

特约评述



## 2025年中国储能技术研究进展

陈海生<sup>1</sup>, 李泓<sup>2</sup>, 徐玉杰<sup>1,3</sup>, 徐德厚<sup>4</sup>, 陈满<sup>5</sup>, 周学志<sup>1,3</sup>, 王亮<sup>1,3</sup>, 胡东旭<sup>1</sup>, 林海波<sup>6</sup>,  
李先锋<sup>7</sup>, 胡勇胜<sup>2</sup>, 安仲勋<sup>8</sup>, 刘语<sup>1</sup>, 蒋凯<sup>9</sup>, 唐永炳<sup>10</sup>, 陈人杰<sup>11</sup>, 尹钊<sup>1,3</sup>, 俞海龙<sup>2</sup>,  
钟国彬<sup>12</sup>, 王青松<sup>13</sup>, 李臻<sup>14</sup>, 张宇鑫<sup>1</sup>, 马一鸣<sup>5</sup>, 黄凡旗<sup>5</sup>, 朱轶林<sup>1,3</sup>, 张艳<sup>1,3</sup>,  
张欣霖<sup>1,3</sup>, 林曦鹏<sup>1,4</sup>, 戴兴建<sup>1,3</sup>, 张华良<sup>1</sup>, 李杰才<sup>6</sup>, 张长昆<sup>7</sup>, 张姣<sup>2</sup>, 李浩秒<sup>9</sup>, 石琼林<sup>9</sup>,  
史卓群<sup>1,3</sup>, 陈仕卿<sup>1,3</sup>, 欧学武<sup>10</sup>, 魏路<sup>1</sup>, 俞乐<sup>1</sup>, 梅文昕<sup>13</sup>, 岳芬<sup>14</sup>, 刘为<sup>14</sup>,  
宋振<sup>14</sup>, 俞振华<sup>14</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; <sup>2</sup>中国科学院物理研究所, 北京 100190;  
<sup>3</sup>压缩空气储能北京市重点实验室, 北京 100190; <sup>4</sup>毕节高新技术产业开发区国家能源大规模  
物理储能技术研发中心, 贵州 毕节 551712; <sup>5</sup>南方电网调峰调频发电有限公司储能科研院,  
广东 广州 511400; <sup>6</sup>吉林大学化学学院, 吉林 长春 130012; <sup>7</sup>中国科学院大连化学物理  
研究所, 辽宁 大连 116023; <sup>8</sup>上海奥威科技开发有限公司, 上海 201203; <sup>9</sup>华中科技大学电气  
与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; <sup>10</sup>中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;  
<sup>11</sup>北京理工大学, 北京 100081; <sup>12</sup>广东新型储能国家研究院有限公司, 广东 广州 510080;  
<sup>13</sup>中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; <sup>14</sup>中关村储能产业技术  
联盟, 北京 100190)

**摘要:** 本文对2025年度中国储能技术的研究进展进行综述。通过对基础研究、关键技术和集成示范三方面的回顾和分析, 总结得出了2025年中国储能领域的主要技术进展, 包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、铅蓄电池、锂离子电池、液流电池、钠离子电池、超级电容器、新型储能技术、集成技术和消防安全技术等。研究表明, 2025年是中国储能高速发展的一年, 储能技术多元化并进、新增装机创历史新高、市场化政策机制实现突破、产业格局加速发展。中国继续保持全球基础研究、技术研发和集成示范最为活跃的国家地位。中国机构和学者在储能领域发表SCI论文数、申请WIPO国际发明专利数和储能系统总装机均稳居世界第一且在持续增长, 和其他储能强国相比, 优势有进一步扩大的趋势。总体上中国储能实现了规模化发展, 且正在向全面商业化发展转变。

**关键词:** 储能; 技术; 进展

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0476

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-1981-53

收稿日期: 2026-06-01; 修改稿日期: 2026-06-08。

基金项目: 国家青年科学基金A类延续项目(52525601), 国家自然科学基金(U24A6007), 国家重点研发计划项目(2024YFE0212700、2024YFE0208100), 中国科学院储能专项(LDES15 0000), 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(117GJHZ2023009MI、117GJHZ2023093MI), 贵州省基础研究计划面上项目(黔科合基础MS(2026) 017), 新基石科学基金会(科学探索奖)。

第一作者及通信联系人: 陈海生(1977—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为大规模储能技术、叶轮机械内部流动、限定尺度传热等, E-mail: chen\_hs@iet.cn; 共同第一作者: 李泓; 徐玉杰; 徐德厚; 陈满; 周学志; 王亮; 胡东旭; 林海波; 李先锋; 胡勇胜; 安仲勋; 刘语; 蒋凯; 唐永炳; 陈人杰; 尹钊; 俞海龙; 钟国彬; 王青松; 李臻; 张宇鑫。

引用本文: 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2025年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 1981-2033.

Citation: CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress in China's energy storage technology in 2025[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 1981-2033.

## Research progress in China's energy storage technology in 2025

CHEN Haisheng<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, XU Yujie<sup>1,3</sup>, XU Dehou<sup>4</sup>, CHEN Man<sup>5</sup>, ZHOU Xuezhi<sup>1,3</sup>,  
WANG Liang<sup>1,3</sup>, HU Dongxu<sup>1</sup>, LIN Haibo<sup>6</sup>, LI Xianfeng<sup>7</sup>, HU Yongsheng<sup>2</sup>, AN Zhongxun<sup>8</sup>,  
LIU Yu<sup>1</sup>, JIANG Kai<sup>9</sup>, TANG Yongbing<sup>10</sup>, CHEN Renjie<sup>11</sup>, YIN Zhao<sup>1,3</sup>, YU Hailong<sup>2</sup>,  
ZHONG Guobin<sup>12</sup>, WANG Qingsong<sup>13</sup>, LI Zhen<sup>14</sup>, ZHANG Yuxin<sup>1</sup>, MA Yiming<sup>5</sup>, HUANG Fanqi<sup>5</sup>,  
ZHU Yilin<sup>1,3</sup>, ZHANG Yan<sup>1,3</sup>, ZHANG Xinlin<sup>1,3</sup>, LIN Xipeng<sup>1,4</sup>, DAI Xingjian<sup>1,3</sup>, ZHANG Hualiang<sup>1</sup>,  
LI Jiecai<sup>6</sup>, ZHANG Changkun<sup>7</sup>, ZHANG Jiao<sup>2</sup>, LI Haomiao<sup>9</sup>, SHI Qionglin<sup>9</sup>, SHI Zhuoqun<sup>1,3</sup>,  
CHEN Shiqing<sup>1,3</sup>, OU Xuewu<sup>10</sup>, WEI Lu<sup>1</sup>, YU Le<sup>1</sup>, MEI Wenxin<sup>13</sup>, YUE Fen<sup>14</sup>, LIU Wei<sup>14</sup>,  
SONG Zhen<sup>14</sup>, YU Zhenhua<sup>14</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; <sup>2</sup>Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; <sup>3</sup>Compressed Air Energy Storage Beijing Key Laboratory, Beijing 100190, China; <sup>4</sup>National Energy Large Scale Physical Energy Storage Technologies R&D Center of Bijie High-tech Industrial Development Zone, Bijie 551712, Guizhou, China; <sup>5</sup>Energy Storage Research Institute, Guangzhou 511400, Guangdong, China; <sup>6</sup>College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China; <sup>7</sup>Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China; <sup>8</sup>Shanghai Aowei Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201203, China; <sup>9</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; <sup>10</sup>Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China; <sup>11</sup>Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; <sup>12</sup>National institute of Guangdong Advanced Energy Storage, Guangzhou 510080, Guangdong, China; <sup>13</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; <sup>14</sup>China Energy Storage Alliance, Beijing 100190, China)

**Abstract:** This paper presents a comprehensive review of the research progress in China's energy storage technology in 2025. Through the review and analysis of fundamental research, key technologies, and integration demonstrations, the major technological advances in China's energy storage in 2025 are summarized, including pumped hydro storage, compressed air energy storage, flywheel energy storage, lead-acid batteries, lithium-ion batteries, flow batteries, sodium-ion batteries, supercapacitors, novel energy storage technologies, integration technologies, and fire safety technologies. The results indicate that China's energy storage sector has undergone a year of rapid development, characterized by the diversified advancement of storage technologies, record-high newly installed capacity, breakthroughs in market-oriented policy mechanisms, and an accelerating evolution of the industrial landscape. China continues to maintain its position as the most active country in the world in terms of fundamental research, technology R&D, and integration demonstration. Chinese institutions and scholars rank the first in the world in the number of SCI papers, WIPO international invention patent applications, and total installed capacity of energy storage systems, all of which continue to grow. Compared with other leading energy storage nations, China's leading advantages show a trend of further expansion. Overall, China's energy storage has achieved large-scale development and is transitioning toward full commercialization.

**Keywords:** energy storage; technology; progress

随着国家双碳战略的深入实施,我国的能源转型加速推进。党的二十届四中全会指出“加快建设新型能源体系,建设能源强国”。我国可再生能源实现了跨越式发展,可再生能源发电装机占比超过60%,风光装机已历史性超过火电,建成了全球最大的清洁能源系统。相应地,储能已从电力系统的支撑技术,升级为新型电力系统的核心主体;从能源体系的配套设施,升级为新型能源体系的核心基础设施;从新兴培育产业,升级为国家新兴支柱产业。储能已成为抢占国际战略新高地的重要领域,对构建安全高效、清洁低碳的新型能源体系具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。

“十四五”期间,我国储能行业经历了高速发展,实现了从商业化初期向规模化发展的转变<sup>[3-6]</sup>。2021—2024年,笔者对中国的主要储能技术的年度研究进展进行了综述<sup>[3-6]</sup>,得到了学术界和产业界的广泛关注。2025年,中国储能技术和产业又经历了高速发展的一年,储能技术多元化并进、新增装机创历史新高、市场化政策机制实现突破、产业格局加速发展。总体上,中国储能已开始从规模化发展向全面商业化发展转变。学术界和产业界的朋友鼓励笔者继续撰写年度综述文章,对中国2025年储能技术的研究进展进行系统地回顾和分析。

本文是受《储能科学与技术》期刊邀请,依托中国化工学会储能工程专委会和中国能源研究会储能专委会的专家,拟对2025年中国的主要储能技术的研究进展进行综述,包括抽水蓄能、压缩空气储能、储热储冷、飞轮储能、铅蓄电池、锂离子电池、液流电池、钠离子电池、超级电容、新型储能技术、系统集成技术和消防安全技术等,希望能够通过对储能技术基础研究、关键技术、集成示范等的回顾和分析,总结2025年中国储能技术领域的主要进展,为储能领域的研究生、科研工作者、工程技术人员等行业从业者提供参考。

本文共14节,其中前言由陈海生撰写,第1节抽水蓄能由陈满、徐德厚、马一鸣、周学志、黄凡旗撰写,第2节压缩空气储能由周学志、朱轶林、徐玉杰撰写,第3节储热储冷由王亮、张艳、张欣霖、林曦鹏撰写,第4节飞轮储能由胡东旭、戴兴建、张华良撰写,第5节铅蓄电池由林海波、李杰

才、刘为撰写,第6节锂离子电池由李泓、岳芬撰写,第7节液流电池由李先锋、张长昆、俞振华撰写,第8节钠离子电池由胡勇胜、张姣、刘语撰写,第9节超级电容由安仲勋、刘语撰写,第10节其他新技术由周学志、陈仕卿、徐玉杰(重力储能)、王亮、史卓群(热泵储电)、蒋凯、李浩秒、石琼林(液态金属电池)、唐永炳、欧学武、宋振(双离子电池)、陈人杰(智能电池)、俞海龙(全固态电池)、尹钊、魏路、俞乐、徐玉杰(AI for 储能)撰写,第11节集成技术由钟国彬、宋振撰写,第12节消防安全技术由王青松、梅文昕、岳芬撰写,第13节综合分析由陈海生、张宇鑫、李臻撰写,第14节结论由陈海生撰写,全文由陈海生统稿。由于作者水平有限,加之时间仓促,文中不足和不妥之处,敬请读者批评指正。

## 1 抽水蓄能

抽水蓄能具有技术成熟、容量大、寿命长、成本低等优点,但存在需要特定地理条件、建设周期长、对生态有影响等挑战。2025年我国抽水蓄能行业继续保持高速发展态势,技术向大容量、高参数、智能化和市场化方向发展,特别是智能化发展速度加快。基础研究重点方向包括流体流动特性、机组设备与控制技术、系统调度和优化、智能化与新技术等;关键技术研发重点包括机组设计与制造技术、高参数工程与施工技术、智能运维与管理技术等。

### 1.1 基础研究

在流体流动特性研究方面,文献[7-8]研究了侧式进/出水口水力学性能演变规律,并指明了进/出水口结构布置的优化方向;在此基础上,文献[9]通过进/出水口漩涡特性试验,提出设置双层消涡梁等消除有害涡旋的措施。文献[10]对长短叶片转轮无叶区压力脉动开展非定常模拟,发现动静干涉使脉动主频呈 $5f_n$ ,额定水头下幅值更高,原因为短叶片压力面侧大尺度涡的积聚增强。文献[11]聚焦泵工况驼峰区,定量揭示了72%~86%的能量耗散集中于转轮与导叶系统,无叶区涡群演化及近底环剧烈变化的速度梯度是损失主因。文献[12]进一步区分双驼峰区机理,第一驼峰由转轮进口前盖板侧

流动分离致损失骤增 130% 主导, 特征频率含  $0.8f_n$ 、 $3.8f_n$  等非线性成分; 第二驼峰则由导叶旋转失速加剧致损失翻倍主导, 动静干涉频率  $7f_n$  幅值增大 68%。文献[13]针对飞逸工况, 采用 1D-3D 耦合方法揭示了转轮流道内超  $500\text{ s}^{-1}$  大尺度涡与尾水管涡带贴壁转变的协同机制, 引发以 1 倍及 2 倍叶片频率为主的高频高幅脉动。文献[14]建立全流道可压缩耦合模型, 证实长尾水管与机组内部存在强双向耦合, 压力脉动频率受动静干涉与管道涡结构共同调制, 确立了全系统耦合模拟的必要性。文献[15]设计仿生导叶, 使反 S 区显著缩小, 低频压力脉动幅值降低 31.2%。文献[16]采用轴面收缩导叶, 使泵单级水力效率由 91.59% 提至 95.16%。文献[17]证实变速机组可优化蜗壳高压与尾水管低压极限值, 缩短转速调节时间。文献[18]证实“调压室-竖井结合布置”能有效降低水头损失, 水锤波反射性能优于传统分离式。文献[19]以某抽蓄电站事故闸门为研究对象, 联合 SST  $k$ - $\epsilon$  湍流模型、VOF 流体体积模型与重叠网格技术, 研究了相同初始水位和不同流量工况下, 闸门关闭过程中关键部位的动应力演化过程及其附近复杂流场演变规律。文献[20]研究了同发同抽不等流量运行的水力特性, 推荐选择抽发流量比为 2.0 及以上。

在机组设备与控制技术方面, 文献[21]构建了由有压输水系统、水泵水轮机、交流励磁发电机和调速器等组成的变速抽水蓄能机组精细化模型, 对抽水蓄能电站典型水力过渡过程开展了深入的计算分析。文献[22]基于特征线法构建了全功率变频抽水蓄能机组调节系统的精细化模型, 探讨了全功率变速抽水蓄能机组甩负荷工况下的动态特性和安全性。文献[23]研究了变速机组暂态无功支撑机理, 分析了电机本体参数、励磁控制参数和非线性因素对机组暂态无功支撑能力的影响。文献[24]构建了抽水蓄能电站送出系统的功角时间尺度模型, 研究了定速/变速协同暂态功角稳定性。文献[25]建立了双馈感应电机、水泵水轮机及调速器的耦合数学模型, 验证了机组对功率调节的动态响应特性。文献[26]提出高参数机组重点发展方向, 包括变速抽水蓄能、多级抽水蓄能、海水抽水蓄能和地下抽水蓄能等。

在系统调度和优化方面, 文献[27]围绕选址对象与技术方法分析了抽水蓄能选址原则, 为项目选址决策提供理论参考和方法借鉴。文献[28]提出考

虑新建上库、新建下库、上下库联动三种工况的特征水位拟定方法, 运用穷举法和分段迭代法, 提高了方案科学性。文献[29]考虑集中式、分布式光伏电源与太阳能热电站, 建立了以投资成本、发电收益及系统灵活性为目标的抽水蓄能电站双层规划模型。文献[30]提出基于卧式抽蓄的风光水储联合运行优化方法, 通过对常规水电融合改造, 降低了联合运行系统的日均供电缺口。文献[31]建立了包含风电、光伏、混合式抽水蓄能、电化学储能的一体化电站配置运行两阶段随机优化模型, 得到了多种电源的配置与运行情况, 以及不同资源禀赋下的电源配置方案。文献[32-36]针对梯级混合式抽蓄, 开展了动态控制技术研究, 使剩余负荷峰谷差和弃电率均大幅降低。文献[37]和[38]分别提出供需不确定下分层优化调度策略, 并分析抽蓄集群规划与运营, 支撑抽水蓄能灵活调控与规模化布局。文献[39-45]开展了抽蓄机组的容量配置优化研究, 大幅提升抽蓄和风-光等多能耦合机组的配置特性和系统经济性。

在智能化与新技术方面, 文献[46]构建大语言模型智能运维辅助系统。文献[47]建立整机动力学模型, 明晰机架振动特性机理以支撑机组振动评估。文献[48]提出基于改进经验模态分解 (IEMD) 和全局注意力机制优化时间卷积网络 (GAM-TCN) 的机组状态趋势预测方法, 能够更精确预测振动信号的发展趋势。文献[49]基于 ICEEMDAN 和 CNN-LSTM-ATTENTION 实现机组振动精准预测。文献[50]提出了基于云管边端协同的视频监控智能体方案, 通过算法模型分层部署和协同机制, 解决高时延和高耗能问题, 提升了智能运维、智能巡检等场景的实时应用水平。此外, 在新型抽水蓄能技术方面, 文献[51]分析了废弃煤矿抽水蓄能应用现状, 建议西北地区采用“地下储水库+抽蓄”联合模式。文献[52]将新型抽蓄分为地下、水下、半地下、跨季节跨地域等类型, 认为人工挖掘地下空间最具潜力。

## 1.2 关键技术

在机组设计与制造技术方面, 广东肇庆浪江 300 MW 变速抽水蓄能机组交流励磁系统通过工厂试验并正式下线, 该机组输出电流和电压分别达定速机组的 3 倍和 10 倍。惠州中洞 400 MW 级变速机组交流励磁系统首条功率支路通过工厂试验。两河口抽水蓄能项目 300 MW/272.7 r/min 电动发电机

模拟样机通过验收,攻克了“容量-电压-转速”匹配难题。东方电机研制成功22极-300 MW电动发电机。另外,我国已将300 MW和400 MW级国产变速抽蓄机组成套设备纳入能源领域首台(套)清单。

在高参数工程与施工技术方面,文献[53]完成800 MPa级超高水头引水钢管水压试验;文献[54]开展高水头抽水蓄能电站高压岔管稳定性分析。文献[55]优化堆石坝面板混凝土配合比,解决大体积温控难题。文献[56]研究抽水蓄能电站排水廊道TBM施工技术。文献[57]研发排水系统小直径TBM高效物料运输系统,可提升施工效率与安全性。文献[58]综合考量钻孔速度、质量及钻头磨损,构建钻进参数优化模型,确定不同地质条件下的最优参数组合。文献[59]针对沥青混凝土面板堆石坝开展抗震安全性分析,有效提升了坝体在极端地震工况下的整体稳定性能。文献[60]在广义塑性理论框架下,提出一个改进本构模型,以准确预测抽水蓄能电站面板堆石坝在频繁水位波动下的应力变形特性。文献[61]以湖北大冶抽水蓄能电站为例,通过现场测试与反演分析,探明了深埋复杂多岩层条件下地应力场分布特征,证实引水隧洞各段抗水力劈裂安全系数均超1.1,可采用普通钢筋混凝土衬砌。

在智能运维与管理技术方面,智能诊断系统的快速发展,实现了多种监测数据的采集融合,大幅消减了机组监测盲点,实现了智能监测、状态评估、智能诊断和智能运维等新技术新产品在抽水蓄能电站的完整运用。福建永泰抽水蓄能机组智能诊断系统及行业首套CAVE数智化运维检修仿真平台投入使用,该平台能够实现机组实时数据和运行状态的可视化监测孪生,助力用户实现设备全生命周期数字化运维管理。三峡集团“大禹大模型”在水电生产运行、设备运维、日常办公等场景实现智能应用落地。国家能源集团的云上水电平台完成部署,标志着首个高精度水电大模型智能问数技术成功应用。尚志抽水蓄能电站的“模助”智能施工管理平台,成为驱动全链条智能施工的“数字中枢”,可在模型上批注质量缺陷、安全隐患、物资调配需求,系统自动追踪责任人直至问题闭环。

### 1.3 集成示范

2025年,我国新增抽水蓄能装机容量748万千瓦。清原、宁海、句容、五岳、缙云、梅州二

期、洛宁、南宁、易县、天台等十座抽水蓄能电站或机组投运,混合式抽蓄、地下硬岩抽蓄等新型技术路线示范工程稳步推进,行业创造多项世界第一。浙江天台电站首台425 MW机组并网,成为国内单机容量最大抽蓄电站,以724米额定水头创造世界最高水头纪录,标志着我国在超高水头、超大容量抽蓄领域达到世界领先水平。松阳抽蓄电站应用国内首台超深竖井全断面扩孔式硬岩掘进机“天工号”,建成国内最深637米竖井,标志我国超深竖井施工装备与智能建造水平迈入国际先进行列。江苏句容抽水蓄能电站创造了世界最高抽水蓄能电站大坝(182.3米)、世界最高沥青混凝土面板堆石坝和世界最大库盆填筑工程。广西南宁抽水蓄能电站从主体工程开工到4×300 MW机组全面投产仅用时41个月,刷新国内同类型电站建设速度纪录。

2025年,国家发展改革委、国家能源局联合发布了《抽水蓄能电站开发建设管理暂行办法》,为我国抽水蓄能行业规范管理提供了制度依据。浙江缙云电站375 MW宽负荷机组投运,机组稳定运行区间拓展至30%~100%额定功率。平江抽蓄电站完成国内首个二次系统智能一体化联调,实现监控、调速、励磁等多系统协同,控制信息交互时间从秒级缩短至毫秒级,预计缩短单台机组现场调试时间25%以上。辽宁清原电站、广东梅州抽蓄二期电站均实现了机组控制的软硬件全面国产化和自主可控。广东梅州抽蓄二期电站还实现“投产即入市”,全站电量进入电力现货市场,成为全国市场化容量最大抽蓄电站,开创了“报量报价”交易新模式,标志着抽水蓄能参与电力市场交易进一步深化。

## 2 压缩空气储能

压缩空气储能技术具有储能容量大、周期长、寿命长、比投资小等优点,被认为是大规模储能的重要方向,但传统压缩空气储能系统存在需要特定地理条件,需要燃烧化石燃料等挑战。2025年,我国压缩空气储能技术取得了跨越式发展。总体上,压缩空气储能技术实现了100~300 MW级系统从集成示范阶段向推广应用阶段的转变,在系统总体特性与全工况能量损失机理、关键部件技术、集成示范与并网运行等方面均取得重要进展。

## 2.1 基础研究

在系统总体特性与参数优化方面,文献[62]从系统构型、热力学过程和关键部件三个层面总结了压缩空气储能(CAES)的总体特性,提出压缩机、膨胀机、储气室及储热子系统的协同匹配是决定系统效率、储能密度和工况适应性的核心因素。文献[63]基于变速运行理念提出双轴变速 CAES 系统,并在高效与宽工况兼顾的目标下确定最优变速匹配方案,相较于传统定速运行,变速方案可使系统效率提高 2.04%。文献[64]针对先进绝热 CAES 系统,考虑热耦合特性建立配置优化框架,优化压缩/膨胀与蓄热单元的匹配关系,提升系统能量利用效率并降低热不匹配损失。文献[65]基于一维损失模型对填充床蓄热耦合的绝热 CAES 系统开展优化设计(滑压运行),分析关键参数对压缩/膨胀与热储匹配及系统效率的影响,确定了系统最优配置与运行边界。文献[66]针对水下压缩空气储能系统的柔性气囊开展特性实验研究,揭示了不同工况下气囊的力学-热力学耦合规律,为恒压 CAES 系统总体参数优化设计提供理论指导。

在压缩机内流特性及变工况调控方面,文献[67]研究了压缩空气储能系统径向进气混流压缩机的叶顶间隙流动特性,揭示了叶顶间隙对压缩机流动稳定性、效率以及压力比的影响。文献[68]基于应用场协同理论研究了压缩机内部流场的二次流涡旋产生的局部耗散机理,揭示了内流损失分布规律。文献[69]通过数值方法研究了压缩空气储能系统中涡旋压缩机在变工况下的瞬态内流特性,分析了压缩机内部气动损失和性能衰减机制。文献[70]建立了包含机械损耗的实际热力学模型,通过先进焓分析揭示了压缩机在储能阶段产生较大内部不可逆损失的内在线理。文献[71]提出了一种基于代理模型和遗传算法的轴流压缩机叶片三维弯掠结构优化方法,在保证气动性能的前提下显著降低了动叶的最大等效应力,提升了设备长期运行的安全性。

在膨胀机内流特性和变工况调控方面,文献[72]针对 CAES 系统中的轴流膨胀机,通过数值模拟揭示了高温高压工况下轴向热膨胀导致的级间间隙变化对内部流场特性及气动效率的影响。文献[73]通过数值模拟研究了渐扩式排气管道扩张角对流动损失与动能回收效果的影响,确定了实现最佳静压恢复的扩张角度,为提升膨胀机系统整体输出效率提供了理

论指导。文献[74]通过引入旁路控制策略,动态调节膨胀比以克服压力下降导致的功率衰减,并利用数值模拟优化排气管道扩张角,进而有效提升系统的整体能量密度和输出效率。文献[75]提出将旁路系统应用于膨胀机组中,通过设计多种旁路控制策略动态调节各级膨胀比,有效克服了压力下降导致的功率衰减,延长机组发电时间的同时提高了系统能量密度。

在蓄热(冷)换热器传蓄热特性方面,文献[76]建立了耦合熔盐储热的补燃式系统热力性能分析模型,详细分析了高温熔盐在换热器中的传蓄热特性。文献[77]重点研究了中温蓄热压缩空气储能系统的动态模拟,对换热器端差、储热介质在充放气循环中的瞬态传热特性及压力控制策略进行了详细建模与验证。文献[78]提出用非传统的管壳式(S&T)换热器代替传统的换热器,采用合并的工业热回收蒸汽发生器(HRSG)技术设计热空气发生器(HAG)。文献[79]提出了一种利用内部热交换器和余热的主动热管理策略,建立了新的热力学模型来模拟空气温度和压力的动态响应,并通过实验验证了内部换热器控制空气温度的有效性和模型的准确性。文献[80]建立了微型压缩空气储能(Micro CAES)热电联供系统的完备动态模型,考虑了换热器和蓄热器的变工况特性,分析了换热器端差与换热匹配随负荷变化的响应规律。

在储气室热力学和气密性等研究方面,文献[81]采用 CFD(computational fluid dynamics)数值模拟方法,研究了某拟建隧洞式 CAES 地下储气库在首次充放气运行条件下的热力学过渡过程,分析了储气库布局方式对压缩空气热力学过渡特性及储能能力的影响。文献[82]针对人工硐室储气技术,通过对比储气装置的绝热模型和等温模型来研究密封层材料的选择(如聚氨酯聚合物砂浆)及其低渗透特性,并分析了开挖损伤区对气体泄漏风险的影响,提出了利用密封层和相对坚硬围岩使破裂带最小化的措施。文献[83]针对压缩空气储能(CAES)用衬砌岩石洞室(LRC)的稳定性,设计并进行了相似物理模型试验,分析了饱和及循环气压工况下 LRC 的热力学响应及变形特性。文献[84]通过实验研究了等压压缩空气储能系统中储气室的动态特性,详细分析了储气室在充放气过程中的热力学行为、气密性变化及压力波动,揭示了储气室内部气

体膨胀和压缩过程对热传导、气体流动和密封性要求的影响。

在压缩空气储能系统与其他系统耦合研究方面, 文献[85]首次提出热储式压缩空气储能系统与空气分离装置耦合方案, 通过CAES向ASU供给高压空气并回收部分液氮用于发电, 实现降低空分压缩能耗和提升系统经济性的协同效果。文献[86]将新型氢燃料压缩空气储能系统, 与质子交换膜电解槽电池和质子交换膜燃料电池相结合, 耦合系统设计效率为74.3%。文献[87]提出了一种将压缩空气储能系统与燃气轮机联合循环系统相耦合的设计方案, 通过系统集成有效利用压缩热, CAES子系统的往返效率、运动效率和能量储存密度分别为78.8%、79.37%和3.56 kWh/m<sup>3</sup>。文献[88]提出压缩空气储能与生物质热电联产耦合的多联产系统, 利用压缩余热与生物质系统协同供热供电, 从而增强系统的热电联供能力与综合利用性能。

## 2.2 关键技术

2025年, 我国压缩空气储能(CAES)在系统总体设计技术、压缩机技术、膨胀机技术、蓄热(冷)换热器技术、系统集成技术与控制技术等核心技术领域取得重要突破。系统总体设计方面, 中国科学院工程热物理研究所基于“过程对应-参数匹配”设计理论首次提出并建成了涵盖“系统设计-关键部件-集成控制”的完整变速压缩空气储能研发设计体系<sup>[62]</sup>。压缩机技术研发方面, 文献[89]突破了总体设计及优化、全三维流动优化、长转子复杂轴系结构设计、高效变工况控制等关键技术难题, 成功研制具有完全自主知识产权的国际首套单机功率超过100 MW压缩空气储能压缩机, 相比已有压缩空气储能压缩机, 其单机功率提高100%以上, 单位成本大幅降低, 同时具有效率高、压力大、运行范围宽等优点。膨胀机技术方面, 文献[90]通过采用调节流道静叶安装角的技术方案, 适当减小静叶安装角, 提高调节喷嘴的进口压力, 实现节流损失显著降低, 提高膨胀机的效率, 为压缩空气储能系统膨胀机的设计、优化和运行控制提供了重要的理论依据和技术支持。换热器技术方面, 文献[91]通过强化传热与宽工况动态匹配等技术路线, 改善了换热效率与流动阻力之间的权衡, 并提升了换热器与系统集成的适配性, 为CAES系统全场景工程化落地提供了核心支撑。在系统集成技术方面, 针对传

统冷热电联产系统变工况性能差、余热利用不充分问题, 突破了CAES与蓄热装置深度耦合的多联供系统集成技术, 构建电-冷-热-压缩空气多联供系统, 实现烟气余热的梯级回收与综合利用等。

## 2.3 集成示范

2025年, 我国压缩空气储能集成示范方面实现了里程碑式的跨越。在去年实现从100 MW向300 MW级跨越的基础上, 今年实现了300 MW级系统从集成示范走向推广应用。国信苏盐淮安盐穴压缩空气储能示范项目2号机组并网成功, 该项目采用了进口温度为330℃的300 MW级高温空气透平。中储国能山东肥城国际首套300 MW/1800 MWh先进压缩空气储能系统主要设备通过第三方检测, 验证了先进压缩空气储能领域的300 MW系统效能处于国际领先水平。

2025年, 各地示范项目正呈集群化落地趋势, 山东、江苏、河南、内蒙古、宁夏、陕西、甘肃、江西等地陆续公布压缩空气储能电站项目, 已公布项目总装机超过8 GW。除盐穴储气外, 人工硐室、水下柔性、压力容器等储气装置研究热度增加。中储国能660 MW先进压缩空气示范项目启动, 建成后将成为全球单体装机容量最大的压缩空气储能电站。此外, 中储国能、华能集团、大唐集团、中国电建、中国能建、三峡集团、国能集团等企业加大投入, 规划和实施项目进度进一步加速。

2025年, 我国压缩空气储能系统验证平台与装备产能布局方面也取得重要进展, 产业化基础得到进一步夯实。中国科学院工程热物理研究所南京基地暨中科南京未来能源系统研究院研发的国际首套百兆瓦级压缩空气储能集成实验与验证平台主体完工, 该平台可实现30~600兆瓦多工况条件下的CAES系统级测试, 将成为推动技术示范走向规模化应用的核心支撑平台。随着测试验证与配套产能的全面铺开, 我国压缩空气储能产业链将逐步完善, 构建起完整的生态体系, 产业发展进程进入快车道。

## 3 储热储冷

储热储冷技术通常包括显热、潜热、热化学储热三种技术, 显热储热具有成本低、规模大、技术成熟等优点, 但存在储能密度低、放热温度不稳定等挑战; 潜热储热具有储能密度较高、放热温度稳

定、技术基本成熟等优点,但存在易过冷、导热系数低、价格较高等挑战;热化学储热具有储能密度高、储能时间长、存储热损失低等优点,但存在技术成熟度低、循环寿命短、系统复杂等挑战。2025年,储热储冷技术继续保持储能领域研究的热点方向之一。我国学者在储热储冷的基础理论研究、关键技术与设备研发,工程集成示范方面进展显著,其中高性能复合材料、多尺度换热特性、相变储热技术、大规模火电耦合储热工程示范为当前技术研究的热点。

