

特约文章



## 2021年中国储能技术研究进展

陈海生<sup>1</sup>, 李泓<sup>2</sup>, 马文涛<sup>3</sup>, 徐玉杰<sup>1</sup>, 王志峰<sup>4</sup>, 陈满<sup>5</sup>, 胡东旭<sup>1,6</sup>, 李先锋<sup>7</sup>, 唐西胜<sup>4</sup>, 胡勇胜<sup>2</sup>, 马衍伟<sup>4</sup>, 蒋凯<sup>8</sup>, 钱昊<sup>9</sup>, 王青松<sup>10</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 张新敬<sup>1</sup>, 王星<sup>1</sup>, 徐德厚<sup>11</sup>, 周学志<sup>1</sup>, 刘为<sup>12</sup>, 吴贤章<sup>13</sup>, 汪东林<sup>14</sup>, 和庆钢<sup>15</sup>, 马紫峰<sup>16</sup>, 陆雅翔<sup>2</sup>, 张雪松<sup>4</sup>, 李泉<sup>2</sup>, 索鏊敏<sup>2</sup>, 郭欢<sup>1</sup>, 俞振华<sup>12</sup>, 梅文昕<sup>10</sup>, 秦鹏<sup>10</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>中国科学院重大科技任务局, 北京 100864; <sup>4</sup>中国科学院电工研究所, 北京 100190; <sup>5</sup>南方电网调峰调频发电有限公司, 广东 广州 510623; <sup>6</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <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>华中科技大学, 湖北 武汉 430074; <sup>9</sup>北京海博思创科技股份有限公司, 北京 100094; <sup>10</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>11</sup>国家能源大规模物理储能技术研发中心, 贵州 毕节 551712; <sup>12</sup>中关村储能产业与技术联盟, 北京 100190; <sup>13</sup>浙江南都电源动力股份有限公司, 浙江 临安 310030; <sup>14</sup>阳光电源股份有限公司, 安徽 合肥 230088; <sup>15</sup>浙江大学化学工程与生物工程学院, 浙江 杭州 310027; <sup>16</sup>上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 本文对2021年度中国储能技术的研究进展进行了综述。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2021年中国储能技术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, 中国储能技术在基础研究、关键技术和集成示范方面均取得了重要进展, 中国已经成为世界储能技术基础研究最活跃的国家, 也已成为世界储能技术研发和示范的主要核心国家之一。

**关键词:** 储能; 技术; 进展

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 03-1052-25

收稿日期: 2022-02-26。

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (51925604), 内蒙古自治区科技重大专项 (2020ZD0017), 中国科学院国际合作局国际伙伴计划 (182211KYSB20170029), 中国科学院战略性先导科技专项 (A类) (XDA21070200)。

第一作者及通讯联系人: 陈海生 (1977—), 男, 研究员, 研究方向为新型压缩空气储能系统、超临界流体储能系统、微型燃气轮机, E-mail: chen\_hs@mail.etp.ac.cn; 共同第一作者: 李泓, 研究员, 研究方向为锂离子电池、固态锂电池、失效分析, E-mail: hli@iphy.ac.cn; 马文涛, 工程师; 徐玉杰, 研究员, 研究方向为压缩空气储能, E-mail: xuyujie@iet.cn; 王志峰, 研究员, 研究方向为太阳能热发电技术、太阳能建筑技术, E-mail: Zhifeng@vip.sina.com; 陈满, 高级工程师, E-mail: 13926159826@139.com; 胡东旭, 工程师, 研究方向为压缩空气储能、飞轮储能、转子动力学、结构强度, E-mail: hudongxu@iet.cn; 李先锋, 研究员, 研究方向为液流电池关键材料与

核心技术、模拟及系统结构设计与模拟仿真、检测与评价、创新型电池关键材料与技术等, E-mail: lixianfeng@dicp.ac.cn; 唐西胜, 研究员, 研究方向为分布式电力与储能、微电网和智能电网等, E-mail: tang@mail.iee.ac.cn; 胡勇胜, 研究员, 研究方向为新能源材料与器件及其相关基础科学问题, E-mail: yshu@aphy.iphy.ac.cn; 马衍伟, 研究员, 研究方向为超导与纳米储能材料及器件, E-mail: ywma@mail.iee.ac.cn; 蒋凯, 教授, 研究方向为先进能源材料、新型电化学储能技术、规模储能技术应用, E-mail: kjiang@hust.edu.cn; 钱昊, 正高级工程师, E-mail: qianhhao@hyperstrong.com.cn; 王青松, 研究员, 研究方向为锂离子电池安全, E-mail: pinew@ustc.edu.cn。

## Research progress of energy storage technology in China in 2021

CHEN Haisheng<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, MA Wentao<sup>3</sup>, XU Yujie<sup>1</sup>, WANG Zhifeng<sup>4</sup>, CHEN Man<sup>5</sup>, HU Dongxu<sup>1,6</sup>, LI Xianfeng<sup>7</sup>, TANG Xisheng<sup>4</sup>, HU Yongsheng<sup>2</sup>, MA Yanwei<sup>4</sup>, JIANG Kai<sup>8</sup>, QIAN Hao<sup>9</sup>, WANG Qingsong<sup>10</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, ZHANG Xinjing<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, XU Dehou<sup>11</sup>, ZHOU Xuezhil<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>12</sup>, WU Xianzhang<sup>13</sup>, WANG Donglin<sup>14</sup>, HE Qinggang<sup>15</sup>, MA Zifeng<sup>16</sup>, LU Yaxiang<sup>2</sup>, ZHANG Xuesong<sup>4</sup>, LI Quan<sup>2</sup>, SUO Liumin<sup>2</sup>, GUO Huan<sup>1</sup>, YU Zhenhua<sup>12</sup>, MEI Wenxin<sup>10</sup>, QIN Peng<sup>10</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>Bureau of Major R&D Programs Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China; <sup>4</sup>Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; <sup>5</sup>China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, Guangdong, China; <sup>6</sup>Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>7</sup>Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China; <sup>8</sup>Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; <sup>9</sup>Beijing Hyper Strong Technology Co. Ltd., Beijing 10094, China; <sup>10</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; <sup>11</sup>National Energy Large Scale Physical Energy Storage Technologies R&D Center of Bijie High-tech Industrial Development Zone, Bijie 551712, Guizhou, China; <sup>12</sup>CNESA, Beijing 100190, China; <sup>13</sup>Zhejiang Narada Co. Ltd., Lin'an 310030, Zhejiang, China; <sup>14</sup>Sungrow Co. Ltd., Hefei 230088, Anhui, China; <sup>15</sup>College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; <sup>16</sup>Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Research and development progress on energy storage technologies of China in 2021 is reviewed in this paper. By reviewing and analyzing three aspects of research and development including fundamental study, technical research, integration and demonstration, the progress on major energy storage technologies is summarized including hydro pumped energy storage, compressed air energy storage, flywheel, lead battery, lithium-ion battery, flow battery, sodium-ion battery, supercapacitor, new technologies, integration technology, fire-control and safety technology. The results indicate that extensive improvements of China's energy storage technologies have been achieved during 2021 in terms of all the three aspects. China is now the most active country in energy storage fundamental study and also one of the core countries of technical research and demonstration.

**Key words:** energy storage; technology; progress

储能是能源革命的关键支撑技术, 是解决可再生能源大规模接入、提高电力系统和区域能源系统效率、安全性和经济性的迫切需要<sup>[1-3]</sup>。2021年, 国家双碳战略的实施, 大幅促进了储能技术和产业的发展, 中国储能实现了从商业化发展初期到规模化发展的转变, 总体上中国储能的发展超出了业界预期<sup>[4]</sup>。一是支持储能的政策不断出台, 二是储能系统的装机大幅增加, 三是多种储能技术取得重要进展。学术界和工业界都非常希望能有一篇综述性文章对中国 2021 年储能技术的研究进展进行全面

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 2021 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、飞轮储能、铅蓄电池、锂离子电池、液流电池、钠离子电池、超级电容器和新型储能技术等, 希望能够通过对储能技术基础研究、关键技术和集成示范的回顾和分析, 总结 2021 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

者和工程技术人员提供参考。

本文共分15节,其中前言由陈海生撰写,第1节抽水蓄能由陈满、徐德厚、郭欢撰写,第2节压缩空气储能由徐玉杰、张新敬、王星撰写,第3节储热储冷由王志峰、王亮、张雪松撰写,第4节飞轮储能由胡东旭、周学志撰写,第5节铅蓄电池由唐西胜、吴贤章撰写,第6节锂离子电池由李泓、李泉、索彦敏撰写,第7节液流电池由李先锋、马文涛撰写,第8节钠离子电池由胡勇胜、陆雅翔、马紫峰撰写,第9节超级电容器由马衍伟撰写,第10节新型储能技术由蒋凯、和庆钢和俞振华撰写,第11节集成技术由钱昊、汪东林、刘为撰写,第12节消防安全技术由王青松、梅文昕、秦鹏撰写,第13节综合分析和第14节结论与展望由陈海生撰写,全文由陈海生统稿。由于时间仓促,且作者水平有限,相关内容如有不全面甚至谬误之处,请各位读者批评指正。

