“双碳”目标的关键大规模储能方式,在中国已实现从技术验证到商业化的跨越式发展。中国 CAES 技术通过三级发展路径,从 2014 年芜湖 500 kW 非补燃技术验证,到 2022 年金坛盐穴 60 MW 首套商业电站投运,直至 2025 年华能金坛二期 2×350 MW 项目提供全球首创的“熔融盐+带压热媒水储热”高温绝热压缩方案,标志着我国在核心设备国产化(100%)、单机规模(350 MW)及系统效率(>70%)三大指标上达到全球领先水平。

为提升系统综合性能,CAES 与多种可再生能源耦合展现出显著优势。水能耦合(PH-CAES)通过压缩空气排水及将下水库改为封闭承压容器的设计突破地理限制,降低建造成本;光热耦合(CSP-CAES)利用太阳能直接辅热高压空气,实现余热梯级利用,系统炯效率提升至 76.8%;风电/光伏耦合通过功率平滑将并网率提升至 71%;热泵耦合在

串联模式下回收余热驱动热泵,效率提升 3.75%~29.96%,在并联模式下通过消纳弃风解耦热电联产限制。多能耦合系统在效率(生物质耦合达 86.14%)、能量密度(PH-CAES 为抽蓄 4 倍)及环境效益(氢能耦合实现 CO₂ 零排放)方面显著优于单一 CAES 系统。

尽管技术前景广阔,CAES 仍面临效率瓶颈(系统中关键设备炯损大)、储气库循环载荷问题(蠕变疲劳损伤)及政策覆盖不足等挑战。热泵耦合特有瓶颈包括串联模式中余热温度波动与工质适配难题(换热器炯损大),以及并联模式受限于地源热泵/水源热泵(额外的地质/水质成本及要求)。未来需通过工程创新(仿生密封材料、超临界 CO₂ 循环)、智能调控(数字孪生驱动多能流协同)及政策支持(统一标准体系、需求响应补贴)突破瓶颈,并依托泰安 PH-CAES、CSP-CAES 等示范项目加速商业化,推动中国 CAES 技术为全球能源转型贡献核心力量。

参 考 文 献

- [1] HUANG S C, KHAJEPOUR A. A new adiabatic compressed air energy storage system based on a novel compression strategy [J]. *Energy*, 2022, 242: 122883. DOI:10.1016/j.energy.2021.122883.
- [2] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 31-55. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [3] FERNANDES D, PITIÉ F, CÁCERES G, et al. Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities"[J]. *Energy*, 2012, 39(1): 246-257. DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.024.
- [4] KANTHARAJ B, GARVEY S, PIMM A. Compressed air energy storage with liquid air capacity extension[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 152-164. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.07.076.
- [5] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, et al. Energy storage systems for transport and grid applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(12): 3881-3895. DOI:10.1109/TIE.2010.2076414.
- [6] 杨绪青,余真珠,杨肖虎,等.压缩空气储能与吸收式热泵循环集成的热电联产系统[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1): 362-369. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0307.
- YANG X Q, YU Z Z, YANG X H, et al. Combined heating and power system coupled with compressed air energy storage and absorption heat pump cycle[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(1): 362-369. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0307.
- [7] 刘旭,史志杰,刘健,等.耦合热泵的压缩空气储能系统性能分析[J].

- 动力工程学报, 2025, 45(4): 563-570. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2025.240064.
- LIU X, SHI Z J, LIU J, et al. Performance analysis of compressed air energy storage system coupled with heat pump[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(4): 563-570. DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.240064.
- [8] 武明皓, 赵俊红, 史志杰. 压缩空气储能系统中的余热利用研究[J]. 暖通空调, 2025, 55(S1): 39-42.
- WU M H, ZHAO J H, SHI Z J. Study on waste heat utilization in compressed air energy storage system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2025, 55(S1): 39-42.
- [9] 丁艺楠. 含地源热泵和先进压缩空气储能的电-热综合能源系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- DING Y N. Study on electric-thermal integrated energy system with ground source heat pump and advanced compressed air energy storage[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [10] KIM Y M, LEE J H, KIM S J, et al. Potential and evolution of compressed air energy storage: Energy and exergy analyses[J]. Entropy, 2012, 14(8): 1501-1521. DOI:10.3390/e14081501.