### 3.1 基础研究

在储热储冷材料的开发与性能调控方面,文献[92]通过精确调控D-甘露醇与赤藓糖醇的质量配比,成功抑制了材料在储存过程中的自发结晶行为,提升了中低温储热系统的能量保持能力与热可靠性,为实现跨季节长时储能提供了理论依据和解决路径。文献[93]提出了基于磁场诱导的性能调节方法,利用改性纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 颗粒显著增强了甲酸钠-氯化钾水基材料的导热性能并抑制了过冷现象。文献[94]采用蒸发法确定了 $\text{NaCl-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 三元共晶水合盐系统的最佳共晶点,提升工业储能系统的能量密度。文献[95]研制了基于六水氯化镁共晶体系的复合相变材料,通过改性设计有效解决了相分离与过冷问题。文献[96]开发了具有高潜热的定型盐水相变蓄冷凝胶,凭借其优异的导热系数和循环稳定性,显著提升了储能系统的能量转换效率。

在储热储冷单元传热特性与系统优化方面,文献[97]针对液态空气储能系统,提出了采用液体换热流体的级联固体填充床蓄冷方案。文献[98]构建了集成平板微热管阵列的新型相变蓄冷装置,深入研究了其在充放冷同步运行模式下的传热特性,并利用响应面法完成了翅片结构的优化。文献[99]开发了以热电制冷器为冷源的相变蓄冷系统,研究了翅片构型与相变材料热物性对装置冷能储存性能的协同影响。文献[100]运用响应面法对微热管式蓄冷单元进行了参数化评估,定量分析了翅片几何尺寸对充放冷速率及系统紧凑性的贡献率。在系统集成方面,文献[101]分析了耦合LNG冷能回收、工业余热及太阳能的先进液化空气储能系统的往返效率与经济性。文献[102]创新性提出了集成涡流管与热泵技术的压缩空气储能冷热电联供系统,分析了新系统降低节流损失和实现能量梯度利用的

潜力。

### 3.2 关键技术

在储热储能系统耦合与集成,文献[103]针对光伏/集热-热泵耦合系统、配置旋转床储热系统,提出了新型动态流量控制策略可使有效放热时间延长1.7倍。文献[104]建立了耦合相变材料填充床储热装置的绝热压缩空气储能系统动态模型,引入双级级联储热装置及优化相变材料熔点,使系统往返效率提升了4.4%。文献[105]提出了与燃煤电厂耦合的新型蒸汽/水混合储热系统,通过系统性的性能评估,证明该集成系统能将机组最低电负荷从30%降低至12.15%。文献[106]提出了耦合蓄热式热管散热器的新型系统,并探究了旨在降低日耗电量的自适应压缩机频率控制策略。文献[107]研究了基于螺旋折流结构的熔盐储热罐系统,通过数值模拟分析了高度直径比、倾角及螺旋分数对温度分层的影响,结果表明优化后螺旋流道可抑制充电时的液体混合并增强放电时的换热效率。文献[108]构建了比例缩小的双井砂箱装置以研究跨季节含水层储能系统的热性能,发现季节性调节负荷以及优化井深与井间距等结构参数可提高系统储能效率。

在相变储能技术方面,文献[109]研究了利用微通道平行流扁管的新型相变蓄热装置,通过优化蓄热管与放热管的间距,显著提升了系统在空气源热泵采暖工况下的充放热特性。文献[110]提出了耦合翅片与纳米颗粒的仿生马蹄形管结构,结果显示该几何优化使熔化时间缩短了36.11%,换热效率提升了43.29%。文献[111]提出了集成光/电-热转换与储存的高级相变复合材料,利用微晶石墨耦合碳泡沫构建高效导热路径,使热响应速度提升了10倍以上。文献[112]系统评估了纳米颗粒对潜热调节、热导率提升及黏度变化的影响,指出分布均匀性与长期稳定性是保障其热性能的关键。文献[113]研究了封装结构对相变胶囊储能效率的影响,借鉴生物学原理提出了仿生线粒体、仿生叶绿体和仿生高尔基体胶囊模型,其中高尔基体仿生结构使储能性能最高提升了133.12%。

在储冷技术方面,文献[114]开发了具有可调相变温度的高级相变凝胶,通过整合有机与无机相变材料,克服了相分离与低导热瓶颈,实现了较高的循环稳定性。文献[115]提出了集成冷释放与空气净化的新型液态空气储能颗粒填充床系统,通过冷存

储单元冻结环境空气中的水分和二氧化碳,在提升能量存储效率的同时增强了物料利用率。文献[116]研究了集成双级朗肯循环与二氧化碳储能系统的液化天然气冷能回收方案,分析表明通过优化高压侧存储压力可提升系统的能量存储密度。文献[117]研制了基于改性膨胀石墨的水基复合相变材料,通过引入十二烷基苯磺酸钠,改善了疏水性碳基骨架与水基材料的兼容性,有效提升了储冷过程中的工质热导率。文献[118]提出了利用能源隧道进行储冷的方案。

### 3.3 集成示范

在储热系统集成示范方面,国家能源集团安徽公司宿州电厂建成GWh级“煤电+熔盐”储能项目,采用三路抽汽方案,储放热系统整体效率达83.4%。中国科学院工程热物理研究所华电山西朔州热电厂建成20 MWh新型喷淋式填充床储热项目,打破了传统热电联产机组“以热定电”模式,将供热和发电“解绑”,提升火电调峰能力。国家能源集团河北龙山电厂建成采用多源抽汽技术的600 MW火电抽汽熔盐储能项目,可提高机组调峰能力得到提高。在区域冷热联供储能示范方面,济南南部能源中心建成跨季节“冰蓄冷+水蓄热”联供项目,该项目采用“冰蓄冷+水蓄热”技术,集中供冷系统COP可达6.0以上,供冷面积达200万平方米。

## 4 飞轮储能

飞轮储能具有响应速度快、效率高、循环寿命长、无污染等优点,但存在能量密度低、自放电率高、能量成本高等挑战,适合在短时高频储能的场景应用。2025年,中国飞轮储能技术继续向大功率、长寿命、高可靠性以及应用拓展方向深化发展,在基础研究、关键技术和集成示范方面均取得重要进展,技术成熟度和应用规模均稳步提升。

### 4.1 基础研究

在基础研究方面,相关研究聚焦于转子热管理、振动抑制、疲劳寿命预测及多场耦合分析。文献[119]针对高功率密度飞轮电机转子在真空环境下的散热难题,提出了中空轴内通流散热方案,理论计算与缩比实验表明,通过增加导热油流量和提升转速可有效增强对流换热。文献[120]建立了飞轮储能系统的集总参数热网络模型,通过200~400 kW的连续充放电实验验证,模型稳态误差小于2℃。文献

[121]针对大功率飞轮储能系统磁轴承,通过电磁场与温度场双向耦合仿真,分析了不同电流下的温度分布,自然风冷能满足安全运行要求,但需在热管理与电磁性能间取得平衡。文献[122]针对柔性转子系统的不平衡振动问题,提出基于不平衡系数辨识的变参数补偿控制策略。文献[123]针对磁轴承系统在大范围变速运行时的多频振动问题,提出基于变采样频率法的比例微分变速重复控制器,实验证明该控制器可有效抑制谐波。文献[124]综述了飞轮转子疲劳寿命分析的研究进展,将传统疲劳寿命模型与人工智能相结合,在多轴疲劳预测方面展现出更高精度。此外,文献[125]研究了永磁同步电机局部失磁下的转子机械响应,揭示了失磁故障导致的不平衡磁拉力及其引发的应力分布变化规律,为故障诊断提供了理论参考。文献[126]提出了一种基于高温超导磁悬浮轴承和平面涡流磁耦合器的飞轮储能系统,实现了无接触支撑与传动,显著降低了摩擦损耗。

### 4.2 关键技术

飞轮储能的关键技术重点在于磁轴承控制、多相电机驱动、构网型并网及混合储能协同等方面。文献[127]针对六相永磁同步电机驱动的高速飞轮储能系统,提出了适应升速、并网准备和并网运行三阶段的并网控制策略,仿真验证了其稳定性。文献[128]系统地论述了“构网型飞轮储能”的技术路线,分析了惯量飞轮调相机、电力电子并网型高速飞轮与同步机并网型高速飞轮在惯量响应、暂态支撑等方面的差异,为应对新型电力系统惯量支撑不足的问题提供了解决方案。文献[129]提出了基于逐次变分模态分解和非支配排序遗传算法II的火电-飞轮联合系统协同优化方法,仿真显示该策略使二次调频性能指标 $K_p$ 提升17.8%。文献[130]针对飞轮-锂电混合储能,提出了基于模态匹配的控制策略及动态SOC区间管理策略,该策略使机组日均 $K_p$ 值提升19.98%,锂电池日均循环次数减少34.27%。文献[131]提出了一种将飞轮储能响应过程分解为快速响应、能量维持、精确调节三个阶段的多目标优化控制策略,在330 MW火电机组工程中使飞轮有效投运率提升至94%。文献[132]提出了一种基于改进型模型参考自适应系统的无传感器容错控制策略,将实时辨识永磁体磁链应用于模型预测控制,在电机参数变化和缺相故障下,仍能确

保系统稳定运行。文献[133]综述了人工智能在飞轮储能中的应用,将人工智能深入渗透到转子设计、电机控制、并网策略和故障诊断等环节。此外,文献[134]研究了将模块化多电平变流器与高速飞轮储能相结合,应用于城市轨道交通直流牵引网,并提出了“冒泡排序-载波移相调制”方法,有效解决了电压均衡问题。文献[135]提出了基于开关表三矢量模型预测转矩控制策略,通过硬件在环实验验证了其在充放电切换工况下功率脉动和转矩脉动显著降低,为提升系统稳态性能提供了技术支撑。

### 4.3 集成示范

2025年,中国飞轮储能集成示范项目在电网调频、轨道交通等领域取得新的进展。在电网调频领域,应用于火电-飞轮联合调频、新能源场站的飞轮储能示范项目相继落地,与锂电、火电等协同发展也日益深化。山东省100 MW真空磁悬浮飞轮储能独立调频项目一期(30 MW)在威海乳山投运,西北地区8 MW/0.32 MWh级飞轮储能协同一次调频示范项目成功并网。此外,辽宁省规划建设了20 MW/3.2 MWh飞轮+80 MW/160 MWh电化学、30 MW/3 MWh飞轮+70 MW/140 MWh电化学两个混合储能系统。在轨道交通领域,杭州地铁飞轮储能型再生制动能量吸收装置应用项目顺利通过验收,广州地铁18号线将飞轮储能技术应用于25千伏城际轨道交通系统。未来,随着工程示范经验的积累和飞轮储能成本的进一步下降,飞轮储能有望在更多应用场景实现商业化推广。

## 5 铅蓄电池

铅蓄电池具有技术成熟、成本低、安全性高、可靠性好等优点,在通信电源、电力储能、汽车启动电源等领域有重要应用;但存在能量密度低、深循环寿命短、充放电倍率小等挑战。尽管面临着新型电池技术的竞争,铅蓄电池及相关技术的研究开发仍然持续进行。2025年,铅蓄电池在正负极材料、电解液添加剂及板栅技术等方面取得了重要进展。通过材料、结构与界面等多维度基础研究,以及功能化正负极添加剂、电解液添加剂和轻质复合板栅等关键技术开发,铅蓄电池性能得到了系统地提升,并实现了在电源侧和用户侧储能等场景中的商业化应用。

### 5.1 基础研究

在基础研究方面,材料创新与添加剂研究仍然是主要方向。在负极添加剂研发方面,通过原子级负载、异质原子掺杂、表面功能化及多孔结构设计等策略,有效抑制析氢副反应、缓解不可逆硫酸盐化,显著提升电池循环寿命与倍率性能。文献[136]采用络合沉淀法将PbO锚定于稻壳基活性炭,制备高比表面积PbO/RHAC复合材料,使电池HRPSOC循环寿命从1098次提升至12102次,0.1 C放电容量提升14.3%。文献[137]通过球磨降解-碳化两步法将废PET塑料转化为富含氧官能团的多孔碳添加剂,电池HRPSOC循环寿命达21062次,较对照电池提升11.35倍。文献[138]采用化学还原法合成多孔铋材料,并与活性炭机械混合后以2%的比例添加至负极中,HRPSOC循环寿命达5226次,较对照电池提升3.38倍。文献[139]通过均匀沉淀法可控合成PbO/AC复合材料,调控水热时间与反应物摩尔比,优化PbO负载量后的电池HRPSOC循环寿命达12655次。文献[140]通过聚多巴胺介导的蚀刻-保护策略,将MAF-6与聚吡咯复合后热解,构筑含ZnO和吡咯氮的抗析氢碳网络PMC,HRPSOC循环寿命达12743次,较对照电池提升3.8倍。文献[141]以ZIF-8为前驱体,经硝酸蚀刻后负载PbO,制备N、Zn共掺杂多孔碳复合材料PbO@ZNCacid,HRPSOC循环寿命达33729次,较对照电池提升5.68倍。文献[142]以杏壳为原料,经KOH活化后水热负载锰氧化物,制备Mn-RASC复合材料,HRPSOC循环寿命达15188次,较对照电池提升8.7倍。文献[143]在 $g-C_3N_4@rGO$ 上锚定Pb单原子,构建N-Pb双活性位点复合材料,添加0.5% (质量分数) 时,HRPSOC循环寿命达24736次,较未改性材料和对照电池分别提升2倍和6.5倍。

在正极添加剂研发方面,通过纳米材料负载、导电聚合物复合、介孔结构设计及表面官能团修饰等策略,有效提升活性物质转化效率、抑制软化脱落、延长深循环寿命。文献[144]采用水热法将 $\beta-PbO_2$ 纳米棒负载于稻壳基多孔碳,制备RHC/ $\beta-PbO_2$ 复合材料,添加1.2%时,铅炭电池0.05 C放电容量达3.31 Ah,较对照电池提升19.9%,1 C循环200次后容量保持率86.8%。文献[145]通过氧化聚合法制备亲水性聚苯胺/氧化石墨烯复合材料(0.45%),

0.1 C 初始放电容量达 3.55 Ah, 较对照电池提升 63.5%, 1 C 放电容量为 0.61  $C_{10}$ , 100 次循环后容量保持率仍为 98.8%。文献[146]采用软模板法制备介孔  $\text{SiO}_2$  纳米球, 介孔结构提供质子传输通道、表面羟基作为质子储库, 添加 1.8% 的电池 0.1 C 初始放电容量达 3.36 Ah, 较对照电池提升 37.3%, 120 次循环后容量保持率达 124.5%。文献[147]通过浓硝酸氧化改性科琴黑, 引入酸性含氧官能团, 添加 0.2% 的电池 HRPSoC 循环寿命达 60599 次, 较对照电池提高 460%, 0.1 C 初始放电容量提升 112.9%。文献[148]通过干法混合压制成型工艺制备正极板, 引入聚四氟乙烯作为黏结剂, 添加 5% PTFE 时, 0.5 C 循环寿命达 222 次, 较干法未添加样品 (100 次) 提升 122%。

在电解液添加剂研发方面, 采用导电聚合物网络构建、功能分子界面调控及双电解质体系设计等策略, 有效提升离子传输效率、抑制副反应、拓宽电化学窗口, 显著改善电池循环稳定性与能量密度。文献[149]在  $\text{SiO}_2$  凝胶电解液中添加磷酸三乙酯, 调控  $\text{Pb}^{2+}$  沉积行为, 促进细小  $\text{PbSO}_4$  晶体形成, 抑制不可逆硫酸盐化; 同时构建界面保护层抑制析氢副反应, 优化界面电场分布, 实现  $\text{Pb}^{2+}$  均匀沉积, HRPSoC 循环寿命从 4719 次提升至 8943 次。

在板栅研发方面, 主要进行了多元合金化设计与腐蚀层结构调控。文献[150]发现, 在合金中引入 Sr 可提高析氧过电位、降低腐蚀速率, 并通过调控  $\text{PbSO}_4$  晶体生长形成致密有序的腐蚀层, 显著提升耐蚀性与循环寿命。

## 5.2 关键技术

在关键技术方面, 中国在铅蓄电池领域也取得了多项重要进展。在负极添加剂技术方面, 文献[151]开发了一种三组分复合添加剂, 由磺化改性木质素磺酸盐、氧化石墨烯-碳纳米管杂化导电剂和改性腐殖酸-硼酸混合物组成, 实现模板调控、导电增强、界面保护等多重功能, 电池循环寿命达 2234 次, 析氢量仅 2 mL。文献[152]采用分段热解工艺, 将铅盐、熔盐与农林生物质混合后经低温和高温热处理, 实现碳气凝胶构建与铅单原子/纳米颗粒负载, HRPSoC 循环寿命达 20342 次, 80% DoD 深循环 150 次后容量保留率 93.3%。文献[153]以桑蚕茧壳与植物碳材料复合为生物炭基质, 经石墨烯改

性、氮掺杂和孔结构调控, 构建三级孔道互穿结构, 负极内阻仅 0.11 m $\Omega$ , 循环寿命达 1024 次。负极添加剂向模板调控、导电增强与界面保护等多功能方向发展, 通过原子级负载、孔道结构设计和表面功能化等策略, 有效抑制析氢、缓解硫酸盐化、提升循环稳定性。

在正极铅膏技术方面, 文献[154]开发了一种碳晶材料, 经碳源-催化剂复合前驱体制备、纳米模板真空浸渍、两步碳化、酸法去模板工艺制得, 兼具纳米纤维形态与类石墨层状结构, 添加 0.6% 时, 电池首次放电比容量达 102.14 mAh/g, 0.5 C 循环 100 圈后容量保持率 98.34%。文献[155]开发了一种高活性物质利用率正极铅膏, 通过添加磺酸基聚噻吩衍生物, 利用其电子和离子双导电特性, 显著降低电池内阻, 循环 400 次后剩余容量达 20.8 Ah, 较对照电池提升了 27.6%。正极铅膏由传统导电添加剂转向结构、导电、活性一体化, 通过纳米纤维网络构建、双导电体系设计等策略, 有效提升活性物质利用率、抑制软化脱落、延长循环寿命。

在板栅技术方面, 文献[156]通过多层梯度结构设计, 开发出铝基铅合金/掺钴包碳纤维粉- $\alpha$ - $\text{PbO}_2$  复合正极板栅, 利用铝的低密度和高导电性, 实现质量减轻 50%、抗拉强度提升 34%、导电性提高 28% 以上, 100% 放电深度下循环寿命延长 25%。文献[157]采用微波烧结结合超声空化工艺, 制备 CNT 强化铅基板栅, 实现碳纳米管在铅基体中的均匀分散与界面强结合, 显著提升材料强度与韧性。文献[158]以 Ba、Yb 复合微合金化技术为核心, 开发出低锡 (0.3%~0.6%) 耐高温板栅合金, 在晶界形成 Ba-Pb-O 复合氧化物、表面重构 Yb-Sn- $\text{O}_2$  致密钝化膜, 60℃ 高温下腐蚀速率降低 50% 以上。文献[159]采用高分子聚合物正系数温度材料 (PPTC) 替代传统铅合金, 经浇铸和表面电沉积铅制备正极板栅, 年腐蚀深度降至 1.85~1.92 mm/a, 高温浮充寿命达 9 次, 比容量提升至 3.57 Ah/kg。文献[160]采用 TA2/TA3 钛合金经拉网成型, 研发了厚度仅 0.1~0.18 mm 的超薄钛基板栅, 结合锡铈氧化物涂层与电镀铅层, 板栅重量仅为铅板栅的十分之一, 能量密度提升至 70 Wh/kg 以上。上述技术表明, 板栅从传统铅合金向轻质化、复合化、功能化方向发展。

### 5.3 集成示范

2025年,国内铅炭电池储能集成示范项目加速落地,应用场景从电网侧共享储能拓展至新能源配套、通信基站及虚拟电厂等领域。其中,宁夏银川吉洋绿储200 MW/400 MWh共享储能电站并网,刷新国内电网侧铅炭储能规模纪录,系统循环寿命达6000次以上。山东泰安46 MW/92.16 MWh农光互补铅炭储能项目同步并网,探索“储能+农业”融合发展模式。浙江移动依托5000个通信站点建成了250 MWh储备一体铅炭储能系统,可基于调峰调频需求响应、用电需求预测及智能平衡调度完成资源统筹联动,实现能源供需平衡、能源利用提升和节能降碳。另外,河南漯河综合智慧零碳电厂储能项目完成EPC招标,建设规模165.6 MW/1019.216 MWh。天津泰达综能基于增量配电网的吉瓦时以上长时储能电站项目完成储能系统采购,规模174 MW/1034 MWh。昆工科技发明了高导电铝基铅合金复合材料及其半固态/固态连续挤压包覆技术,开发了具有长时储能特点的铝基铅炭电池,可适配多元储能场景,并开始示范应用。总体上,2025年我国铅炭电池储能示范项目呈现出从用户侧向电网侧、从单一场景向多元融合加速拓展的趋势。

## 6 锂离子电池

锂离子电池具有能量密度高、效率高、响应快、技术成熟等优点,是目前装机容量最多的电力储能技术;但存在热失控风险高、低温性能下降、回收处理复杂等挑战。2025年,锂离子电池在规模化应用基础上进一步向高安全、低成本和长寿命方向发展。液态锂离子电池持续主导市场,磷酸铁锂电池是目前储能锂电池的主流技术路线,500 Ah及以上大容量电芯正加速研发和应用,固液混合储能电池(半固态)在多地开展工程示范。总体来看,锂离子电池储能技术正由单体性能优化向“材料-结构-系统”多尺度协同发展转变,储能系统向增加时长与大容量方向快速演进。

### 6.1 基础研究

材料体系方面,磷酸铁锂电池凭借其安全性与成本优势保持储能锂电池的主导地位,其正极材料为磷酸铁锂,负极材料为长寿命人造石墨。在正极材料方面,文献[161]研究了通过 $Ti^{4+}$ 离子掺杂调控

磷酸铁锂正极材料的结构与传输行为,在不显著改变材料晶体结构和形貌的前提下,优化了锂离子扩散路径和电荷转移过程,显著提升了材料的倍率性能和电化学活性。文献[162]以改性碳纳米管为基底,通过调控成核驱动力实现磷酸铁锂在其表面的非均匀成核生长,并在高温热解过程中构建“树根状”导电网络结构,显著提升材料的电子传导能力,并在高倍率下仍表现出优异的容量保持能力。文献[163]针对废旧磷酸铁锂直接再生过程中晶体通道受损和电导率不足等问题,提出了Li位缺陷和Fe位缺陷的定向修复策略,有效改善了再生材料的导电性和循环稳定性,为退役磷酸铁锂正极材料的高值化再生提供了新思路。

负极材料方面,文献[164]系统解析了磷酸铁锂电池中石墨负极的析锂行为,提出了双层石墨负极结构设计可有效抑制电极内部锂的析出,显著提升了电池的循环寿命,为负极结构优化提供了新策略。文献[165]提出了基于正负极协同的全生命周期预锂化策略,在负极侧采用高活性联苯锂与功能添加剂构建稳定的SEI层,在正极侧利用硼氮双掺杂碳负载的异质催化剂促进锂释放,有效补偿了初始锂损失,显著提升了电池循环稳定性。

电解液和隔膜方面,文献[166]设计了一种基于2-甲基四氢呋喃的弱溶剂化醚类电解液,通过削弱锂离子溶剂化结构并抑制共嵌入反应,显著改善了界面离子传输效率,提升了电池的低温倍率性能和循环稳定性。文献[167]提出通过弱溶剂化溶剂与新型锂盐协同调控溶剂化结构的策略,有效促进了锂离子去溶剂化并改善界面兼容性,在高电压及高低温条件下展现出良好的循环稳定性。文献[168]开发了基于聚酰亚胺涂覆的复合隔膜,通过调控孔结构实现高孔隙率与优异热稳定性的协同优化,显著提升了电池的安全性。

在固态电池方面,文献[169]通过调控交联剂中环氧乙烷重复单元链段,揭示了聚合物固态电解质离子电导率与力学性能之间存在由配位与限域效应共同影响的非线性关系,并成功制备出兼具高机械强度与优异电化学性能的聚合物电解质,为高性能固态聚合物电解质的分子设计提供了材料范式。文献[170]通过构建聚合物离子液体单体并引入三齿交联剂调控 $Li^+$ 配位环境,制备出兼具高热稳定性、宽电化学窗口和高离子电导率的阻燃型固态电

解质, 为高安全长寿命固态电解质设计提供了新思路。目前, 推动固液混合锂离子电池向全固态锂离子电池发展, 已成为重要的研发方向。

## 6.2 关键技术

锂离子电池电芯技术正朝着大容量、构网型、高安全及智能化方向加速演进。在电芯本体技术方面, 500 Ah 以上大容量电芯加速研发和应用, 多家企业已实现 500 Ah 级以上储能电芯量产, 单集装箱系统容量突破 6 MWh, 电芯体积能量密度最高超过 400 Wh/L。阳光电源基于叠片工艺开发出 684 Ah 大容量电芯, 并通过全液冷碳化硅 PCS 提升系统效率; 宁德时代通过材料体系优化与极片工艺升级, 将 587 Ah 电芯体积能量密度提升至 434 Wh/L, 并推出单机容量达 9 MWh 的储能系统; 海辰储能则通过宽幅厚涂布、三维气道一体化顶盖结构及高压等压注液等工艺, 实现了 1175 Ah 级长时储能电芯的规模化制造, 并进一步向 1300 Ah 级长时储能电芯迈进。比亚迪推出了单体容量达到 2740 Ah 大容量储能电池电芯, 为目前量产单体容量最高的大容量电芯。与此同时, 固态电池技术加速从实验室研究向工程化过渡, 混合固液电池进入批量交付阶段。卫蓝新能源发布 314 Ah 级混合固态电池并实现量产, 通过纳米固态电解质与原位固化技术的结合, 显著提升了电池的安全性、热稳定性及循环稳定性, 正在开发 587 Ah 级别的混合固液电池。

在安全技术方面, 锂离子储能电池已形成以材料自身安全、电芯结构设计与系统防护为核心的多层级安全技术体系, 阻燃电解液、高稳定隔膜、热抑制结构及热电分离设计等关键技术实现工程化应用, 显著提升了电池系统的安全边界。电池热管理是提升储能系统效率和安全性的关键技术, 一体化液冷散热系统成为行业发展的趋势, 中国科学院物理研究所与中国时代发布了电芯中心液冷技术, 实现了电芯温度的均一化和快速控制。基于多源传感的安全预警技术快速发展, 实现了通过温度、压力、气体及声学信号的融合监测对热失控的提前识别与主动干预。同时, 随着人工智能技术的引入, 储能系统智能运维成为新的技术重点。多家企业开发基于大数据与 AI 模型的储能管理系统, 实现电池状态精准预测与运行优化, 有效提升热失控预警准确率、降低 SOH 估算误差, 并进一步提高储能电站的整体运行效率和均衡能力。

## 6.3 集成示范

2025 年锂离子电池储能百兆瓦级项目已常态化, 集成示范进一步向超大规模、构网型应用及新型电池技术示范方向发展, 在系统容量、技术创新及应用场景拓展方面取得重要突破。内蒙古包头卜尔汉图电网侧储能电站成功并网, 规模达 400 MW/2400 MWh, 批量应用 587 Ah 大容量电芯及 7 MWh 级储能系统, 成为大电芯与大容量系统规模化应用的典型工程。在构网型储能方面, 内蒙古阿荣旗构网型储能电站建成投运, 终期规模达 1 GW/4 GWh, 成为目前国内规模最大的构网型储能电站, 标志着构网型储能由示范验证阶段迈向大规模应用阶段。在固态电池储能方面, 清陶牵头参与的内蒙古乌海 200 MW/800 MWh 半固态锂电池储能项目正在推动示范应用, 为我国目前装机规模最大的半固态锂电池电网侧独立新型储能项目; 广东汕尾 200 MW/400 MWh 固液混合锂离子电池储能系统建成投运, 通过拓扑及控制策略创新实现储能系统多功能复合型应用, 标志着我国固态储能技术从示范应用迈入规模商业化运营阶段。总体来看, 锂离子电池储能集成示范正从单一能量存储单元向电网关键调节与支撑装备转变, 固态电池储能技术规模化应用迈向新台阶, 为新型能源体系与新型电力系统建设提供了重要支撑。

# 7 液流电池

液流电池具有安全性高、循环寿命长、容量与功率解耦等优点, 在长时大规模、高安全储能技术领域有广泛的应用前景; 但存在能量密度较低、系统较复杂、材料价格波动大等挑战。2025 年, 以钒液流电池为代表的液流电池储能技术从工程示范快步迈向规模化推广应用。电解液、电极材料、离子交换膜材料取得重要进展, 液流电池正从示范应用阶段逐步迈向商业化推广阶段, 其大规模应用能力得到了进一步验证。

## 7.1 基础研究

在电解液方面, 文献[171]通过系统研究全钒液流电池正极电解液中五价钒离子的溶剂化结构随温度变化的演化过程, 阐明了正极电解液沉淀析出机理, 并据此提出了高稳定性钒电解液设计策略。在高能量密度电解液方面, 文献[172]通过在溴电解液中引入胺类化合物作为溴清除剂, 将电化学反应中产生的溴单质 ( $\text{Br}_2$ ) 转化为溴代胺类化合物,

实现了从 $\text{Br}^-$ 到 $\text{Br}^+$ 的双电子转移,提升了电池能量密度。同时,超低的溴浓度降低了电解液腐蚀性,提高了电池寿命。

在电极材料方面,研究者提出了多种电极优化策略,旨在降低活性氧化还原电对的反应势垒、加速电荷转移与离子传输,并缩短活性物种的扩散距离。文献[173]揭示了富含空位的 $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 催化剂加速钒氧化还原电化学电荷转移过程,全钒液流电池在 $300\text{ mA/cm}^2$ 下具有80.8%的能量效率和稳定的1000次循环寿命。

在离子传导膜材料方面,文献[174]开发出一种新型的界面交联策略,制备出厚度仅为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的高稳定性超薄聚合物膜材料,将全钒液流电池的工作电流密度提升至 $300\text{ mA/cm}^2$ 。文献[175]开发了系列阴离子选择性共价三嗪骨架膜,其具备密集的亚纳米级离子传输通道和均匀的微孔分布,能够有效缓解电荷不对称效应,并为阴离子提供高效的传导路径。该膜构建的中性水系有机液流电池 $500\text{ mA/cm}^2$ 电流密度下能量效率为50.4%。文献[176]设计出一种支化型聚合物膜,该膜通过构建微相分离与自具微孔相结合的双重离子通道,展现出优异的离子电导率,并成功应用于水系有机液流电池中。

## 7.2 关键技术

在全钒电解液方面,钒电解液产能已接近50万立方米,钒电解液产业的规模化效应正加速显现。在商业模式上,电解液租赁模式持续深化。未来,钒电解液技术将围绕“短流程、高浓度、低成本、宽温域”的技术路线发展。

在离子交换膜方面,国内企业依托自主核心技术,相继实现了全氟磺酸离子交换膜的规模化制备与稳定供应,国产替代进程显著加速,国产膜市场份额合计超过90%。非氟多孔离子传导膜的产业化也取得了显著进展。欧洲化学品管理局(ECHA)正式发布修订后的全氟和多氟烷基化合物(PFAS)限制提案,对含氟材料的管控趋严。随着全球对PFAS类物质监管力度加大,非氟膜的海外市场空间将进一步打开。

## 7.3 集成示范

液流电池因其功率单元和能量单元可独立设计、高安全等优势,已成为大规模长时储能的主流技术之一。2025年全年,液流电池储能项目已投运46个,新投入运行的液流电池储能电站装机超过600 MW,

涵盖了全钒液流电池、全铁液流电池、铁铬液流电池和水系有机液流电池等多种技术路线。其中,全球最大的200 MW/1 GWh全钒液流储能项目在新疆吉木萨尔县实现全容量投产运行,内蒙古磴口县400 MW/1.6 GWh“全钒液流+磷酸铁锂”混合储能项目成功并网,配有高功率密度液流电池1 MW/5 MWh,单电池额定电流密度高达 $500\text{ mA/cm}^2$ ,内蒙古鄂尔多斯的全球首个5 MW/20 MWh水系有机液流电池储能项目并网运行,该项目采用195 MW磷酸铁锂电池和5 MW水系有机液流电池,共计200 MW/800 MWh的电网侧独立储能系统。在技术标准方面,国内首个液流电池产品碳足迹量化方法与要求标准《温室气体产品碳足迹量化方法与要求全钒液流电池电解液》发布。《全钒液流电池电堆通用要求和测试方法》和《全钒液流电池用电解液测试方法》国际标准新提案正式立项。

# 8 钠离子电池

钠离子电池因资源丰富、降本潜力大、安全性好以及低温性能优势,受到越来越多关注,但和锂离子电池相比,存在能量密度偏低、产业链尚不成熟等挑战。2025年,中国钠离子电池发展明显加快,逐渐从实验室研究走向产业化应用。在高性能正极材料、固态电解质以及系统集成示范等核心领域,取得了实质性进展,同时呈现出应用场景逐渐明确、产业链不断完善、产业化明显提速的特点。