## 1 抽水蓄能

抽水蓄能具有储能容量大、系统效率高、运行寿命长、响应快速、工况灵活、技术成熟等优点,是当前大规模储能的主流技术。2021年,在双碳目标的驱动下,国家从规划、政策等方面对抽水蓄能给予了引导和支持,我国抽水蓄能的发展迎来历史性机遇,得到了飞速发展。可变速抽水蓄能、大容量超高水头抽水蓄能、抽水蓄能与新能源联合运行控制、海水抽水蓄能以及基于废弃矿洞的抽水蓄能等技术成为研究重点。

### 1.1 基础研究

针对变速机组的控制及运行问题,Gong等<sup>[5-6]</sup>提出了水泵工况启动控制、低电压穿越控制等方法,Chen等<sup>[7-9]</sup>提出了有功励磁控制器与调速器协调控制、一次调频控制策略和技术、有功无功快速控制等新方法。武汉大学与南方电网调峰调频公司<sup>[9-10]</sup>通过实证研究,量化了机组变速性能、出力性能、效率性能和压力脉动性能共性指标,揭示了可变速机组变速行为演化机理,阐明了变速运行压力脉动“拐点”效应,明晰了定扬程条件下变速入力调节的“迁移三角形”规律。

围绕风光等新能源与抽水蓄能结合发电的控制特性和系统优化,Yao等<sup>[11]</sup>提出了可变速海水抽水蓄电站与海上风电联合运行调度策略,优化计算了海

水抽水蓄能电站的最优容量。杨森等<sup>[12]</sup>在粒子群万有引力混合算法中引入混沌算法、惯性权重和改进步长因子,建立以经济效益最大化为目标的风-光-抽水储能联合发电系统数学模型。Xu等<sup>[13]</sup>针对不同的风况(随机风、梯度风和阵风),从动态调节性能和互补特性的角度研究了抽水蓄能发电对间歇性风电注入的调节能力。王珏等<sup>[14]</sup>建立了反映抽水储能机组过渡过程和双馈风电机组特性的抽水储能-风电联合系统模型,探究了有功功率跟踪和功率平滑模式的动态响应特性,并验证抽水蓄能机组的功率调节补偿性能。

围绕水泵水轮机流动特性,Tao等<sup>[15]</sup>对水泵水轮机的不可逆流动能量耗散特性进行了可视化、跟踪、量化和对比分析,指出有针对性地消除涡流、降低表面粗糙度和提高几何流动适应性有助于提高水泵水轮机的能量转换效率。Zhang等<sup>[16]</sup>分析了水泵水轮机内水流破坏和重组的全过程,提高了对水柱分离危险现象的认识。Gao等<sup>[17]</sup>根据水泵水轮机的完整特性曲线,建立了双馈抽水蓄能快速高精度模型。张金凤等<sup>[18]</sup>以提高水泵水轮机泵工况的效率与扬程为目标,用近似模型和改进PSO算法结合的方法对转轮9个结构参数进行全局寻优。

针对废弃矿井构建抽水蓄能地下水库的问题,张庆贺等<sup>[19]</sup>以常规抽水蓄能电站主要工程结构为蓝本,提出了淮南矿区沉陷区一地下洞室群抽水蓄能电站的构建模型。卞正富等<sup>[20]</sup>研究了水文地质与水化学特征及水循环过程对选址的影响,以及废弃矿井地下空间岩体稳定性和密闭性对运行的影响。Shang等<sup>[21]</sup>开展了废弃煤矿地下空间改造为抽水蓄能电站的指标评价体系研究,指出上下水库的高差是影响最大的指标,其次为上下水库库容。另外,赵海镜等<sup>[22]</sup>综合考虑寒冷地区抽水蓄能电站水库最大冰厚的影响因素,利用实测资料采用多元回归方法建立了我国北方抽水蓄能电站最大冰厚计算公式。

### 1.2 关键技术

我国大型抽水蓄能电站工程建设技术取得了长足进步。大型抽水蓄能电站地下洞室群、水力系统快速机械化施工技术成熟应用,国产盾构机在2020年首次实现在抽水蓄能电站成功应用后,到2021年底已在8个抽水蓄能项目推广应用。

超高水头、超大容量抽水蓄能机组设计制造安

装技术取得新突破,国内单机容量最大(400 MW) 700米级水头的阳江抽水蓄能机组攻克了长短转轮叶片与导叶匹配技术、双鸽尾结构磁极技术、磁轭通风沟锻件整体铣槽工艺、磁轭鸽尾槽预装后整体铣槽工艺等新型制造和安装技术,机组稳定性指标优越,达到国际领先水平。

抽水蓄能电动发电机技术取得新突破,分数极路比绕组技术在国内首次成功应用于黑龙江荒沟抽水蓄能电站,与常规绕组方式相比,可优化电站电气系统配置,改善发电电动机性能,定子绕组布局合理,提高定子线棒刚强度,机组安装与维护更方便。

抽水蓄能机组安装及调试技术也取得新进步,梅州抽水蓄能电站在机组施工过程中通过安装调试措施优化,创造了从项目开工至首台机投产仅用时41个月的国内抽蓄建设工期新纪录。

### 1.3 集成示范

2021年全国共建设投产了敦化、荒沟、周宁、沂蒙、长龙山、梅州、阳江、丰宁8座抽水蓄能电站。敦化蓄能电站在国内首次实现700米级超高水头、高转速、大容量抽水蓄能机组的完全自主研发、设计和制造,成功建设严寒地区抽水蓄能电站首个沥青混凝土心墙堆石坝;长龙山蓄能电站最大发电水头(756 m)、机组额定转速(5号6号机组600 r/min)、高压钢岔管HD值(4800 m×m)均为世界第一;黑龙江荒沟电站填补国内空白的技术创新成果——“分数极路比”绕组技术;沂蒙电站1号、2号机组投产发电,是首例高转速“零配重”抽水蓄能机组;梅州蓄能电站主体工程创造了国内抽水蓄能电站最短建设工期纪录的同时,机组运行稳定性在国内首次实现了三导轴承摆度精度达到0.05 mm;阳江蓄能电站实现了40万千瓦级单机容量、700 m高水头抽蓄机组全自主化制造,电站水道是世界首条800 m级水头的钢筋混凝土衬砌水道;丰宁蓄能电站是世界装机容量最大的抽水蓄能电站,在国内首次引进使用变速机组技术。

南方电网调峰调频公司等多家单位建设了国内外首台完备的水-机-电-控制系统的可变速抽水蓄能动态特性实验装置,建设了变速抽水蓄能仿真平台,实现了国内可变速抽蓄技术的集成示范应用,深入研究了10 MW级可变速海水抽水蓄能机组关键技术。

## 2 压缩空气储能

压缩空气储能技术具有储能容量大、储能周期长、系统效率高、运行寿命长、比投资小等优点,被认为是最具有广阔发展前景的大规模储能技术之一。2021年,我国压缩空气储能技术取得了里程碑式的发展,在系统特性分析、压缩机和膨胀机关键技术、10~100 MW集成示范等方面均取得重要进展。

### 2.1 基础研究

在系统特性分析与优化方法方面,Guo等<sup>[23]</sup>建立超临界压缩空气储能系统各个部件的动态模型,研究系统的容腔效应、热惯性的影响规律,进而提出系统运行的控制方法,提升了系统的响应特性。Chen等<sup>[24]</sup>通过对储热系统优化设计使蓄热式压缩空气储能循环效率得到提升。通过调节运行参数,实现了蓄热式压缩空气储能系统冷热电三联供。Dzido等<sup>[25]</sup>研究了液态空气储能中冷能的回收利用对系统性能的影响,研究发现不同的液化工艺流程及释能压力对系统循环效率存在影响。焓损分析表明,系统焓损最大的为节流损失。Guo等<sup>[26]</sup>通过理论分析得到了水下压缩空气储能系统的热力学特性,研究得到水下压缩空气储能系统的效率可达70.7%,降低部件焓损的优化顺序为膨胀机前换热器、膨胀机、压缩机末级、低温蓄热罐。Chen等<sup>[27]</sup>研究了等温压缩空气储能的系统特性,系统循环效率最高可达76%。Mucci等<sup>[28]</sup>研究了小型压缩空气储能系统性能,研究发现通过对压缩机、膨胀机的转速调节、压力阀门控制等方法,能够提升系统效率并降低成本。