- [11] ZHAO P, WANG J F, DAI Y P. Thermodynamic analysis of an integrated energy system based on compressed air energy storage (CAES) system and Kalina cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98: 161-172. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.03.094.
- [12] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI: 10.16081/j.epae.202309005.
- LIU X C, MEI S W, DING R C, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI:10.16081/j.epae.202309005.
- [13] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907+3140. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138.
- MEI S W, LI R, CHEN L J, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907+3140. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138.
- [14] 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 146-153. DOI:10.16516/j.ceec.2024.2.14.
- YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 146-153. DOI:10.16516/j.ceec.2024.2.14.
- [15] RAJU M, KUMAR KHAITAN S. Modeling and simulation of compressed air storage in Caverns: A case study of the Huntorf plant[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 474-481. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.019.
- [16] NAKHAMKIN M, ANDERSSON L, SWENSEN E, et al. AEC 110 MW CAES plant: Status of project[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(4): 695-700. DOI: 10.1115/1.2906644.
- [17] BASHIRI MOUSAVI S, ADIB M, SOLTANI M, et al. Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114379. DOI:10.1016/j.enconman.2021.114379.
- [18] BECATTINI V, GEISSBÜHLER L, ZANGANEH G, et al. Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 2: Tests with combined sensible/latent thermal-energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17: 140-152. DOI:10.1016/j.est.2018.02.003.
- [19] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.
- CHEN H S, LI H, MA W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105.
- [20] 黄宽, 张万益, 王丰翔, 等. 地下空间储能国内外发展现状及调查建议[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 105-117.
- HUANG K, ZHANG W Y, WANG F X, et al. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 105-117.
- [21] 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.
- [22] 辛传奇, 王文权, 陈伟, 等. 压缩空气储能技术多维度应用与发展路径分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3636-3647. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0160.
- XIN C Q, WANG W Q, CHEN W, et al. Multi-dimensional application and development paths of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3636-3647. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0160.
- [23] LIU C C, SU X, YIN Z, et al. Experimental study on the feasibility of isobaric compressed air energy storage as wind power side energy storage[J]. Applied Energy, 2024, 364: 123129. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123129.
- [24] CALISE F, CAPIELLO F L, CIMMINO L, et al. Off-design performance of a hybrid renewable compressed air energy storage system: Dynamic simulation and thermo-economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 501: 145254. DOI:10.1016/j.jclepro.2025.145254.
- [25] MARANO V, RIZZO G, TIANO F A. Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage[J]. Applied Energy, 2012, 97: 849-859. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.086.

- [26] 贺鸿鹏, 王小宇, 徐美娇, 等. 考虑输电约束的风力发电系统压缩空气储能可靠性与经济性评价[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 4226-4234. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0489.
- HE H P, WANG X Y, XU M J, et al. Reliability and economic evaluation of compressed air energy storage in wind power generation systems with transmission constraints[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4226-4234. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0489.
- [27] 李广阔, 陈来军, 谢毓广, 等. 考虑压缩空气储能变工况特性的风储联合系统运行优化策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 511-518. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20200131015.
- LI G K, CHEN L J, XIE Y G, et al. Coordinated optimization strategies of wind-storage hybrid system considering off-design characteristics of compressed air energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 511-518. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20200131015.
- [28] ZHANG Y, XU Y J, ZHOU X Z, et al. Compressed air energy storage system with variable configuration for accommodating large-amplitude wind power fluctuation[J]. Applied Energy, 2019, 239: 957-968. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.01.250.
- [29] HASAN N S, HASSAN M Y, ABDULLAH H, et al. Improving power grid performance using parallel connected Compressed Air Energy Storage and wind turbine system[J]. Renewable Energy, 2016, 96: 498-508. DOI:10.1016/j.renene.2016.04.088.
- [30] 谭靖, 李国杰, 唐志伟. 基于压缩空气储能的风电场功率调节及效益分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 33-37.
- TAN J, LI G J, TANG Z W. Design and economic analysis of compressed air energy storage based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 33-37.
- [31] JIN H, LIU P, LI Z. Dynamic modeling and design of a hybrid compressed air energy storage and wind turbine system for wind power fluctuation reduction[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 122: 59-65. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.05.023.
- [32] AMMAL DHANALAKSHMI M, DEIVASUNDARI P. Modular compressed air energy storage system for 5kw wind turbine: A feasibility study[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2021, 23(7): 2201-2212. DOI:10.1007/s10098-021-02127-7.