## 8.1 基础研究

钠离子电池基础研究主要围绕正极材料结构稳定性、硬碳负极储钠机制以及全固态电解质体系展开。其中,正极材料仍以层状氧化物、聚阴离子化合物和普鲁士蓝类材料为核心研究方向。

在层状氧化物正极方面,文献[177]通过Ti取代优化局域电子结构,抑制不可逆相变和Jahn-Teller畸变,水性黏结剂制备的正极在 $1\text{ A/g}$ 下循环500次仍保持96%以上容量。文献[178]采用多元素协同调控策略制备LFANMT( $\text{NaLi}_{0.05}\text{Fe}_{0.04}\text{Al}_{0.01}\text{Ni}_{0.4}\text{Mn}_{0.4}\text{Ti}_{0.1}\text{O}_2$ ),实现186 mAh/g比容量和608 Wh/kg能量密度,并通过“应力保护层”和“电子缓冲层”提升结构稳定性和空气耐受性。文献[179]利用 $\text{Ca}^{2+}$ “离子支柱”增强机械稳定性,使单晶正极深度脱钠体积变化仅约4%,循环1000次后容量保

持约80%。文献[180]利用先进TEM技术多维表征锰基层状氧化物,揭示出充放电过程中的动态结构和化学变化。

聚阴离子正极方面,文献[181]通过调控Na位化学计量比构建异质结构,实现 $m$ -NFP向活性相NFPP完全转化,异质结构增强结构稳定性和电荷传输动力学,高倍率循环性能优异。文献[182]设计嵌入多孔碳框架的NVFP-VO双相异质结构正极,通过Fe掺杂提高导电性和多孔碳缓冲体积变化,在半电池循环超过10万次,软包电池能量密度达153.4 Wh/kg。

普鲁士蓝类材料方面,文献[183]合成Ni-Mn双金属PBAs,通过调节Ni/Mn比例优化充放电性能, $\text{Ni}_{0.1}\text{Mn}_{1.9}\text{HCF}$ 在500 mA/g循环100次后容量保持70.5%。文献[184]通过调控氮配位过渡金属局域电子结构,提升PBAs晶体稳定性,5 C循环1000次后容量保持率超过91%。

负极材料方面,硬碳仍为主流。文献[185]通过杂原子调控孔结构和界面优化,氧杂交交联硬碳(HC—O)微孔丰富且含羰基,Na//HC—O半电池可逆容量352.9 mAh/g,初始库仑效率88%,全电池循环300次容量保持86.1%。文献[186]利用甘蔗渣制备介孔为主硬碳,初始容量305.5 mAh/g,循环200次后容量保持96%。

全固态钠电池方面,文献[187]提出室温各向同性外延生长策略,在NVOFP正极表面构建均匀MOF外延层(MET-6),改善电解质稳定性,将PEO基电解质氧化电压提升至4.27 V。全固态电池在2.5~4.2 V范围内0.5 C循环300次,平均放电电压保持率达到97.9%,提出“低晶格畸变能+强界面吸附”的设计原则,为高压固态钠电池界面工程提供参考。

## 8.2 关键技术

2025年,钠离子电池关键技术研究从单一材料性能提升,进一步转向电极结构、界面稳定性和全电池工程化设计。首先,在高载量电极构筑方面,文献[188]提出一种无黏结剂连续导电网络电极结构,通过电纺/电喷协同工艺将活性颗粒稳定嵌入导电网络中,提高了高面容量电极的电子传输与结构完整性,为高能量密度钠离子电池电极制造提供了工程化思路。其次,在快充和长寿命方面,文献[189]通过构建超稳定碳负极,实现了钠离子

电池快速充电和长循环性能的同步提升,说明负极界面稳定性与离子传输动力学是提升快充性能的关键。在负极界面调控方面,文献[190]进一步从原子尺度进行界面工程设计,增强了钠离子电池负极的稳定性和能量密度,体现出界面化学调控对提升全电池寿命的重要作用。高压正极/聚合物电解质界面保护是固态钠电池发展的关键技术之一。此外,文献[191]通过对钠离子软包电池在不同截止电压下的失效机制进行分析,指出高电压循环会加速容量衰减和阻抗增长,尤其会加剧正极材料退化,为实际电芯设计中的电压窗口优化和寿命管理提供了依据。

2025年,中科海钠推出了海星钠离子电池,其电芯能量密度突破165 Wh/kg,能在20~25 min快速完成100%充电,且快充模式下循环寿命仍能达到8000次,结合-40~45℃宽温域稳定放电的性能优势,可用于储能系统和商用车动力。同时,宁德时代推出Naxtra钠电池品牌,中国石化与LG Chem合作开发材料,目前50余家企业推出了近70个型号产品。

## 8.3 集成示范

2025年,中国钠离子电池示范应用加速,标志着技术向规模化应用的重要跨越。云南丘北200 MW/400 MWh储能电站全容量并网,其中40 MWh钠离子电池由中科海钠提供,是全国最大构网型锂-钠混合储能电站,也是首个高低倍率复合运行的商业化钠电项目。中国华能集团20 MWh聚阴离子钠电池项目开工建设,标志着聚阴离子型钠离子电池技术在规模化储能领域迈出关键一步。广西南宁伏林电站二期扩容至50 MWh,年循环可达600次,为清洁能源消纳和能源结构转型提供支持。总体上,钠离子电池示范项目主要集中在储能、低速电动车、启停电源和在寒冷地区应用。虽然能量密度仍低于锂电,但资源丰富、低温性能好、安全性高、降成本潜力大,适合对安全、寿命和成本敏感的场景。

## 9 超级电容器

超级电容器具有功率密度高、充放电速度快、循环寿命长等优点,在短时高功率场景具有重要应用价值;但存在能量密度低、自放电率高、能量成本高等挑战。2025年,我国超级电容器技术继续

向高性能和规模化应用方向发展。基础研究从传统电双层储能向赝电容和多离子协同方向发展, 关键技术研究以新型电极材料和界面工程为研究重点, 多离子储能体系不断发展, 推动倍率性能和循环稳定性提升, 石墨烯、纳米碳材料及先进制造技术也促进了能量密度和功率密度的提高; 同时, 超级电容器在交通运输、电力储能、算力中心和电子设备等领域的示范和应用得到了长足发展。

### 9.1 基础研究

2025年, 超级电容器基础研究主要围绕新型赝电容材料、多离子储能机制、电解质与柔性器件等方向展开, 研究重点逐渐从传统电双层储能向高能量密度与高倍率协同提升转变。

在电极材料方面, 文献[192]通过氟辅助合成策略和温度调控制备出多相Cu-Ni化合物, 其中300℃煅烧样品在10 mV/s下比电容达到1026.0 F/g。基于该材料组装的电池-超级电容混合器件在350 W/kg功率密度下实现82.95 Wh/kg能量密度, 并在10000次循环后仍保持93.2%的电容。文献[193]构建了具有内建电场和富氧空位的NiO/NiCo-LDH异质结正极以及La掺杂Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>负极, 组装的非对称超级电容器在超过10 kW/kg高功率密度下仍可输出153 Wh/kg的高能量密度, 并展现出优异倍率性能和循环稳定性。文献[194]提出“黏结剂孔道工程”策略, 通过非溶剂诱导相分离在厚电极内部构建连通宏观孔道, 显著改善离子传输效率和低温性能, 在-40℃条件下仍可实现300 mW/cm<sup>2</sup>高功率输出。

在新型赝电容与多离子储能机理方面, 文献[195]报道了中国科学院工程热物理研究所提出SrZr<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3</sub> (SZY) 作为H<sup>+</sup>/OH<sup>-</sup>混合离子导体电极, 其比电容达到1164.9 F/g, 经Mo掺杂后提升至1467.7 F/g。研究表明, 该体系通过构建连续H<sup>+</sup>/OH<sup>-</sup>传输网络, 大幅降低离子迁移活化能, 相较传统氧离子扩散机制显著提高离子传输速率和倍率性能。文献[196]报道了中国科学院上海应用物理研究所利用辐照还原法制备氧空位丰富的Ni-rMoO<sub>3-x</sub>电极, 在1 A/g下比电荷达到881 C/g, 并在10000次循环后仍保持98.5%的容量, 说明缺陷工程可有效增强MoO<sub>3</sub>基赝电容材料活性。此外, 文献[197]将高熵钙钛矿La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.1</sub>Ni<sub>0.4</sub>Cu<sub>0.1</sub>O<sub>3</sub>与还原氧化石墨烯复合, 在1 A/g下比电容达到

458.6 F/g, 是单一高熵氧化物的1.9倍。文献[198]则通过Ca掺杂LaCrO<sub>3</sub>调控氧空位浓度, 使材料比电容提高至306 F/g, 并在5000次循环后保持94%的库仑效率。这些研究表明, 异质结构、氧空位调控和多离子协同储能机制已成为提升赝电容性能的重要方向。

在电解质与柔性器件方面, 文献[199]开发了一种新型凝胶聚合物电解质, 通过调控Stern层电位梯度和离子分布抑制高电压下电解液分解, 使准固态超级电容器在3.5 V条件下实现43.87 Wh/kg能量密度和22.66 kW/kg功率密度。文献[200]利用逐层原位沉积技术构筑聚苯胺-聚乙烯醇三明治结构水凝胶, 实现1604 mF/cm<sup>2</sup>的高面电容和142.60 μWh/cm<sup>2</sup>的能量密度, 并在1000次循环后保持95%的电容。文献[201]则基于可逆交联聚合物构建了全固态柔性超级电容器, 其器件在100%应变下经历1200次拉伸后仍保持91.7%的电容, 并在12000次充放电循环后保持96.1%的初始性能, 展示了柔性和可持续储能器件的重要应用潜力。

在隔膜与混合型电容器方面, 文献[202]制备了高湿润性再生纤维素隔膜, 纳米裂纹结构使其孔隙率达到70.2%, 电解液保留率达到329%, 组装的超级电容器在10000次循环后仍保持99.5%的电容。文献[203]通过在隔膜中引入醋酸纤维素和rGO, 制备出rGO/CA/PVDF压电复合隔膜, 其孔隙率达到90.5%, 离子电导率为0.0728 S/m, 并显著提升超级电容器循环稳定性。文献[204]则通过电极结构设计与低凝固点电解质协同优化, 构建风信子状Ti<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>MXene@CC正极, 实现了-40℃极端低温下稳定运行, 为航空航天等极端环境储能应用提供了新思路。

### 9.2 关键技术

2025年, 超级电容器关键技术研究主要集中在高容量储能、高频响应、微型化器件以及混合储能系统等方向, 研究重点逐渐从单一材料性能提升转向材料-器件-系统协同优化。

在高容量与高倍率储能方面, 文献[205]通过调控糠树残渣生物炭的微观结构与化学组成, 构建出富含活性官能团的分级多孔结构。所得SCR-HPC-900电极在0.5 A/g下比电容达到415.6 F/g, 组装的对称超级电容器在100000次循环后仍保持100.8%

的电容,并在有机电解液中实现45.6 Wh/kg能量密度和41750 W/kg功率密度。文献[206]在原子尺度上可视化了锂离子在二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene中的插层行为,发现富氧终止基是提升MXene储锂性能的关键因素,揭示了离子脱溶剂化和电极界面相互作用在高性能储能器件设计中的重要作用。文献[207]则通过扩大电极界面电势差( $\Delta\phi$ ),实现了电容与工作电压的同步提升。在钠基醚类电解液中,部分脱溶剂化过程使溶剂化数由2.1降低至0.6,从而提升孔内限域双电层储能效率,组装的混合钠离子电容器软包电芯能量密度达到40 Wh/kg,并在51 C高倍率下稳定循环30000次。

在高频响应与微型器件方面,文献[208]通过微纳加工和锁相放大技术精准测定了超级电容器动态响应极限,提出“介电-电化学”异质电容概念,并开发出特征频率超过1 MHz的高频超级电容芯片。研究通过电极完全平整化与寄生电容屏蔽技术,大幅拓展了超级电容器在交流滤波和高频脉冲领域的应用范围。进一步提出了混合电化学电解电容器设计,通过将电化学反应与介电效应非对称耦合,获得了44 kHz特征频率和800  $\mu\text{F}/\text{cm}^3$ 体积比容量密度。

在柔性器件与系统集成方面,文献[209]利用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene/羟基化纳米纤维素/碳纳米管复合墨水,通过3D打印制备全固态柔性微型超级电容器。纳米纤维素作为流变调节剂提高了墨水可打印性,而碳纳米管与MXene的协同作用增强了电子传输和柔韧性,展示了3D打印在微型储能器件制造中的潜力。此外,文献[210]还开发了超级电容与电池耦合的混合储能牵引供电系统,可将城市轨道交通中的母线电压波动控制在2 V以内,实现稳定能量补偿。在材料-器件集成方面,文献[211]PANI/ $\text{MnO}_2$ /rGO-P三元复合电极通过界面协同和导电网络优化,在0.5 A/g下比电容达到635 F/g,并在5000次循环后保持82%的容量。

在关键材料国产化方面,中轻特材联合中国造纸院完成超薄型超级电容器隔膜关键技术研发及产业化。国产隔膜内阻由0.125 m $\Omega$ 降低至0.116 m $\Omega$ ,不仅降低约8%的综合成本,也推动全球超级电容器隔膜市场价格下降超过35%,进一步提升了我国超级电容器产业链自主化水平。

### 9.3 集成示范

2025年,超级电容器在系统集成与工程化应用方面取得重要进展,应用场景由传统交通运输和工业领域进一步拓展至电网调频、轨道交通、人工智能和核聚变等新兴领域,体现出超级电容器在高功率瞬态响应和长寿命储能方面的独特优势。

在电网调频与储能领域,规模化发展趋势明显,多个百兆瓦级示范项目相继投运。华能伊敏电厂16 MW $\times$ 10 min全超级电容储能调频项目正式运行,包含6个储能单元,是目前全球容量最大的全超级电容储能调频工程。山西偏关百兆瓦级独立调频电站一期总装机100 MW,其中配置58 MW超级电容储能系统,并采用“超级电容+锂电池”混合架构:超级电容负责毫秒级快速调频,锂电池承担分钟级调峰任务,实现“快慢协同”。系统可实现0.001 s超快响应,并在-40 $^{\circ}\text{C}$ 下保持85%容量,有效降低电池负荷和全生命周期成本。广东顺德实证基地则建设了我国首个百兆瓦级“超级电容+锂电”混合储能商业化项目,总规模达200 MW/305 MWh,其中配置50 MW/5 MWh超级电容储能系统和150 MW/300 MWh磷酸铁锂储能系统,为可再生能源并网和新型电力系统建设提供了重要示范。辽宁沈抚示范区也启动了东北地区首个火电机组与超级电容储能调频融合项目,标志着火电灵活性改造取得新进展。

在轨道交通领域,研究人员提出基于超级电容与电池混合的列车牵引供电系统,并针对广州地铁4号线短站距工况进行模拟研究。结果表明,单一储能装置难以同时兼顾响应速度和能量密度,而混合储能系统能够将母线电压波动控制在2 V以内,实现稳定能量补偿和电压调节,为城市轨道交通节能运行提供了技术基础。

在人工智能与数据中心领域,超级电容器开始应用于AI服务器和数据中心瞬态功率补偿。江海股份已为英伟达GB300服务器批量供货,其服务器BBU采用252只超级电容器集成模组,单柜功率超过180 kW,响应时间小于10 ms,并形成由牛角电容、滤波模块和超级电容组成的三级供电体系。与此同时,公司已布局混合型和全极耳超级电容器生产线,进一步推动超级电容器在高端算力设备中的应用。

在核聚变领域,由中国电气装备、中国核工业

集团等联合研制的“中国环流三号”300 MVA脉冲供电系统完成测试验收。该系统采用高压级联超级电容储能技术,在供电能力和运行效率方面实现提升,标志着我国在可控核聚变脉冲供电装备领域取得重要突破。

此外,全球首个电力储能领域超级电容器国际标准在国际电工委员会(IEC)成功立项,表明我国超级电容器技术正在从工程应用逐步走向国际标准制定。

## 10 其他新技术

### 10.1 液态金属电池

液态金属电池突破传统电池构型,采用液态金属与无机熔盐作为电极和电解质,具有高安全、长寿命、低成本等优势,在可再生能源并网等中长期储能领域具有广阔的应用前景。2025年度,我国学者围绕液态金属电池材料设计、器件开发和系统集成等方面开展了系统深入的研究,并取得了系列重要进展。开发了可持续、低温化的Na基/Ca基液态金属电池新材料体系;突破了大容量电池液-液界面稳定调控技术,构建了2000 Ah级液态金属电池单体;开发了电池模组电-热耦合高效管理技术,实现了液态金属电池标准化模组构建与系统集成设计,并建设了液态金属电池自动化产线,为液态金属电池的规模应用奠定了基础。

在基础研究方面,研究者提出了材料的筛选设计新方法,开发了系列低温化高性能液态金属电池创新体系,进一步提升了液态金属电池的性能。文献[212]设计了一种低熔点(324.4℃)的混合阳离子熔盐电解质LiBr-LiCl-KBr和低熔点Bi-Sn合金正极,构建的Na||Bi<sub>7</sub>Sn<sub>3</sub>电池在400℃下循环700次后,容量保持率高达95%。文献[213]设计了一种具有双重吸附和转化功能的高电压Te-Cu正极,有效抑制了Te及其放电产物在熔盐电解质中的溶解,降低了电池极化阻抗,从而提高了Te正极的利用率并加速了电极动力学,构建了高能量密度Li||Te-Cu电池新体系。文献[214]采用合金化策略,设计实现了Se-Sb合金正极,结合金属锂负极构建的Li||Se<sub>7</sub>Sb<sub>3</sub>液态金属电池放电电压高达1.65 V,同时显示出良好的循环稳定性。文献[215]采用具有极高锂离子扩散系数的Bi-Sn合金作为正极材料,通过Bi-Sn合金化设计,降低电池充放电电极化电

压,并提高锂的化学反应计量比。基于该体系构建的Li||Bi-Sn液态金属电池,在100 mA/cm<sup>2</sup>的电流密度下,实现了91.39%的能量效率和93.91%的材料利用率。文献[216]开发了一种Bi-Cd双活性合金正极,其中Cd的加入形成了液态通道,从而提高了电池的倍率性能和热冲击稳定性。构建的Li||LiFLiCl-LiBr|Bi<sub>4</sub>Cd<sub>6</sub>电池在800 mA/cm<sup>2</sup>的高电流密度下,仍能保持其初始容量的70%。文献[217]通过用固体颗粒取代传统的液态正极,Ca||Sb(s)体系的放电容量达到715 mAh/g,提升318%,电极成本(19.1美元/kWh)降低了71%,进一步推动了高丰度液态金属电池材料体系的研究进展。在上述研究基础上,文献[218]提出了一种基于人工智能的液态金属电池能量密度估计方法,构建了包含2158组数据和41个特征参数的液态金属电池数据库,采用高斯过程回归模型预测其能量密度,并比较了不同核函数的性能,揭示了Sb摩尔分数、平均电离能和平均熔点等因素对电池能量密度的影响规律,为高比能液态金属电池材料体系设计提供了重要理论指导。

在关键技术方面,液态金属电池内部反应机制解析是当前重点研究方向之一,研究者通过模拟仿真分析电池内部多场耦合传输行为,解析电池产热特性,突破了电池服役特性调控和模组构建关键技术。文献[219]从电极扩散、熔盐中物质传递以及界面电化学反应等电化学过程出发,基于数值解析方法和分数阶Pade近似方法,构建了液态金属电池机理模型,为电池状态估计与分析提供了重要基础。在液态金属电池安全特性分析与预警方面,文献[220]围绕大容量液态金属电池内部短路分析,建立了电化学反应-传热耦合模型,明确了液态金属电池内部短路时合金化反应放热为主的产热机制,并进一步提出了负极温升速率(超1℃/s)作为液态金属电池内部短路预警的可靠判据。文献[221]系统研究了液态金属电池在多种滥用条件下的电热行为与安全性,开展了振动、倾斜、外部短路和热冲击等实验,全面评估了电池的滥用安全阈值,为液态金属电池在极限条件下的安全性评估提供了理论依据。文献[222]基于混合高斯模型方法分析液态金属电池的老化状态,定量描述了容量突降发生前的数据细微变化,实现了对液态金属电池容量突降行为的提前预警。在大容量电池稳定性调控方面,文

献[223]提出了一种基于外部磁场的液态金属电池放电性能强化方法。在  $1000 \text{ mA/cm}^2$  的电流密度下,  $29.6 \text{ mT}$  的磁场可使放电电压提高  $74.5\%$ 。同时外部磁场还能快速修复短路的电池, 使其充放电性能恢复至短路前水平。文献[224]通过外部磁场或外部热环境来降低电池放电过程中的浓差极化, 从而提升电池的放电电压。在电池模组构建方面, 华中科技大学联合武汉吉兆储能科技有限公司开发了液态金属电池模组低功耗动态热管理控制方法与技术, 构建了标准化电池模组, 实现对模组内不同区域或不同电池单元的精准、差异化温度调控, 显著提升模组的性能一致性和循环寿命。

在系统集成与示范方面, 华中科技大学牵头承担了国家重点研发计划项目“兆瓦时级液态金属电池中长时储能技术”, 计划将于2027年建成兆瓦时级液态金属电池储能系统, 并在可再生能源并网中示范应用。此外, 武汉吉兆储能科技有限公司建成国内首条年产能  $10 \text{ MWh}$  的液态金属电池自动化中试产线, 为液态金属电池的规模应用奠定了基础。

## 10.2 热泵储电

热泵储电技术, 又称卡诺电池, 是通过逆向热力循环(热泵)将电能转换为热能并存储, 用电时通过正向热力循环(热机)将存储热能转化为电能的新型长时储能技术。该技术具有高能量密度、低成本和长寿命等优点, 已成为新型储能领域的重要方向之一。2025年我国在热泵储电研究持续推进, 在系统设计和性能优化、多应用场景耦合集成等基础研究方面进一步深化, 并且在关键部件和系统实验平台方面取得重要进展。

在基础研究方面, 系统结构与参数优化研究主要围绕不同循环构型的热泵储电系统展开。对于布雷顿循环构型系统, 文献[225]研究了采用分级压缩与等温压缩的回热式热泵储电系统, 发现两种方案均可显著降低压缩功并提升系统综合性能。文献[226]开展了超临界  $\text{CO}_2$  再压缩系统的热经济分析与多目标优化, 结果表明系统最优往返效率、能量密度和储能成本分别可达  $70.75\%$ 、 $36.88 \text{ kWh/m}^3$  和  $0.1082 \text{ 美元/kWh}$ 。在朗肯循环方面, 文献[227]研究了级联热泵驱动的超临界有机朗肯循环卡诺电池, 结果表明优化后热泵 COP 可提升约  $23.5\% \sim 26.9\%$ , 系统能量转换效率可达  $63.11\%$ , 储能密度可达  $13.9 \text{ kWh/m}^3$ 。在增强型优化循环方面, 文

献[228]构建了热泵-Kalina 循环卡诺电池系统, 结果表明其往返效率可得到显著提升, 且氨水质量分数为  $80\% \sim 90\%$  时更有利于系统性能提升。文献[229]研究了集成双压冷凝与双压蒸发技术的增强型卡诺电池系统, 结果表明其往返效率在不同气候区均高于传统系统, 提升幅度最大可达  $70.5\%$ 。文献[230]对补气增焓-抽气回热型卡诺电池进行了可行性分析, 表明复合强化循环可同时改善系统往返效率与经济效益。

在系统工质、储热/冷介质与单元研究方面, 相关研究主要围绕二氧化碳及混合工质特性、熔盐与冰浆等储热/冷介质, 以及相变蓄热单元与填充床蓄热结构展开。针对系统工质研究, 文献[231]研究了基于  $\text{CO}_2$  混合工质的跨临界热泵储电系统性能, 结果表明在  $10 \text{ MW}/8 \text{ h}$  规模下,  $\text{CO}_2/\text{R32}$  方案的平准化储能成本最低可达  $0.1655 \text{ 美元/kWh}$ 。针对储热/冷介质, 文献[232]对级联潜热储热器开展了二定律分析, 结果表明在冷热电联供工况下其往返效率上限较纯储电工况可提高  $2.1\%$ 。针对蓄热单元, 文献[233]对朗肯循环热泵储电系统中的翅片管潜热蓄热单元进行了优化, 结果表明当气相体积分数为  $83\%$ 、传热流体温差为  $20 \text{ K}$  时, 最大热流密度可达  $11877 \text{ W/m}^2$ 。文献[234]研究了  $\text{CO}_2$  热泵储能系统中储热罐温度匹配优化问题, 结果表明采用四储热罐配置时往返效率可提高至  $50.9\%$ 。

在动态特性与控制策略方面, 文献[235]研究了跨临界  $\text{CO}_2$  热泵储电系统的运行特性, 结果表明主要换热设备达到稳态  $95\%$  所需时间约为  $115 \sim 164 \text{ s}$ 。文献[236]研究了基于梯级相变储热/冷的卡诺电池冷热电联产系统变工况动态特性。文献[237]针对基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统开展了运行策略优化研究, 结果表明同时配置电储能与冷/热储能的方案经济性最好。文献[238]研究了风电并网场景下热泵储电系统的储能过程动态特性及控制策略, 闭环控制下  $10 \text{ MW}$  系统输入功率调节深度超过  $80\%$ , 动态响应时间由  $80 \text{ s}$  缩短至  $25 \text{ s}$ 。文献[239]研究发现引入热泵储电的工业园区分布式能源系统总运行成本在夏季和冬季可分别降低  $2.05\%$  和  $4.78\%$ 。

在系统耦合集成方面, 文献[240]提出了热集成热泵储电系统的三路径效率提升方法, 性能提升最高达  $220\%$ 。文献[241]发现集成抽汽再生的热泵

储电系统的往返效率和焓效率分别提高9.3%和15.6%。文献[242]研究表明热泵储电与甲醇分解反应耦合能够改善系统综合用能水平。文献[243]研究发现熔盐卡诺电池与600 MW亚临界燃煤电厂耦合的单位储热负荷最大调峰容量较火储方案提高69%。文献[244]提出了液冷数据中心余热驱动的跨临界CO<sub>2</sub>卡诺电池,在100 kW/5 h规模下热泵COP可达5.23、发电效率可达13.28%、往返效率可达67.64%。文献[245]发现余热梯级利用和多压布置有助于提升SCO<sub>2</sub>热泵储电系统热经济性。文献[246-247]研究表明耦合低温余热的热泵储电系统的功-功效率可达50%~120%。文献[248-249]筛选了耦合生物质电厂的热泵储电系统的最优工质,构建的12 MW耦合系统COP可达1.423、往返效率可达50.09%。对于复合储能与综合能源系统集成,文献[250]提出SOFC、SCO<sub>2</sub>发电循环与布雷顿热泵储电耦合的热电联产系统,能量最优效率达到70.47%。文献[251]研究发现液态空气储能与热泵储电混合储能系统耦合有助于发挥冷热储能链路互补优势。

在关键技术方面,2025年我国在热泵储电技术领域的实验平台和关键技术方面取得较大进展。在关键部件技术方面,文献[252]对基于有机朗肯循环的热泵储电系统开展了实验研究,在热源温度为90℃工况下,实验测得热泵子系统平均COP达到6.27、系统最高焓效率达到19.9%。文献[253]构建了10 kW级热集成卡诺电池实验系统,结果表明在近6 h充电、10 h以上储热和近6 h放电条件下系统最高功到功效率达到75.59%。在工程示范项目方面,国家电力投资集团完成兆瓦级超高温热泵储能中试项目全体系工程化验证;绿储科技与湖州工业控制技术研究联合建设的2 MW/600℃特高温热泵储能关键技术验证平台实现试运行。

### 10.3 重力储能

重力储能技术利用电能将重物提升至高处,将电能转化为重力势能;需要时重物被释放下落,带动发电机发电。该技术具有储能量大、寿命长、自放电率低、环境友好等优点,但存在能量密度低、需要特定地形或高大构筑物、响应速度慢等挑战。2025年,我国重力储能技术保持较快发展趋势,技术路线更加多元,研究内容更加贴近工程应用。研究重心由原理验证和方案构想,转向选址评价、

关键装备优化、并网控制以及工程化应用研究。重力储能与光伏电站、矿区综合能源系统、深井采油等场景的耦合研究不断拓展,凸显较强的场景适应性与应用潜力。

在基础研究方面,主要围绕重力储能系统构型、场景适配和大容量系统运行模式等开展研究。2025年重力储能技术发展的最大特点在于技术路线更加多元,相较于此前以斜坡式和竖井式为主的格局,活塞式、固体流式以及废弃矿井耦合式等新路线不断涌现。文献[254]建立了活塞式重力储能系统模型,分析了管道长度、活塞尺寸等对储能容量、效率和能量密度的影响。文献[255]提出面向大海拔高差地区固体流大规模重力储能技术,从资源禀赋、能量转换和投资成本等方面分析建设重力储能电站的可行性,拓展了依托自然高差建设重力储能的技术边界。文献[256]从废弃矿井资源再利用角度,梳理了矿井型重力储能、抽水蓄能和压缩空气储能等物理储能技术,提出井道深度、地下空间规模和储能适用性评价指标,为矿井型重力储能选址与场景适配提供了参考。

在系统耦合与应用拓展方面,文献[257]面向集中式光伏电站开展重力储能容量优化设计,结果表明,重力储能有助于提升光伏电站系统效率。文献[258]将废弃矿井重力储能纳入矿区综合能源系统,构建考虑阶梯碳-绿证互认机制的优化调度模型,结果表明,其可提高矿区可再生能源消纳率并降低碳排放。文献[259]提出“油气开采+重力储能发电”的新思路,利用抽油杆的重力势能在采油过程中实现电力储存,拓展了竖井式重力储能在深层油气开采场景中的应用。文献[260]针对百MWh级竖井式重力储能系统,提出重物块分级储存、最优路径运输和AGV协同运输方案,结果表明,在典型日净负荷功率波动下优化的重力储能系统重物储存及运输方案对电网平抑具有有效作用。

在关键技术方面,主要集中在并网控制、功率调节、结构优化和故障保护等环节。针对斜坡式重力储能系统中质量块离散切换引发的转速波动和并网波动问题,文献[261]提出基于自抗扰控制的并网控制策略;文献[262]针对停机阶段功率波动问题,提出转速外环分段PI参数控制方法;文献[263]比较了电励磁同步电机、双馈感应电机及多种功率控制策略,指出滑模控制在动态响应、稳态

精度和鲁棒性方面具有优势。电机控制方面,文献[264]通过复系数滤波器提高转子位置估算精度;文献[265]构建了改进滑模观测器和负载扰动观测器相结合的无传感器控制策略;文献[266]针对轴向磁通永磁同步电机定位转矩抑制开展研究,实现重物提升和释放过程的电能平顺性与可靠性提升。在结构与安全方面,文献[267]研究竖井式多轿厢运行过程中的气动阻力特性并提出导流罩优化设计;文献[268]提出基于纵向零序电压及其三次谐波分量的发电机定子匝间短路保护方法;文献[269]构建斜坡式重力储能两阶段选址决策框架,为斜坡式重力储能系统的科学选址提供了理论支持。

在集成示范方面,重力储能示范工程建设和工程化验证明显加快。在集成示范方面,重力储能示范工程建设和工程化验证明显加快。国家能源局2024年公布了56个新型储能试点示范项目,其中3个重力储能项目入选,分别是江苏如东26 MW/100 MWh重力储能项目、甘肃张掖17 MW/68 MWh重力储能项目和河北赤城60 MW/360 MWh重力储能项目。如东26 MW项目2025年完成主体工程建设并进入调试及并网冲刺阶段,是塔式模块化重力储能工程化应用的典型代表;张掖17 MW项目2025年完成地下三层和地上一层主体结构施工;赤城60 MW项目完成地勘和可研报告评审等工作,将采用竖井式方案。总体来看,我国重力储能示范尚未进入商业化阶段,但围绕斜坡式、竖井式、矿井式及耦合应用等多种路线,已经形成了从站点选址、关键技术攻关、系统设计到工程实施的全方位布局,为未来重力储能的推广应用奠定了基础。

#### 10.4 双离子电池

双离子电池采用独特的“双插层”机制,充电时,电解液中的阴阳离子(如 $\text{Li}^+$ 和 $\text{PF}_6^-$ )同时工作,分别嵌入到负极和正极储存起来;放电时,阴阳离子从电极中同时脱出并返回到电解液中。不同于常规电池技术,由于阴阳离子协同参与储能反应,且正极材料无需钴、镍等贵金属,因而具有成本低、工作电压较高、环境友好等优点,近年来受到了广泛关注与深入研究。2025年,我国学者在双离子电池电极材料、电解质及产业化等方面,均取得了重要进展。