在压缩机内流特性与宽工况调节方面,Liang等<sup>[29]</sup>在对离心式压缩机进行数值模拟的基础上,结合改进的二区模型和低稠度叶片扩压器(LSVD)设计方法,完成了整体齿式(IGC)压缩机第一级的气动设计,多变效率可达91.0%。张丹等<sup>[30]</sup>研究了轴流式压缩机动静叶弯参数耦合特征对角区分离和激波的影响并进行优化设计,使失速裕度提升了60.56%。Sun等<sup>[31-32]</sup>在压缩机中引入湿压缩方法,研究了该方法对压缩机性能的影响特性及汽雾颗粒的运动规律,发现设计工况下压缩机耗功可降低1.47%。孟冲等<sup>[33]</sup>发现采用进口导叶调节可以使工作流量范围扩大30.4%,压比范围扩大427.4%。

Guo等<sup>[34]</sup>实验研究了可调导叶和可调扩压器对压缩机性能的影响规律,发现二者联合调节能够使压缩机效率最高提高1.2%,并获得了联合调节策略。

在膨胀机内流特性与高效调节方面,Wang等<sup>[35]</sup>分析了压缩空气储能闭式和半开式向心膨胀机内部三维流场结构,揭示了流动损失机理。孙冠珂等<sup>[36-37]</sup>对膨胀机进气结构内部的二次流漩涡结构开展了研究并揭示了流动损失机理。此外,现有研究也分别对膨胀机闭式叶轮轮盖空腔间隙泄漏流<sup>[38-39]</sup>、轮背空腔泄漏流<sup>[40]</sup>、半开式叶顶间隙泄漏流<sup>[41]</sup>等开展分析,并提出了多元耦合流动控制方法<sup>[42]</sup>、叶片三维造型<sup>[43-44]</sup>、新型轮背空腔泄漏流密封结构<sup>[45]</sup>、集气室表面局部低粗糙度流动控制法<sup>[46]</sup>等流场优化方法,有效提高了膨胀机效率。针对压缩空气储能膨胀机非稳态运行工况,刘祖煜等<sup>[47]</sup>对启动过程下膨胀机内部流动损失特性开展研究,揭示了其内部通道分离涡与前缘涡演化规律。李辉等<sup>[48]</sup>研究了多级膨胀机级间耦合下膨胀机可调导叶内部流场结构与损失特征。刘栋等<sup>[49]</sup>对多级再热式向心涡轮第一、三级导叶开度采用联调方式,发现该方法能够扩大多级涡轮流量和总出功的调节范围。

在蓄热换热器蓄热特性方面,Liao等<sup>[50]</sup>和Li等<sup>[51]</sup>通过研究流量、压力等对填充床蓄冷单元的影响,得到了优化运行参数,同时利用液体透平回收超临界空气储能过程的能量,使系统循环效率进一步提升10%。Zhang等<sup>[52]</sup>将压缩热与太阳能热利用结合,构建一种有封装相变材料的级联填充床梯级储热单元,实现了不同温度热能的梯级利用,使系统效率有所提升。液态空气储能中冷能的回收利用对系统性能具有重要的影响,通过构建液体空气储能系统的多种结构,采用多组分流体循环回收系统的冷能,可提升系统效率2.3%<sup>[53]</sup>。在液态空气存储罐中会液体分层现象,Heo等<sup>[54]</sup>根据液空温度和其中氧成分浓度定义了分层发生的条件,评估了分层稳定性比和稳定性图谱,利用液气储罐内部分层的操作策略,可以最大限度地减少储罐内液气的蒸发气体。

在压缩空气储能系统与其他系统耦合研究方面,Fu等<sup>[55]</sup>将蓄热式压缩空气储能与有机朗肯循环耦合系统,将系统中多余的压缩热用来驱动有机朗肯循环,并采用变结构实现压缩与膨胀单元的压力调节,使该系统的最大效率达70.5%。Alirahmi

等<sup>[56]</sup>将压缩空气储能与太阳热能、海水淡化耦合构成新型能源系统并分析其技术经济性,结果表明该系统可以提供电力调峰以及淡水系统的投资回报期为2.65年。Li等<sup>[57]</sup>开展了蓄热式压缩空气储能系统全生命周期技术经济和环境优化分析,较好评估了系统的度电成本及其对环境的影响,同时通过对压缩空气储能系统全生命周期环境影响评估,得到各个环节折合CO<sub>2</sub>排放及能源与水消耗,获得了其全生命周期环境影响特性。

## 2.2 关键技术

压缩空气储能的关键技术主要包括压缩机技术、蓄热换热器技术、膨胀机技术、系统集成与控制技术等。

2021年,中国科学院工程热物理所依托国家能源大规模物理储能研发中心建成了压缩机实验与检测平台,测试平台系统压力测量范围0.5~110 bar(1 bar=0.1 MPa),转速测量范围0~40000 r/min,功率测量范围0~10 MW,具有开展单/多级压缩机气体动力学、力学性能、压缩机与换热设备的耦合特性、压缩系统变工况控制规律、压缩系统性能检测以及特殊工质压缩机性能等功能。依托该实验平台,中国科学院工程热物理所研制了10 MW先进压缩空气储能系统用10 MW级六级间冷离心式压缩机(最大工作压力10 MPa,效率为86.3%)、10 MW级四级再热组合式透平膨胀机(最大入口压力为7 MPa,效率为88.2%)、高效超临界蓄热换热器(蓄热量达68 GJ,蓄热效率为97.3%),并应用于肥城10 MW盐穴压缩空气储能商业电站。

中国科学院工程热物理所还攻克了100 MW级先进压缩空气储能系统的宽工况组合式压缩机技术、高负荷轴流式膨胀机技术、高效蓄热换热器技术,以及系统集成与控制技术,研制出国际首套100 MW系统压缩机、膨胀机和蓄热换热器,目前正在开展张家口示范系统的集成调试。

## 2.3 集成示范

2021年,压缩空气储能示范项目取得了多个里程碑式的进展。中国科学院工程热物理所于2021年8月在山东肥城建成了国际首套10 MW盐穴先进压缩空气储能商业示范电站,顺利通过项目验收,并正式并网发电商业运行,系统效率达到60.7%,创造了新的世界纪录。位于贵州毕节的集气装置储气10 MW先进压缩空气储能系统于

2021年10月完成并网发电。江苏金坛建设了60 MW/300 MW·h盐穴压缩空气储能示范项目,并于2021年10月开展了并网试验。中国科学院工程热物理所在张家口市建设的国际首套100 MW先进压缩空气储能国家示范项目,已经完成关键部件研制和系统集成安装,并于2021年12月底顺利并网,开始进入系统带电调试阶段,成为我国压缩空气储能技术新的里程碑。

### 3 储热储冷

储热储冷技术具有规模大、成本低、寿命长等优点,在电力、建筑、工业等领域得到广泛应用。根据存储方式不同,储热储冷技术可分为显热、潜热和热化学储热三类。2021年,我国学者在储热材料物性调控机理、储热换热特性与强化、储热材料制备技术、系统控制与优化技术、系统集成示范等方面,取得了重要进展。

#### 3.1 基础研究

在储热材料物性调控及其机理方面,形成从量子力学到牛顿力学,从纳米尺度到宏观的多尺度研究手段。基于第一性原理对物质电子和晶格的热运动规律进行研究,得到材料物性的调控方法;采用分子动力学对物质原子体系行为进行研究,得到物质的微观热物性机理,尤其是揭示了热化学储热的核壳结构<sup>[58]</sup>。在温度对能垒的作用,材料原子间相互作用,热作用下晶格振动和电子运动规律等的研究方面取得了较大进展。研究了新工质和维持多孔物理吸附材料反应活性和吸附循环热稳定性的方法;利用相图理论发展了低熔点高分解温度混合熔盐的设计方法<sup>[59]</sup>。

储热换热特性与机理方面,在相变材料中添加一维到三维的纳米尺度高导热材料,形成热输运通道和增加声子传输能力。Tian等<sup>[60]</sup>开展了利用莫里定律的仿生储热换热研究;Yao等<sup>[61]</sup>基于拓扑优化方法获得储热换热器新结构;Yu等<sup>[62]</sup>研发了熔盐纳米流体的比热容提升和对流传热强化特性,熔盐纳米流体的比热容提升和对流传热强化机理等;Lin等<sup>[63]</sup>研究了新型喷淋式填充床内渗流流动及储热特性;文献[64-66]研究了多种水合盐类、糖醇类和石蜡类储释热性能,并且开展多种复合强化、微胶囊化、翅片增强等方法研究;Chen等<sup>[67]</sup>研究了相变材料储释热过程体积变化产生的缩孔缩松特征及其