- [33] 文贤馐, 陈雯, 钟晶亮, 等. 面向废弃能量收集的风电-压缩空气储能耦合发电系统[J]. 节能, 2019, 38(2): 107-110.
- WEN X K, CHEN W, ZHONG J L, et al. Wind power-compressed air energy storage coupling power generation system for waste energy collection[J]. Energy Conservation, 2019, 38(2): 107-110.
- [34] MENG H, WANG M H, OLUMAYEGUN O, et al. Process design, operation and economic evaluation of compressed air energy storage (CAES) for wind power through modelling and simulation [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 923-936. DOI: 10.1016/j.renene.2019.01.043.
- [35] ASTOLFI M, GUANDALINI G, BELLOLI M, et al. Preliminary design and performance assessment of an underwater compressed air energy storage system for wind power balancing [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(9): 091001. DOI:10.1115/1.4047375.
- [36] BENNETT J A, SIMPSON J G, QIN C, et al. Techno-economic analysis of offshore isothermal compressed air energy storage in saline aquifers co-located with wind power[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117587. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.117587.
- [37] LI X Z, CHEN Z J, FAN X C, et al. Hydropower development situation and prospects in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 232-239. DOI:10.1016/j.rser.2017.08.090.
- [38] STORLI P T, LUNDSTRÖM T S. A new technical concept for water management and possible uses in future water systems[J]. Water, 2019, 11(12): 2528. DOI:10.3390/w11122528.
- [39] 任婷婷. 基于液控压缩空气储能技术的城市抽水蓄能电站研究[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(8): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0813.2025.08.011.
- REN T T. Research on urban pumped storage power station based on liquid controlled compressed air energy storage technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2025, 45(8): 77-83. DOI:10.3969/j.issn.1008-0813.2025.08.011.
- [40] 蔡文方, 冯陈, 鲍文龙, 等. 压缩空气抽水蓄能系统建模与性能分析 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 200-204. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240653.
- CAI W F, FENG C, BAO W L, et al. Modeling and performance analysis of compressed air pumped storage system[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(3): 200-204. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240653.
- [41] 王焕然, 席光, 李瑞雄, 等. 先进抽水压缩空气复合储能技术[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(5): 1-9. DOI:10.7652/xjtubxb202405001.
- WANG H R, XI G, LI R X, et al. A study on the combined pumped-hydro and compressed air energy storage system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(5): 1-9. DOI: 10.7652/xjtubxb202405001.
- [42] 严凯, 侯付彬, 刘明明, 等. 恒压型抽水压缩空气储能系统的热力学及经济学多目标优化[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(1): 135-140.
- YAN K, HOU F B, LIU M M, et al. Multi-objective optimization on thermodynamics and economics of a constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 135-140.
- [43] 赵全胜, 朱玲, 刘尧伍, 等. 压缩空气储能电站浅埋人工储气洞库设计基本理念和方法[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(8): 2775-2784. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0219.
- ZHAO Q S, ZHU L, LIU Y W, et al. The basic design concept and method of a shallow rock cavern of a compressed air energy-storage power station[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(8): 2775-2784. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0219.
- [44] 蒋志容, 侯彦硕, 丁平, 等. 水电洞室压缩空气储能地下储气库可行性分析[J]. 四川水力发电, 2023, 42(S1): 22-28, 35. DOI:10.3969/j.issn.1001-2184.2023.z1.005.
- JIANG Z R, HOU Y S, DING P, et al. Feasibility analysis of underground gas storage for compressed air energy storage in hydropower Caverns[J]. Sichuan Water Power, 2023, 42(S1): 22-

- 28, 35. DOI:10.3969/j.issn.1001-2184.2023.z1.005.
- [45] WANG H R, WANG L Q, WANG X B, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system[J]. *Energies*, 2013, 6(3): 1554-1567. DOI:10.3390/en6031554.
- [46] 郑开云, 池捷成, 张学锋. 耦合抽水蓄能的压缩空气储能电站概念研究[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003.
- ZHENG K Y, CHI J C, ZHANG X F. Concept research of compressed air energy storage power plant coupled with pumped hydro storage[J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(2): 18-25. DOI:10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.003.
- [47] 姚尔人, 席光, 王焕然, 等. 一种新型压缩空气与抽水复合储能系统的热力学分析[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(3): 12-18.