在电极材料方面,石墨类正极材料在大尺寸阴

离子插层/脱出及溶剂共插层过程中易发生较大体积变化,从而导致石墨结构破坏与性能衰减<sup>[270-273]</sup>。文献[272]通过将酸性 $\text{LiH}_2\text{PO}_4$ 涂覆在天然石墨表面,一方面能够抑制电解液在正极表面的分解,另一方面通过 $\text{LiH}_2\text{PO}_4$ 与聚偏氟乙烯黏结剂之间的界面相互作用提升正极的结构稳定性;双离子电池在2 C下循环10000次后容量保持率达到80.7%,并实现60 C倍率下的稳定充放电性能。相比于石墨类材料,有机正极材料具有可调层间距和丰富活性位点,成为提升双离子电池容量的重要研究方向。针对有机正极存在的溶解与容量衰减问题,文献[273]合成了一种p型5,10-二芳基-5,10-二氢吩嗪聚合物,通过超分子结构中的 $\pi$ - $\pi$ 堆叠稳定烷基链主链结构以抑制降解问题,同时引入共轭芳基以促进电荷离域化并激活氮活性位点;基于该正极材料的双离子电池在100 mA/g下可逆容量达到120 mAh/g,循环2000次后容量保持率达到88%,为克服传统有机电极的本征限制提供了新途径。在负极材料方面,双离子电池常用负极材料主要包括碳基负极材料、过渡金属氧化物/硫化物负极、有机负极以及合金化负极等。其中,合金化负极具有比容量高、反应电位适中等优点,展现出良好的应用前景<sup>[274-275]</sup>。文献[274]针对微米级合金负极电解液润湿性差、体积膨胀严重等问题,创新性地将微米级锡颗粒沉积在三维铝集流体中,并用非晶碳进行包覆,实现了近零接触角的亲电解液特性,同时,非晶碳界面层降低了界面阻抗,并促进了钠离子的传输;基于上述复合负极,钠基双离子电池在5 C条件下循环2000次后容量仍保持90 mAh/g,100 C倍率下容量保持率仍达52%,突破了传统微米级合金负极的性能瓶颈,为微米合金负极的界面稳定与动力学优化提供了有效方案。

在电解质方面,双离子电池的电解质不仅充当离子传输介质,更是活性离子的直接来源,对电池容量、循环寿命及能量密度等关键性能具有重要影响。针对传统碳酸酯类电解液难以有效适配双离子电池的局限,当前研究主要聚焦碳酸酯类电解液的优化改性与新型高稳定电解液的开发。文献[276]为研究不同溶剂种类对阴离子插层石墨正极的影响,开发出原位拉曼光谱-电化学联用平台,通过监测溶剂的振动指纹和石墨G带分裂行为证实了“协同阴离子-溶剂共插层”机制的存在以及溶剂分

子在调控阴离子插层过程中的主导作用,并通过引入供体数和介电常数(DN- $\epsilon$ )双参数描述符对不同溶剂体系中阴离子的插层电压进行定量预测,为通过电解液设计降低插层电位并提升石墨容量提供了理论依据与实验指导。文献[277]通过乙烯硫酸酯添加剂诱导的溶剂化设计策略,开发了一种界面自兼容的准固态电解质,其中,添加剂与阴离子的强配位作用能有效抑制溶剂共嵌入并优先形成薄而坚固的正极-电解质界面,使电解质氧化稳定窗口拓宽至5.5 V,同时双离子电池实现了超过900次稳定循环。

在双离子电池的产业化研究方面,2025年,中国科学院深圳先进技术研究院、中国科学院青岛生物能源与过程研究所、中国科学院长春应用化学研究所等科研单位开展了中试验证研究,通过电极材料、电解液及电芯工艺优化,包括高面载低内阻电极制备工艺、预嵌阴离子技术等关键工艺[278],开发出50 Ah容量的双离子电池单体电芯,并逐步探索双离子电池在短时高频等特定场景中的应用示范。下一步,面向大规模产业化应用,双离子电池仍需进一步优化电解液与隔膜材料体系,并持续提升循环寿命与能量密度等关键性能。

## 10.5 智能电池

智能电池是指从单一能量存储单元的传统电池,向信息-能量一体化系统快速演进的新型电池体系。其最显著的发展趋势在于由单一性能优化转向“感知-响应-决策”多功能协同,从单一材料驱动转向材料、器件与人工智能深度耦合驱动。特别是在电动汽车、智能电网和可穿戴设备等应用需求下,电池不仅需要更高的能量密度与安全性,还需具备实时状态感知与自主调控能力。当前,智能电池已从概念探索迈入关键技术突破阶段,逐步形成以先进传感、智能材料与数据驱动模型为核心的技术体系。

在基础研究方面,智能电池的突破主要集中于先进传感机理、智能材料以及多物理场耦合模型的构建。在传感机理层面,为了支撑实时感知型智能电池的发展,基础研究聚焦于如何在密闭、高腐蚀性电化学环境下实现高精度、长寿命传感。研究重点从单一参数如温度、电压的外部测量,转向利用光纤布拉格光栅、声发射、薄膜传感器等技术,发展针对固态电解质界面膜生长、气体析出及应力累

积等微观化学物理过程的原位表征方法,揭示电池内部物理化学信息与数字信号之间的映射关系,为构建高保真数字孪生模型奠定物理基础。在智能材料方面,研究正朝着类生物应激响应机制方向不断深化,以赋予电池主动调控能力。例如,自修复材料的研究已从概念验证走向机理深化,通过开发基于氢键、金属配位或微胶囊技术的电极与电解质材料,实现对微裂纹与锂枝晶等早期损伤的自主修复,显著延长了电池在极端工况下的循环稳定性与寿命。同时,形状记忆合金与热响应聚合物在电池热管理系统中的应用研究,为构建“热-力-电”协同的自我保护机制提供了理论支撑。此外,基于数据驱动模型与数字孪生技术正成为智能电池基础研究的重要前沿方向。通过融合实验数据与电化学机理模型,实现电池全生命周期行为的预测与映射。这种物理模型与数据模型的协同框架,为智能电池实现从状态感知到行为预测提供了理论与方法支撑。

在关键技术方面,智能电池的发展依赖于三类核心技术的突破,主要包括先进传感技术、智能响应材料以及数据驱动与人工智能算法三个方面。首先,在传感层面,多维嵌入式传感器能够对电池内部的温度场、应力场及化学环境进行原位监测,是实现电池感知能力的核心基础。其关键技术在于高集成度、低功耗的传感器封装工艺,以及与之匹配的数据解析能力。一方面,要确保在不牺牲电池能量密度的前提下,让传感器与现有电池制造工艺兼容;另一方面,还要从电池内部复杂环境中准确剥离出多维信息的干扰,准确捕捉反映内部真实状态的关键特征信号,从而实现对热失控前兆的早期识别与精准预警能力。

在响应层面,智能材料的设计与系统兼容性是实现电池自适应调控的核心。其关键技术在于赋予材料明确的刺激响应功能,并在不牺牲电池基础电化学性能的前提下,实现与现有电池体系的深度融合。一方面,智能材料的响应机制需针对电池内部典型的异常工况如局部过热、锂枝晶穿刺、机械变形及过充等异常工况。另一方面,智能材料与电化学体系的兼容性直接决定了响应功能的实用价值。这要求材料在引入智能特性的同时,不能干扰正常的离子输运、电荷转移及界面稳定性,在电池的工作电压窗口内保持良好的化学惰性,且其激活阈值

需与电池的安全边界相符合,从而推动电池由被动稳定向主动调控转变。

在决策层面,云端电池管理系统与人工智能算法的融合,使电池具备自学习与预测能力。其核心在于“云端+边缘”协同的算法架构。借助数字孪生技术,将实体电池的实时传感数据与电化学机理模型深度融合,在云端构建起覆盖全生命周期的虚拟映射。具体包括基于大数据和机器学习的健康状态与荷电状态高精度估计算法,以及利用强化学习实现的自主充放电策略优化。这一技术体系使电池由被动执行向主动决策转变,能根据历史数据和实时工况,主动进行自我诊断、性能优化与维护决策。

在集成与应用方面,智能电池已在多个关键领域逐步展开示范应用。在智能电网与储能系统方面,依托云端平台的智能电池系统实现了电池组间的信息互联与协同调控,整体提升了储能系统的运行效率和稳定性。当局部电芯出现异常时,系统可快速完成精准隔离与定向控制,防止故障在储能阵列中扩散。总体来看,智能电池的集成示范正呈现出系统化与平台化的趋势。通过材料、器件与信息系统的深度融合,能够实现从单体电池到电池系统、再到能源网络的多层级协同优化,为未来能源互联网的发展提供了关键支撑。

## 10.6 AI for 储能

人工智能(AI)正深刻重塑储能技术与产业的发展范式,已深刻影响储能技术的设计、制造、试验、集成、运维等几乎所有环节。2025年人工智能在智能预测、生成式AI、计算机视觉、具身AI和智能体等多个方面加速储能技术的发展<sup>[279]</sup>,具备自主决策与任务执行能力的智能体正在储能技术全流程中展现出广泛的应用潜力。同时,人工智能的快速发展也使数据中心和算力中心的用电需求大幅增加,并对能源供应的绿色化和高可靠性提出了刚性需求,为储能行业发展带来了重大机遇。下面围绕储能技术的设计分析、试验制造、运行维护及集成示范四个方面,总结2025年我国人工智能赋能储能技术的研究进展。

在设计分析方面,AI技术有效提升储能技术研发阶段的分析精度,降低高维仿真耗时,并结合智能优化算法进一步提升系统性能。针对物理储能,文献[280]围绕压缩空气储能与固体氧化物燃料电

池耦合的混合能源系统,利用非支配排序遗传算法与人工神经网络开展多目标优化设计,所提出的集成和优化方案提升了系统效率。文献[281]提出了面向飞轮储能连续纤维增强复合材料的等效弹性性能预测框架,采用ResNet-36网络与迁移学习技术,在小样本条件下实现了预测误差小于0.5%。文献[282]提出一种结合三维反问题设计、响应面法与机器学习算法的水泵水轮机转轮多目标优化设计方法,通过对叶片载荷分布及高压侧叶片倾角的协同优化,使转轮在多个运行工况下效率最高提升1.28%,并有效降低了压力脉动幅值与水力损失。在电化学储能方面,文献[283]构建了知识-数据双驱动的电解液分子性质预测模型,通过可解释机器学习方法从数据中提取结构-性质知识,并将其作为特征输入或约束条件嵌入深度学习模型,实现了对电解液熔点、沸点和闪点的准确预测,并为宽温域、高安全锂电池电解液的快速设计与高通量筛选提供了方法支撑。文献[284]针对高电压锂电池电解液添加剂优化问题,构建了数据驱动的机器学习设计框架,通过对面积比阻抗、阻抗增长和比容量等关键性能指标进行预测,从未经测试的配方库中筛选出性能更优的双添加剂组合,实现电解液体系的加速设计与优化。文献[285]基于机器学习模型与SHAP解释方法,解决了水凝胶超级电容器设计中关键参数与性能关系不明确的问题,识别了影响比电容和循环稳定性的主导因素,为超级电容器设计提供了支撑。文献[286]基于机器学习的电化学性能预测方法,解决了过渡金属二硫化物/碳复合超级电容器电极设计依赖经验试错的问题,揭示了影响比电容的关键因素,为高性能复合电极的理性设计提供了依据。在储热方面,文献[287]针对NaCl-NaF-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>异质熔盐储热介质储热性能难以直接表征的问题,提出了基于深度势分子动力学的预测方法,通过对熔盐体系微观结构与热储性能的耦合分析,实现了候选高温储热介质的智能评估。文献[288]基于机器学习势函数的热物性预测方法,通过融合第一性原理分子动力学与主动学习构建深度势模型,提升了高温碳酸盐相变储热材料热物性预测精度,实现了关键参数的高精度预测,为储热介质筛选与设计提供了依据。

在试验制造方面,AI促进了储能关键部件的工艺改进,提升了制造过程缺陷检测的准确性和识别

速度。在物理储能方面,文献[289]针对抽水蓄能机组功率调节系统在多源扰动下的响应迟滞问题,开展了基于残差卷积神经网络与CBAM注意力机制的试验研究,试验结果表明,在 $\pm 10\%$ 随机负荷扰动下,调节时间缩短至10.6 s,水锤压力波动抑制率达81.6%,验证了该方法在提升机组动态响应性能方面的有效性。针对电化学储能,文献[290]提出了基于神经网络的锂电池电极制造特性智能预测方法,通过将关键工艺参数作为输入,实现了对电极质量负载、厚度和孔隙率的快速预测,提高了制造过程开发效率与工艺优化能力。文献[291]针对锂离子电池隔膜生产过程中缺陷样本少、检测精度不足的问题,提出了基于迁移学习与集成建模的智能缺陷检测方法,实现了对隔膜缺陷的高效识别,从而提升了电池制造环节的质量控制能力。文献[292]针对煤基多孔碳电极试验制备过程中参数筛选效率低、实验成本高的问题,提出了机器学习辅助的定向调控方法,实现了材料制备参数的快速优化与高性能电极筛选,提升了超级电容器电极的试验制造效率。文献[293]提出了基于机器学习的实验参数优化方法,通过构建多种回归模型对比电容等电化学性能进行预测,实现了制备参数与电化学性能之间关系的定量表征,从而为超级电容器电极材料的实验开发与工艺优化提供了数据驱动支撑。在储热方面,文献[294]提出了一种基于时间特征表征与机器学习的储热数据驱动列线图方法,为储热样品的实验表征、性能评估和方案比较提供了快速分析工具,进而提高了实验开发阶段的数据处理与决策效率。文献[295]围绕相变储热单元充放热过程中液相分数难以快速获取的问题,提出了一种基于机器学习与特征工程的预测方法,实现了对相变过程关键状态参数的快速表征,从而为储热单元实验开发、性能测试与方案优化提供了数据驱动支撑。

在运行维护方面, AI技术可用于优化运行控制策略以提高系统性能,同时通过故障诊断和寿命预测提升储能系统的安全性和可靠性。在物理储能方面,文献[296]针对废弃矿井改建压缩空气储能储气库密封结构的长期稳定性问题,构建了基于麻雀搜索算法优化长短期记忆网络的界面渗透率智能预测模型,优化后模型的 $R^2$ 达0.999。文献[297]针对浅埋压缩空气储能洞室衬砌裂缝识别问题,构建了引入卷积注意力模块并优化掩膜损失函数的改进

Mask R-CNN模型,改进模型的平均精度达89.3%、交并比达88.41%,较原模型分别提升17.2%与8.8%。文献[298]针对抽水蓄能机组频率调节控制问题,提出一种基于多智能体深度强化学习的控制策略,能够显著提升机组在新能源高比例接入背景下的频率调节性能与运行稳定性。文献[299]针对抽水蓄能电站大坝渗流安全监控问题,融合卷积神经网络、双向门控循环单元、蜣螂优化算法与分位数回归,构建了概率性预测模型,在95%置信水平下给出渗透压力的预测区间,为大坝运行维护中的安全评价提供了更全面的决策信息。文献[300]基于马尔科夫决策过程对飞轮储能单元的能量管理系统进行数学建模,采用深度强化学习框架下的DQN算法实现充放电阈值动态寻优,提高了电能综合利用效率。文献[301]提出一种基于飞轮储能系统的风电功率平滑控制方法,采用深度Koopman模型预测控制策略,通过深度神经网络逼近Koopman算子完成系统线性化处理,在风电波动抑制、动态响应速度及抗扰动能力方面表现出更好的控制效果与鲁棒性。在电化学储能方面,文献[302]提出了基于Transformer的锂离子电池剩余寿命(RUL)预测方法,通过引入自编码器及改进注意力结构,强化了对长时序依赖、多特征耦合和全局-局部退化信息的表征能力,从而提高了剩余寿命预测性能。文献[303]针对锂离子电池早期微弱故障诊断问题,提出了一种基于数据驱动的分级诊断方法,实现了对内短路、外短路及接触不良等故障的分级识别,从而提升了电池运行安全监测与故障诊断性能。文献[304]针对超级电容器退化轨迹与剩余寿命预测中物理一致性不足和数据依赖性较强的问题,提出了结合LSTM与物理信息神经网络(PINN)的预测方法,通过在损失函数中嵌入物理方程并采用贝叶斯优化动态平衡物理项与数据项,提高了退化轨迹和剩余寿命预测精度。在储热方面,文献[305]提出了面向储热型太阳能发电系统的智能优化运行方法,通过数据驱动预测与随机模型预测控制相结合,实现了光热-光伏联合电站在不确定工况下的协同调度优化,从而提升了储热系统参与电网调峰的灵活性。文献[306]针对建筑集成式储热热泵系统在复杂热负荷和分时电价条件下运行控制精度不足的问题,提出了基于PI-Seq2Seq神经网络的智能控制方法,通过将建筑

热工机理嵌入时序预测模型,并结合有限状态机实现多状态协同控制,从而提升了热负荷预测精度与系统运行灵活性。

在集成示范方面, AI促进了多种储能技术的协同管理与优势互补。国家能源集团投运 101 MW/205 MWh 的磷酸铁锂、钠离子、全钒液流以及飞轮储能电站,集成 AI 算法实现电力交易与能量管理动态联动。远景储能发布首款智能体储能产品 EN 8 Pro, 该产品基于 AI 大模型,并内置 Trade Agent 交易智能体和 Grid Agent 构网智能体。宁德时代将人形具身智能机器人“小墨”在中州基地的动力电池 PACK 生产线实现规模化落地,并发布“天恒·智储”智慧管理平台,通过“大数据平台+AI 大模型+机理算法融合+AI 助手工具”的架构,实现了智能预警、运行分析、电站体检和智慧运维的全链条标准化管理。

### 10.7 全固态电池

全固态电池采用固态电解质替代传统的液态电解液与隔膜,金属离子在充放电过程中通过固体电解质在正负极之间迁移。其优点在于固态电解质不可燃、无漏液风险,安全性高,可匹配金属负极,能量密度高等优点,已成为全球储能领域的研究热点。但全固态电池存在固-固界面阻抗大、离子电导率低、制造工艺复杂等挑战。2025 年,中国汽车工程学会发布了全球首个《全固态电池判定方法》团体标准,首次明确全固态电池的定义为液态组分含量小于 1%,2025 年底发布的国家标准征求意见稿将门槛提升至失重率 $\leq 0.5\%$ 。2025 年是中国全固态电池基础研究突破向工程化迈进的关键一年,在基础研究和关键技术方面取得重要突破,产业实现了工程化验证的重要跨越。

在基础研究方面。正极、固体电解质和负极材料均取得了原创性成果这既是我国基础科研能力提升的体现,亦是突破海外专利围堵的关键。文献[307]通过 Nb 掺杂和氧分压调控合成晶粒细化微晶高镍三元材料,颗粒力学耐受提升 2 倍,并提升了全固态电池长循环条件下结构与界面的稳定性。文献[308]采用  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  对  $\text{Li}_{5.4}\text{PS}_{4.4}\text{Cl}_{1.6}$  硫化物固体电解质进行掺杂改性,室温离子电导率达 11.34 mS/cm 且具有良好的湿空气稳定性与溶剂稳定性,并通过全湿法涂覆工艺实现全固态电池构筑。文献[309]合成黏弹性铝基氯化物固态电解质, 30℃ 时  $\text{Li}^+$  电

导率超过 1 mS/cm,实现了界面接触的大幅改善,具备高达 4.8 V 的电化学稳定窗口。文献[310]通过 Li-B 纤维拓扑力学增强骨架和择优锂输运通道,在保留金属锂高比容量与低电位优势的同时,同时实现宽压力范围下的低体积应变。文献[311]通过利用碘离子在硫化物固体电解质中的传输特性,在负极界面构建随充放电过程的动态自适应界面层,同时实现界面空隙消除和枝晶抑制,并验证了在该界面调控作用下,全固态金属锂电池可在无外部压力条件下稳定循环。

在关键技术方面,电解质膜构建方法日益成熟,多种方式有效提升致密度,并在枝晶抑制方面显著改善。文献[312]通过溴掺杂硫银锗矿电解质改变材料模量,在冷压条件下制备出致密电解质片,消除电解质层空隙抑制枝晶生长,实现全固态金属锂电池 1 C 倍率循环。文献[313]研究复合正极内硫化物电解质多种颗粒尺寸对性能的影响规律,总结出亚微米尺寸电解质最佳,兼顾高比界面面积以缓解电化学-机械耦合效应。文献[314]提出了全固态电池中固态电解质薄膜与正极材料的共轧干法工艺,实现了薄固态电解质层与高载量正极的兼容构筑,并在 2 MPa 低堆叠压力下稳定循环。多家企业分别建成硫化物电解质和氧化物/聚合物电解质固态电池中试线,研发出 60 Ah 级固态电池。

在工程化应用方面, 2025 年固态锂电池从高堆压、小尺寸实验室样品走向较低堆压的大尺寸中试线产品,从单纯追求高比能量转向更加重视综合性能均衡。随着界面调控、正极抗裂设计和低压力运行等技术不断进步和工程化推进,固态锂电池有望在近期装车验证。总体上,从技术发展阶段看,全固态锂电池目前仍处于基础研究深入、关键技术突破和产业化推进并行的阶段。与液态锂离子电池相比,其成本主要受高纯固态电解质制备、界面修饰工艺、干燥环境要求及高压机组装设备等因素影响,短期内成本仍很高,未来在政策支持和产业链协同推动下,其成本有望大幅降低。全固态锂电池有望在高安全、高能量密度储能场景中占据重要地位,有望在 2030 年前后进入规模化商业应用阶段。

## 11 系统集成技术

随着规模化储能的高速发展,我国储能系统集成技术持续向高安全、大容量、高效率方向深度演

进。2025年,随着“构网型”技术的快速发展与混合储能的规模化应用,我国储能系统集成技术实现了从“单一技术验证”向“多技术融合集成”的跨越。当前储能集成技术的研发重点集中于构网型控制、高压直挂集成、电池管理系统智能化以及多技术混合储能等方向。鉴于电化学储能的技术复杂性,本文聚焦于电化学储能系统的集成技术,其他储能形式的集成技术本文暂不评述。

### 11.1 基础研究

新型储能系统集成技术基础研究重点集中于功率变换、电池管理、系统能量管理及安全运维等方向。

在功率变换方面,新型电力系统加速建设,新能源渗透率持续攀升,电网系统惯性降低、调频能力减弱,暂态稳定管控压力加剧,构网型储能变流器技术成为储能功率变换领域重点发展方向。文献[315]研究构网型储能的频率与振荡自主协同控制技术,指出构网型储能的一次调频特性与虚拟阻尼特性的解耦控制是实现频率支撑、振荡抑制多目标综合控制的关键,并通过建立虚拟同步机的输出特性模型,深入解析角速度、转子阻尼、定子阻抗等因素对输出功率的影响机理,实现虚拟同步机频率与振荡控制参数解耦设计,达到构网型储能的自主协同控制的目的。目前,构网型技术已从岛屿微网应用扩展到主网连接环境,英国、澳大利亚、美国德州等地区正积极推进构网型储能的商业化部署。

在电池管理方面,储能电池管理系统(BMS)正经历从“电芯级管理”向“电极级管理”的范式转变。文献[316]研发出基于长寿命电位传感的锂离子电池电极级管理技术,通过引入低阻抗三维电位传感器可解耦监测电池正负极状态,在不影响电池耐久性的前提下实现无损监测。该传感器在1 C倍率下循环800次后电池容量保持率达94%,容量衰减率较传统集成传感器电池降低一半。该技术可实现电池化成阶段的相变跟踪、循环过程的锂库存估计、老化过程的活性材料和锂损失诊断、快充条件下的负极电位控制以及热失控条件下的电极状态监测,显著提升电池管理精度、运行安全性和使用寿命。此外,植入式光纤传感器技术持续发展,通过集成电、热、气、力、化等多元传感器,智能电池技术成为BMS领域的重要研究方向。

在系统能量管理及安全运维方面,针对源、

网、荷各侧储能的控制要求,核心技术在于曲线跟踪、功率响应、协同控制、充放电优化等功能。混合能源系统优化型能量管理策略成为研究热点,基于元启发式算法的能量管理系统(EMS)在氢燃料节省和系统效率方面表现优异,如采用Coot鸟优化器的EMS在氢燃料节省方面可达13.65~17.51 g,系统效率可达89.65%~92.65%<sup>[317]</sup>。储能电站EMS系统的智能化程度将持续提升,机器学习驱动的系统运行状态自我诊断与预测技术日趋完善,可预判潜在设备故障或系统异常,有效减少人工干预。

### 11.2 关键技术

新型储能系统集成关键技术研发重点集中于构网型控制、混合储能协同优化与电池安全智能预警等方向。

在构网型技术方面,主要聚焦构网型储能设备的优化配置与控制策略。文献[318]基于s域模态分析理论,构建集模态识别、关键节点筛选与容量协同优化于一体的技术体系,兼顾经济性约束提出容量与选址协同优化方法,通过粒子群优化算法完成多模态场景储能容量协同配置,以低成本实现系统稳态恢复。文献[319]针对构网型储能因变流器单一运行模式难以适应电网短路比变化的问题,设计幅相同步双模式改进切换策略,采用改进粒子群优化算法对跟踪环参数进行自适应辨识,实现跟网-构网模式切换暂态功率冲击小于0.02 p.u.

在混合储能技术方面,重点集中于多类型储能的协同优化与配置方法。针对工业复杂工况下单一储能技术适配性不足的问题,国内外学者提出电、热、冷多类型储能耦合的混合储能体系。文献[320]搭建场景自适应的混合储能系统分层优化设计框架,涵盖需求分析、储能选型、系统建模、优化设计与性能评估五个核心环节,通过分层优化方法实现设备配置与运行调度的联合优化,在工业园区的应用中可实现能源成本降低43.7%、碳排放减少69.9%。文献[321]系统综述超级电容与电池混合储能可在再生能源集成中的应用,指出超级电容提供快速响应与功率支撑,电池提供长时能量支撑,二者优势互补可有效提升电网运行稳定性。

在电池安全防控方面,重点集中于植入式传感技术与热失控早期预警。文献[322]研发无源无线超声波传感系统,将柔性传感器植入商用棱柱形电池内部,可同步监测温度和压力,测量精度分别达

0.1℃和0.5 kPa, 时间分辨率达100 ms。监测数据显示, 热失控发生前约800秒压力率先骤升, 可作为早期故障预判依据。文献[323]建立耦合本征反应动力学与热传输的热失控预测框架, 明确自热与散热博弈关系是热失控核心诱因, 并结合试验与仿真构建热安全边界。文献[324]指出, 无线内部传感技术正推动电池管理系统从被动监测向主动维护转变, 可实现电池安全自主感知、预警与处置。

### 11.3 集成示范

新型储能系统集成示范重点集中于构网型技术、混合储能技术电池安全防控等技术的集成示范。

在构网型技术方面, 国内已实现大规模电站建设与高端场景示范的双重突破。内蒙古赣润储能科技有限公司建设的阿荣旗100万千瓦/400万千瓦时构网型磷酸铁锂储能电站于2025年12月正式投运, 总规模1 GW/4 GWh, 是全球最大的构网型储能电站。该电站直接接入500千伏高压电网, 可提升区域新能源消纳率6%, 年均新增清洁能源消纳量超12亿千瓦时, 为蒙东地区能源低碳转型及大规模构网型储能集成示范提供重要实践经验。南方电网公司牵头、国家新型储能创新中心具体实施的10 kV高压直挂构网型储能装备, 成功保障第十五届全运会开幕式供电, 创造我国大型赛事“高可靠市电+新型储能在线”主供方案的首次应用。该装备依托“电池+电力电子”一体化集成技术与构网型控制策略, 可实现离网独立带载运行, 具备毫秒级响应、零秒切换不间断切换供电的优势, 为新型储能能在城市核心区高可靠供电场景的规模化应用提供可复制的技术范式。

在混合储能技术方面, 国内技术落地应用成效显著。2025年12月, 国家新型储能创新中心牵头建设的顺德实证基地顺利并网投运, 项目采用“50 MW/5 MWh 超级电容+150 MW/300 MWh 磷酸铁锂”混合技术路线, 并配套应用构网型变流器, 形成“超短时构网响应+一二次频率调节+长效能量支撑”的多重保障体系, 推动超级电容储能技术迈入规模化工程应用阶段。2025年5月, 国网烟台供电公司服务的禄山龙源储能电站实现全容量并网, 总规模320 MW/640.2 MWh, 是山东省首座“磷酸铁锂+超级电容”混合式储能项目, 每年可新增新能源消纳量约2亿千瓦时。两种储能技术优势

互补, 超级电容可实现毫秒级快速响应, 磷酸铁锂电池具备大容量供电优势, 为提升电网灵活调节能力打造了推广的技术模式。

在电池安全防控方面, 国内技术持续迭代升级。协能科技联合中车推出“一芯一管理CCS+”技术方案, 为单体电池配备专属智能管理芯片, 实现高精度监测与安全管理。大规模火灾测试(LSFT)已纳入硬性检测要求, 结合UL 9540A标准, 核验系统抵御热失控扩散的防护性能。同时行业积极探索浸没式冷却技术等主动防护技术, 从根源抑制热失控蔓延, 有效延长电池使用寿命。

## 12 消防安全技术

随着我国电化学储能产业持续高速增长, 储能系统向大规模集成方向加速演进, 储能电站单体规模也屡创新高, 储能系统消防安全技术的战略地位进一步凸显。2025年, 我国在储能电池热失控产气行为和机理、热失控传播机制、热管理技术、热失控预警技术、灭火技术、安全评估等方面均取得重要进展。

### 12.1 基础研究

在热失控产气行为和机理研究方面, 文献[325]通过材料层级的原位产气实验揭示了磷酸铁锂电池热失控过程产气机制, 发现了热诱导下磷酸铁锂电池热失控的六个主要反应路径。发现了电解液是 $C_2H_4$ 、 $CO_2$ 的主要产生来源, 脱锂正极在800℃内未检测到明显释氧, 但500℃起始的相变会引发后续放热反应。文献[326]定量揭示了不同绝热热失控阶段的动态产气规律, 发现 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2$ 和 $C_2H_4$ 是热失控初始触发阶段产生的主要气体。针对安全阀这一关键结构, 文献[327]研究发现无安全阀设计热失控风险最高, 安全阀泄压压力的选择需要平衡电池自身运行和安全性。

在热失控传播机制方面, 针对模组层级火灾诱因不明的问题, 文献[328]首次在模组层级揭示了两种典型自燃机制, 即安全阀摩擦点火与电解液积聚引发外部短路电火花点火, 并明确了热-力耦合效应在热失控传播加速及降低点火能量中的作用。针对气体对热失控传播的影响, 文献[329]设计了常规封装与隔离泄放封装两种模组结构, 发现了热失控泄放气体是封闭结构中热失控传播加速的关键因素, 为电池模块的泄放导向和热隔离设计提供针

对性指导。

## 12.2 关键技术

在热管理技术的被动散热方面,研究聚焦于通过微观结构设计提升材料功能性,有效抑制热失控传播<sup>[330]</sup>。在主动散热技术方面,研究重点聚焦于浸没式液冷系统的结构优化与智能控制。研究者们通过设计分布式入口循环结构、优化流道布局、引入多目标优化算法等手段,显著提升了浸没式液冷在大容量电池模组中的散热效率和能耗表现<sup>[331]</sup>。在复合热管理系统中,被动隔热与主动冷却协同技术得到了深入研究<sup>[332]</sup>,通过优化被动隔热材料,结合液冷、浸没式液冷等主动散热技术,实现了从被动防护向主动预防、从单一功能向协同响应的跨越。

在热失控预警技术方面,在传统的通过电压、温度等信号预警之外,中国科学技术大学<sup>[333-334]</sup>发现力学信号也可作为有效的预警指标,提出了一种基于机械应力信号的锂离子电池热失控预警方法基于应力变化率拐点的热失控早期预警方法和基于内部压力敏感性的热失控早期预警方法。此外物理模型与数据驱动融合的热失控预警技术也备受关注,如北京交通大学构建了电化学-力耦合模型与机器学习算法的双重框架,实现了电池膨胀估计与早期预警<sup>[335]</sup>。

在灭火技术方面,协同灭火策略依然成为关注重点。中国石油大学(华东)<sup>[336]</sup>提出了水雾与液氮交替协同的灭火策略,明确了针对磷酸铁锂电池的最佳预喷时间与交替间隔。中国矿业大学<sup>[337]</sup>也提出了气态灭火剂与间歇性细水雾的协同抑制策略,相比纯细水雾可减少66.67%~83.33%用水量。研究成果对于指导实际应用中灭火系统的设计,具有重要的数据与理论参考价值。

在安全评估方面,针对传统方法单一参数主导评估结果的弊端,中国科学技术大学针对不同材料体系的电池,提出了安全评估的预期贡献法<sup>[338]</sup>,即通过修正矩阵与相关性分析保证各参数公平贡献,并经蒙特卡罗采样与斯皮尔曼相关系数验证其稳定性,提升了复杂电池体系安全评估的客观性。

## 12.3 集成示范

2025年5月,由南方电网调峰调频发电有限公司牵头,中国科学技术大学、北京理工大学、应急管理部天津消防研究所等单位联合完成的“锂离子电池储能系统全寿命周期应用安全技术”项目顺利