影响。Feng等<sup>[68]</sup>在吸附式储热储冷方面、新工质和维持多孔物理吸附材料反应活性、吸附循环热稳定性等方面有较多研究。

#### 3.2 关键技术

在储热储冷材料制备技术方面,基于碳化硅、黑刚玉与高岭土等材料研制出可在1100℃条件下安全使用的储热陶瓷颗粒材料<sup>[69]</sup>;在熔盐储热材料方面,重点开展了低熔点二元熔盐、低熔点高温三元熔盐体系研究<sup>[70]</sup>。Guo等<sup>[71]</sup>研发了碱金属和碱土金属的氯化物熔盐体系,实现了700℃下氯化物熔盐对316不锈钢的腐蚀速率低于205.37 μm/年;还开展了复合相变、定形相变和仿生相变储热材料研究,提出了基于纳米颗粒、多孔仿生陶瓷、共晶盐体系的比热容和热导率协同提升方法,导热系数可达116 W/(mK)<sup>[71]</sup>;在太阳能热化学储热方面,韩翔宇等<sup>[72]</sup>开展了Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CoO等金属氧化物反应物体系和钙基热化学储热的动力学研究;Liu等<sup>[73]</sup>实现了太阳能直接驱动光热转换与热化学储热一体化。

在储热储冷装置设计技术方面,贺明飞等<sup>[74]</sup>研究了大容量长周期跨季节储热,进行了蓄热水体承重浮顶热力耦合特性和逆斜温层控制技术研究;Guo等<sup>[75]</sup>研究了土壤跨季节储热的传蓄热机理和结构参数;Zhu等<sup>[76]</sup>和Liu等<sup>[77]</sup>研究了换热器、热管等相变储冷储热强化技术,Chen等<sup>[78]</sup>开展了高效动态冰浆蓄冷换热性能研究与性能优化等。

在系统控制与优化方面,研究人员<sup>[79-82]</sup>开展了储热储冷应用于太阳能热发电、火电调峰、风电消纳、分布式能源系统等领域的能源系统设计、参数优化和运行调控策略等方面研究;张涵等<sup>[83]</sup>研究了热泵储电、卡诺电池等以热能和冷能存储电能的新型储能系统;林酿志等<sup>[84]</sup>和徐德厚等<sup>[85]</sup>开展了基于水体和土壤等方式的大容量长周期跨季节储热研究,建立了考虑技术经济性的储热供热系统性能分析方法。

#### 3.3 集成示范

在储热集成示范方面,2021年度在敦煌建成了采用熔盐储热的50 MW线性菲涅尔式太阳能热发电站,热熔盐温度550℃,冷熔盐温度290℃,熔盐储热可发电750 MW·h;在新疆哈密建成了50 MW熔盐塔式光热发电,采用熔盐储热可实现12 h连续发电;在河北黄帝城建成1.06万m<sup>3</sup>水体

储热的太阳能储热采暖项目,在北京建立了50 kW/500 kW·h中低温热化学储热中试系统;在张家口建成100 MW亚临界水蓄热子系统应用于100 MW先进压缩空气储能系统;在张家口应用水合盐相变材料实现为冬奥会转播中心供暖。江苏金合公司已实现中高温复合相变材料及其系统技术(450~750 °C)的规模化应用。

在储冷集成示范方面,在北京环球影城建成三联供系统耦合冰蓄冷系统,每年冰蓄冷系统“移峰填谷”的电量可达630万 kW·h;北京用友软件园采用冰储冷技术,为18.5万 m<sup>2</sup>建筑供热供冷;相变储冷材料、装备和系统研究进展迅速,基于相变材料的冷链运输技术已获得应用<sup>[84]</sup>。

## 4 飞轮储能

飞轮储能具有功率密度较高、充放电次数高、工作环境要求低、无污染等特点,在短时高频领域具有很好的应用前景。2021年,国内飞轮储能行业在基础研究、关键技术和集成示范方面均取得了重要进展。

### 4.1 基础研究

基础研究方面,国内学者在飞轮材料、电机损耗、动力学及控制等方面取得进展。洛阳船舶材料研究所宋金鹏等<sup>[85]</sup>通过对复合材料进行拉伸性能试验,建立了复合材料储能飞轮力学模型。中国科学院工程热物理研究所戴兴建等<sup>[87]</sup>进行了高强合金钢飞轮转子材料结构分析,表明了合金钢飞轮的安全性和经济性。江苏大学孙玉坤等<sup>[88]</sup>进行了高速永磁同步电机损耗分析与优化,结果表明径向分段和Halbach充磁方式均能大幅度降低永磁体涡流损耗。清华大学贾翔宇等<sup>[89]</sup>分析了接触参数对储能飞轮转子碰摩行为的影响,为优化系统接触参数、提升系统稳定性提供依据。哈尔滨工程大学任正义等<sup>[90]</sup>探究了接触应力对飞轮转子动力特性的影响,结果表明不同的过盈量对转子系统的模态有很大的影响;同时还进行了刚性飞轮转子-基础耦合系统的径向振动分析。西安电子科技大学Xiang等<sup>[91]</sup>探究了飞轮储能系统充放电过程控制,提出了一种复合控制模型,以提高响应速度和输出电压精度。

### 4.2 关键技术

关键技术方面,国内学者的研究重点在大储能量飞轮本体、高速电机和调节控制技术等方面。中

国科学院工程热物理研究所突破了大储能量飞轮及高速电机关键技术,完成了500 kW/180 MJ飞轮储能工程样机方案设计及关键部件研制。武汉理工大学刘鸣等<sup>[92]</sup>进行了磁悬浮飞轮中位移检测信号工频干扰分析及消除研究,提出一种变步长算法进行滤波处理和扰动消除可达到实时消除工频干扰的效果。陈仲伟等<sup>[93]</sup>基于双馈电机驱动的飞轮储能多功能柔性功率调节器(FPC)设计了一套励磁控制系统,该系统能够实现软启动,适合于带飞轮储能的双馈电机励磁控制系统。沈舒楠等<sup>[94]</sup>为解决飞轮储能电机齿槽转矩大,高速运行时铁芯损耗高的问题,提出一种外转子无铁芯无轴承永磁同步电机,相较于传统的有铁芯电机运行稳定性更好。由中海油新能源二连浩特风电有限公司牵头,中国科学院工程热物理研究所、清华大学等单位参与的内蒙古自治区重大专项“MW级先进飞轮储能关键技术研究”完成了系统方案设计及工程样机研制,预计将于2022年并网发电。

### 4.3 集成示范

集成示范方面,国内多个示范项目在2021年取得了突破。华阳集团两套单机600 kW全磁悬浮飞轮储能系统成功下线,将用于深圳地铁再生制动能量回收。由沈阳微控新能源技术有限公司承建的风电场站一次调频和惯量响应的飞轮储能应用项目顺利通过并网前验收,该项目坐落于大唐国际阜新风电场。国家能源集团宁夏电力灵武公司光火储耦合22 MW/4.5 MW·h飞轮储能项目开工,该项目是国内第一个全容量飞轮储能-火电联合调频工程,实现大功率飞轮单体工程应用。国电投坎德拉(北京)新能源有限公司MW级飞轮储能系统成功交付,该项目飞轮储能系统规模为1 MW/200 kW·h,将应用于霍林河循环经济的“源网荷储用”示范项目大规模混合储能系统。

## 5 铅蓄电池

铅蓄电池的特点是技术成熟、成本低、安全可靠,但是放电功率较低、寿命较短,铅蓄电池的研发主要集中于铅炭电池,通过在负极添加高活性的碳材料,可以有效抑制部分荷电态下因负极硫酸盐化引起的容量快速衰减,并可以提高电池的快速充放电能力。

## 5.1 基础研究

如何平衡好碳材料的两面性,使其既能改善负极孔结构,抑制硫酸盐化,提升大电流充电接受能力,充分发挥其延长电池寿命的优势,又能使负极保持较高的析氢过电位,抑制析氢失水的负面作用,是近几年基础研究的主要方向。目前研究主要包括碳材料对负极活性物质的作用机理、电化效应、结构特性,碳添加于负极活性物质的工艺、高倍率部分荷电态性能等方面。中国科学院福建物质结构研究所陈远强<sup>[95-96]</sup>分别采用聚吡咯/炭黑复合材料和聚苯胺/木素复合膨胀剂,以改善负极析氢问题及不可逆“硫酸盐化”问题,最终显著提高了铅酸电池的循环寿命,其中采用聚吡咯(PPy)/炭黑(CB)复合材料电池循环寿命可达7578次,比对照组的电池(负极只添加CB)提高了约109%。

## 5.2 关键技术

高电化活性与铅炭兼容的新型碳材料方面,开发了适用于硫酸环境、大孔和中孔结构合理、高的比表面利用率和良好的离子电导性的新型碳材料,良好的铅炭相容性,使负极具备较高的析氢过电位,抑制析氢失水的副反应。