- YAO E R, XI G, WANG H R, et al. Thermodynamic analysis on a novel compressed-air based pumped hydro energy storage system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(3): 12-18.
- [48] 陈来军, 王欣雨, 刘瀚琛, 等. 抽水蓄能耦合压缩空气储能关键技术及研究展望[J]. *高电压技术*, 2025, 51(8): 4447-4457. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250548.
- CHEN L J, WANG X Y, LIU H C, et al. Key technology and research prospect of pumped hydro compressed air energy storage[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(8): 4447-4457. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20250548.
- [49] CAMARGOS T P L, POTTIE D L F, FERREIRA R A M, et al. Experimental study of a pH-CAES system: Proof of concept[J]. *Energy*, 2018, 165: 630-638. DOI:10.1016/j.energy.2018.09.109.
- [50] CHEN H, WANG H R, LI R X, et al. Experimental and analytical investigation of near-isothermal pumped hydro-compressed air energy storage system[J]. *Energy*, 2022, 249: 123607. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123607.
- [51] BESHARAT M, DADFAR A, VISEU M T, et al. Transient-flow induced compressed air energy storage (TI-CAES) system towards new energy concept[J]. *Water*, 2020, 12(2): 601. DOI: 10.3390/w12020601.
- [52] POURASL H H, BARENJI R V, KHOJASTEHNEZHAD V M. Solar energy status in the world: A comprehensive review[J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 3474-3493. DOI: 10.1016/j.egy.2023.10.022.
- [53] 李建华, 崔森, 张小龙, 等. 计及压缩空气储能爬坡能力的区域综合能源系统多时间尺度调度[J/OL]. *分布式能源*, 2025: 1-10[2025-12-03]. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.25100364.
- LI J H, CUI S, ZHANG X L, et al. Multi-timescale scheduling of regional integrated energy systems incorporating compressed air energy storage ramp capabilities[J/OL]. 2025: 1-10[2025-12-03]. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.25100364.
- [54] 王昊一. 基于新型电力系统的“源-荷-储”协调低碳经济调度[D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
- WANG H Y. Coordinated low-carbon economic dispatch based on "source-load-storage" of new power system[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024.
- [55] 汪德成, 李妍, 张群, 等. 一种基于碳排放和能源成本的混合储能容量最优化配置方法研究[J]. *节能技术*, 2025, 43(2): 127-136. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2025.02.005.
- WANG D C, LI Y, ZHANG Q, et al. Allocation analysis of the energy storage system in integrated energy systems considering the carbon emissions and cost[J]. *Energy Conservation Technology*, 2025, 43(2): 127-136. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2025.02.005.
- [56] 郑浩, 徐波丰, 谢丽蓉, 等. 基于光伏混合储能的配置策略研究[J]. *水力发电*, 2020, 46(8): 88-91.
- ZHENG H, XU B F, XIE L R, et al. Research on configuration strategy based on photovoltaic hybrid energy storage[J]. *Water Power*, 2020, 46(8): 88-91.
- [57] 王伟岸, 张鹏凯, 吕敬, 等. 基于VSG的构网型光伏逆变器阻抗建模与稳定性分析[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(10): 1573-1585. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250207.
- WANG W A, ZHANG P K, LÜ J, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-forming photovoltaic inverter based on VSG[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(10): 1573-1585. DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250207.
- [58] 李天宇, 钟庆, 冯俊杰, 等. 大规模光伏外送系统光伏逆变器直流侧电压跌落抑制策略[J/OL]. *电力系统自动化*, 2025: 1-10[2025-11-25].
- LI T Y, ZHONG Q, FENG J J, et al. Mitigation strategy for DC-side voltage dip of photovoltaic inverter in large-scale photovoltaic transmission system[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025: 1-10[2025-11-25].
- [59] ARABKOOHSAR A, MACHADO L, FARZANEH-GORD M, et al. The first and second law analysis of a grid connected photovoltaic plant equipped with a compressed air energy storage unit[J]. *Energy*, 2015, 87: 520-539. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.008.
- [60] CAZZANIGA R, CICU M, ROSA-CLOT M, et al. Compressed air energy storage integrated with floating photovoltaic plant[J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 13: 48-57. DOI: 10.1016/j.est.2017.06.006.
- [61] MARKOWSKI J, LESZCZYŃSKI J, FERREIRA P F V, et al. Analysis of electricity supply and demand balance in residential microgrids integrated with micro-CAES in northern Portugal[J]. *Energies*, 2024, 17(19): 5005. DOI:10.3390/en17195005.