通过综合绩效评价。该项目研发出世界首套基于液氮灭火抑爆的储能系统,已在华南、华东、西北多地试点示范应用。建成了我国首个吉瓦时级新型储能安全监测平台,可实现在热失控发生15分钟之前预警,技术成果在南方电网宝塘储能站工程示范应用。在储能系统热管理技术方面,对于超大规模电站(如2025年沙特7.8 GWh项目)热管理技术已不再局限于单柜散热,而是面向全生命周期、全应用场景提供一站式的解决方案。同时,融合AI的热管理智能控制策略、基于大数据的器件寿命预测及故障预警,为超大规模储能电站的安全稳定运行提供了核心技术支撑。在钠离子电池方面,亿纬锂能建设的同步采用包级、柜体双重消防灭火设计方案的大容量钠离子电池储能系统,2025年9月在荆门基地成功并网。

## 13 综合分析

### 13.1 基础研究

图1给出了依据“Web of Science”核心数据库,以“Energy Storage”为主题词统计的2025年度中国机构和学者关于储能技术发表的SCI论文数。2025年度中国机构和学者共发表SCI论文数24312篇。其中储热储冷技术、锂离子电池技术、钠离子电池技术、超级电容器的SCI论文数超过1000篇,为当前我国储能领域基础研究的热门技术方向。

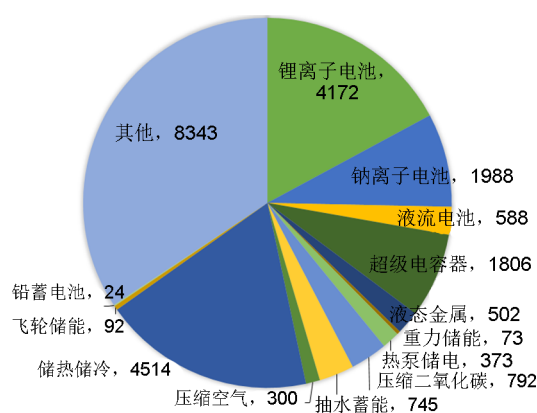


图1 2025年中国主要储能技术发表SCI论文数

Fig. 1 Number of SCI papers on major energy storage technologies published from China in 2025

图2给出了依据“Web of Science”核心数据库,以“Energy Storage”为主题词统计的2025年度世界主要国家关于储能技术发表的SCI论文数。

2025年全世界共发表储能技术相关SCI论文数49544篇。其中排名前十的国家依次为中国、印度、美国、沙特、韩国、德国、英国、澳大利亚、巴基斯坦和伊朗。和2024年相比,前三名中、印、美的位次没有变化,沙特和巴基斯坦的位次有所提升,且巴基斯坦首次进入前十名;韩国和意大利位次有所下降,且意大利排到了第11位。2025年度中国机构和学者发表了24312篇SCI论文,相较2024年又有增长,在全世界的占比为49.1%,继续居世界第一。世界储能技术基础研究较2024年更加活跃,中国仍是全球储能技术研究最为活跃的国家。从分项技术看,图1中给出的所有单项技术包括抽水蓄能、压缩空气、储热、飞轮、锂离子电池、超级电容、钠离子电池、铅电池、液态金属、液流电池,中国机构和学者2025年发表SCI论文数均位于世界第一,且领先的论文数进一步增加。

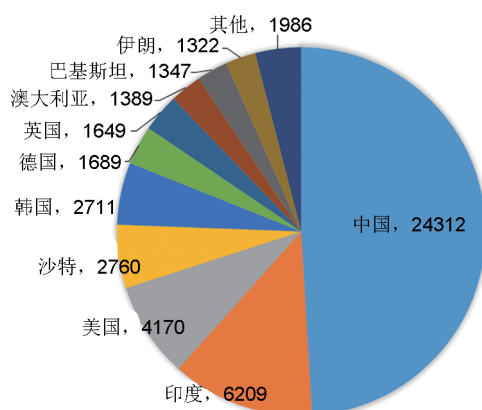


图2 2025年世界主要国家储能技术发表SCI论文数  
Fig. 2 Number of SCI papers on energy storage technologies published from major countries worldwide in 2025

图3给出了依据“Web of Science”核心数据库,以“Energy Storage”为主题词统计的2015—2025年世界主要国家关于储能技术发表的SCI论文数。其中中国、美国、印度、韩国、德国、英国、澳大利亚、沙特、意大利、伊朗、加拿大、西班牙、日本、法国、巴基斯坦位列前十五位。相较于2024年,中国、印度、韩国、沙特、伊朗、巴基斯坦这些新兴国家2025年度发表SCI论文数有明显增加,增幅超过10%。美国、德国、英国、澳大利亚、意大利、加拿大、西班牙、日本、法国这些发达国家2025年度发表的SCI论文数和2024年基本持平,其中德国发表SCI论文数略有减少,其

他国家略有增加。总体上,世界各国关于储能技术的基础研究更加活跃。统计2015—2025年累计论文数发现,中国、美国、印度排名前三,2015—2025年累计发表论文数分别为141001篇、41183篇、31238篇。2025年当年发表论文数的排名对比2015—2025年累计发表论文数排名上升的国家有印度、沙特、土耳其、巴基斯坦。需要说明的是图3中2015—2025年发表的SCI论文数的数据和去年统计的数据稍有不同,这主要是由于Web of Science数据库本身更新的原因,但总体趋势是一致的。

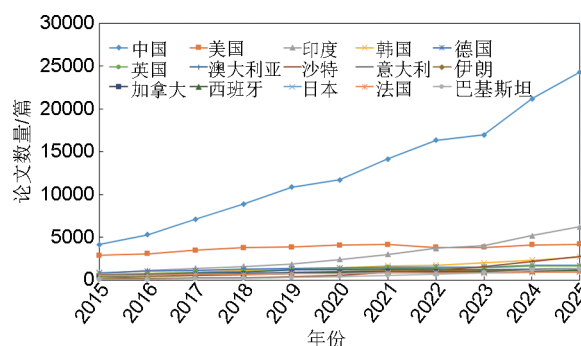


图3 世界主要国家储能技术发表SCI论文数（2015—2025年）

Fig. 3 Number of SCI papers on energy storage technologies published from major countries worldwide (2015—2025)

从发展趋势上看,自2015年以来,所有15个国家发表的储能相关SCI论文数均呈现总体增加趋势。中国自2015年以来储能相关SCI论文数增加最为迅猛,且明显领先其他国家。美国发表的SCI论文数总体平稳,2025年度较2024年度略有增加。印度于2023年首次超过美国,2025年相对美国的领先优势在进一步增大。整体上看,这15个国家可分为两类:一类是西方发达国家,包括美国、德国、英国、澳大利亚、意大利、西班牙、法国,它们的储能相关SCI论文数增长较慢,基本保持稳定;另一类是新兴国家,包括中国、印度、沙特、伊朗、巴基斯坦,它们的储能相关SCI论文数增长较快,且一直保持增长趋势。其中,中国自从2013年以来,SCI论文数位居世界第一,目前已同美国、印度和其他国家拉开较大差距。

图4给出了依据“Web of Science”核心数据库,以“Energy Storage”为主题词统计的2015—2025年世界主要国家关于储能技术与中国合作发

表的SCI论文数。其中美国、澳大利亚、英国、新加坡、德国、日本、加拿大、沙特、巴基斯坦、韩国位列前十位。中国和美国合作发表SCI论文数在2020年后总体有所下降,和其他国家合作发表SCI论文数总体在增加。2025年当年的情况,这十个国家与中国合作发表SCI论文数均超过了200篇。美国仍然是与中国合作发表SCI论文数最多的国家(737篇),但同2024年相比有明显下降(-13.1%)。2025年度与中国合作发表SCI论文数占各自国家论文数比例较高的十个国家分别为新加坡、澳大利亚、英国、巴基斯坦、日本、加拿大、沙特、美国、德国和韩国,占比分别为65.7%、43.9%、40.0%、30.7%、25.0%、24.0%、19.2%、17.7%、17.4%和11.7%。与中国合作排名前十的国家中有8个国家位列2025年当年发表SCI论文数全球前十名,它们是美国、澳大利亚、英国、沙特、巴基斯坦、韩国、德国、印度。

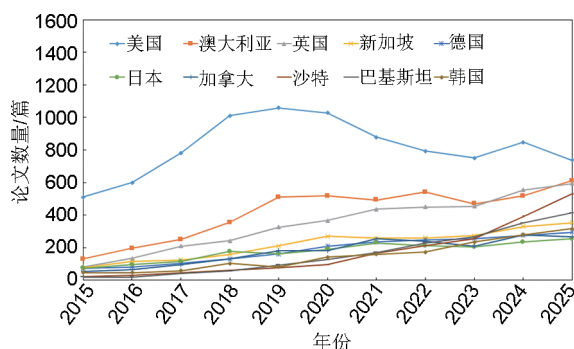


图4 世界主要国家与中国合作发表储能技术SCI论文数(2015—2025)

Fig. 4 Number of SCI papers in cooperation with China on energy storage technologies published from major countries worldwide(2015—2025)

综合图2、图3和图4可见,当前世界储能技术基础研究的基本格局同2021—2024年没有变化<sup>[9]</sup>,仍可主要分为两类国家,一类是美国、德国、英国、日本等为代表的西方发达国家;另一类是中国、印度、沙特等为代表的新兴国家,且SCI论文数排名在前十位的新兴国家的数量在增加,2025年已达5个。中国储能相关SCI论文数稳居第一位,且同其他国家形成较大领先优势,已单独成为储能技术基础研究活跃度的第一梯队;第二梯队为印度和美国,但美国和印度的差距在拉大;其他国家为第三梯队。从国际合作发表论文情况看,2015年、

2020年、2025年中国学者国际合作发表SCI论文分别为1337篇、4522篇和4931篇;中国学者国际合作发表SCI论文占当年全部SCI论文数的比例分别为32.2%、38.6%、20.3%。一方面中国通过国际合作发表SCI论文绝对数一直呈上升趋势;另一方面国际合作SCI论文占全部SCI论文数的相对比例呈现出先增加后降低的趋势,2020年前一直增加,到2020年达到峰值,从2021年后有所下降,这主要是由于中国学者的全部SCI论文数增加较快,以及中美合作发表SCI论文数量下降的结果。

### 13.2 关键技术

表1给出了2025年中国储能关键技术研发进展的总结。从表中可见,2025年我国主要储能技术研发方面均取得了重要进展,取得了多个里程碑式的成果。总体上呈现出多技术路线并行、多元场景与规模突破的特征,其中构网型储能、大容量电池、长时储能、固态电池、AI+储能是当前技术研发的热点。各种储能技术大致可以分为三类的基本格局没有变化,即第一类基本成熟类,主要包括抽水蓄能、铅蓄电池、储热储冷和锂电池技术;第二类集成示范类,主要包括液流电池、压缩空气储能、钠离子电池、飞轮储能和超级电容器技术;和第三类关键技术类,主要包括重力储能、热泵储电、液态金属、双离子电池等。同2025年相比<sup>[9]</sup>,单项技术中半固态锂电池、压缩空气、液流电池、钠离子电池和超级电容器的技术成熟度进一步提升,抽水蓄能、压缩空气、液流电池、飞轮储能、超级电容器等储能技术的单机功率或规模有所提升。

图5给出了依据全球专利数据库incoPat,以“Energy Storage”为主题词统计的2015—2025年中国机构在中国区域申请的发明专利数,部分数据与去年统计的数据稍有差异<sup>[9]</sup>,这是由于数据库自身更新的结果。从图中可知,2015—2025年中国储能技术发明专利申请数呈现显著增加趋势,2025年中国储能技术发明专利申请数为56685篇,和去年同期<sup>[9]</sup>相比增长了10.6%(由于数据库更新速度的原因,2025年的数据是和2024年同期数据进行的比较,图5中2024年数据比去年同期略高<sup>[9]</sup>)。

图6给出了依据全球专利数据库incoPat,统

表 1 2025 年中国储能关键技术与示范进展

Table 1 Progress of China’s energy storage technology and demonstration in 2025

| 序号 | 技术类型   | 关键技术进展                                                                                               | 集成示范进展                                                                                                                                                  |
|----|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 抽水蓄能   | ①变速机组协同控制与水泵水轮机寻优控制技术；②智能一体化联调技术，实现监控、调速、励磁等多系统协同；③抽水蓄能电站排水廊道TBM施工技术                                 | ①国内单机容量最大浙江天台电站抽蓄电站首台 425 MW 机组并网，724 米水头创造世界纪录；②松阳抽蓄电站建成国内最深 637 米竖井；③浙江缙云电站 375 MW 电站实现 30%~100% 功率宽负荷运行；④广西南宁、河北易县等电站投产，混合式抽蓄等新技术示范工程                |
| 2  | 压缩空气储能 | ①600 MW 压缩空气储能技术研发；②大功率组合式压缩机和轴流式膨胀机技术；③微通道蓄热换热技术；④储能-电力系统冷热电耦合联供系统                                  | ①100 MW 级压缩空气储能全尺寸实验平台建成；②300 MW 级系统从示范走向推广应用，已公布项目超过 8 GW；③盐穴、人工硐室、压力容器等储气装置研究热强度增加；④中储国能、大唐集团、华能集团、中国电建、中国能建、三峡集团等企业加大投入，产业发展迅速                       |
| 3  | 储热储冷   | ①可调低转变温度的高级相变凝胶技术；②基于螺旋折流结构的熔盐储热罐技术；③集成于燃煤电厂的新型蒸汽/水混合储热技术                                            | ①安徽宿州建成 1 GWh 级煤电+熔盐储能项目；②山西朔州热电厂建成 20 MWh 新型喷淋式填充床储热项目；③河北龙山电厂建成采用多源抽汽技术的 600 MW 火电抽汽熔盐储能项目，提高调峰能力 100 MW；④济南南部能源中心建成跨季节冰蓄冷+水蓄热联供项目，集中供冷系统能效比可达 6.0 以上 |
| 4  | 飞轮储能   | ①磁轴承控制与多相电机驱动技术；②惯量飞轮储能与构网型飞轮储能技术；③混合储能协同；④AI+飞轮储能技术                                                 | ①威海乳山 100 MW 真空磁悬浮飞轮储能独立调频项目一期（30 MW）投运；②西北地区 8 MW/0.32 MWh 级飞轮储能协同一次调频示范项目并网；③杭州地铁飞轮储能型再生制动能量吸收装置应用项目通过验收；④广州地铁 18 号线将飞轮储能应用于 25 千伏城际轨道交通系统            |
| 5  | 铅蓄电池   | ①负极复合添加剂技术；②一体化正极铅膏技术；③轻质化复合板栅技术                                                                     | ①宁夏银川吉祥绿储 200 MW/400 MWh 共享储能电站并网；②山东泰安 46 MW/92.16 MWh 农光互补项目并网；③浙江移动依托 5000 个通信站点建成 250 MWh 铅碳储能系统                                                    |
| 6  | 锂离子电池  | ①500 Ah 以上大容量电芯，最大 2740 Ah；②一体化全液冷技术；③纳米固态电解质与原位固化技术；④电池状态精准预测与智能运维技术。总体上由单体性能优化向“材料-结构-系统”多尺度协同发展转变 | ①内蒙古卜尔汉图 400 MW/2400 MWh 大电芯规模化应用示范工程并网；②国内规模最大的构网型储能电站内蒙古阿荣旗 1 GW/4 GWh 电站投运；③广东汕尾 200 MW/400 MWh 固液混合锂离子电池储能系统建成投运。百兆瓦级项目常态化，半固态电池在多地开展示范             |
| 7  | 液流电池   | ①复合多孔离子膜技术；②塑料激光焊接技术；③高功率密度电堆技术；④新型溴基两电子转移反应体系                                                       | ①新疆吉木萨尔 200 MW/1 GWh 全钒液流储能电站并网；②内蒙古磴口县 400 MW/1.6 GWh “全钒液流+磷酸铁锂”混合储能项目成功并网，单电池额定电流密度达 500 mA/cm <sup>2</sup> ；③全铁液流电池、铁铬液流电池、水系有机液流电池等多种新技术路线         |
| 8  | 钠离子电池  | ①大容量快充电芯技术；②层状氧化物正极材料技术和聚合物固态电解质技术；③宽温域性能优化技术等                                                       | ①国内最大 200 MW/400 MWh 构网型锂钠混合储能电站（含 40 MWh 钠离子电池）在云南丘北全容量并网运行；②全国首个 20 MWh 聚阴离子型钠离子电池储能项目开工；③广西南宁伏林大容量钠离子电池储能电站二期扩容工程正式投运                                |
| 9  | 超级电容器  | ①高频响应超级电容技术；②全固态柔性微型超级电容器技术；③新型复合电极技术；④超级电容与电池混合储能牵引供电技术                                             | ①全球容量最大的全超级电容储能调频示范工程华能伊敏电厂 16 MW 全超级电容电站投运；②山西偏关超级电容+锂电池百兆瓦级独立调频电站，配备了 58 MW 的超级电容储能系统，创造了全球最大规模超级电容应用的新纪录                                             |
| 10 | 储能新技术  | ①液态金属电池；②热泵储电技术；③重力储能技术；④双离子电池技术；⑤智能电池；⑥AI+储能技术等                                                     | —                                                                                                                                                       |
| 11 | 集成技术   | ①构网型控制；②高压直挂集成；③电池管理系统智能化；④多技术混合储能等。从“单一技术验证”向“多技术融合、系统集成”跨越                                         | ①全球最大的构网型储能电站内蒙古阿荣旗 1 GW/4 GWh 电站正式投运；②10 kV 高压直挂构网型储能装备实现首次应用；③“一芯一管理 CCS+技术方案”发布，为每块电池配备独立智能管理芯片                                                      |
| 12 | 消防安全技术 | ①浸没式液冷系统的结构优化与智能控制；②复合热管理技术；③热失控预警技术灭火剂与细水雾的协同抑制技术；④安全评估预期贡献法                                        | ①世界首套基于液氮灭火抑爆的储能系统在南方电网宝塘储能站工程示范应用；②荆门大容量钠离子电池储能系统投运，采用包级和柜体双重消防灭火技术                                                                                    |

计的 2025 年中国机构在中国地区申请的各种主要储能技术的发明专利数。可见，2024 年，各种储能技术中，锂离子电池技术申请发明专利数居第一为 10269 件，比去年同期增长 12.9%。其次是储热储冷技术 8291 件，锂离子电池技术申请发明专利数首次超过储热储冷，跃居第一位。钠离子电池、液流电池、超级电容器、压缩空气、飞轮、抽水蓄能和热泵储电也非常活跃，其他储能技术申请发明

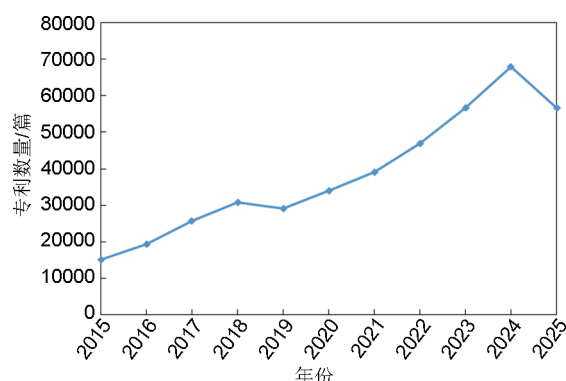


图5 中国储能技术申请发明专利数（2015—2025年）

Fig. 5 Number of patents applied by Chinese institutions on energy storage (2015—2025)

专利数为19357篇。总体上，各种储能技术的排名和2021—2024年基本吻合，化学储能发明专利数高于物理储能，和材料密切相关的储能技术申请专利的活跃程度很高。储能相关技术申请发明专利数活跃，同图1基础研究SCI论文的情况基本吻合。

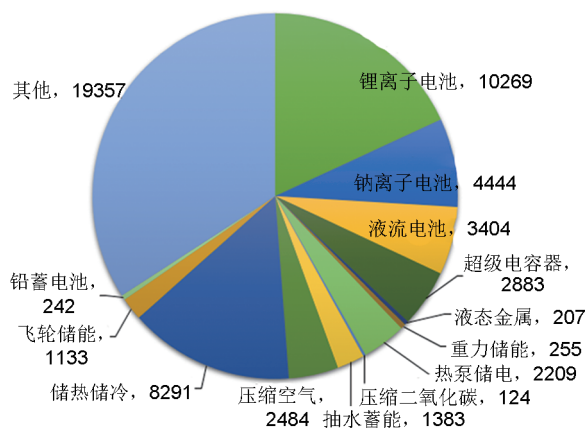


图6 2025年中国主要储能技术申请发明专利数

Fig. 6 Number of patents applied by Chinese institutions on energy storage published in 2025

图7给出了依据全球专利数据库incoPat，以“Energy Storage”为主题词在世界知识产权数据库（WIPO）中统计的，2015—2025年世界主要国家关于储能技术申请的国际发明专利数。需要说明的是，图中国际发明专利数与之前统计数据稍有变化<sup>[9]</sup>，这是数据库自身更新的原因；另外，2025年各国储能技术发明专利申请数明显偏低，这是由于数据库更新滞后的结果，图中2015—2024年的数据更具参考价值。2015—2025年累计发明专利数中国排名第一，累计排名前十的国家依次为美国、中国、德国、日本、韩国、法国、英国、瑞

士、瑞典和加拿大。从总体趋势上看，其他主要国家的储能国际发明专利申请数变化较为稳定，而中国储能国际专利申请数增长迅猛，2018年以来一直保持世界第一，美国、德国、日本、法国等国家有轻微波动，但总体变化不大。

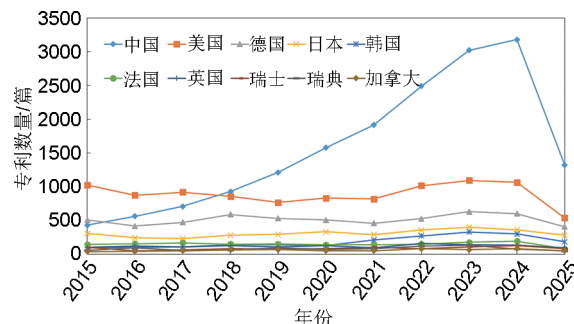


图7 各国储能技术WIPO国际发明专利申请数（2015—2025年）

Fig. 7 Number of WIPO patents applied on energy storage by major countries (2015—2025)

图8给出了2024年世界主要国家WIPO发明专利申请数。2024年，中国储能WIPO国际发明专利申请数为3180篇，占全球47.5%，较2023年比例占比有所增加，已稳居世界第一。排在第2至10名的国家是美国、德国、日本、韩国、法国、英国、瑞士、加拿大和瑞典。2024年中国储能技术发明专利申请数优势进一步增大，逐渐接近世界的一半。中美两国储能技术发明专利申请数总和占全球的63.4%，为世界储能领域关键技术研发的最主要力量。

综合图6、图7和图8可见，除中国外，国际

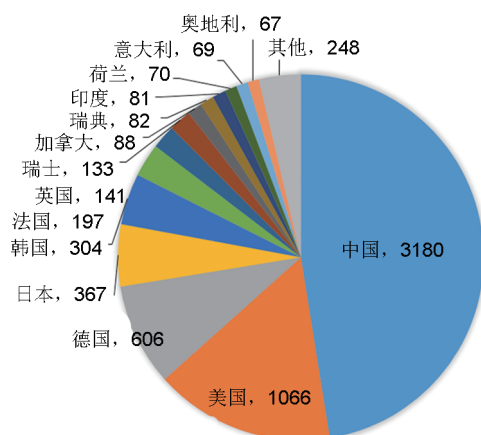


图8 2024年各国WIPO国际发明专利申请数

Fig. 8 Number of patents applied on energy storage by major countries in 2024

发明专利申请数前十名的国家均为发达国家，和 2023 年相比国际储能关键技术研发的格局基本不变。结合图 3 中 SCI 论文数的基本格局，可以看出明显的趋势，图 3 中新兴国家的 SCI 论文数增加很快，基础研究的快速发展，将推动关键技术加快研发和专利申请数的增加。比如，印度在 2024 年申请的国际专利数已达到世界的第 11 位，增长趋势明显，这也和印度近几年 SCI 论文数快速增加是吻合的。综合图 1~8 可见，2024 年中国学者和机构的国际发明专利申请数已占到 47.5%，和基础研究 SCI 论文数的比例（49.0%）已基本持平<sup>⑩</sup>。在储能技术领域，无论是基础研究还是关键技术研发，中国均是世界上最活跃的国家。

### 13.3 集成示范

表 1 给出了 2025 年中国储能集成示范进展的总结。从表中可见，2025 年我国主要储能技术的集成示范均取得了重要进展，大规模、长时间、高安全和混合储能是当前集成示范的热点方向。和 2024 年相比，集成示范的分类基本没有变化，仍可大致分为三类：一是系统规模或者性能提升的集成示范，主要包括抽水蓄能、锂离子电池、压缩空气储能、铅蓄电池和飞轮储能等。二是验证关键技术的集成示范，主要包括锂离子电池、液流电池、钠离子电池、储热储冷和超级电容等。三是新型技术的集成示范，主要包括构网型储能、半固态电池、混合储能、热泵储电、双离子电池等。

根据中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟全球储能数据库的统计，如图 9 所示，截至 2025 年底，中国已投运的储能项目累计装机容量（包括物理储能、化学储能以及熔融盐储热）达 213.3 GW，同 2024 年相比增长 54.0%，占全球市场 43.0%，居世界第一位。其中，抽水蓄能累计装机 66.8 GW，同 2024 年相比增长 12.8%，抽水蓄能累计装机在总装机中的占比为 31.3%；新型储能装机快速增长，累计装机达到 144.7 GW（未含熔融盐储热 1.8 GW），同 2024 年相比增长 85.0%，是“十三五”时期末的 45 倍，中国新型储能累计装机已占全球市场的 51.9%，居世界第一位。2025 年，我国储能装机继续保持高速增长，新增投运储能装机容量 75.4 GW，其中新增新型储能投运装机 66.4 GW，继续稳居世界第一位，比 2024 年同比增长 51.9%。

结合表 1 和图 9 可见，从技术分布来看，同 2024 年相比<sup>⑩</sup>，我国 2025 年抽水蓄能装机比例下降 11.1%，在去年首次低于 1/2 后，历史上首次低于 1/3；在新型储能技术中，锂离子电池继续占据主导地位，压缩空气储能、铅蓄电池、液流电池和储热技术等，也占有一定的市场份额。从发展特征上看，2025 年中国储能项目呈现出大型化、规模化与多元化并行发展的趋势，全年新增百兆瓦级项目超过 260 个，同比增长 38.8%，新增百兆瓦级项目的技术路线包括锂离子电池、压缩空气、液流电池、铅蓄电池等。从应用分布来看，如图 10 所示，2025 年新增装机应用场景以独立储能和新能源配储为主，二者新增合计装机近 60 GW，同比增长 50%，其中，独立储能新增装机 42 GW，同比增长 59.0%。

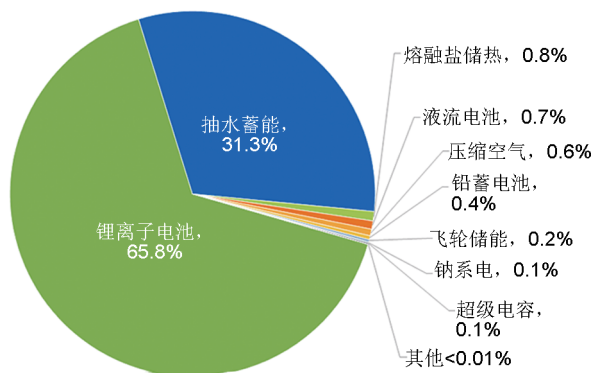


图 9 2025 年底中国储能项目累计装机情况  
Fig. 9 Cumulative installed capacity of energy storage projects in China by 2025

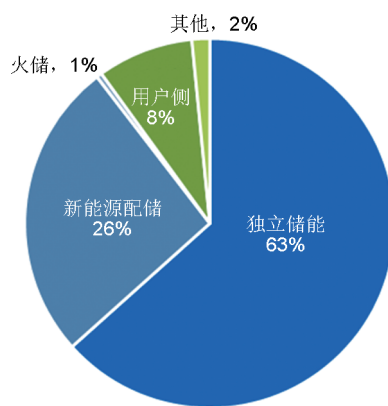


图 10 2025 年中国新增储能项目应用情况  
Fig. 10 Application of newly installed capacity of energy storage projects in China in 2025

综合分析 2025 年各种储能技术基础研究、关键技术、集成示范和应用情况，中国储能技术可大致分为四个梯队，和 2024 年基本一致<sup>⑩</sup>。如图 11

所示,第一梯队为抽水蓄能和锂电池,已大规模应用;第二梯队为压缩空气储能、液流电池、铅蓄电池和储热储冷技术,处于推广应用阶段;第三梯队为钠离子电池、飞轮储能和超级电容器,处于从示范向应用转型阶段;第四梯队为液态金属、热泵储电、重力储能、双离子电池、固态电池等储能新技术,尚处于研发阶段。

图12给出了2025年中国储能技术和世界储能技术先进水平的对比。从图中可见,中国继续位列储能技术国际先进国家行列,和美国、欧洲形成国际储能技术的第一梯队。锂离子电池、压缩空气储能、液流电池和钠离子电池技术已达到世

界先进水平。同2024年相比<sup>[9]</sup>,各储能技术发展水平均有所提升,抽水蓄能、锂离子电池、压缩空气储能、钠离子电池和储能新技术的提升更加明显。综合图3、图6和图12可见,2025年中国继续保持全球基础研究、技术研发和集成示范最为活跃的国家地位,中国发表的SCI论文数、申请WIPO国际发明专利数和储能系统总装机均占全球总数的50%左右,稳居世界第一;而且,中国发表SCI论文数、申请WIPO国际发明专利数和储能系统总装机均仍在持续增长,和美国等其他储能强国相比优势有继续扩大的趋势,特别是在新型储能领域的优势更加明显。

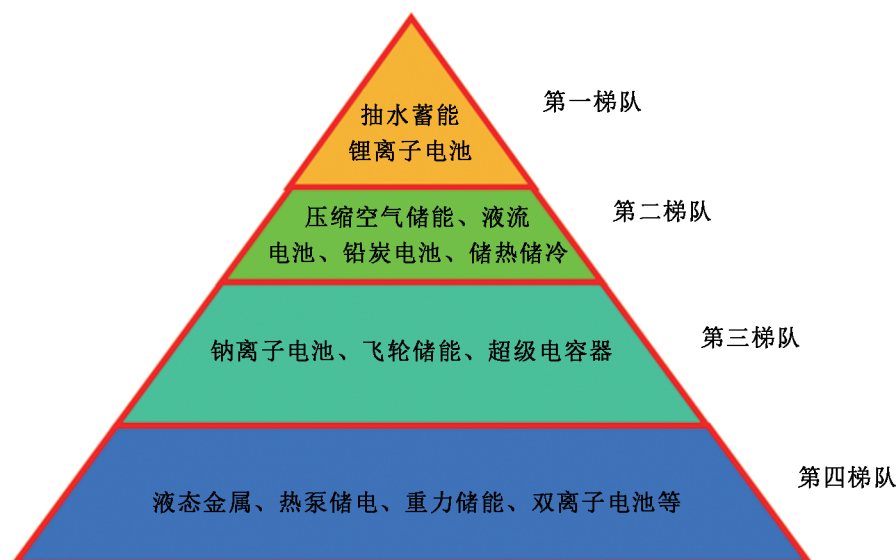


图11 2025年中国储能集成示范和产业化梯队

Fig. 11 Echelon of energy storage demonstration and industrialization in China in 2025

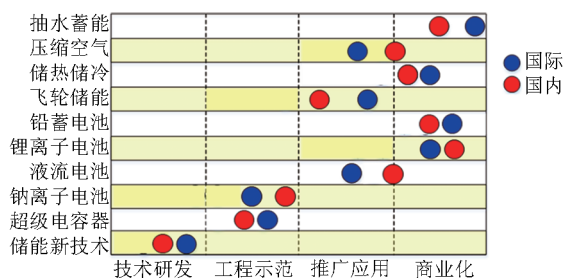


图12 2025年中国储能技术和世界先进水平的比较

Fig. 12 Comparison of energy storage technologies between China and world leading countries in 2025

### 13.4 政策分析

2025年我国储能政策热度与精准度同步提升,储能全面市场化,政策精细化、收益多元化趋势明显,国家与地方容量电价、并网调度、安全标准等出

台系列细则,有力地促进了中国储能行业从规模化向市场化发展的转变。据中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟不完全统计,2025年全国共发布储能相关政策869项,较2024年同比增长13%,累计政策数量突破3340项。其中,国家层面发布政策97项,主要聚焦顶层设计与机制创新,重点围绕产业高质量发展、电力市场建设、安全管理规范等关键领域构建制度框架;地方层面,广东、浙江、四川、河北等省份政策发布量位居前列。全国已有26个省市完成“十四五”储能装机目标,11个省份发布2027年装机规划,8个省份明确2030年发展目标,政策对产业的引导作用持续凸显。总体上,2025年我国储能政策在强化战略引领、深化市场化改革、规范产业发展等方面持

续发力,主要体现在如下几个方面:

在储能战略地位的深化与升级方面,2025年《中华人民共和国能源法》正式施行,规定国家合理布局、积极有序开发建设抽水蓄能电站,推进新型储能高质量发展,发挥各类储能在电力系统中的调节作用。全国两会及《中共中央关于制定国民经济和社会发展的第十五个五年规划的建议》中明确提出“大力发展新型储能”,将其作为加快建设新型能源体系、培育新质生产力的核心抓手。国家层面出台“制造+应用”双轮驱动的高质量发展策略,7部门联合印发的《新型储能制造业高质量发展行动方案》提出到2027年培育3~5家千亿元级生态主导型企业,推动产业向高端化、智能化、绿色化转型;《新型储能规模化建设专项行动方案(2025—2027年)》则明确2027年全国新型储能装机规模达1.8亿千瓦、带动直接投资2500亿元的应用端目标。各地政策进一步细化储能在可再生能源消纳、电力系统安全韧性提升、能源结构转型等场景的功能价值,形成覆盖技术创新、产业培育、场景应用、国际合作的全方位战略支撑体系。

在市场机制改革与创新方面,2025年我国电力市场“1+6”体系全面建成,为储能市场化发展奠定制度基础。《电力市场运行基本规则》及中长期、现货、辅助服务等配套规则正式落地,明确新型储能作为独立经营主体的市场地位,进一步降低市场准入门槛。现货市场实现省级全覆盖,山西、广东、山东等7个省份及省间市场转入正式运行,多地探索“报量报价”模式、5分钟节点电价等灵活交易机制,贴合储能技术特性的价格发现机制逐步形成。辅助服务市场向多元品种扩展,调频市场成为储能增量收益核心,山东、河北、湖南等省份开展二次调频试运行,爬坡、备用、黑启动等新兴品种在部分省份落地;“电能量市场套利+辅助服务收益+容量价值补偿”的多元盈利模式逐步成熟,替代传统单一容量租赁模式。2025年,国家发展改革委和国家能源局发布《关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的通知》(136号文件),取消了新能源强制配储要求,推动储能从“政策驱动”转向“市场驱动”,电网侧独立储能成为增长热点。

在储能调节作用的强化与保障方面,国家发改

委、国家能源局联合发布《电力系统调节能力优化专项行动实施方案(2025—2027年)》等政策,明确新型储能与抽蓄、火电并列作为电力系统核心调节资源,统筹推进其在促消纳、保供应、保安全中的多元作用。政策进一步规范储能并网调度技术要求,强化全流程管理,华北、华中、华东等区域实现储能规模化集中调用,储能在电力系统中的调节价值得到充分释放。同时,政策推动储能与新能源融合发展,在“沙戈荒”新能源基地优化储能配置比例,探索100%新能源基地建设,支持分布式储能与交通、建筑、农业等领域复合利用,多维度拓展储能应用场景。

在市场化容量补偿机制的完善方面,2025年储能容量价格机制取得突破性进展。国家层面明确将容量市场作为电力市场体系建设的重要组成部分,推动建立市场化容量成本回收机制。地方层面,内蒙古、新疆、山东、浙江、河北、甘肃、湖北等7个省份已出台容量补偿政策,形成“按容量补偿”与“按放电量补偿”两类主流模式。甘肃率先实现机制创新,将电网侧新型储能纳入发电侧容量补偿范围,与煤电享受同等补偿标准,通过可靠容量折算与供需系数调控实现精细化补偿,为全国提供可参考经验。2026年初发布的《关于完善发电侧容量电价机制的通知》(114号文件),从国家制度层面明确电网侧独立新型储能的容量电价机制,按“同工同酬”原则参照煤电容量电价标准折算,标志着储能“电能量+辅助服务+容量价值”的完整收益体系正式成型。

在产业发展与品质优化方面,国家层面修订完善《锂离子电池行业规范条件》,制定产业高质量发展行动方案,引导企业从规模扩张转向技术创新、质量提升与成本优化。政策聚焦多元技术研发,推动钠离子电池、液流电池、压缩空气储能等新型技术的示范应用,支持长时储能、AI+储能等前沿方向攻关。地方层面通过专项资金补贴、研发激励等政策,促进产业技术升级,多地对技术创新型企业给予税收优惠与融资支持。同时,政策强化项目全生命周期管理,甘肃省构建闭环管理机制,山东省、山西省推行项目库管理模式,河南省强化备案失效考核,有效防范盲目投资与重复建设,引导产业高质量有序发展。

在绿色装备价值提升方面,2025年国家层面聚焦绿色场景融合,出台多项专项政策推动储能深

度参与低碳转型。5月发布的《关于有序推动绿电直连发展有关事项的通知》，明确绿电直连项目需配套储能提升系统平衡能力，要求新能源年自发自用电量占比不低于60%，鼓励源储协同就近消纳；6月印发的《关于开展零碳园区建设的通知》，将储能列为零碳园区核心调节资源，首批52个国家级园区明确清洁能源消费占比 $\geq 90\%$ 的指标，支持储能以虚拟电厂形式参与市场。地方层面积极跟进，21个省市出台虚拟电厂专项政策，绿电直连与零碳园区建设中普遍将储能配置作为关键条件，通过资金补贴、审批优化等措施引导部署，储能的绿色价值与经济价值深度融合，成为全面绿色转型的重要支撑。

## 14 结论与展望

2025年，中国储能经历了高速发展的一年，中国继续保持全球基础研究、技术研发和集成示范最为活跃的国家地位。这一年，中国机构和学者在储能领域发表SCI论文24312篇，其中国际合作SCI论文4931篇；申请中国发明专利51258件，申请WIPO国际发明专利3180件（2024年数据）；新增集成示范和产业化项目装机容量213.3 GW，新型储能装机首次超过2/3。中国发表SCI论文数、申请WIPO国际发明专利数和储能系统总装机均稳居世界第一且在持续增长，和其他储能强国相比优势有进一步扩大的趋势。总体上中国储能实现了规模化发展，且正在向全面商业化发展转变。

（1）物理储能方面：在抽水蓄能方面，总体上我国抽水蓄能技术向大容量、高参数、智能化和市场化方向发展，在高参数工程与施工技术、智能运维与管理技术等方面有重要进展。在压缩空气储能方面，总体上我国压缩空气储能技术实现了100~300 MW级系统从集成示范向推广应用的转变，在系统总体特性与能量损失机理、关键部件技术、集成示范与并网运行等方面均取得重要进展。在储热储冷方面，储热储冷技术继续保持储能领域研究的最热点方向之一，高性能复合材料、多尺度换热特性、相变储热技术、大规模火电耦合储热工程示范为当前技术研究的热点。在飞轮储能方面，我国飞轮储能技术持续向大功率、长寿命、高可靠性以及应用拓展方向深化发展，在转子热管理和振动抑制、构网型及混合储能协同等方面取得重要进展，

多个火电-飞轮联合调频、新能源场站的飞轮储能示范项目相继落地，技术成熟度和应用规模均稳步提升。

（2）化学储能方面：在铅蓄电池方面，在正极材料、电解液添加剂及板栅技术等方面取得了重要进展，示范项目加速落地，呈现出从用户侧向电网侧、从单一场景向多元融合拓展的趋势。在锂离子电池方面，技术在规模化应用的基础上向高安全、低成本和长寿命方向深化发展；液态锂离子电池持续主导市场，磷酸铁锂电池是目前储能锂电池的主流技术路线，500 Ah及以上大容量电芯正加速研发和应用；系统全生命周期管理及智能运维等关键技术持续完善，百兆瓦级示范和应用项目常态化，固液混合（半固态）储能电池在多地开展示范。在液流电池方面，在电解液、电极材料、离子交换膜材料等基础研究方面取得重要进展，复合多孔膜、高电流密度单电池和高功率密度电堆等关键技术取得突破，液流电池的大规模应用能力得到验证。在钠离子电池方面，技术在高性能正极和电解质材料、电极结构与界面稳定性、全电池工程化设计等方面取得了实质性进展，呈现出示范应用加速、产业链不断完善的特点。在超级电容器方面，技术总体向高性能和规模化方向发展，基础研究重点从传统电双层储能向赝电容和多离子协同方向发展，技术方面新型电极材料和界面工程成为研究重点，多个百兆瓦级项目投运，应用项目规模化和场景多元化趋势明显。在新型储能技术方面，研究热点有液态金属电池、热泵储电、重力储能、双离子电池、智能电池、固态电池和人工智能等。

（3）集成与安全方面：在集成技术方面，我国规模储能系统集成技术持续向高安全、大容量、高效率方向深度演进，总体上实现了从“单一技术验证”向“多技术融合、系统集成”的跨越，在构网型控制、高压直挂集成、电池管理系统智能化以及多技术混合储能等方向取得重要进展，储能集装箱集成度进一步提高。人工智能（AI）技术在智能预测、生成式AI、计算机视觉、具身AI和智能体等多个方面正在加速储能技术的发展，已深入到设计分析、试验制造、运行维护及集成示范等各个阶段，受益于大模型能力不断提升，具备自主决策与执行能力的智能体已应用于储能技术全流程，尤其在运行维护环节的规模化落地，显著提升了储能系

统的智能化水平。在消防安全技术方面,我国在储能电池热失控产气行为和机理、热失控传播机制、热管理技术、热失控预警技术、灭火技术、安全评估等方面均取得重要进展。在储能政策方面,我国储能政策热度与精准度同步提升,在深化市场化改革、强化战略引领、规范产业发展等方面持续发力,储能全面市场化,政策精细化、收益多元化趋势明显。

展望2026年,中国储能技术预计将继续保持全球最活跃国家地位,在基础研究、关键技术和集成示范方面,发表论文数、申请专利数、集成示范与应用装机规模将继续保持世界第一,且和其他储能强国的领先优势很有可能进一步扩大。预计全年中国储能新增装机将达60 GW以上,储能装机的相对增速可能放缓,但绝对增量将依然保持高位,新型储能装机比例将继续提升,有望突破70%。同时,尽管存在国际政治和贸易格局重构、国内产业和出口政策调整、储能企业竞争激烈等不确定因素,2026年中国储能大概率将继续保持高速发展,总体上将从政策驱动向市场驱动的高质量发展阶段转变。

### 参考文献

- [1] 国家发展改革委 国家能源局. “十四五”新型储能发展实施方案: 发改能源〔2022〕209号[EB/OL]. (2022-01-29) [https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c\\_1310523208.htm](https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310523208.htm).
- [2] 国家能源局. 关于促进新型储能并网和调度运用的通知: 国能发科技〔2024〕26号[EB/OL]. (2024-04-02) [https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-04/02/c\\_1310771072.htm](https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-04/02/c_1310771072.htm).
- [3] 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): 2149-2192.  
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): 2149-2192.
- [4] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330.  
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330.
- [5] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2023年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1359-1397. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441.  
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1397. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441.
- [6] 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.  
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.
- [7] 高学平, 罗畅, 朱洪涛, 等. 接复杂布置形式隧洞的抽水蓄能电站侧式进/出水口优化研究[J]. 水利学报, 2025, 56(6): 780-790.  
GAO X P, LUO C, ZHU H T, et al. Study on optimization of the side inlet/outlet with the complex tunnel layout in a pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(6): 780-790.
- [8] 高学平, 廉想, 朱洪涛, 等. 抽水蓄能电站进/出水口最优调整段长度研究[J/OL]. 水利水电科技进展, 1-14[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.tv.20250918.1516.010>.
- [9] 余凯文, 韩昌海, 韩康, 等. 抽水蓄能电站进/出水口漩涡特性及控制措施模型试验研究[J]. 水电能源科学, 2025, 43(10): 201-205. DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242184.  
YU K W, HAN C H, HAN K, et al. Experimental study on characteristics and control measures of inlet/outlet vortex of pumped storage power station[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(10): 201-205. DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242184.
- [10] YI C B, ZHANG Z Q, DONG H Y, et al. Research on pressure fluctuation distribution law and rotor-stator interaction of pump-turbine in vaneless region of turbine mode[J]. Frontiers in Energy Research, 2025, 12: 1387367. DOI:10.3389/fenrg.2024.1387367.
- [11] FANG Y R, HU J Y, LIU B, et al. Research on the energy distribution of hump characteristics under pump mode in a pumped storage unit based on entropy generation theory[J]. Water, 2025, 17(16): 2458. DOI:10.3390/w17162458.
- [12] LIANG A, CHANG Y Z, ZHANG W W, et al. Study on unsteady flow characteristics in the double-hump region of a pump-turbine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3150(1): 012053. DOI:10.1088/1742-6596/3150/1/012053.
- [13] YANG X W, ZHANG Z C, HANG C Y, et al. Transient simulation and analysis of runaway conditions in pumped storage power station turbines using 1D-3D coupling[J]. Fluids, 2025, 10(12): 318. DOI:10.3390/fluids10120318.
- [14] LI Z X, LI X B, HUANG X X, et al. 3D compressible flow analysis of an ultra-high-head pumped storage unit with water conveyance system at maximum pumping head[J]. Energies, 2025, 18(18): 4864. DOI:10.3390/en18184864.
- [15] 陆杰, 施俊德, 周大庆, 等. 水泵水轮机反S形不稳定区的仿生控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61(12): 336-343.  
LU J, SHI J D, ZHOU D Q, et al. Bionic control of the S-shaped instability region of a pump-turbine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(12): 336-343.
- [16] 刘心宇, 杨浩, 王维, 等. 三机式抽水蓄能机组中多级离心泵径向前导叶优化研究[J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 158-162.  
LIU X Y, YANG H, WANG W, et al. Research on optimization of radial leading vane of multistage centrifugal pump in ternary

- pumped storage unit[J]. *Water Resources and Power*, 2025, 43(3): 158-162.
- [17] 张宝勇, 程奇, 钱塘, 等. 定速与变速抽水蓄能机组联合运行过渡过程动态特性研究[J]. *水电能源科学*, 2025, 43(10): 196-200.  
ZHANG B Y, CHENG Q, QIAN T, et al. Study on the dynamic characteristics of transient processes during the joint operation of fixed-speed and variable-speed pumped storage units[J]. *Water Resources and Power*, 2025, 43(10): 196-200.
- [18] 宿生, 张元进, 白齐健, 等. 抽水蓄能电站调压室-竖井结合布置瞬态水力特性[J/OL]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 1-10[2026-04-08].  
<https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20250808.1051.002>.
- [19] 郭苗, 黄子豪, 江涛, 等. 抽水蓄能电站事故闸门动应力演化过程分析研究[J]. *水利学报*, 2025, 56(12): 1668-1678.  
GUO M, HUANG Z H, JIANG T, et al. Study on the dynamic stress evolution process of emergency gates in pumped storage power stations during transient operations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(12): 1668-1678.
- [20] 陈青生, 刘天凤, 孙纪阳, 等. 抽水蓄能电站同发同抽不等流量运行的水力特性研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(3): 28-35.  
CHEN Q S, LIU T F, SUN J Y, et al. Study on hydraulic characteristics of pumped storage power plant running with simultaneous generation and pumping at different flow rates[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2025, 47(3): 28-35.
- [21] 许昌, 卢伟甫, 曾雪洋, 等. 变速抽水蓄能机组水力-电气耦合仿真技术研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2026, 44(2): 164-172.  
XU C, LU W F, ZENG X Y, et al. Research on hydraulic-electrical and electromechanical coupling simulation technology of variable-speed pumped storage units[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2026, 44(2): 164-172.
- [22] 刘璋, 刘公成, 张云鹏, 等. 全功率可变速抽水蓄能机组在不同条件下甩负荷的动态特性研究[J]. *振动与冲击*, 2025, 44(17): 71-81.  
LIU Z, LIU G C, ZHANG Y P, et al. Dynamic characteristics of load rejection of full power variable-speed pumped storage unit under different conditions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(17): 71-81.
- [23] 贾伊杭, 许国瑞, 卢伟甫, 等. 变速抽水蓄能机组暂态无功支撑能力及其影响因素[J]. *大电机技术*, 2025(3): 1-9.  
JIA Y H, XU G R, LU W F, et al. Transient reactive power support capability of variable-speed pumped storage unit and its influence factors[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2025(3): 1-9.
- [24] 王彤, 李子昂, 陈骁, 等. 不同故障类型下定速/变速抽水蓄能机组协同运行系统的暂态功角稳定性研究[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-15[2026-04-08].  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250908.1104.009>.
- [25] 张昊晟, 郑冬飞, 魏藏, 等. 变速抽水蓄能机组并网运行仿真与控制[J]. *大电机技术*, 2025(6): 58-65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3983.2025.06.008.  
ZHANG H S, ZHENG D F, WEI W, et al. Simulation and control of variable-speed pumped storage units in grid-connection[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2025(6): 58-65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3983.2025.06.008.
- [26] 王贵, 高洪军, 李德友, 等. 大型抽水蓄能电站关键技术研究现状及发展趋势[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(10): 3-13. DOI: 10.12067/ATEEE2412008.  
WANG G, GAO H J, LI D Y, et al. Research status and development trends of key technologies for large-scale pumped storage power stations[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(10): 3-13. DOI: 10.12067/ATEEE2412008.
- [27] 贾文林, 张尊华, 周梦妮, 等. 抽水蓄能选址技术方法及其发展综述[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(12): 4672-4688.  
JIA W L, ZHANG Z H, ZHOU M N, et al. Site selection methods and developments for pumped hydro energy storage: A review[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(12): 4672-4688.
- [28] 吴勇拓, 曹睿, 方国华, 等. 抽水蓄能电站特征水位方案拟定方法研究[J]. *水电能源科学*, 2025, 43(8): 208-212.  
WU Y T, CAO R, FANG G H, et al. Research on method of formulating characteristic water level for pumped storage power station[J]. *Water Resources and Power*, 2025, 43(8): 208-212.
- [29] 郭海燕, 段宝仓, 尹修明, 等. 基于灵活性量化的抽水蓄能电站规划方法[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(4): 22-29. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-1687.  
GUO H Y, DUAN B C, YIN X M, et al. Planning method for pumped storage power stations considering flexibility requirements[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2025, 46(4): 22-29. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-1687.
- [30] 莫巨华, 王浩, 王超, 等. 基于卧式抽蓄的风光水储联合运行优化调度研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(1): 1-9.  
MO J H, WANG H, WANG C, et al. Optimized scheduling of wind-solar-hydro energy storage joint operation based on horizontal pumped storage[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2025, 46(1): 1-9.
- [31] 张彦芝, 陈思捷, 郑林烽, 等. 含混合式抽蓄的风光水储一体化电站的配置与运行方法[J/OL]. *上海交通大学学报*, 1-25[2026-04-08].  
<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.429>.
- [32] 陈智梁, 魏苗, 胡新源, 等. 计及绿电交易的风光-梯级混合抽蓄系统多目标调峰优化控制[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2025, 61(11): 54-68.
- [33] 许红断, 刘凡, 黄迪, 等. 基于改进灰狼算法的梯级水电站与抽水蓄能联合经济调度策略[J]. *水力发电*, 2025, 51(8): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2025.08.015.  
XU H D, LIU F, HUANG D, et al. Joint economic scheduling strategy of cascade hydropower stations and pumped storage based on improved grey wolf algorithm[J]. *Water Power*, 2025, 51(8): 99-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2025.08.015.
- [34] 冯钦, 武新宇, 程春田, 等. 考虑风光出力预测累积误差的抽水蓄能电站群调峰优化方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-13[2026-04-08].  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250416.1309.007>.

- [35] 钱骏, 谭乔凤, 闻昕, 等. 基于增设泵站的梯级混合式抽水蓄能电站短期调度研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-16[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250520.2111.013>.
- [36] 曹林宁, 杨孟昌, 汪嘉豪, 等. 基于流量优化的混蓄电站精细化运行成本研究[J/OL]. 中国农村水利水电, 1-14[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1419.tv.20250909.0845.012>.
- [37] 吕婉煜, 赵红生, 韩应生, 等. 供需不确定性下抽水蓄能提升系统灵活性的分层优化调度[J]. 电工技术学报, 2025, 40(21): 6984-6999. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241815.
- LYU W Y, ZHAO H S, HAN Y S, et al. Hierarchical optimal scheduling for pumped storage to enhance system flexibility under supply-demand uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 6984-6999. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241815.
- [38] 张智, 霍超, 郭尊, 等. 新型电力系统下抽水蓄能集群规划与运营关键问题综述及研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 5810-5831. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.242762.
- ZHANG Z, HUO C, GUO Z, et al. Overview and research prospects of key issues in pumped storage cluster planning and operation under the new type power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5810-5831. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.242762.
- [39] 钟浩, 杜涛, 邹贤求, 等. 电力市场环境下多流域型虚拟电厂抽水蓄能机组容量优化配置[J/OL]. 电力自动化设备, 1-22[2026-04-08]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202511016>.
- [40] 何尧玺, 张宝允, 陈雪霞, 等. 基于合作博弈的风光-定/变速抽蓄分布鲁棒容量优化配置[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 1-12[2026-04-08]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001718>.
- [41] 崔杨, 付大志, 程丁然, 等. 考虑系统惯量需求的常规水电站改造联合纯抽蓄电站容量配置方法[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 5292-5303, 10112-10115.
- CUI Y, FU D Z, CHENG D R, et al. Capacity allocation method of conventional hydropower transformation combined with pure pumped storage power station considering system inertia demand [J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5292-5303, 10112-10115.
- [42] 梅粮飞, 刘伟, 侯俊, 等. 基于碳中和背景下的水电二次开发利用研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 1-20[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20251114.1720.002>.
- [43] 卢慧颖, 张婉秋, 曹成龙, 等. 采煤沉陷区光伏—抽水蓄能容量配置优化方法研究[J/OL]. 金属矿山, 1-12[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1055.td.20250829.0913.002>.
- [44] 祝令凯, 郑威, 缪玉洁, 等. 考虑高比例新能源消纳的抽蓄机组选址定容优化方法[J/OL]. 水利水电技术(中英文), 1-10[2026-04-08]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1746.tv.20251120.1137.004>.
- [45] 谢建恒, 王浩, 任岩, 等. 基于卧式抽蓄的多能互补系统容量配置优化研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 10-19.
- XIE J H, WANG H, REN Y, et al. Capacity allocation optimization of multi-energy complementary system based on horizontal pumped storage[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 10-19.
- [46] 胡昊, 许昭一, 崔争艳, 等. 基于大语言模型的抽水蓄能电站智能运维辅助系统构建研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 34-42.
- HU H, XU Z Y, CUI Z Y, et al. Intelligent operation and maintenance for pumped storage power stations based on large language model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(5): 34-42.
- [47] 黄锦辉, 曾辉, 万晶宇, 等. 抽水蓄能机组整机动力学模型及机架振动特性分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(11): 1833-1843.
- HUANG J H, ZENG H, WAN J Y, et al. Dynamic model of complete machine and vibration characteristics analysis of the frame of pumped storage unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(11): 1833-1843.
- [48] 惠振国, 胡志平, 孙政, 等. 基于改进 EMD 和 GAM-TCN 模型的抽水蓄能机组状态趋势预测[J]. 水电能源科学, 2025, 43(6): 175-179.
- HUI Z G, HU Z P, SUN Z, et al. State tendency prediction for pumped storage unit based on improved EMD method and GAM-TCN model[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(6): 175-179.
- [49] 汪靖尧, 冯陈, 张玉全, 等. 基于 ICEEMDAN 和 CNN-LSTM-ATTENTION 的抽水蓄能机组振动预测[J/OL]. 水电能源科学, 2026 (3): 194-199[2026-03-25]. <https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250203>.
- [50] 王保根, 林文峰, 秦飞, 等. 基于云管边端协同的抽水蓄能电站视频监控智能体的研究与应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 491-497.
- WANG B G, LIN W F, QIN F, et al. Research and application of pumped-storage hydroelectricity video monitoring agent based on cloud tube edge collaboration[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 491-497.
- [51] 亓增刚, 王磊, 蔺国华, 等. 废弃煤矿地下空间资源应用研究现状与展望[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(5): 124-138.
- QI Z G, WANG L, LIN G H, et al. Current situation and prospects of applied research on underground space resources of abandoned coal mines[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(5): 124-138.
- [52] 聂子攀, 肖立业, 张京业, 等. 新型抽水蓄能系统发展综述[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(10): 14-25. DOI:10.12067/ATEEE2502018.
- NIE Z P, XIAO L Y, ZHANG J Y, et al. Review of development of new pumped storage systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(10): 14-25. DOI: 10.12067/ATEEE2502018.
- [53] 王浩爽. 抽水蓄能电站 800 MPa 级引水钢管管水压试验研究[J]. 山西建筑, 2026, 52(5): 171-174, 194. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2026.05.036.
- WANG H S. Water pressure test study on 800 MPa grade water diversion steel bifurcation pipe for pumped storage power station [J]. Shanxi Architecture, 2026, 52(5): 171-174, 194. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2026.05.036.
- [54] 冯鲲鹏, 吕城腾, 谢海峰, 等. 高水头抽水蓄能电站高压岔管稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2025, 43(9): 166-170.

- FENG K P, LV C T, XIE H F, et al. Stability analysis of high-pressure branch pipes in high-head pumped storage power station[J]. *Water Resources and Power*, 2025, 43(9): 166-170.
- [55] 李绪佳. 抽水蓄能电站堆石坝面板混凝土配合比优化与关键施工技术[J]. *四川水泥*, 2026(2): 107-108, 111.
- LI X J. Mix proportion optimization and key construction technology of concrete face slab of rockfill dam of pumped storage power station[J]. *Sichuan Cement*, 2026(2): 107-108, 111.
- [56] 董书礼, 王栋林, 苏衡. 抽水蓄能电站排水廊道TBM施工技术[J]. *云南水力发电*, 2025, 41(2): 103-105. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3951.2025.02.026.
- DONG S L, WANG D L, SU H. TBM construction technology for drainage gallery of pumped storage power station[J]. *Yunnan Water Power*, 2025, 41(2): 103-105. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3951.2025.02.026.
- [57] 吴宗林, 李寒松, 胡天浩, 等. 抽水蓄能电站排水系统应用小直径TBM施工的高效物料运输系统[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(24): 64-69.
- WU Z L, LI H S, HU T H, et al. Efficient material transportation system for small-diameter TBM construction in drainage system of pumped storage power station[J]. *Construction Technology*, 2025, 54(24): 64-69.
- [58] 王二闯. 抽水蓄能电站大直径超深竖井伞钻孔特性分析及钻进参数优化[J]. *价值工程*, 2025, 44(26): 116-118. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2025.26.035.
- WANG E C. Characteristics analysis and drilling parameter optimization of large-diameter and ultra deep vertical umbrella boreholes in pumped storage power stations[J]. *Value Engineering*, 2025, 44(26): 116-118. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2025.26.035.
- [59] 罗笃发, 闵晶, 刘宇, 等. 辽宁岫岩抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板堆石坝抗震安全性[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(35): 15267-15277.
- LUO D F, MIN J, LIU Y, et al. Seismic safety of asphalt concrete-faced rockfill dam in Liaoning Xiuyan pumped storage power station[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(35): 15267-15277.
- [60] 胡锦方, 马刚, 杨启贵, 等. 水位变幅对抽水蓄能面板堆石坝应力变形的影响[J]. *水力发电学报*, 2025, 44(12): 84-99.
- HU J F, MA G, YANG Q G, et al. Effect of water level variation on stress-deformation behavior of CFRD for pumped storage stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2025, 44(12): 84-99.
- [61] 张小虎, 董志宏, 韩晓玉, 等. 湖北大冶抽水蓄能电站地应力场反演与抗水力劈裂分析[J]. *水利水电快报*, 2026, 47(2): 32-38.
- ZHANG X H, DONG Z H, HAN X Y, et al. *In-situ* stress field inversion and hydraulic fracturing resistance analysis of Daye Pumped Storage Power Station in Hubei Province[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2026, 47(2): 32-38.
- [62] CHEN H S, WANG X, XU Y J, et al. Technologies and prospects for compressed air energy storage[J]. *Nature Reviews Clean Technology*, 2026, 2(3): 179-197. DOI: 10.1038/s44359-026-00150-9.
- [63] YAN M D, LIU C C, LING H S, et al. Off-design performance of variable-speed compressed air energy storage system under different operation schemes[J]. *Energy*, 2025, 338: 138626. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138626.
- [64] LI T Y, CHEN L J, LIU H C, et al. Configuration optimization for advanced adiabatic compressed air energy storage considering thermal coupling characteristics[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 131: 117249. DOI: 10.1016/j.est.2025.117249.
- [65] GE G Q, CAI X C, SUN H, et al. Optimization design of an adiabatic compressed air energy storage system with sliding pressure operation and packed bed thermal energy storage based on a one-dimensional loss model[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 328: 119626. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119626.
- [66] SU X, LIU C C, GUO D Z, et al. Experimental study on the characteristics of energy airbags for underwater compressed air energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 118: 116283. DOI: 10.1016/j.est.2025.116283.
- [67] CHEN J X, ZUO Z T, ZHOU X, et al. Study on tip clearance flow of radial intake mixed flow compressor in CAES system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 263: 125304. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125304.
- [68] ZHANG Y X, ZUO Z T, ZHOU X, et al. Comparative analysis of diagonal and centrifugal compressors with synergy theory in compressed air energy storage system[J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(4): 1325-1339. DOI: 10.1007/s11630-024-1966-4.
- [69] ZHAO M, LAN Y S. Investigation on transient flow characteristics of scroll compressor for compressed air energy storage system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2025, 239(7): 1052-1060. DOI: 10.1177/09576509251375506.
- [70] 王国华, 张通, 陈来军, 等. 面向工程应用的先进绝热压缩空气储能模型及先进(火用)分析[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(2): 127-135.
- WANG G H, ZHANG T, CHEN L J, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system model for engineering applications and advanced exergy analysis[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(2): 127-135.
- [71] 石贵月, 陶海亮, 左志涛, 等. 压缩空气储能轴流压缩机叶片应力优化方法[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(4): 1522-1532. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1011.
- SHI G Y, TAO H L, ZUO Z T, et al. Research on blade stress optimization method of axial flow compressor in compressed air energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(4): 1522-1532. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1011.
- [72] PAN X C, ZHU Y L, WANG X, et al. Numerical investigation on the influence of axial thermal expansion in axial turbine for compressed air energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110595. DOI: 10.1016/j.est.2024.110595.
- [73] 常坤, 王子遇, 邹磊, 等. 压缩空气储能膨胀机出口管道扩张角影响

- 研究[J]. 内燃机与配件, 2025(23): 64-66. DOI:10.3969/j.issn.1674-957X.2025.23.020.
- CHANG K, WANG Z Y, ZOU L, et al. Research on the influence of expansion angle of outlet pipeline of compressed air energy storage expansion machine[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2025(23): 64-66. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-957X. 2025.2 3.020.
- [74] SU C X, WANG G R, JING J J, et al. Study on thermodynamic performance of compressed air gas storage device in idle oil and gas wells[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46 (10): 3188-3196.
- [75] 陈泽兵, 李文, 朱阳历, 等. 压缩空气储能系统膨胀机的旁路控制策略[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(7): 2091-2105.
- CHEN Z B, LI W, ZHU Y L, et al. Bypass control strategies for the compressed air energy storage system expander[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(7): 2091-2105.
- [76] 赵朝成, 刘明, 倪广涛, 等. 耦合熔盐储热的补燃式压缩空气储能系统热力性能分析[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(1): 42-50.
- ZHAO C C, LIU M, NI G T, et al. Thermodynamic analysis on the afterburning-type compressed air energy storage system integrated with molten salt thermal storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(1): 42-50.
- [77] YANG H, CUI J Y, LIU L S, et al. Dynamic simulation of medium-temperature thermal storage compressed air energy storage (TS-CAES) system using Aspen Hysys[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 123: 116757. DOI: 10.1016/j. est. 2025. 116757.
- [78] ROMANI J, SALVINI C, GIOVANNELLI A, et al. Heat transfer equipment for a compressed air energy storage (CAES) integrated with a concentrated solar system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3143(1): 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/3143/1/012061.
- [79] LIU H T, WANG Z Y, LI W, et al. A thermodynamic model and experimental validation of internal heat exchangers for active air temperature control in lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. Energy, 2025, 340: 139165. DOI: 10.1016/j. energy.2025.139165.
- [80] 郑彦霖, 郭欢, 尹钊, 等. 微型压缩空气储能热电联供系统变负荷运行特性[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3488-3499.
- ZHENG Y L, GUO H, YIN Z, et al. Variable-load operating characteristics of heat and power cogeneration system based on micro compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3488-3499.
- [81] 蔡升华, 戴洪军, 张勇, 等. 隧洞式压缩空气储能储气库温度时空演化规律研究[J]. 水力发电, 2025, 51(9): 113-120. DOI: 10.3969/j. issn.0559-9342.2025.09.017.
- CAI S H, DAI H J, ZHANG Y, et al. Temporal and spatial evolution of temperature in tunnel-type Caverns for compressed air energy storage under first operational cycle condition[J]. Water Power, 2025, 51(9): 113-120. DOI: 10.3969/j. issn. 0559-9342.2025. 09.017.
- [82] 郑开云. 基于人工洞室的压缩工质储能系统构建与分析[J/OL]. 南方能源建设, 1-9[2026-04-02]. <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-200>.
- ZHENG K Y. Construction and analysis of compressed working fluid energy storage system based on artificial cavern [J]. Southern Energy Construction, 1-9[2026-04-02]. <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-200>.
- [83] LIU S H, XIA C C, XU Y J, et al. Physical model test and numerical simulation for the stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. Energy, 2025, 335: 137853. DOI:10.1016/j.energy.2025.137853.
- [84] LIU C C, YIN Z, SU X, et al. Experimental investigation into the dynamic characteristics of an isobaric compressed air energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 147: 120349. DOI: 10.1016/j.est.2026.120349.
- [85] LI G, CHEN H, GUO H, et al. A novel coupled system of compressed air energy storage system and air separation unit: Thermodynamic and economic evaluation[J]. Energy, 2025, 335: 138303. DOI:10.1016/j.energy.2025.138303.
- [86] CAO R F, MA Y Y, WANG Y F. Thermodynamic and economic analysis of a hydrogen fueled compressed air energy storage system coupling with PEM electrolyzer cell and PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 170: 151221. DOI:10.1016/j.ijhydene.2025.151221.
- [87] XUE X J, LI S J, ZHENG L X, et al. Designing and performance assessment of a novel compressed air energy storage system integrated with a gas turbine combined cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 128042. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2025.128042.
- [88] XUE X J, SHI W Y, ZHENG L X, et al. Performance analyses of a novel compressed air energy storage system integrated with a biomass combined heat and power plant for the multi-generation purpose[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 272: 126403. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.126403.
- [89] CHEN J X, ZHOU X, ZUO Z T, et al. Study on the effect of inlet/outlet volute on mixed flow compressor performance for compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 117: 116132. DOI:10.1016/j.est.2025.116132.
- [90] GUAN Y, LI W, ZHANG X J, et al. Optimization method for nozzle control of governing turbine[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 285: 109773. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2024.109773.
- [91] 靳红炜, 林曦鹏, 陈广玲, 等. 板翅换热器气-水换热流热固耦合特性研究[J]. 科技与创新, 2025(15): 114-116, 119. DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2025.15.030.
- JIN H W, LIN X P, CHEN G L, et al. Study on thermal-solid coupling characteristics of gas-water heat exchange flow in plate-fin heat exchanger[J]. Science and Technology & Innovation, 2025(15): 114-116, 119. DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2025.15.030.
- [92] HUANG X L, LIU D, ZHAO L, et al. Developing phase change materials for thermal energy storage using polyols with cold crystallization property[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 110: 115364. DOI:10.1016/j.est.2025.115364.
- [93] ZHONG Y X, YANG D Z, XIE J, et al. The heat transfer of phase change cold storage material regulated by magnetic field-induced