在宽温区、超长寿命、高能量转换效率、低成本铅炭储能电池方面,开发了负极长循环配方技术,抑制硫酸盐化。开发更耐腐蚀的正极板栅合金,提升正极耐腐蚀寿命,并改善合金表面氧化层,提高界面导电性。

在高电压大容量系统集成技术方面,实现了电池系统电压高于1500 V,单簇系统容量高于3 MW·h,系统能量转换效率不低于90%。

在铅炭储能系统集成技术及智能管理技术方面,突破了充放电智能管理技术,使电池运行在合理的区间内,并延长系统使用寿命。

## 5.3 集成示范

与锂离子电池相比,铅炭电池的充放电速度慢,一般需要6~8 h以上才能实现容量的有效利用,而且能量密度低。铅炭电池在经过几年的快速发展后目前趋于沉寂,但安全性高、回收率高的特点使其在场地要求不高、有较长的充放电工作周期等场合仍然是有竞争力的储能技术。2021年,中国铁塔和中国联通通过公开招标,分别采购了1.097 GW·h和1.089 GW·h铅酸铅炭电池。2020年并网的雒城(金陵变)12 MW/48 MW·h铅炭储能项

目已实现正式运行。

# 6 锂离子电池

锂离子电池具有储能密度高、充放电效率高、响应速度快、产业链完整等优点,是最近几年发展最快的电化学储能技术。2021年,我国锂离子电池技术在基础研究、关键技术、系统集成等方面均取得了一系列重要进展。

## 6.1 基础研究

基础研究方面,关键电池材料和固态电池设计是当前研发的热点。在关键电池材料方面,复旦大学Shi等<sup>[97]</sup>成功研制了高性能的纤维锂离子电池,通过揭示纤维锂离子电池内阻随长度的变化规律,构建出可以编织到纺织品中的新型纤维聚合物锂离子电池。北京大学Liu等<sup>[98]</sup>提出了 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{X}_z\text{O}_2$ (X为单个或多个元素掺杂)无Co正极候选材料。中国科学院物理研究所Yue等<sup>[99]</sup>报道了溶解气体 $\text{CO}_2$ 作为界面形成添加剂,在保证盐包水电解质的宽电化学稳定性窗口的前提下,减小了锂盐浓度带来的高成本问题。新型固态电解质开发方面,中国科技大学Wang等<sup>[100]</sup>报道了 $\text{Li}_2\text{ZrCl}_6$ 新型电解质体系,成本较低,可以液相法制备。航天811所Gao等<sup>[101]</sup>研制出高电化稳定性低成本 $\text{Li}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ ,离子电导率达到了 $3.59 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ (20 °C)。吉林大学Chi等<sup>[102]</sup>研制了超薄、高离子电导、高稳定性的锂离子交换沸石X(LiX)固态电解质膜(LiXZM)。这三类固态电解质材料具有重要的应用价值,对于推动固态电池的发展具有十分重要的意义。

## 6.2 关键技术

在关键技术方面,正负极材料、快充技术、半固态电池技术等是当前技术研发的重点。在正极材料方面,从短期发展来看,高镍主流材料为NCM811,随着对能量密度要求的进一步提升,Ni88、Ni90、Ni92等正极材料已实现研发和量产,Ni96等超高镍产品(镍含量 $\geq 90\%$ )正在研发中。高镍/超高镍搭配硅碳新型负极,电芯的质量能量密度达到了350~400 W·h/kg。在负极材料方面,纳米硅碳负极材料实现了高首效、长寿命、低膨胀。在快充技术方面,蜂巢新能源宣称通过革新锂电池正负极、电解液等关键材料,可实现充电10 min,续航400 km。在半固态电池研发方面,蔚来发布了基于原位固态化技术的150 kW·h的动力锂电池

技术,电芯能量密度达360 W·h/kg以上,使得搭载该电池的ET7轿车单次充电续航达到1000 km以上。北京卫蓝新能源与浙江锋锂开发的混合固液电解质锂离子储能电池也达到了一万次的循环寿命,并实现了100 kW·h的小型储能系统的示范。

### 6.3 集成示范

在系统集成方面,无模组技术(CTP, cell to pack)与比亚迪刀片电池的推广,实现了磷酸铁锂系统能量密度提升到150 W·h/kg以上,并兼顾安全性。宁德时代在晋江建设的36 MW/108 MW·h基于锂补偿技术的磷酸铁锂储能电池寿命达到1万次,在福建省调频和调峰应用方面取得了较好的应用效果。此外,宁德时代推出了将锂离子电池和钠离子电池集成到同一系统中的解决方案。蔚来汽车发布了三元正极与磷酸铁锂电芯混合排布的新电池包(75 kW·h),构成双体系电池系统,可实现低温续航损失降低25%,也有望未来用于规模储能系统。

## 7 液流电池

液流电池具有安全性高、寿命长、规模大等优点,在大规模储能领域具有良好的应用前景。据美国DOE预计,在储能时长为4~10 h的电网规模储能方面,液流电池储能技术将具有比较优势。2021年,我国在液流电池研发领域开展了卓有成效的工作,并取得了重要的进展。

### 7.1 基础研究

探索开发低成本、高能量密度的长寿命液流电池新体系,对于实现液流电池未来可持续发展具有较为重要的意义<sup>[103]</sup>。国内多家单位包括中国科学院大连化学物理研究所、中国科学技术大学、南京大学、西安交通大学、华南理工大学、西湖大学、中国科学院金属所等开展了包括有机系、多电子转移水系的液流电池新体系的开发工作。西湖大学Xu等<sup>[104]</sup>利用分子工程修饰了吩嗪类有机氧化还原电对,基于此电对所构建的水系有机液流电池具有良好的稳定性。除有机外,以中国科学院为代表单位开展高能量密度多电子转移水系液流电池的开发工作,开发出包括锌锰<sup>[105]</sup>、锌碘<sup>[106]</sup>、钛锰<sup>[107]</sup>等多个体系(锌锰和锌碘的研究是2020年及以前的)。中国科学院大连化学物理研究所Li等<sup>[108-109]</sup>首次引入机器学习方法用于预测全钒液流电池成本和性能,并建

立液流电池用多孔膜溶剂处理后的性能预测模型。尽管如此,以上体系仍存在许多关键科学与技术问题需要解决<sup>[110-111]</sup>。

### 7.2 关键技术

面对双碳背景下新型电力系统对储能的重大需求,2021年我国在液流电池领域技术研发领域投入明显增加。以中国科学院大连化学物理研究所、大连融科储能技术发展有限公司、北京普能公司为代表的单位在新一代高功率密度全钒液流电池关键电堆技术以及高能量密度锌基液流电池等方面取得重要进展。开发出新一代可焊接全钒液流电池技术,较传统全钒液流电池,其膜材料选择可焊接多孔离子传导膜,双极板采用可焊接双极板,实现电堆的高效、自动化集成,系统可靠性进一步提高,电堆成本降低40%;全钒液流电池的单个电堆功率超过50 kW,单个储能标准模组的功率达到500 kW,有望继续增加到1 MW,这为降低系统集成成本、进一步推进液流电池产业化应用具有重要的意义。此外其他体系包括锌基液流电池和铁铬液流电池等也取得重要成果,相继开展了相关应用示范。

### 7.3 集成示范

近年来随着电网侧对大规模、高安全、长时储能技术的需求急剧增加,吸引了大量研究单位和企业从事全钒液流电池产业化的开发。国内完成了多个标志性全钒液流电池储能电站示范项目,其中,融科储能两套10 MW/40 MW·h网源友好型风场项目投运,北京普能交付了一套光伏、储能户外实证实验平台国家光伏、储能实证实验平台(大庆基地)的全钒液流电池储能系统,大连200 MW/800 MW·h全钒液流电池储能调峰电站一期工程完成主体工程建设,进入单体模块调试阶段。此外,近期国内签约落地多个100 MW级全钒液流电池电站,国电投集团襄阳100 MW/500 MW·h,中广核100 MW/200 MW·h全钒液流电池储能电站等。

## 8 钠离子电池

钠离子电池是最接近锂离子电池的化学储能技术,虽然在储能密度、技术成熟度等方面同锂离子电池还有差距,但由于其资源丰富、低温性能好、充放电速度快等优点,特别是随着锂资源问题热度的提高,钠离子电池得到了储能领域的高度关注。2021年,我国钠离子电池在基础研究、技术水平