- [62] CASTELLANI B, MORINI E, NASTASI B, et al. Small-scale compressed air energy storage application for renewable energy integration in a listed building[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1921. DOI:10.3390/en11071921.
- [63] ARUTA G, ASCIONE F, BIANCO N, et al. Optimization of a diabatic compressed air energy storage coupled with photovoltaics for buildings: CO₂-eq emissions vs payback time[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 12686-12698. DOI: 10.1016/j.egy.2022.09.112.
- [64] 郑昊宇, 周家辉, 全冰, 等. 配置压缩空气储能的绿氢系统容量配置和运行调度优化研究[J]. *综合智慧能源*, 2025, 47(7): 64-70. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2025.07.007.
- ZHENG H Y, ZHOU J H, TONG B, et al. Research on capacity

- allocation and operation scheduling optimization of green hydrogen system with compressed air energy storage[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(7): 64-70. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2025.07.007.
- [65] WANG Z Z, XU C, YU B X, et al. Multi-objective optimization of capacity configuration in a wind-PV-compressed air energy storage hybrid system[J]. Energy, 2025, 332: 137097. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137097.
- [66] BAZDAR E, NASIRI F, HAGHIGHAT F. An improved energy management operation strategy for integrating adiabatic compressed air energy storage with renewables in decentralized applications[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286: 117027. DOI:10.1016/j.enconman.2023.117027.
- [67] 郑守庆. 基于光热与压缩空气储能的综合能源系统设计与调度[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2024.
- ZHENG S Q. Design and scheduling of integrated energy systems based on concentrating solar power and compressed air energy storage[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2024.
- [68] PELAY U, LUO L G, FAN Y L, et al. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 82-100. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.139.
- [69] LEE Y J, KIM J S, KIM T S. Impact of thermal energy storage material on the performance of the adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 131: 117575. DOI:10.1016/j.est.2025.117575.
- [70] 秦浩轩, 陈伟. 槽式太阳能耦合压缩空气储能系统动态特性研究[J]. 山东科学, 2025, 38(5): 65-79. DOI: 10.3976/j.issn.1002-4026.20240133.
- QIN H X, CHEN W. Dynamic characteristics of a trough solar energy-coupled compressed air energy storage system[J]. Shandong Science, 2025, 38(5): 65-79. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.20240133.
- [71] 张营, 张伟江, 李晓光. 耦合太阳能辅热的AA-CAES系统储热特性分析及优化[J]. 中国测试, 2019, 45(11): 155-160. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2018080033.
- ZHANG Y, ZHANG W J, LI X G. Analysis and optimization of thermal storage characteristics of AA-CAES system coupled with solar heating[J]. China Measurement & Testing Technology, 2019, 45(11): 155-160. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2018080033.
- [72] 陈晓弢, 王国华, 司杨, 等. 改进的光热复合压缩空气储能系统设计方案及其仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 20-26. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.003.
- CHEN X T, WANG G H, SI Y, et al. Improved design scheme of solar thermal compressed air energy storage system and its simulation analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 20-26. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.003.
- [73] 蔡杰, 张松岩, 杜治, 等. 含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统容量配置策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 165-176. DOI: 10.16081/j.epae.202007027.
- CAI J, ZHANG S Y, DU Z, et al. Capacity allocation strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage system with solar thermal collector module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 165-176. DOI:10.16081/j.epae.202007027.
- [74] 方乐, 刘成奎, 陈晓弢, 等. 含光热复合压缩空气储能的分布式综合能源系统容量规划方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5933-5943. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220106.
- FANG L, LIU C K, CHEN X T, et al. Capacity planning method of distributed integrated energy system with solar thermal composite compressed air energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5933-5943. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220106.
- [75] 尹航, 王强, 朱佳华, 等. 耦合光热发电储热-有机朗肯循环的先进绝热压缩空气储能系统热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3749-3760. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0548.
- YIN H, WANG Q, ZHU J H, et al. Thermodynamic analysis of an advanced adiabatic compressed-air energy storage system coupled with molten salt heat and storage-organic Rankine cycle [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3749-3760. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0548.
- [76] 韩中合, 王珊, 胡志强, 等. AA-CAES+CSP系统性能及关键参数分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 322-329. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0915.