- surfactant-modified nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 122: 116747. DOI:10.1016/j.est.2025.116747.
- [94] MA Q, XIE B S, CAO P H, et al. Emerging ternary eutectic hydrated salt cold energy storage materials for cold chain transportation[J]. *Energy*, 2025, 335: 138042. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138042.
- [95] YANG X, XIE B S, LI C S, et al. Emerging magnesium chloride hexahydrate phase change material targeting cold storage engineering[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 137: 118639. DOI:10.1016/j.est.2025.118639.
- [96] LIN S Y, XIE Y Q, CHEN X Y, et al. Efficient utilization of energy enabled by form stable brine phase change cold storage gels with ultra-high latent heat towards green, safe and cost-effective fruit cold chain[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2025, 178: 192-202. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2025.07.006.
- [97] LI J X, WANG Z K, LI Y H, et al. Design and analysis of a cascade solid-packed bed cold storage system using liquid heat transfer fluids for liquid air energy storage[J]. *Energy*, 2025, 338: 138860. DOI:10.1016/j.energy.2025.138860.
- [98] YANG F L, DIAO Y H, ZHAO Y H, et al. Heat transfer performance and optimization investigation on the phase change cold storage device based on flat micro-heat pipe array under simultaneous charging and discharging mode[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116689. DOI: 10.1016/j.est.2025.116689.
- [99] SUN C B, DIAO Y H, FANG D R, et al. Numerical analysis on the thermal behavior and optimization of a phase change cold energy storage device with thermoelectric coolers as a cold source[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127307. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127307.
- [100] LIU Z C, QUAN Z H, ZHAO Y H, et al. Optimization of a cold thermal energy storage system with micro heat pipe arrays by statistical approach: Taguchi method and response surface method[J]. *Renewable Energy*, 2025, 238: 121899. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121899.
- [101] SHANGGUAN Z, CHEN L, GONG C X, et al. Thermodynamic and economic analysis of an advanced liquid air energy storage system coupled with LNG cold energy, waste heat and solar energy[J]. *Energy*, 2025, 340: 139194. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139194.
- [102] JI Z Y, TENG S Y, XI H. Thermodynamic and economic performance analysis of compressed air energy storage system with a cold, heat and power tri-generation function combined with vortex tube[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 114: 115932. DOI:10.1016/j.est.2025.115932.
- [103] LI B, LI Z Z, WU C X, et al. Dynamic heat storage and release characteristics and flow control optimization of photovoltaic/thermal-heat pump coupled packed bed thermal energy storage system (PV/T-HP-PBTES) [J]. *Energy*, 2025, 334: 137736. DOI:10.1016/j.energy.2025.137736.
- [104] FAN C H, LI M J, LI M J, et al. Performance analysis and optimization of an adiabatic compressed air energy storage system coupled with the packed-bed thermal energy storage device[J]. *Energy*, 2025, 324: 135939. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135939.
- [105] ZHOU D, LIU M, WANG Z Z, et al. Design and performance evaluation of a new steam/water hybrid thermal energy storage system integrated within a coal-fired power plant[J]. *Energy*, 2025, 335: 138324. DOI:10.1016/j.energy.2025.138324.
- [106] SUN S Y, XU S X, RONG W L, et al. Experimental study of a system coupling thermal storage heat pipe radiators with air-source heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128454. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.128454.
- [107] FAN B B, HUA J Y, LI G, et al. Thermal stratification mechanism analysis of new molten salt storage tank system based on spiral infusion structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 281: 128552. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128552.
- [108] LI W X, CHEN W Y, HUANG L H, et al. Thermal performance of a seasonal aquifer energy storage system considering operational and structural characteristics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 281: 128554. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128554.
- [109] DONG Y J, XU R J, ZHAO S Y. Study on heat storage and release characteristics of a novel phase-change thermal energy storage device using microchannel parallel-flow flat pipes[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 136: 118366. DOI: 10.1016/j.est.2025.118366.
- [110] LI B F, YANG X L, YU N, et al. Study on the enhancement of phase change thermal storage performance by biomimetic horseshoe (BH) shaped pipe structure coupled with fins and nanoparticles[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 167: 109393. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109393.
- [111] XU A, XIE B S, JIN J, et al. Advanced phase change composite integrating photo/electro-thermal energy conversion and storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 293: 113887. DOI:10.1016/j.solmat.2025.113887.
- [112] LI J X, MO S P, ZHOU Z C, et al. Nanoparticle-enhanced phase change materials for thermal energy storage: A critical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 223: 116040. DOI:10.1016/j.rser.2025.116040.
- [113] YU J Q, ZHANG Z G, ZHANG G T, et al. Investigation of structural influence on the thermal energy storage efficiency in phase change capsules[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 67: 104122. DOI:10.1016/j.tsep.2025.104122.
- [114] LI Y X, LI C C, HE Y L. Advanced phase change gel featuring tunable low-temperature transition for cold energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 130: 117467. DOI:10.1016/j.est.2025.117467.
- [115] LIU Y N, HE X F, ZUO Z Q, et al. Integrated cold release-purification method for enhanced efficiency in packed bed cryogenic energy storage systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 140: 119102. DOI:10.1016/j.est.2025.119102.

- [116] LI Z Q, CAI L. Performance evaluation of a novel integrated two-stage Rankine cycle and carbon dioxide energy storage system for LNG cold energy recovery[J]. *Energy*, 2025, 335: 138136. DOI:10.1016/j.energy.2025.138136.
- [117] LIU Y L, ZHANG Y, LI M, et al. Novel water-based composite phase change materials for cold energy storage applications[J]. *Renewable Energy*, 2025, 240: 122174. DOI:10.1016/j.renene.2024.122174.
- [118] CEN D F, YAO S G, XIA C C. Cold storage scheme for energy tunnels to improve the ground thermal accumulation around subway tunnels[J]. *Renewable Energy*, 2025, 253: 123589. DOI:10.1016/j.renene.2025.123589.
- [119] 李博文, 文贤馥, 范强, 等. MW级飞轮电机转子中空轴内通流散热实验研究[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 2925-2931. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0518.
- LI B W, WEN X K, FAN Q, et al. Experimental study on heat dissipation through circulation in the hollow shaft of MW-class flywheel motor rotor[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 2925-2931. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0518.
- [120] JIAO Y Y, DAI X J, WANG Y F, et al. Case study on flywheel energy storage systems: LPTN-based transient thermal analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 120: 116319. DOI: 10.1016/j.est.2025.116319.
- [121] 文贤馥, 李博文, 史正军, 等. 飞轮储能系统磁轴承电磁特性与温升特性分析[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 2932-2941.
- WEN X K, LI B W, SHI Z J, et al. Analysis of electromagnetic and thermal characteristics of magnetic bearings in flywheel energy storage systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 2932-2941.
- [122] 王创典, 张磊, 黄志华, 等. 磁悬浮飞轮储能柔性转子系统不平衡控制[J/OL]. *储能科学与技术*, 1-14[2026-06-02]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0152>.
- WANG C D, ZHANG L, HUANG Z H, et al. Unbalance control of magnetically suspended flywheel energy storage flexible rotor system[J/OL]. *Energy Storage Science and Technology*, 1-14[2026-06-02]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0152>.
- [123] 徐铖, 唐西胜. 飞轮储能磁轴承系统多频振动的变速重复控制方法研究[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(8): 20-32. DOI: 10.12067/ATEEE2504044.
- XU C, TANG X S. Research on variable speed repetitive control method for multi-frequency vibration of flywheel energy storage magnetic bearing system[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(8): 20-32. DOI:10.12067/ATEEE2504044.
- [124] 胡东旭, 戴兴建, 任军辉, 等. 飞轮储能及转子疲劳寿命分析研究进展[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(10): 136-148. DOI:10.12067/ATEEE2411056.
- HU D X, DAI X J, REN J H, et al. Research progress on flywheel energy storage and rotor fatigue life analysis[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(10): 136-148. DOI:10.12067/ATEEE2411056.
- [125] 蒋宏春, 韩帅杰, 何玉灵, 等. 飞轮储能用永磁同步电机局部失磁下转子机械响应分析[J/OL]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 1-10[2026-06-02]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999/tm.20250829.1425.002>.
- JIANG H C, HAN S J, HE Y L, et al. Analysis of rotor mechanical response in permanent magnet synchronous motor/generator under partial demagnetization for flywheel energy storage applications[J/OL]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 1-10[2026-06-02]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999/tm.20250829.1425.002>.
- [126] YANG Y, XU B C, GU Z, et al. Design and experimental evaluation of a superconducting flywheel energy storage system with contactless power transmission[J]. *Renewable Energy*, 2026, 263: 125506. DOI: 10.1016/j.renene.2026.125506.
- [127] 张国平, 王富强, 张洪福, 等. 基于六相同步电机的高速飞轮储能系统并网控制研究[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(8): 9-19. DOI: 10.12067/ATEEE2501003.
- ZHANG G P, WANG F Q, ZHANG H F, et al. Research on grid-connected control of high-speed FESS based on six-phase synchronous motor[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(8): 9-19. DOI: 10.12067/ATEEE2501003.
- [128] 唐西胜. 构网型飞轮储能发展概论[J]. *电工电能新技术*, 2025, 44(8): 1-8.
- TANG X S. Overview of development of grid-forming flywheel energy storage systems[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2025, 44(8): 1-8.
- [129] 邓迎春, 王玮, 张文政, 等. 基于 SVM-NSGA II 优化综合调频性能的火电-飞轮联合系统协同控制方法[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(12): 2056-2067, 2131.
- DENG Y C, WANG W, ZHANG W Z, et al. Coordinated control method for a thermal power-flywheel hybrid system based on SVM-NSGA II for optimizing comprehensive frequency regulation performance[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(12): 2056-2067, 2131.
- [130] 洪烽, 杜浩, 梁璐, 等. 基于模式匹配的飞轮/锂电混合储能辅助火电 AGC 控制策略及应用[J]. *中国电机工程学报*, 2026, 46(6): 2229-2240. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.242660.
- HONG F, DU H, LIANG L, et al. Flywheel/lithium hybrid energy storage assisted thermal power agc control strategy and application based on mode matching[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2026, 46(6): 2229-2240. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.242660.
- [131] 吕涛, 高越纪, 吴斌, 等. 基于多目标优化的飞轮储能辅助火电机组 AGC 调频控制策略[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-12[2026-06-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.252127>.
- LYU Y, GAO Y J, WU B, et al. Flywheel energy storage-assisted AGC frequency regulation control strategy for thermal power units based on multi-objective optimization[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-12[2026-06-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.252127>.

- 10.13334/j.0258-8013.pcsee.252127.
- [132] SONG G L, WU Z K, YAN Q L, et al. Sensorless fault-tolerant control strategy of flywheel energy storage system based on improved model reference adaptive system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 132: 117842. DOI: 10.1016/j.est.2025.117842.
- [133] 魏路, 冷至益, 叶佳, 等. 人工智能在飞轮储能中的应用[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(8): 3019-3027.
- WEI L, LENG Z Y, YE J, et al. Application of artificial intelligence in flywheel energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(8): 3019-3027.
- [134] ZHANG D, ZHANG M L, LIU Y X, et al. Novel hybrid control of high-speed flywheel energy storage using modular multilevel converter in a DC power system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2026, 176: 111724. DOI: 10.1016/j.ijepes.2026.111724.
- [135] 刘广忱, 杨航宇, 陈禹, 等. 基于开关表三矢量模型预测转矩控制的飞轮储能控制策略[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(8): 140-149.
- LIU G C, YANG H Y, CHEN Y, et al. Control strategy of flywheel energy storage based on three vector model predictive torque control of switch table[J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(8): 140-149.
- [136] LI J C, WU Y P, WANG Z Z, et al. Complexation-precipitation synthesis of high surface area PbO/rice husk-based activated carbon composites for ultra-long-life lead-carbon battery anodes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 524: 169750. DOI:10.1016/j.ccej.2025.169750.
- [137] HU M, CAO J, XIANG S Y, et al. Upcycling polyethylene terephthalate plastics into high-performance carbon additives for ultra-long cycle life lead-carbon batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 541: 147336. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.147336.
- [138] HUANG C, XIE F Z, MA Y J, et al. Application and mechanism of pore-like Bi as a hydrogen evolution inhibitor in lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 119: 116324. DOI:10.1016/j.est.2025.116324.
- [139] SUN X F, HUO X G, XIONG Y Q. Controllable synthesis of PbO/AC composite assisted by homogeneous precipitation for lead carbon batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 520: 145848. DOI:10.1016/j.electacta.2025.145848.
- [140] XU J L, XIE Z J, LI H X, et al. Suppressing hydrogen evolution via anti-hydrogen evolution carbon network toward high-performance lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 153: 120974. DOI:10.1016/j.est.2026.120974.
- [141] LI S T, XU J L, LI J Y, et al. Metal-organic framework-derived N, Zn-doped carbon materials loaded with PbO for suppressing hydrogen evolution and irreversible sulfation in lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 139: 118885. DOI:10.1016/j.est.2025.118885.
- [142] XI Q C, YU Q, LI S T, et al. Manganese oxide/biomass porous carbon anode additive derived from apricot peel for high-performance lead-carbon batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 527: 146246. DOI:10.1016/j.electacta.2025.146246.
- [143] TAO D W, XIA Y J, ZONG Q, et al. Constructing cooperative nitrogen-lead dual-active sites on graphene additives for long-cycle-life lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 145: 119928. DOI:10.1016/j.est.2025.119928.
- [144] JI Y F, TU J, HE Y P, et al. Rice husk derived porous carbon/ $\beta$ -PbO<sub>2</sub> composites as positive additives for lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 139: 118930. DOI:10.1016/j.est.2025.118930.
- [145] WANG H B, OUYANG L N, HUANG J, et al. Hydrophilic polyaniline/graphene oxide composite promoting electron and ion transfer in positive electrode of lead-carbon battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 631: 236248. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236248.
- [146] TU J, ZHAO H, HE Y P, et al. Proton transport mediated mesoporous SiO<sub>2</sub> nanospheres for long-life lead-carbon battery [J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 542: 147420. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.147420.
- [147] LIU L N, XU W T, ZHANG S W, et al. Acidic oxygenated functional group-modified carbon as positive additives: A boost to performance of lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 117: 115998. DOI:10.1016/j.est.2025.115998.
- [148] ZHANG S W, LIU L N, LI M, et al. Polytetrafluoroethylene-infused dry processed enhancing lead-carbon battery performance [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 132: 117819. DOI: 10.1016/j.est.2025.117819.
- [149] HUO X G, LIU Y J, SUN X F, et al. Dual-function triethyl phosphate@fumed silica-based gel electrolytes for enhancing anode performance in lead-carbon batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 137: 118503. DOI: 10.1016/j.est.2025.118503.
- [150] PANG F Z, CHEN X, LI X Y, et al. Corrosion resistance of PbSrSnAl positive grid alloys for lead-acid batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 519: 145835. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.145835.
- [151] 李志斌, 王涛, 覃开天, 等. 一种铅酸电池负极添加剂及其制备方法和应用: CN121366896A[P]. 2026-01-20.
- [152] 孙晓飞, 熊源泉, 张平. 铅单原子/纳米颗粒锚定的碳气凝胶及其制备方法和应用: CN120127146A[P]. 2025-06-10.
- [153] 杨卫奇, 解森, 卫鹏. 一种铅酸蓄电池负极铅膏及其制备方法: CN120221599A[P]. 2025-06-27.
- [154] 金源, 张宗良, 刘淼. 碳晶材料和正极铅膏及其制备方法、正极极板与铅酸蓄电池: CN121428658A[P]. 2026-01-30.
- [155] 马素丽, 张巡蒙, 秦争光, 等. 一种高活性物质利用率的正极铅膏及其制备方法: CN121394381A[P]. 2026-01-23.
- [156] 陈步明, 郭锴, 张大新, 等. 一种铝基铅合金/掺钴包碳纤维粉- $\alpha$ -PbO<sub>2</sub>复合正极板栅及其制备方法: CN119920910B[P]. 2025-11-21.
- [157] 王永清, 夏韬, 荆文涛, 等. 铅蓄电池及其CNT强化铅基板栅、制备方法和应用: CN121506966A[P]. 2026-02-10.
- [158] 谭晓波, 刘遥, 石建明. 一种耐高温低锡铅酸蓄电池板栅合金及其制备方法: CN121215771A[P]. 2025-12-26.

- [159] 高士元, 张树祥, 薛胜凡, 等. 一种高分子半导体长寿命铅酸电池正极板栅及其制备方法和应用: CN121054709A[P]. 2025-12-02.
- [160] 林海波, 许珂大, 林楠. 一种超薄钛基板栅及铅酸电池: CN119943964A[P]. 2025-05-06.
- [161] KANG T, MENG Y S, LIU X Z. Optimizing lithium-ion diffusion in  $\text{LiFePO}_4$ : The impact of  $\text{Ti}^{4+}$  doping on high-rate capability and electrochemical stability[J]. *Ionics*, 2025, 31(3): 2419-2428. DOI:10.1007/s11581-025-06075-w.
- [162] PAN C Y, LI B W, PAN F Z, et al. The "inner and outer double-layer coating" constructs a three-dimensional electronic channel from the inside to the outside to improve the electrochemical performance of lithium iron phosphate[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 653: 237777. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237777.
- [163] ZHANG J L, DONG Z Y, ZENG Z H, et al. Upcycling spent  $\text{LiFePO}_4$ : Precisely Fe-sites doped by Ti-atoms with expanded Li-diffusion channels toward high capacity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(20): e22632. DOI: 10.1002/adfm.202522632.
- [164] HE R J, ZHONG W, WU Y K, et al. Two-layer graphite anode for energy and power densified  $\text{LiFePO}_4$  battery[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(28): 2501185. DOI: 10.1002/adma.202501185.
- [165] ZHONG W, HE R J, PENG L F, et al. Lifecycle synergistic prelithiation strategy of both anode and cathode for high-performance lithium-ion batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(26): 2406007. DOI: 10.1002/aenm.202406007.
- [166] WANG Z W, GU X W, ZHU J C, et al. Weakly-solvated and co-intercalation-free ether-based electrolytes enhance the low-temperature and fast-charging performance of  $\text{LiFePO}_4$ || Graphite batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(1): e21171. DOI:10.1002/anie.202521171.
- [167] XU T H, LUO S Y, WU M Q, et al. Low-concentration flame-retardant PC-based electrolytes for wide-temperature and high-voltage lithium-ion batteries[J]. *Small*, 2025, 21(9): 2409626. DOI:10.1002/sml.202409626.
- [168] LIU J N, CAO J H, WU Y Y, et al. Micro porous forming of polyimide composite membrane with temperature and humidity control and its application Evaluation in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 644: 237082. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237082.
- [169] YANG Y X, XIAO K S, CAO B W, et al. Molecular-tailored crosslinker enabling a 110 MPa-robust solid polymer electrolyte for long-cycling solid-state lithium metal batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2026, 86: 104922. DOI: 10.1016/j.ensm.2026.104922.
- [170] LIU L W, XUE J Y, GAO Y W, et al. Polymerized-ionic-liquid-based solid polymer electrolyte for ultra-stable lithium metal batteries enabled by structural design of monomer and crosslinked 3D network[J]. *Materials Reports: Energy*, 2025, 5(1): 100311. DOI:10.1016/j.matre.2024.100311.
- [171] MU C K, LI T Y, ZHAN C B, et al. Harnessing solvation chemistry of pentavalent vanadium for wide-temperature range vanadium flow batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(30): e202508456. DOI: 10.1002/anie.202508456.
- [172] XU Y, LI T Y, PENG Z Q, et al. Grid-scale corrosion-free Zn/Br flow batteries enabled by a multi-electron transfer reaction[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(12): 1470-1481. DOI:10.1038/s41560-025-01907-5.
- [173] ZHANG X Y, AO K L, SHI J H, et al. The critical role of atomic-scale polarization in transition metal oxides on vanadium-redox electrochemistry[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(13): 2420510. DOI:10.1002/adma.202420510.
- [174] LIU X N, SHI M Q, LIAO C Y, et al. Ultrathin membranes prepared through interfacial polymer cross-linking for selective and fast ion transport[J]. *Nature Chemical Engineering*, 2025, 2(6): 369-378. DOI:10.1038/s44286-025-00238-2.
- [175] FANG J K, ZHANG G Z, GOULET M A, et al. High selectivity framework polymer membranes chemically tuned towards fast anion conduction[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3282. DOI:10.1038/s41467-025-58638-0.
- [176] HE G H, LI L, XU H, et al. A polymer membrane with integrated microphase separation and intrinsic microporosity for aqueous organic redox flow batteries[J]. *Joule*, 2025, 9(7): 101976. DOI: 10.1016/j.joule.2025.101976.
- [177] JIA X B, PENG Q Q, LIU Y F, et al. Design principles of practical industrial-scale layered oxide cathodes with air/water stability for sustainable sodium-ion batteries[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 10477. DOI: 10.1038/s41467-025-65480-x.
- [178] WANG X B, YANG W F, YANG Y, et al. A multi-element composition modulation strategy for designing high-capacity and stable  $\text{O}_3$ -Type Na-layered oxide[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(41): e09032. DOI:10.1002/adma.202509032.
- [179] WANG H B, TANG H, LIN T, et al. Na-ion battery with 180 Wh/kg and long cycle life[J]. *ACS Energy Letters*, 2026, 11(1): 537-547. DOI:10.1021/acsenergylett.5c03155.
- [180] XU S, ZHAO L H, LI S K, et al. Revealing the microstructure and mechanism of layered oxide cathodes for sodium-ion batteries by advanced TEM techniques[J]. *Chemical Communications*, 2025, 61(21): 4147-4159.
- [181] HAO Z L, UNIVERSITY N N, GUO J Z, et al. Heterogeneous-interface-induced charge redistribution toward Fe-based polyanion cathode for advanced sodium-ion batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(16): 13905-13914. DOI:10.1021/jacs.5c02480.
- [182] ZOU Z Y, MU Y B, HAN M S, et al. Integrated polyanion-layered oxide cathodes enabling 100 000 cycle life for sodium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(5): 2216-2230.
- [183] KUANG B B, FENG W C, SHI Y X, et al. Balance control of capacity and stability of the bimetallic Prussian blue cathode for

- high-performance sodium-ion batteries[J]. *Inorganic Chemistry*, 2025, 64(30): 15392-15401.
- [184] WANG Y H, YAN J X, XIE B X, et al. Tuning cyanide coordination electronic structure enables stable Prussian blue analogues for sodium-ion batteries[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 10083. DOI:10.1038/s41467-025-65062-x.
- [185] LIU Y, YIN J, WU R Y, et al. Molecular engineering of pore structure/interfacial functional groups toward hard carbon anode in sodium-ion batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 75: 104008. DOI:10.1016/j.ensm.2025.104008.
- [186] KUANG Y M, ZHANG B S, FAN Y M, et al. Bagasse-derived hard carbon anode with a synergistic sodium storage mechanism induced by temperature gradient for high-performance sodium-ion batteries[J]. *Small*, 2026, 22(9): e13253. DOI:10.1002/smll.202513253.
- [187] LIU Y, MAO H C, BAI R, et al. Designing an isotropic epilayer for stable 4.2 V solid-state Na batteries[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(11): 1305-1314. DOI:10.1038/s41560-025-01857-y.
- [188] OUYANG M Z, GUO Z Y, SALINAS-FARRAN L E, et al. High-areal-capacity Na-ion battery electrode with high energy and power densities by simultaneous electrospinning-spraying fabrication[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(13): 6764-6779.
- [189] JIANG H L, SUN Z Q, LIU P, et al. Fast-charging and long-cycle sodium-ion batteries enabled by an ultra-stable carbon anode[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(47): e09953. DOI: 10.1002/adma.202509953.
- [190] HUO Z J, FANG H L, LIN S J, et al. Atomic-scale interface engineering for robust sodium-ion battery anodes with superior stability and high energy density[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(30): 2501288. DOI: 10.1002/aenm.202501288.
- [191] ZHANG R C, WANG R, GU S, et al. Unravelling the failure mechanism of sodium ion pouch cell with layered cathode cycled under high voltage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 135: 118391. DOI:10.1016/j.est.2025.118391.
- [192] KUO T R, CHENG Y C, CHIEH D C, et al. Fluorine-guided synthesis of copper nickel compounds with 2-methylimidazole and temperature control for battery supercapacitor hybrids[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 700: 138463. DOI:10.1016/j.jcis.2025.138463.
- [193] HUANG Z A, ZHOU W Q, LI D Q, et al. Advanced oxygen-vacancy NiO/NiCo-LDH heterojunction and La-doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosheets constructing ultra-high energy supercapacitor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521: 167005. DOI: 10.1016/j.cej.2025.167005.
- [194] LI J X, YAN X D, LIAN C, et al. Boosting extraordinary capacitive performance by porous structure engineering of binders in activated carbon-based electrodes[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(44): e04231. DOI: 10.1002/aenm.202504231.
- [195] ZHU Z Y, LIU Y, ZHENG S Q, et al. High-performance pseudocapacitors enabled by H<sup>+</sup>/OH<sup>-</sup> mixed ion conductors in perovskite electrodes[J]. *Chemical Communications*, 2025, 61(72): 13699-13702.
- [196] ZHANG K, MAO X Z, LUO C W, et al. Radiation-induced *in situ* synthesis of Ni anchored MoO<sub>3</sub> with oxygen vacancy for high-performance pseudocapacitor[J]. *Nano Research*, 2026, 19(1): 94907947. DOI:10.26599/nr.2025.94907947.
- [197] ZHANG Y X, WANG F F, LUO D Q, et al. Preparation and electrochemical properties of high-entropy perovskite La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>Co<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.1</sub>Ni<sub>0.4</sub>Cu<sub>0.1</sub>O<sub>3</sub>/RGO composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2025, 44: 1-9. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20251103.003.
- [198] GUO X, SUN X, WANG L, et al. Investigation of the structure and electrochemical performance of perovskite oxide La<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>CrO<sub>3</sub> utilized as electrode materials for supercapacitors[J]. *Coatings*, 2025, 15(7): 837. DOI:10.3390/coatings15070837.
- [199] BAI Y G, FENG Y Y, WANG K M, et al. A high-voltage tolerance gel polymer electrolyte functioned by surface dielectric layer enabling durable supercapacitors[J]. *Rare Metals*, 2025, 44(9): 6185-6198. DOI:10.1007/s12598-025-03370-3.
- [200] LI W W, CHEN Z Z, XU C, et al. A seamlessly integrated sandwich-structured hydrogel for supercapacitors and multimodal wearable sensors enabling information transmission [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(51): e12653. DOI: 10.1002/adfm.202512653.
- [201] MAO T J, LI T Q, LI Y X, et al. Fully recyclable all-solid-state supercapacitors with high stretching stability and room-temperature self-healing capability[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(27): e27000. DOI: 10.1002/adfm.202527000.
- [202] WANG X Y, ZHENG W Q, ZHAO H, et al. Robust and high-wettability cellulose separators with molecule-reassembled nano-cracked structures for high-performance supercapacitors [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 153. DOI:10.1007/s40820-025-01650-2.
- [203] SHU K W, LI W J, ZHANG Y, et al. An rGO/cellulose acetate/PVDF piezoelectric separator for mitigating self-discharge in supercapacitor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 520: 166056. DOI:10.1016/j.cej.2025.166056.
- [204] LIU W J, LIU H Q, SUN Y, et al. Low-temperature, low-pressure Zn-ion hybrid supercapacitor in extreme near-space application [J]. *Materials Horizons*, 2025, 12(11): 3979-3990.
- [205] KONG C X, DI T M, WANG G M, et al. "Win-win" structural engineering of Chinese herb residues-derived porous graphitic carbons: Decoupling the porosity-graphitization antagonism for ultrahigh-rate supercapacitors[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2026, 9(2): e70174. DOI:10.1002/eem2.70174.
- [206] BO Z, WANG R, WANG B, et al. Ion desolvation for boosting the charge storage performance in Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene electrode[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3813. DOI:10.1038/s41467-025-58700-x.
- [207] FAN S C, YAN Z R, WANG B H, et al. Unlocking limited electric

- double-layer capacity *via* electrochemically-driven continuous partial desolvations in carbon nanopores[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 363. DOI: 10.1038/s41467-025-66433-0.
- [208] LI Z, XU M H, XIA Y E, et al. High-frequency supercapacitors surpassing dynamic limit of electrical double layer effects[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3704. DOI:10.1038/s41467-025-59015-7.
- [209] ZHANG X, ZHOU Z, GE S D, et al. Direct-ink-write 3D printing of flexible all-solid-state micro-supercapacitor based on MXene-hydroxylated nanocellulose-carbon nanotubes[J]. *Carbon Future*, 2025, 2(3): 9200049. DOI:10.26599/cf.2025.9200049.
- [210] HAN J Y, SHEN B Y, CHEN Y, et al. Study on battery-supercapacitor hybrid energy storage system for metros[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(24): 13243. DOI:10.3390/app152413243.
- [211] 杨儒松, 侯朝霞, 李伟, 等. PANI/MnO<sub>2</sub>/rGO-P 三元复合电极的制备及在超级电容器中的应用[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(7): 2791-2800. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0036.
- YANG R S, HOU Z X, LI W, et al. Preparation of PANI/MnO<sub>2</sub>/rGO-P ternary composite electrode and its application in supercapacitors[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(7): 2791-2800. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0036.
- [212] GUO Y W, DONG J Y, CU Q, et al. High performance sodium-based liquid metal batteries based on low-melting-point multication molten salt electrolytes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 523: 168562. DOI:10.1016/j.cej.2025.168562.
- [213] ZHANG W X, HE X, ZHANG T, et al. Te-Cu dual adsorption-conversion function cathode enables high-energy-density and long-lifespan liquid metal batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 530: 173595. DOI:10.1016/j.cej.2026.173595.
- [214] YANG Y Z, LI Z H, XIE H L, et al. A novel high voltage SeSb positive electrode material for high-energy-density liquid metal battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 115: 116032. DOI: 10.1016/j.est.2025.116032.
- [215] YI C, ZHOU Y, ZHANG W L, et al. Achieving superior electrode kinetics in bismuth-based liquid metal batteries *via* tin additive [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 640: 236724. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236724.
- [216] ZHAO M X, ZHOU Y, YI C, et al. High performance dual active bismuth-cadmium positive electrode for liquid metal battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 131: 117429. DOI:10.1016/j.est.2025.117429.
- [217] IM S, ASGHARI-RAD P, VARNELL K E, et al. Self-assembling solid Sb electrode enables high-capacity, low-cost Ca-Sb battery[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 6835. DOI: 10.1038/s41467-025-62080-7.
- [218] ZAKERABBASI P, MAGHSOUDY S, BAGHBAN A, et al. Artificial intelligence approach for estimating energy density of liquid metal batteries[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 12677. DOI:10.1038/s41598-025-97287-7.
- [219] SHI Q L, XIA J Y, ZHOU H, et al. A comprehensive numerical model incorporating potential, mass transfer, and species distribution in liquid metal batteries[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2025, 4(6): 100353. DOI: 10.1016/j.geits.2025.100353.
- [220] ZHANG Y, ZHANG W X, ZHOU X B, et al. Numerical study of thermal characteristics in a Li||Bi liquid metal battery subject to internal short circuit[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 660: 238555. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.238555.
- [221] ZHANG Y, FAN L, LI H M, et al. Investigation on electro-thermal behavior of liquid metal batteries under various abusive conditions[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124715. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124715.
- [222] SHI Q L, ZHOU M, LI H M, et al. Advance warning prior to capacity plunge of liquid metal battery using data-driven methods[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(3): 4147-4154. DOI:10.1109/TIA.2025.3542000.
- [223] ZHOU X B, FAN L, NING J, et al. Regulating the discharge performance and electrode interface of liquid metal batteries through external magnetic fields[J]. *Applied Energy*, 2025, 383: 125408. DOI:10.1016/j.apenergy.2025.125408.
- [224] RANAWADE V, TIWARI N, NALWA K S. External magnetic field and heating reduce the mass transport overpotential in a liquid metal battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 114: 115890. DOI:10.1016/j.est.2025.115890.
- [225] HU A W, WANG L, LIN X P, et al. Performance analysis of recuperated Brayton pumped thermal electricity storage with staged compressors[J]. *Energy*, 2025, 316: 134539. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134539.
- [226] YANG H, DU X Z. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of pumped thermal electricity storage system with S-CO<sub>2</sub> recompression Brayton cycle[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 124: 116821. DOI: 10.1016/j.est.2025.116821.
- [227] 韩东辰, 孙恩慧, 许方宁, 等. 级联热泵驱动的超临界有机朗肯循环卡诺电池特性研究[J]. *热力发电*, 2025, 54(12): 19-26.
- HAN D C, SUN E H, XU F N, et al. Characteristics of cascaded heat pump driven supercritical organic Rankine Carnot battery [J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(12): 19-26.
- [228] 杨勇, 徐书德, 张祥, 等. 燃煤电站抽汽驱动的热泵-Kalina 循环卡诺电池及其性能评估[J]. *热力发电*, 2025, 54(9): 46-53. DOI: 10.19666/j.rlfd.202411250.
- YANG Y, XU S D, ZHANG X, et al. Heat pump-Kalina cycle Carnot battery driven by extracted steam in coal-fired power station and its performance evaluation[J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(9): 46-53. DOI:10.19666/j.rlfd.202411250.
- [229] 陈珣, 王敦敦, 胡晓, 等. 集成双压冷凝与双压蒸发技术的增强型卡诺电池系统[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(5): 2035-2042.
- CHEN X, WANG D D, HU X, et al. Enhanced Carnot battery system with integrated dual pressure condensation/evaporation technologies[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(5): 2035-2042.