和产业化方面,均取得了快速发展。

### 8.1 基础研究

正极、负极和电解质材料作为钠离子电池的关键材料是当前基础研究的热点方向<sup>[112-113]</sup>。正极材料研究主要分为三类:一是层状过渡金属氧化物( $\text{Na}_x\text{MO}_2$ ),其可逆比容量高达 $190\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ,平均放电电压一般为 $2.8\sim 3.3\text{ V}$ ,制备方法简单,是工程化开发的首选正极材料体系<sup>[114]</sup>,研究发现阴离子氧化还原的引入可进一步提升材料的比容量<sup>[115]</sup>;二是聚阴离子类化合物,其具有开放的钠离子扩散通道,平均电压高达 $3.7\text{ V}$ ,最具代表性的为氟磷酸钒钠,其可逆比容量约 $120\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ,可实现室温规模合成<sup>[116]</sup>,是一类重要的候选正极材料;三是普鲁士蓝类正极材料,其优点包括可低温合成、平均电压可达 $3.4\text{ V}$ ,可逆比容量为 $100\sim 160\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ,具有低成本化潜力,目前研究较多的为铁氰化物类<sup>[117]</sup>,但该类材料结晶水难以去除,压实密度较低,制备过程污染大、规模化应用还面临一定难度。

在负极材料方面,目前接近实用化的是硬碳材料。无定形碳基材料因资源丰富、综合性能优异,有望近期实现应用<sup>[118-119]</sup>。零应变钛基材料也获得广泛关注,其中 $\text{Na}_{0.66}[\text{Li}_{0.22}\text{Ti}_{0.78}]\text{O}_2$ 的可逆比容量约 $110\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ,循环性能优异<sup>[120]</sup>。其他合金和转换类负极因体积形变较大,有机类负极因溶解等问题短期内尚难以实现应用<sup>[121]</sup>。

在电解质方面,目前仍沿用锂离子电池在有机溶剂中加入盐和添加剂的配方,因钠离子具有较低的溶剂化能,使得使用低盐浓度电解液进一步降低电池成本成为可能<sup>[122-123]</sup>。此外,在正负极材料与电解质间获得离子传输性能好且电子绝缘的薄而致密的固体电解质界面膜也是研究的热点和重点<sup>[124]</sup>。

### 8.2 关键技术

中国科学院物理所、宁德时代、上海交通大学等单位长期致力于钠离子电池技术研发与产业化,在正极、负极、电解质等关键材料以及钠离子电芯和应用系统等方面取得多项研究成果。2021年,我国钠离子电池单体电池和电池系统关键技术方面取得了多项重要进展,包括低成本及高性能正负极核心材料制备放大技术、电解液/隔膜体系优选技术、电芯安全可靠设计技术、高安全、高倍率和宽温电芯设计制造技术、电池正负极材料的评价技

术、大圆柱及大方形铝壳电芯的制造工艺技术、电池的安全性设计与评价技术、电池大规模筛选及成组技术等,并建立了失效分析数据库。钠离子电池的能量密度已达到 $145\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ;  $2\text{C}/2\text{C}$ 倍率下循环4500次后容量保持率 $>83\%$ <sup>[125-126]</sup>。2021年,中科海钠、钠创新能源等企业建成了百吨级钠离子电池正极、负极和电解液材料中试生产线,中科海钠还正在建设千吨级负极材料生产线和电芯线。宁德时代(CATL)发布了钠离子电池技术,该技术以普鲁士白为正极、硬碳为负极,预计能量密度可达 $160\text{ W}\cdot\text{h/kg}$ ,引起储能领域广泛关注。

### 8.3 集成示范

2021年,在中国科学院A类战略性先导科技专项大规模储能关键技术与应用示范项目的支持下,中国科学院物理所与中科海钠在山西太原综改区推出了全球首套 $1\text{ MW}\cdot\text{h}$ 钠离子电池光储充智能微网示范系统,并成功投入运行。此次钠离子电池示范系统的研制成功,以及宁德时代钠离子电池技术的发布,标志着我国钠离子电池技术已走在了世界前列。中科海钠、钠创新能源、佰思格、众钠科技等钠离子电池初创企业也顺利完成其融资计划,为钠离子电池产业发展奠定了良好的基础。

## 9 超级电容器

超级电容器是一种重要的功率型储能器件,具有功率密度高、循环寿命长、充放电速度快等优点,在智能电网、轨道交通、新能源汽车、工业装备以及消费类电子产品等领域具有重要的应用市场。2021年,我国在超级电容器的基础研究、单体制备技术、成组管控技术、系统集成与应用等方面取得了重要进展。

### 9.1 基础研究

电极材料、水系超级电容器、柔性超级电容器、金属离子电容器等是目前超级电容器基础研究的重点方向<sup>[127-128]</sup>。在电极材料方面,石墨烯或石墨烯复合材料仍然是研究的热点。中国科学技术大学Wu等<sup>[129]</sup>利用电化学石英晶体微天平技术研究了溶剂化离子液体在单层石墨烯表面的电化学双电层响应机制。MXene作为一种新型二维过渡金属碳化物,具有超高的导电性、高的理论比容量以及高本征密度等特点。天津大学Wu等<sup>[130]</sup>利用MXene水凝胶构建柔性多孔膜实现高倍率致密储能,在功率

密度高达41.5 kW/L时,基于电极材料的能量密度仍能保持21 W·h/L,是目前文献报道的水系对称型超级电容器的最高值。金属离子电容器包括锂离子电容器、钠离子电容器、钾离子电容器和锌离子电容器等,由于金属离子电容器具有更高的能量密度被誉为是下一代超级电容器,备受研究人员关注。中国科学院电工研究所An等<sup>[131]</sup>提出了一种基于自蔓延高温合成规模化制备石墨烯/碳复合材料的通用方法,通过正负极碳材料同时修饰石墨烯后比容量和倍率都得到提升,并基于此研制出1100 F软包装锂离子电容器,基于器件质量的能量密度高达31.5 W·h/kg,优于目前已商业化的锂离子电容器。

### 9.2 关键技术

在活性炭材料制备技术方面,河南大潮炭能科技公司等开发出木质活性炭功能化定向调控关键技术,围绕活性炭有效孔结构和表面活性中心定向调控,突破了水蒸气梯级活化、热解自活化、催化活化和气氛介导绿色活化等关键技术。

在集流体技术方面,清华大学联合中天科技公司,建立了物理沉积铝-氧化去除模板-梯度退火的泡沫铝制备技术路线,搭建了国际首套连续沉积、一体化制备装备与生产线,实现了宽幅达500 mm、厚度1~2 mm泡沫铝的产线制备,在超级电容器、高功率锂离子电池等领域具有重要的应用前景。

在负极技术方面,中国科学院电工研究所Sun等<sup>[132]</sup>融合内部短路预嵌锂和电化学预嵌锂,提出了一种新的电化学负极预嵌锂方法可以大幅缩短预嵌锂时间、提高预嵌锂效率。复旦大学Yin等<sup>[133]</sup>开发出TiNb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>与石墨复合的高功率负极,配合优化的电解液技术,实现了-60~55℃全天候温区工作的锂离子电容器。

### 9.3 集成示范

2021年,国网江苏省电力有限公司自主研制的国内首套变电站超级电容微储能装置在南京江北新区110 kV虎桥变电站投运,超级电容器由烯晶碳能电子科技无锡有限公司提供;西安合容新能源科技有限公司制备的超级电容器储能系统应用于连云港自贸区-直流电压波动治理系统,该超级电容器储能系统是国内首次针对直流微网的应用。此外,超级电容器在新能源交通领域也取得了示范应用,由中国船舶重工集团公司设计研发的全国首艘

超级电容新能源车客渡船下水试航,采用的上海奥威科技开发有限公司的超级电容器作为船舶动力电源。全球首批335 t智能无人鱼雷车在大连华锐重工集团交付,项目采用了上海奥威科技研发生产的超级电容作为动力电源。

## 10 其他新技术

除以上储能技术外,研究者们开展了多种储能新概念、新材料和新体系的探索与研究,发展了系列储能新体系,为规模储能应用提供了可能的技术选项。近年来,具有代表性的有液态金属电池、多价金属离子电池、水系电池等,这里做简要介绍。

### 10.1 液态金属电池

液态金属电池采用液态金属和熔融无机盐作为电极和电解质,具有长寿命、低成本、易放大等优势,在规模电力储能应用领域具有广阔前景。近年来,液态金属电池技术得到研究者的广泛关注。针对传统Sb基电极运行温度高,材料利用率低的问题,2014年NATURE<sup>[134]</sup>报道了基于合金化电极设计思路的新型Li||SbPb电池体系,将工作温度从700℃降至450℃,有效推动了液态金属电池的实用化。2016年,华中科技大学Li等<sup>[135-136]</sup>提出了环境友好的Li||SbSn液态金属电池新体系,揭示了液态合金电极的放电机制,设计实现了高电压Li||TeSn体系<sup>[137]</sup>和高比能Li||Sb固液复合电池新体系<sup>[138]</sup>,实现了电极体系能量密度的重大突破(495 W·h/kg)。同时,西安交通大学与北京科技大学等团队<sup>[139-140]</sup>在液态金属电池创新材料体系等方面开展了系列研究,开发了Li||BiSb、Li||BiSbSn等液态金属电池新材料体系。2018年以来,华中科技大学等单位在国家重点研发计划项目“液态金属储能技术关键技术研究”的支持下,研究团队在电池特性与系统构建方面开展了深入研究,建立多场耦合大尺寸液-液界面的动态特性模型,提出大容量电池界面稳定调控技术,实现了电池容量从2 A·h到400 A·h的放大;开发了表面陶瓷金属梯度化设计工艺,突破了液态金属电池高温密封绝缘关键技术,实现了大容量电池的长效封装;针对液态金属电池低电压、大电流特性,提出了双等效电路融合模型,建立了包含模型参数与SOC作为可估计状态的状态空间方程,实现了液态金属电池SOC的精准估计<sup>[141-142]</sup>;在电池系统构建方面,构建了