- HAN Z H, WANG S, HU Z Q, et al. Analysis on performance and key parameters of aa-caes+csp system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(2): 322-329. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-0915.
- [77] 葛士宇, 史汪洋, 徐钢, 等. 压缩空气储能辅助太阳能电站调峰性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 35-45. DOI:10.19666/j.rfd.202411235.
- GE S Y, SHI W Y, XU G, et al. Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 35-45. DOI:10.19666/j.rfd.202411235.
- [78] 崔杨, 于一凡, 付小标, 等. 考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4195-4208. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1683.
- CUI Y, YU Y F, FU X B, et al. A capacity allocation method for advanced adiabatic compressed air energy storage systems considering the synergistic complementarity of multiple heat sources[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4195-4208. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1683.
- [79] 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.
- [80] LI X Y, WANG Y M, ZHANG X J, et al. Increasing coal-fired power plant operational flexibility by integrating solar thermal energy and compressed air energy storage system[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(6): 2032-2047. DOI: 10.1007/s11630-022-1699-1.
- [81] RAZMI A R, HEYDARI AFSHAR H, POURAHMADIYAN A, et al. Investigation of a combined heat and power (CHP) system based

- on biomass and compressed air energy storage (CAES) [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46: 101253. DOI:10.1016/j.seta.2021.101253.
- [82] 龚阁阳, 陈晓弢, 麻林瑞, 等. 计及碳交易机制和需求响应的生物质与光热耦合压缩空气储能系统优化策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2754-2763. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20221864.
- GONG G Y, CHEN X T, MA L R, et al. Optimization strategy of biomass and solar thermal coupled compressed air energy storage system considering carbon trading mechanism and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2754-2763. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20221864.
- [83] 薛小军. 基于异质能源互补和时空耦合的先进绝热压缩空气储能系统协同集成机制[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- XUE X J. Synergistic integration mechanism of advanced adiabatic compressed air energy storage system based on heterogeneous energy complementarity and space-time coupling [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [84] XUE X J, WANG Y T, CHEN H, et al. A coal-fired power plant integrated with biomass co-firing and CO₂ capture for zero carbon emission[J]. Frontiers in Energy, 2022, 16(2): 307-320. DOI:10.1007/s11708-021-0790-8.
- [85] 薛小军, 胡刚刚, 陈衡, 等. 与生物质气化联合循环系统耦合的压缩空气储能系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7569-7580. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221185.
- XUE X J, HU G G, CHEN H, et al. Performance assessment of compressed air energy storage system coupled with biomass integrated gasification combined cycle system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7569-7580. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221185.
- [86] 付伟娟. 干热岩压缩空气储能系统性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- FU W J. Research on the performance of hot dry rock compressed air energy storage system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [87] 伍文聪. 基于压缩空气储能及其衍生结构的冷热电多能耦合系统设计研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- WU W C. Design and research of multi-energy coupling system including cooling, heating and power based on compressed air energy storage system and its derivative structure[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [88] 梁健, 王蒙, 杨亚欣, 等. 基于压缩空气储能与增强型地热的三联产系统热力学分析[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 209-218.
- LIANG J, WANG M, YANG Y X, et al. Thermodynamic analysis of CCHP with compressed air energy storage and enhanced geothermal technology[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 209-218.
- [89] ZHANG X F, ZENG R, DENG Q L, et al. Energy, exergy and economic analysis of biomass and geothermal energy based CCHP system integrated with compressed air energy storage (CAES) [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111953. DOI:10.1016/j.enconman.2019.111953.
- [90] MOUSAVI S B, AHMADI P, POURAHMADIYAN A, et al. A comprehensive techno-economic assessment of a novel compressed air energy storage (CAES) integrated with geothermal and solar energy[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101418. DOI:10.1016/j.seta.2021.101418.
- [91] 李欣, 韦国强, 强同波, 等. 压缩空气储能与氢能耦合系统的研究进展[J/OL]. 发电技术, 2025: 1-17[2025-08-01].
- LI X, WEI G Q, QIANG T B, et al. Research Progress on the Coupling System of Compressed Air Energy Storage and Hydrogen Energy [J/OL]. Power Generation Technology, 2025: 1-17 [2025-08-01].
- [92] 张利, 段福凯, 李彪, 等. 与电解水制氢和固体氧化物燃料电池耦合集成的新型压缩空气储能系统性能分析[J]. 现代化工, 2023, 43(12): 213-220. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.12.039.