- [230] 王志朋, 叶琳, 童欢, 等. 补气增焓-抽气回热型卡诺电池可行性分析[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 126-134. DOI:10.19666/j.rld.202406133.
- WANG Z P, YE L, TONG H, et al. Feasibility analysis for vapor injection-regeneration Carnot battery[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 126-134. DOI: 10.19666/j.rld.202406133.
- [231] ZHANG Y L, YIN S Z, YAN X W, et al. Performance of a CO<sub>2</sub>-based mixture cycled transcritical pumped thermal energy storage system[J]. Renewable Energy, 2025, 238: 121893. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121893.
- [232] ZHAO Y, XIE Y, SONG J, et al. Second-law thermodynamic assessment of cascaded latent-heat stores for pumped-thermal electricity storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 262: 125290. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.125290.
- [233] CAO B, SHI Y L, HE Z L, et al. Performance analysis and optimization of finned tube latent thermal energy storage in pumped thermal electricity storage system based on Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 128110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128110.
- [234] 黄正杰, 罗向龙, 梁颖宗, 等. 基于填充床相变蓄热器的卡诺电池系统特性研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(4): 1034-1040.
- HUANG Z J, LUO X L, LIANG Y Z, et al. Study on the characteristics of a Carnot battery based on a packed bed latent heat storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(4): 1034-1040.
- [235] LIU Z Y, LI H, ZHANG H, et al. Operation characteristics analysis of a trans-critical CO<sub>2</sub> pumped thermal energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127591. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.127591.
- [236] 黄佳兴, 赵耀, 杜璞良, 等. 卡诺电池冷热电联产系统的变工况动态特性[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4245-4253.
- HUANG J X, ZHAO Y, DU P L, et al. Dynamic performance analysis of a Carnot battery-based combined cooling, heating, and power system under variable operating conditions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4245-4253.
- [237] 代兰花, 李楨伟, 东明, 等. 基于光伏建筑一体化的电池-热泵储能系统性能及运行策略优化研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 400-410.
- DAI L H, LI Z W, DONG M, et al. Performance and operation strategy optimization of battery-heat pump energy storage system based on building integrated photovoltaic[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(3): 400-410.
- [238] 张冀, 徐润伊, 陈彦奇, 等. 应用于风电并网的热泵储电系统储能过程动态特性及控制策略[J]. 电气工程学报, 2025, 20(2): 68-79. DOI:10.11985/2025.02.007.
- ZHANG J, XU R Y, CHEN Y Q, et al. Dynamic characteristics and control strategies of the charging process in pumped thermal electricity storage systems applied to wind power grid integration[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(2): 68-79. DOI:10.11985/2025.02.007.
- [239] WANG J R, ZHANG B Y, ZHU C, et al. Optimal scheduling of distributed energy system in the industrial park based on pumped thermal energy storage (Carnot battery)[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 110: 115278. DOI: 10.1016/j.est.2024.115278.
- [240] ZHANG M Y, PAN Z H, HU Q G, et al. Breaking the performance limitation of thermally integrated pumped thermal energy storage system: A three-way efficiency-boosting method[J]. Energy Conversion and Management, 2025, 344: 120276. DOI:10.1016/j.enconman.2025.120276.
- [241] TIAN X Y, BA L K, NA X, et al. Thermo-economic assessment and optimization of thermally integrated pumped thermal energy storage with vapor-extraction regeneration[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 113: 115673. DOI: 10.1016/j.est.2025.115673.
- [242] HU Y, YAO E R, ZHONG L K, et al. Conventional and advanced exergy-exergoeconomic assessment of pumped thermal energy storage integration in enhanced thermally coupled methanol decomposition reaction[J]. Energy, 2025, 335: 138341. DOI:10.1016/j.energy.2025.138341.
- [243] 于博旭, 韩瑞, 刘倩, 等. 耦合火电厂灵活改造的卡诺电池储能系统热力学性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1461-1470.
- YU B X, HAN R, LIU Q, et al. Thermodynamic performance of a flexible retrofit Carnot battery energy storage system in a coupled thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1461-1470.
- [244] 谭望, 丁若晨, 周晓宇, 等. 液冷数据中心余热驱动的"热泵-跨临界CO<sub>2</sub>发电"卡诺电池热力性能分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1471-1480. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0934.
- TAN Y, DING R C, ZHOU X Y, et al. Thermal performance analysis of a Carnot battery driven by waste heat from a liquid-cooled data center coupled with a heat pump and a transcritical CO<sub>2</sub> power cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1471-1480. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0934.
- [245] 周晨阳, 商浩杰, 胡杨, 等. 集成余热回收的多压超临界CO<sub>2</sub>热泵储电系统热经济学特性研究[J]. 化工学报, 2025, 76(12): 6587-6600, 封2. DOI:10.11949/0438-1157.20250447.
- ZHOU C Y, SHANG H J, HU Y, et al. Thermo-economic analysis of a multi-pressure supercritical CO<sub>2</sub> pumped thermal energy storage system integrated with waste heat recovery[J]. CIESC Journal, 2025, 76(12): 6587-6600, 封2. DOI:10.11949/0438-1157.20250447.
- [246] FENG J S, YAN Y R, ZHAO L, et al. Performance analysis and optimization of pumped thermal energy storage system coupled with low temperature waste heat recovery[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 132: 117968. DOI: 10.1016/j.est.2025.117968.
- [247] 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.
- [248] WANG F R, HE Q. Thermodynamic analysis of pump thermal energy storage system with different working fluid coupled biomass power plant[J]. Energy, 2025, 318: 134758. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134758.
- [249] 王福锐, 何青, 李红. 生物质电厂与热泵储能耦合的系统及其性能分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(7): 1101-1108.
- WANG F R, HE Q, LI H. A novel system of biomass power plant coupled with heat pump energy storage and its performance analysis[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(7): 1101-1108.
- [250] WANG Z, LIU H, JIANG C H, et al. Assessment and optimization of a novel combined heat and power system through an energy nexus approach: Enhancing energy storage and sustainability[J]. Energy, 2025, 322: 135575. DOI:10.1016/j.energy.2025.135575.
- [251] LI J X, WANG Z K, LI Y H, et al. Energy, exergy, and economic analyses of a novel liquid air and pumped thermal combined energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2025, 330: 119675. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119675.
- [252] SONG W, HE Z, CAO B, et al. Experimental study on the performance of a pumped thermal electricity storage system based on the subcritical organic rankine cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(12): 4339.
- [253] ZHANG M Y, YAO Y, HE J T, et al. Experimental investigation of thermally integrated Carnot battery system[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 131: 117618. DOI: 10.1016/j.est.2025.117618.
- [254] 谈家宝, 王育飞, 薛花. 活塞式重力储能系统建模与性能分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2383-2390. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0063.
- TAN J B, WANG Y F, XUE H. Modeling and performance analysis of piston gravity energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2383-2390. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0063.
- [255] 周凯, 吴炎喜, 黄宇翔, 等. 大海拔高差地区固体流大规模重力储能技术[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(8): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2025.08.001.
- ZHOU K, WU Y X, HUANG Y X, et al. Large-scale gravity energy storage technology for solid flow in areas with large altitude differences[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(8): 1-9. DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2025.08.001.
- [256] 王宇鹏, 滕玉平, 邱清泉, 等. 基于废弃矿井的物理储能技术研究与发展前景[J]. 煤炭工程, 2025, 57(S1): 8-16.
- WANG Y P, TENG Y P, QIU Q Q, et al. Research and development prospects of physical energy storage technology based on abandoned mines[J]. Coal Engineering, 2025, 57(S1): 8-16.
- [257] 丁伟迪, 王佳鑫, 李靖. 基于重力储能的集中式光伏电站设计[J]. 电工技术, 2025(13): 65-67. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.13.016.
- DING W D, WANG J X, LI J. Design of centralized photovoltaic power station based on gravity energy storage[J]. Electric Engineering, 2025(13): 65-67. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2025.13.016.
- [258] 王辉, 董宇成, 夏玉琦, 等. 考虑阶梯碳-绿证互认与重力储能的矿区综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(7): 54-67. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202503063.
- WANG H, DONG Y C, XIA Y Q, et al. Optimal scheduling of coal mine integrated energy systems considering stepped carbon-green certificate mutual recognition and gravity energy storage[J]. Electric Power, 2025, 58(7): 54-67. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202503063.
- [259] 陈跃, 杨恂, 黄蓝, 等. 有杆轨道泵人工举升采油与重力储能发电技术探究[J]. 深地能源科技, 2025, 1(3): 78-87.
- CHEN Y, YANG X, HUANG L, et al. Research on artificial lift oil extraction by rod orbital pump and gravity energy storage and power generation technology[J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025, 1(3): 78-87.
- [260] 曾小超, 姜健宁, 李健文, 等. 百MWh级竖井式重力储能系统重物块储存与运输方案[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3839-3847. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0196.
- ZENG X C, JIANG J N, LI J W, et al. Storage and transportation schemes for a one-hundred-megawatt-hour-class shaft-type gravity energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3839-3847. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0196.
- [261] 查鲲鹏, 胡江溢, 杨岳峰, 等. 基于自抗扰控制的斜坡式重力储能并网[J]. 大电机技术, 2025(4): 82-88.
- ZHA K P, HU J Y, YANG Y F, et al. Grid-connected ramped gravity energy storage based on active disturbance rejection control[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(4): 82-88.
- [262] 杨川, 郝正航. 斜坡式重力储能系统的停机控制技术分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(6): 218-219. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2025.06.091.
- YANG C, HAO Z H. Analysis of shutdown control technology for slope-type gravity energy storage system[J]. Application of IC, 2025, 42(6): 218-219. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2025.06.091.
- [263] 朱永清, 陈巨龙, 王斌, 等. 重力储能系统功率灵活调节控制策略[J]. 分布式能源, 2025, 10(6): 43-53. DOI:10.16513/j.2096-2185.DE.25100159.
- ZHU Y Q, CHEN J L, WANG B, et al. Flexible power regulation control strategy for gravity energy storage system[J]. Distributed Energy, 2025, 10(6): 43-53. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.25100159.
- [264] 姚远凡, 朱新凯, 宋长昊, 等. 基于复系数滤波器的重力储能机侧控制优化[J]. 电力电子技术, 2025, 59(2): 13-17. DOI:10.3969/j.

- issn.1000-100X.2025.02.004.
- YAO Y F, ZHU X K, SONG C H, et al. Optimization of gravity energy storage machine-side control based on complex coefficient filter[J]. *Power Electronics*, 2025, 59(2): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2025.02.004.
- [265] 朱新凯, 姚远凡, 刘雅斌, 等. 面向新能源重力储能系统的永磁同步电机无传感器控制优化[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(9): 351-361. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0902.
- ZHU X K, YAO Y F, LIU Y B, et al. Sensorless control optimization of permanent magnet synchronous motor for new energy gravity energy storage system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2025, 46(9): 351-361. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0902.
- [266] 梁琛, 朱宏毅, 马喜平. 重力储能系统用轴向磁通永磁同步电机定位置转角的抑制[J]. *微电机*, 2025, 58(4): 20-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6848.2025.04.004.
- LIANG C, ZHU H Y, MA X P. Cogging torque reduction method of axial flux permanent magnet synchronous motor applied to gravity energy storage system[J]. *Micromotors*, 2025, 58(4): 20-26. DOI:10.3969/j.issn.1001-6848.2025.04.004.
- [267] 陈良, 曾小超, 王昊, 等. 重力储能竖井超高速多轿厢气动阻力特性及优化设计[J]. *南方能源建设*, 2025, 12(5): 11-25.
- CHEN L, ZENG X C, WANG H, et al. Aerodynamic drag characteristics and optimization design of ultra-high speed multi-car in gravity energy storage shaft[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(5): 11-25.
- [268] 李妍, 朱寰, 王青山, 等. 重力储能电站发电机定子匝间短路故障保护新方法[J]. *大电机技术*, 2025(6): 38-45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3983.2025.06.006.
- LI Y, ZHU H, WANG Q S, et al. A new protection method for generator stator inter-turn short circuit fault in gravity energy storage power station[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2025(6): 38-45. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3983.2025.06.006.
- [269] 张帆, 欧阳章智, 牟征辉, 等. 基于模糊层次分析法的斜坡式重力储能系统选址策略[J]. *南方能源建设*, 2025, 12(5): 26-36.
- ZHANG F, OUYANG Z Z, MOU Z H, et al. Site selection of slope-based gravity energy storage systems using fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(5): 26-36.
- [270] QIU X M, LIU H, DUAN Y R, et al. Designing high-performance dual-ion batteries: Insights into electrode, electrolyte, and interface engineering[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(26): 2501016. DOI:10.1002/aenm.202501016.
- [271] ZHANG X K, QU H T, YAN W B, et al. Sodium-based dual-ion battery: From materials to mechanism[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(48): e202510566. DOI:10.1002/anie.202510566.
- [272] LI Y Q, XIONG W X, QU Q T, et al. pH-dependent phosphates conformal coating enabling 5.0 V graphite cathodes over 10, 000 cycles via reinforced mechanical strength and optimized interphase[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(4): e13729. DOI: 10.1002/adma.202513729.
- [273] LIU X C, SHANG J, CHENG Y, et al. Biomimetic gourd-vine supramolecular engineering for high-performance organic cathode through dual-mode of anion coordination and conjugated redox activation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(38): e202511229. DOI:10.1002/anie.202511229.
- [274] LIU B, JIANG C L, YAN K Y, et al. Super-wetting interface engineering of space-confined micron-sized alloying anodes for high-performance sodium-based dual-ion batteries[J]. *Matter*, 2025, 8(10): 102294. DOI:10.1016/j.matt.2025.102294.
- [275] FAN Y X, LIU X F, SHANG J, et al. Interfacial phonon scattering enables ultrastable and high-power sodium-based dual-ion batteries with alloying anodes[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(23): e72848. DOI:10.1002/adma.72848.
- [276] ZHANG Y C, JIANG H Z, DU X F, et al. Solvent's covert role: Concerted anion-solvent co-intercalation rewrites voltage rules for dual-ion batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(52): e15181. DOI:10.1002/anie.202515181.
- [277] XIE H L, MU H L, LIU L W, et al. Solvation design of an interfacial self-compatible quasi-solid electrolyte for high-loading sodium-based dual-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(44): e09775. DOI: 10.1002/adma.202509775.
- [278] WEI Y K, TANG B, LIANG X, et al. An ultrahigh-mass-loading integrated free-standing functional all-carbon positive electrode prepared using an architecture tailoring strategy for high-energy-density dual-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(30): 2302086. DOI:10.1002/adma.202302086.
- [279] 尹钊, 徐玉杰, 张华良, 等. 人工智能在储能技术中的应用进展[J]. *工程热物理学报*, 2025, 46(12): 4116-4140.
- YIN Z, XU Y J, ZHANG H L, et al. Progress in the application of artificial intelligence in energy storage technologies[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2025, 46(12): 4116-4140.
- [280] ZHONG J L. AI-optimized management of a hybrid SOFC-CAES systems with renewable integration for efficient electricity production and peak shaving[J]. *Energy*, 2025, 320: 135342. DOI:10.1016/j.energy.2025.135342.
- [281] WANG Z F, WANG S, MA C W, et al. The prediction of homogenized effective properties of continuous fiber composites based on a deep transfer learning approach[J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 262: 111050. DOI: 10.1016/j.compscitech.2025.111050.
- [282] HAN S Q, QIN Y L, ZHU B S. Multi-objective optimization design of a pump-turbine runner based on machine learning method[J]. *Energy*, 2025, 336: 138558. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138558.
- [283] GAO Y C, YUAN Y H, HUANG S Z, et al. A knowledge - data dual-driven framework for predicting the molecular properties of rechargeable battery electrolytes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(4): e202416506. DOI: 10.1002/anie.202416506.

- [284] WANG B N, DOAN H A, SON S B, et al. Data-driven design of electrolyte additives supporting high-performance 5 V  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  positive electrodes[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3413. DOI:10.1038/s41467-025-57961-w.
- [285] XU L Y, LIU S Q, HU D D, et al. Interpretable machine learning analysis of design factors in hydrogel supercapacitors[J]. *Gels*, 2025, 11(6): 464. DOI:10.3390/gels11060464.
- [286] CHEN Y Y, YANG Z L, WANG J X, et al. A data-driven machine learning approach for predictive modeling of transition metal dichalcogenide/carbon composite supercapacitor electrodes[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(39): 22890-22897.
- [287] TIAN H Q, LAN X Y, LI J S, et al. Predicting thermal storage property of  $\text{NaCl-NaF-Na}_2\text{CO}_3$  heterogeneous molten salt by depth potential molecular dynamics simulation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 152: 120818. DOI: 10.1016/j.est.2026.120818.
- [288] TIAN H Q, LIU T Y, ZHANG W G. High precision prediction of structure and thermal properties of ternary eutectic carbonates by machine learning potential for solar energy application[J]. *Materials Today Physics*, 2025, 51: 101670. DOI: 10.1016/j.mtphys.2025.101670.
- [289] 郭春勇. 基于残差网络的抽蓄机组多模态协同运行优化研究[J]. *四川水力发电*, 2025, 44(4): 103-107. DOI: 10.20196/j.cnki.scsldf.20250424.
- GUO C Y. Research on multi-modal coordinated operation optimization of pumped storage units based on residual network[J]. *Sichuan Water Power*, 2025, 44(4): 103-107. DOI: 10.20196/j.cnki.scsldf.20250424.
- [290] CHEN T X, LAI X, CHEN F, et al. Intelligent prediction of electrode characteristics based on neural networks in the lithium-ion battery production chain[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2026, 5(1): 100294. DOI: 10.1016/j.geits.2025.100294.
- [291] YE L H, ZHAO X, HE Z, et al. Research on lithium-ion battery diaphragm defect detection based on transfer learning-integrated modeling[J]. *Electronics*, 2025, 14(9): 1699. DOI: 10.3390/electronics14091699.
- [292] JI X L, TIAN Y J, ZHAO J H, et al. Machine learning-assisted tailoring of pore structures in coal-derived porous carbons for enhanced performance[J]. *Small*, 2026, 22(14): e12280. DOI: 10.1002/smll.202512280.
- [293] CHEN J, YU Z S, DONG J X, et al. Machine learning applied to the optimization of biomass char-based supercapacitors: Effect of experimental parameters on supercapacitor performance[J]. *Electrochimica Acta*, 2026, 558: 148543. DOI: 10.1016/j.electacta.2026.148543.
- [294] LAN Y H, YU Y, FANG X M, et al. Data-driven nomogram for thermal energy storage based on time characterizing and machine learning[J]. *Chemical Engineering Science*, 2026, 328: 123724. DOI:10.1016/j.ces.2026.123724.
- [295] GAN L, XIAO Q Q, MA L Y, et al. Liquid fraction prediction in phase change thermal storage units using machine learning and feature engineering[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 152: 120773. DOI:10.1016/j.est.2026.120773.
- [296] HE Y J, XU J W, WANG M, et al. Intelligent prediction study on the seepage evolution of rock-concrete interface in compressed air energy storage artificial Caverns under cyclic loading[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(6): 067115. DOI: 10.1063/5.0268960.
- [297] ZHANG N, GAO X R, LAI X P, et al. Research on crack detection method for shallow-buried underground compressed air energy storage cavern based on improved mask R-CNN model[J]. *Earth Energy Science*, 2025, 1(3): 203-212. DOI: 10.1016/j.ees.2025.07.001.
- [298] KONG J H, YANG Y Q, JI H J, et al. Reinforcement learning for frequency regulation control and simulation strategy optimization of pumped storage units[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2025, 2010.1093: 1818-1829. DOI:10.1093/ijlct/ctaf117.
- [299] 李心如, 宋锦焄, 杨杰, 等. 基于概率性预测的抽水蓄能电站大坝渗流安全监控模型[J]. *水利水电科技进步*, 2025, 45(4): 76-84. DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2025.04.011.
- LI X R, SONG J T, YANG J, et al. Seepage safety monitoring model for pumped storage power station dams based on probabilistic prediction[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 76-84. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2025.04.011.
- [300] 王宁, 曲建真, 张志强, 等. 基于深度强化学习的轨交飞轮储能系统能量管理[J]. *科技创新与应用*, 2025, 15(2): 30-33, 38. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.02.006.
- WANG N, QU J Z, ZHANG Z Q, et al. Energy management of rail flywheel energy storage system based on deep reinforcement learning[J]. *Technology Innovation and Application*, 2025, 15(2): 30-33, 38. DOI: 10.19981/j. CN23-1581/G3.2025.02.006.
- [301] ZHOU J, JIA Y B, SUN C Y. Flywheel energy storage system controlled using tube-based deep Koopman model predictive control for wind power smoothing[J]. *Applied Energy*, 2025, 381: 125117. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.125117.
- [302] 张淑荣. 基于人工智能的锂电池剩余寿命预测研究问题[D]. 济南: 济南大学, 2025. DOI:10.27166/d.cnki.gsdcc.2025.000383.
- [303] 苗晨旭, 梁涛, 耿浩, 等. 基于数据驱动的锂离子电池微小故障分级诊断[J]. *电气工程学报*, 2026, 21(1): 404-411.
- MIAO C X, LIANG T, GENG H, et al. A minor-faults hierarchical diagnosis method of lithium-ion batteries based on data driven [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2026, 21(1): 404-411.
- [304] E L X, WANG J, YANG R X, et al. A physics-informed neural network-based method for predicting degradation trajectories and remaining useful life of supercapacitors[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2025, 4(3): 100291. DOI: 10.1016/j.geits.2025.100291.
- [305] 胡邦杰, 王沛. 数据驱动储热型太阳能发电系统随机模型预测控制策略[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-12[2026-03-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.251675>.

- [306] SUN Y C, ZHANG J, GUO C K, et al. A physics-informed Seq2seq neural network-based control strategy for improving the energy flexibility of building-integrated thermal storage heat pump systems[J]. *Energy*, 2025, 341: 139409. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139409.
- [307] HAO J F, et al. Pressure-resistant polycrystalline Ni-rich layered cathodes for high-performance all-solid-state lithium batteries[J]. *ACS Energy Letters*, 2025, 10(11): 5550-5558. DOI:10.1021/acsenergylett.5c02674.
- [308] ZHANG J, XIAO X Y, CHEN J H, et al. All wet-coating process for chemical stable antimony and selenium dual-doped argyrodite electrolyte based all-solid-state lithium batteries[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2025, 164: 100972. DOI:10.1016/j.mser.2025.100972.
- [309] WANG G Z, ZHANG S M, WU H, et al. Oxychloride polyanion clustered solid-state electrolytes via hydrate-assisted synthesis for all-solid-state batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(4): 2410402. DOI:10.1002/adma.202410402.
- [310] ZHANG X X, YU H L, BEN L B, et al. Topology fortified anodes powered high-energy all-solid-state lithium batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(30): e2506298.
- [311] CEN G J, YU H L, XIAO R J, et al. Adaptive interphase enabled pressure-free all-solid-state lithium metal batteries[J]. *Nature Sustainability*, 2025, 8(11): 1360-1370. DOI: 10.1038/s41893-025-01649-y.
- [312] LIU Y, SU H, ZHONG Y, et al. Inhibiting dendrites by uniformizing microstructure of superionic lithium argyrodites for all-solid-state lithium metal batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(31): 2400783. DOI: 10.1002/aenm.202400783.
- [313] CHEN J Y, HU C J, LIU R L, et al. Long cycle life all-solid-state batteries enabled by medium nanosized catholytes[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2025, 16(3): 731-737. DOI:10.1021/acs.jpclett.4c03539.
- [314] KIM D H, et al. Efficient fabrication of high-capacity silicon composite anodes for all-solid-state lithium-ion batteries[J]. *ACS Materials Letters*, 2025, 7(4): 1211-1218. DOI: 10.1021/acsmaterialslett.5c00068.
- [315] 张祥宇, 侯康博, 付媛. 构网型储能的频率与振荡自主协同控制技术[J]. *电力自动化设备*, 2026, 46(3): 32-40. DOI: 10.16081/j.epae.202511027.
- ZHANG X Y, HOU K B, FU Y. Autonomous cooperative control technology for frequency and oscillation of grid-forming energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2026, 46(3): 32-40. DOI:10.16081/j.epae.202511027.
- [316] MAO S Y, WANG Y, LU Y, et al. Toward electrode-level management of lithium-ion batteries enabled by long-life potential sensing[J]. *Energy Storage Materials*, 2026, 84: 104773. DOI:10.1016/j.ensm.2025.104773.
- [317] ALI M A, MANDOUR M E, LOTFY M E. Efficient coordination of hybrid energy system (fuel cell/photovoltaic/battery/supercapacitor) under the condition of fluctuated load using optimization based energy management strategy[J]. *Scientific Reports*, 2026, 16: 2655. DOI:10.1038/s41598-025-27685-4.
- [318] 胡朝华, 杜新伟, 苟竞, 等. 提升新型电力系统宽频振荡稳定性的构网型储能设备优化配置方法[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(12): 4583-4593.
- HU Z H, DU X W, GOU J, et al. Optimal configuration of grid-forming energy storage systems for enhancing broadband oscillation stability in modern power systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(12): 4583-4593.
- [319] 陈道阳, 李晨阳, 徐恒山, 等. 基于APS-IPSO的构网型储能跟网-构网双模式切换策略[J]. *电力建设*, 2026, 47(1): 15-24. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.002.
- CHEN X Y, LI C Y, XU H S, et al. Grid-forming and grid-following dual-mode switching strategy based on APS-IPSO for grid-forming energy storage[J]. *Electric Power Construction*, 2026, 47(1): 15-24. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.002.
- [320] GUO J C, WU H, MA T, et al. Scenario-adaptive hierarchical optimisation framework for design in hybrid energy storage systems[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 657. DOI: 10.1038/s41467-025-67377-1.
- [321] RABBANI M A. Supercapacitor and battery energy storage systems integrated renewable energy sources-a minireview[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 146: 120012. DOI:10.1016/j.est.2025.120012.
- [322] WANG M Y, YANG Z X, MAO S Y, et al. Passive ultrasonic probe and communication for internal hazards in lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2026: 102353. DOI: 10.1016/j.joule.2026.102353.
- [323] HUANG J L, XIA Y Y, XU S J, et al. Predictive thermal safety of lithium-ion batteries through a unified kinetic-thermal framework [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2026, 14(11): 6651-6662.
- [324] TAO S Y, ZOU C F. Listening to silent signals: Wireless internal sensing redefines battery safety intelligence[J]. *eTransportation*, 2026, 27: 100525. DOI:10.1016/j.etrans.2025.100525.
- [325] ZHANG Y, TENG A Q, FANG Z, et al. *In-situ* gas observation in thermal-driven degradation of LiFePO<sub>4</sub> battery[J]. *The Innovation Energy*, 2025, 2(4): 100107. DOI: 10.59717/j.xinn-energy.2025.100107.
- [326] CHEN S Q, ZHAO L H, CHEN K X, et al. Mitigating "Remaining fire" - "Re-burn": Multi-dimensional dynamic thermal runaway evolution mechanism and suppression for commercial lithium-ion batteries from gas perspective[J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 81: 104520. DOI:10.1016/j.ensm.2025.104520.
- [327] LIU C S, LIU Y, CHENG Z X, et al. Experimental study on the impact of safety valve venting pressure on thermal runaway in large-format lithium iron phosphate battery[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, 201: 107563. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107563.
- [328] LI Y X, MEI W X, YU Y, et al. Revealing the self-ignition mechanism of lithium iron phosphate battery modules: The coupling effect of battery inconsistency and BMS failure[J].

- eTransportation, 2025, 26: 100484. DOI:10.1016/j.etrans.2025.100484.
- [329] PENG R Q, KONG D P, PING P, et al. Experimental investigation of the influence of venting gases on thermal runaway propagation in lithium-ion batteries with enclosed packaging[J]. eTransportation, 2025, 23: 100388. DOI:10.1016/j.etrans.2024.100388.
- [330] WANG J J, WANG S P, YU Y, et al. Dual heat-absorbing inorganic flame-retardant composite phase change material for enhanced battery thermal safety[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 519: 165205. DOI:10.1016/j.cej.2025.165205.
- [331] WU Y X, YUEN A C Y, MO C M, et al. An advanced BPNN/RVEA coupled control strategy for novel immersed liquid cooling battery thermal management system[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 125: 117008. DOI:10.1016/j.est.2025.117008.
- [332] YU Y, TIAN J M, WANG J J, et al. In-depth analysis of synergistic suppression of thermal runaway propagation in lithium-ion battery modules *via* combined active cooling and passive insulation[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: 107026. DOI: 10.1016/j.psep. 2025. 107026.
- [333] SHE C R, LIU C S, LI Y X, et al. A novel early warning method for thermal runaway of lithium-ion batteries based on mechanical stress signal[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 201: 107626. DOI: 10.1016/j.psep. 2025.107626.
- [334] CHENG Z X, JU L R, LI J Y, et al. Early warning of thermal runaway for larger-format lithium iron-phosphate battery by coupling internal pressure and temperature[J]. Applied Energy, 2025, 383: 125396. DOI:10.1016/j.apenergy.2025.125396.
- [335] CAI X, ZHANG C P, CHEN J, et al. Sensorless battery expansion estimation using electromechanical coupled models and machine learning[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 105: 142-157. DOI:10.1016/j.jechem.2024.12.068.
- [336] GAO X Z, KONG D P, HUO J T, et al. Experimental study on fire extinguishing of lithium-ion batteries by alternating synergistic strategies of water mist and liquid nitrogen under low-temperature conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 117986. DOI:10.1016/j.est.2025.117986.
- [337] YAO Y Z, JIANG Y, CHEN F, et al. Optimal spray strategy for synergistic suppression of thermal runaway propagation in lithium-ion batteries using gaseous extinguishing agents and intermittent water mist[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 137: 118579. DOI:10.1016/j.est.2025.118579.
- [338] CHENG Z X, LI Z Y, LI Y X, et al. Atmosphere-regulated thermal runaway characteristics and multidimensional safety assessment of sodium-ion and lithium-ion batteries[J]. eTransportation, 2025, 26: 100475. DOI:10.1016/j.etrans. 2025. 100475.