5.5 kW·h的电池组三维传热模块耦合一维电化学模型<sup>[143]</sup>, 实现了5 kW/18 kW·h液态金属电池储能系统, 为液态金属电池储能技术的应用发展提供了支撑。

## 10.2 多价金属离子电池

多价金属离子电池主要包括了镁、铝和锌离子电池等。这类电池充放电过程中的阳离子脱嵌伴随着多个电子转移, 且镁、铝与锌等元素在地壳中储量丰富、成本低廉、清洁环保, 在规模储能领域具有良好的发展前景。

镁离子电池方面, 关键在于发展高性能、无腐蚀性、价格低廉的镁离子电解液<sup>[144]</sup>。青岛能源所崔光磊等<sup>[145]</sup>以 $MgF_2$ 为前体, 开发了非亲核, 无腐蚀性镁离子电解液, 实现了镁硫电池的稳定循环。进一步针对MACC体系中 $AlCl_3$ 与硫的亲核副反应导致电池不可逆的问题, 清华大学张跃刚教授<sup>[146]</sup>将 $YCl_3$ 应用于MACC体系, 显著提高了镁硫电池的电化学循环稳定性。

铝离子电池方面, 近年来国内外多个研究团队对正极材料(石墨、硫系、过渡金属化合物、有机物等)、负极材料(金属铝、铝基合金等)以及电解质等进行了一系列研究<sup>[147]</sup>。其中, 正极材料是制约铝离子电池性能的关键。北京科技大学Sun等<sup>[148]</sup>利用石墨化碳纸正极, 离子液体为电解液, 实现了可逆性良好的高电压(约2 V)新型铝-碳电池。随后, 进一步发展了铝-硫、铝-硒、铝-碲、铝-过渡金属硫族化合物等系列以及铝离子固态电池, 为实现超大容量提供了新途径<sup>[149]</sup>。

锌离子电池具有成本低廉、安全性好, 特别是基于水溶液体系的锌离子电池近年来备受研究者关注。水系锌离子电池的正极材料主要包括锰基氧化物、普鲁士蓝衍生物、钒基氧化物、聚阴离子化合物等。负极方面, 金属锌的枝晶问题以及溶解-沉积库仑效率低严重限制了实际应用。现阶段, 抑制锌枝晶生长的主要策略包括: 构建三维导电基底, 调控锌的成核与生长<sup>[146]</sup>; 采用电解液添加剂延缓锌枝晶的生长; 设计高浓电解液, 降低电解液与锌离子的反应活性, 提高电极稳定性等。

## 10.3 水系电池

水系电池是指基于水系电解液的电池的统称。它是采用阻燃的水系电解液代替易燃易爆的有机电解液, 具有高安全性、无毒环保、低成本等潜力,

是近年研究的热点。水系锂离子电池、水系钠离子电池, 以及上文提到的水系锌离子电池是目前研究的主要方向。目前, 水系电池主要受到窗口电压窄、电极副反应导致循环稳定性差等问题的限制, 近年来研究者们对正、负极材料、电解液以及储能机制等进行了大量研究。通过在石墨中卤素的转换-嵌入化学, 构建了4 V级的水系锂离子全电池, 能量密度高达460 W·h/kg<sup>[150]</sup>; 此外, 通过电解液添加剂、新型盐包水结构<sup>[151]</sup>和水/有机共溶剂结构<sup>[152]</sup>的水系电解液也实现了电化学窗口的拓宽, 大大提高了能量密度和循环稳定性; 锌负极方面, 通过多孔结构基底修饰<sup>[153]</sup>、原位SEI层保护<sup>[154]</sup>等方法可以实现锌的无枝晶沉积和循环寿命的大幅提升。此外, 华中科技大学开发了嵌入式储锌负极 $Na_{0.14}TiS_2$ 、 $Cu_{2-x}Te$ 等, 构建了“摇椅式”水溶液锌离子电池<sup>[149-150]</sup>, 有望从机理上解决锌枝晶问题<sup>[155-156]</sup>。

# 11 集成技术

2021年, 随着以新能源为主体的新型电力系统发展战略的实施, 储能在整个电力系统中的战略地位得到进一步凸显, 为了适应其发展需求, 储能系统集成关键技术研发也进入快速发展的阶段。由于化学电池系统的复杂性, 本文的集成技术主要指化学电池的集成技术, 关于物理储能的集成技术, 相关文献较少, 本文暂不评述。

## 11.1 基础研究

在PCS方面, 1500 V集中式PCS成为市场主流产品, 行业的研究主要方向为1500 V+液冷电池系统集成。为实现电池的精细化管理, 集中式PCS+DC/DC方案和组串式PCS的系统优化方案, 甚至在电池簇内部增加电力电子优化设备的方案也是目前行业研究方向, 但目前难点是需要在性能改善和系统成本增加之间取得平衡。除此之外, 正在研究更高直流电压等级的储能系统集成方案, 有望进一步提升能量和功率密度, 提高系统循环效率, 同时降低储能系统成本。

在BMS方面, 其主要功能是实时检测储能系统中电池的参数, 进行电池状态SOX(SOC/SOH/SOP/SOE等)计算, 实现故障告警、保护和均衡管理等。目前BMS的研究主要集中在电池建模仿真和SOX算法。当前电池模型研究以不同SOH阶段

与工况模式下的动态参数辨识与参数优化为主流,通过多维信号采集以及历史数据分析,动态调整电池参数,提升SOC的估计精度,在电池性能、安全与寿命中进行最佳寻优。另外,结合云端大数据监控平台,开发云端BMS,以实现全生命周期下电池特性变化的精确控制。

从整个储能系统的组成来看,EMS是整套控制系统的核心,其包括数据采集、网络监控、能量调度和数据分析四个功能,主要用于储能系统的能量控制和功率平衡维持,以保证系统的正常运行。为了实现毫秒级控制和响应,多种快速响应的总线架构,比如EtherCAT,被广泛应用于监控系统快速控制网。同时基于HTML5等技术开发的SCADA系统,针对储能系统具备电芯级监控和高速故障录波功能,可以应用大数据技术进行故障预测、功率预测、寿命分析,确保系统安全和合理收益。

### 11.2 关键技术

为了保障储能系统全生命周期的安全性,需要从电芯本体、模组、插箱、电池簇、储能系统逐级进行全面的系统设计,将热管理系统、电池管理系统和消防管理系统联动形成立体的预警系统。研发智能诊断技术,通过本地的海量级电芯级的电压、电流、温度及内阻,PCS的历史运行数据在线监测和本地分析,实时对储能系统的健康度进行大数据分析,通过智能算法提前侦测和发现病态电芯和异常部件,及时提供主动预警和提前介入运维,以保障储能系统全生命周期的安全可靠运行。

通过将电池系统和PCS进行深度一体化设计,为储能对新型电力系统的搭建提供支撑,主要包括有功快速响应、满无功支撑、一次调频/二次调频功能、电网黑启动、独立建网技术、电网异常下的低穿高穿频率异常穿越技术、虚拟同步机技术实现对电网的惯量支撑、弱网接入技术等,解决新型电力系统中由于新能源渗透率提高带来的惯量日益降低和电网稳定风险。

在已有成熟风冷技术上引入高效智能温控技术,通过液冷技术改善储能系统的温升和温差控制精确度,降低温度不一致导致的电芯间的不一致,延长电池系统循环寿命。相比传统空调风冷,液冷技术辅助能耗降低超过30%,循环寿命提升20%以上,集装箱级别温差控制在3℃以内,能量密度和功率密度的提升进一步降低了系统的初始投资和

运维成本。

### 11.3 集成示范

国家电投海阳100 MW/200 MW·h储能电站项目,采用了高能量密度1500 V磷酸铁锂储能系统,采用高效的智能能量管理系统及大数据运维管理体系,具有保护、控制、通信、测量等功能,可实现对储能系统的全功能综合自动化管理。三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目,储能系统规模70 MW/140 MW·h,该系统采用“防护消泄”四重安全设计理念,实现高效精准预测、消防,实现系统稳定可靠运行。该项目建成投运后将对我国探索源网荷储一体化实施路径,促进储能在大规模多场景中的深入应用起到重要示范作用。