- ZHANG L, DUAN F K, LI B, et al. Analysis on performance of a novel compressed air energy storage system coupled with electrolytic water hydrogen production and solid oxide fuel cell[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(12): 213-220. DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.12.039.
- [93] 方颖聪, 莫春兰, 党玉荣, 等. 微电网与压缩空气储能系统的多能流协同调度[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 605-615. DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2023.0605.
- FANG Y C, MO C L, DANG Y R, et al. Multi-energy flow coordinated dispatching of microgrid and compressed air storage system[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(3): 605-615. DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2023.0605.
- [94] REZA M S, FATTAH I M R, WANG J K, et al. Hydrogen-based hybrid energy system: A review of technologies, optimization approaches, objectives, constraints, applications, and outstanding issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116192. DOI:10.1016/j.rser.2025.116192.
- [95] LI R X, TAO R, YAO E R, et al. Comprehensive thermo-exploration of a near-isothermal compressed air energy storage system with a pre-compressing process and heat pump discharging[J]. Energy, 2023, 268: 126609. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126609.
- [96] 李保岐, 何阳, 陈海生, 等. 空气补热型与耦合热泵型压缩空气储能系统供热能力研究[J/OL]. 西安交通大学学报, 1-11[2025-12-20]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251203.0820.002>.
- [97] 李丞宸, 贺新, 陶飞跃, 等. 一种压缩空气与抽水蓄能耦合的新型储能系统及热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(4): 40-49, 71. DOI:10.7652/xjtub202204005.
- LI C C, HE X, TAO F Y, et al. A new energy storage system coupled with compressed air and pumped-hydro energy storage and related thermodynamic analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(4): 40-49, 71. DOI:10.7652/xjtub202204005.
- [98] MASON J, FTHENAKIS V, ZWEIBEL K, et al. Coupling PV and CAES power plants to transform intermittent PV electricity into a dispatchable electricity source[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008, 16(8): 649-668. DOI: 10.1002/pip.858.
- [99] BASSAM A M, ELMINSHAWY N A S, OTERKUS E, et al. Hybrid

- compressed air energy storage system and control strategy for a partially floating photovoltaic plant[J]. *Energy*, 2024, 313: 133706. DOI:10.1016/j.energy.2024.133706.
- [100] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645.
- ZHANG W L, GU H, ZHANG C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645.
- [101] 芮振华, 刘月亮, 张政, 等. 地热储能技术研究进展及未来展望[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(2): 260-281. DOI:10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.019.
- RUI Z H, LIU Y L, ZHANG Z, et al. Research progress and prospect of geothermal energy storage technology[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(2): 260-281. DOI:10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.019.
- [102] 孙潇, 蔡春荣, 罗志斌, 等. Highview Power 液化空气储能中试装置热力学分析[J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 112-124. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.11.
- SUN X, CAI C R, LUO Z B, et al. Thermodynamic analysis of highview power's liquid air energy storage pilot plant[J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(2): 112-124. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.11.
- [103] 赵凯, 马洪岭, 施锡林, 等. 基于蠕变疲劳本构模型的压气蓄能盐穴长期稳定性评估[J]. *岩土力学*, 2025, 46(S1): 1-12. DOI:10.16285/j.rsm.2024.0622.
- ZHAO K, MA H L, SHI X L, et al. Long-term stability assessment of salt Caverns for compressed air energy storage based on creep-fatigue constitutive model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(S1): 1-12. DOI:10.16285/j.rsm.2024.0622.
- [104] 徐帅, 张青庆, 李小明, 等. 金坛盐穴储气库注采运行参数优化设计研究[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(4): 490-496. DOI:10.13639/j.odpt.2020.04.020.
- XU S, ZHANG Q Q, LI X M, et al. Optimization design of injection/production parameters of Jintan salt-cavern gas storage[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(4): 490-496. DOI:10.13639/j.odpt.2020.04.020.
- [105] PHOGAT P, SHARMA S, RAI S, et al. Self-healing materials: Bridging physics, chemistry, and engineering for a sustainable future[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. DOI: 10.1007/978-981-96-6767-3.
- [106] 师瑞峰, 蔺泳琪, 张凌志, 等. 压缩储能与氢能驱动的虚拟电厂源-储-荷低碳经济调度[J/OL]. *电工技术学报*, 1-13[2025-07-25]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250803>.