## 12 消防安全技术

化学储能的安全性,一直是规模储能领域关注的热点和焦点问题之一。2021年,我国在化学电池火灾发生机理、灭火机理与规律、预警技术等方面,取得了一系列进展。

### 12.1 基础研究

2021年,大型磷酸铁锂电池的安全性是锂电池安全研究的重点。中国科学技术大学等单位对磷酸铁锂电池的火灾危险性进行了深入研究。研究发现不存在点火源的情况下,磷酸铁锂电池的热失控过程一般不会燃烧,仅伴随剧烈的产烟产气行为。而在有点火源的情况下,即使0%SOC的电池仍会发生热失控着火燃烧现象,电池在安全阀打开后会出现短暂的爆燃<sup>[157]</sup>。而随着储能电池容量的增加,电池厂家一般做成内部两个或多个卷芯,因此也出现了热失控阶段的两个或多个热释放速率峰值。火焰可以加速热失控的发生,但对电池特征温度的影响较小。与小型电池相比,大容量电池的最高表面温度和标准化热释放速率峰值更小,表现出相对优越的热安全性<sup>[158]</sup>。

在大型磷酸铁锂储能电池的灭火方面,多应用全氟己酮(C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O)等新型绝缘气体灭火剂,全氟己酮的施加可以高效降低电池的燃烧热,有效地扑灭磷酸铁锂电池的火灾。但是全氟己酮的化学抑制效果在灭火剂用量较高时趋于饱和,针对全氟己酮的用量,学者基于灭火效果、降温效果及体系毒性,提出了全氟己酮用量综合筛选方法,在给定的实验条件下其较优的全氟己酮用量为2.9 g/W·h<sup>[159]</sup>。此

外, 由于气体灭火剂较差的降温效果, 导致灭火剂用完后电池温度仍有大幅回升, 有复燃的隐患, 因此学者们又从灭火剂施加方式上进行优化, 提出了一种全氟己酮间歇喷雾冷却策略<sup>[160]</sup>, 通过控制灭火剂施加的占空比(喷雾时间占喷雾周期的比例), 可比一次施加更有效地降低电池温度, 减少CO和CO<sub>2</sub>的产量并降低热释放速率, 更加有效地扑灭磷酸铁锂电池的火灾, 给定实验条件下的占空比为55.4%时可获得最佳喷雾效率。

## 12.2 关键技术

在热管理技术方面, 为了改善传统单一热管理手段, 研究者们对换热结构<sup>[161]</sup>、系统能耗等方面进行改进, 实现了热管理系统的优化。与此同时, 由于锂离子电池高倍率充放电的应用场景越来越广泛, 混合式的热管理技术也成为了研究的热点。这其中包括内翅片与风冷的结合<sup>[162-163]</sup>、液冷与热管<sup>[164]</sup>等多种技术协同作用的混合式热管理系统。

在预警技术方面, 发展了多种机器学习算法, 优化了传统的BMS预警与热失控温度预警信号处理算法<sup>[165]</sup>, 降低了传统预警方法的误报率。监测了负极析出的锂与黏结剂反应产生的氢气, 探索了基于氢气的热失控提前预警技术<sup>[166]</sup>。除此以外, 还发展了耦合电池表面温度、CO气体浓度、VOC浓度及环境温度的多信息融合的分级预警策略, 实现了锂离子电池热失控发生15 min前预警, 为热失控防控提供应急处置时间<sup>[167]</sup>。

在灭火技术方面, 中国科学技术大学对传统的灭火方式进行了改进, 采用间歇喷雾模式<sup>[160]</sup>释放灭火剂, 不但降低了灭火剂用量而且提高了灭火效率。除此以外, 新型的绝缘灭火剂如全氟己酮<sup>[159]</sup>、液氮<sup>[168]</sup>等也引起了研究者的重视, 发现这些绝缘灭火剂在锂离子电池火灾中具有较好的应用效果。

当然, 这三种技术并非独立发展, 有的学者甚至将这三种技术集成为一体化系统, 实现了全温度范围内的消防技术与该系统的轻量化与低成本, 比如基于全氟己酮喷雾锂离子电池热管理与热失控抑制的闭环系统<sup>[169]</sup>。

## 12.3 集成示范

上述关键技术在新建的储能示范项目中得到推广应用。三峡新能源乌兰察布源网荷储示范项目投运, 项目采用了多信息融合的监测预警技术和全氟己酮程控喷射技术。通过对锂电池热安全状态进行

持续监测和及时抑制, 防止电池火复燃的现象发生, 从而实现长期抑制火情和系统降温的效果。该消防技术还应用于用户侧储能系统, 如连云港华乐合金集团有限公司储能。程控喷射消防技术也走向国门, 实现技术输出, 如青山集团印度尼西亚大K岛55 MW/55 MW·h锂电储能系统的消防方案, 也采用上述消防技术。

## 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2021年度中国机构和学者关于储能技术发表的SCI论文数。从图中可以看出, 2021年, 中国机构和学者共发表SCI论文11949篇, 其中锂离子电池、储热(包括储冷)、超级电容器、钠离子电池的SCI论文数超过1000篇, 为当前我国储能领域基础研究热门方向。总体上化学储能的SCI论文数明显高于物理储能。这主要是关于储能材料的发表论文数非常高, 达到4581篇, 化学储能的材料研究明显比物理储能活跃; 同时, 锂离子电池、储热、超级电容器、钠离子电池这四种储能技术的材料研究也最为活跃。

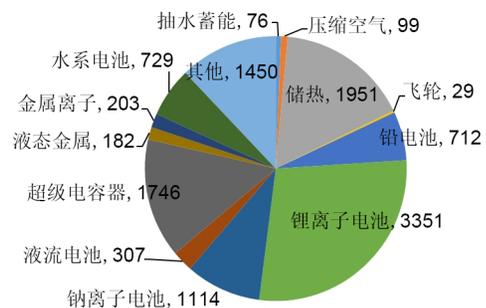


图1 2021年中国主要储能技术发表SCI论文数  
Fig. 1 Number of SCI papers on major energy storage technologies published from China in 2021

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2021年度世界主要国家关于储能技术发表的SCI论文数。从图中可以看出, 2021年, 全世界共发表储能技术相关SCI论文26510篇, 其中中国、美国、印度、韩国、德国、英国和澳大利亚7个国家发表的论文数超过1000篇。中国机构和学者共发表SCI

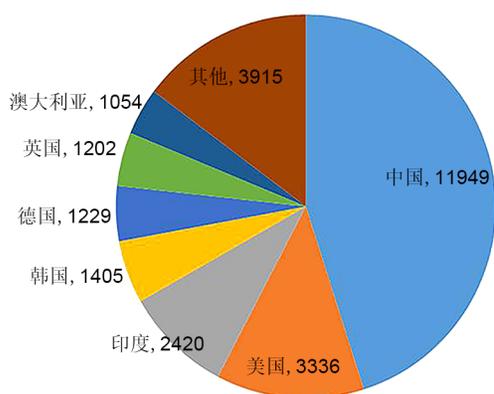


图2 2021年世界主要国家储能技术发表SCI论文数  
Fig. 2 Number of SCI papers on energy storage technologies published from major countries worldwide in 2021

论文11949篇，居世界第一位，遥遥领先于第二位的美国的3336篇和第三位印度的2420篇，且超过了第二到第七位发表论文的总和，中国已经成为全球储能技术基础研究最活跃的国家。综合分析当今世界储能技术基础研究先进国家的格局，基本上包含两类国家：一类是美国、德国、英国和澳大利亚为代表的西方发达国家；第二类为中国、印度和韩国为代表的新兴国家。在分项技术方面，在图1所列出的所有单项技术，包括抽水蓄能、压缩空气、储热、飞轮、铅电池、锂离子电池、钠离子电池、液流电池、超级电容器、液态金属、金属离子电池和水系电池，中国机构和学者在2021年发表的SCI论文数均居世界第一。

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2010—2021年世界主要国家关于储能技术发表的SCI论文数。根据统计结果，2010年以来全世界共发表储能技术相关SCI论文184248篇，其中中国、美国、印度、韩国、德国、英国、澳大利亚、意大利、日本和法国位列前10位，且这十个国家2010年以来发表的储能相关SCI论文数均超过6000篇。从发展趋势看，一方面，相比2010年，所有10个国家发表的储能相关SCI论文数均大幅增加。比如美国从2010年的1223篇增加到2021年的3336篇，中国从2010年的684篇增加到2021年的11949篇。另一方面，这10个主要国家可以分为两类：一类是美国、德国、英国、澳大利亚、意大利、日本和法国7个发达国家，它们的储能相关

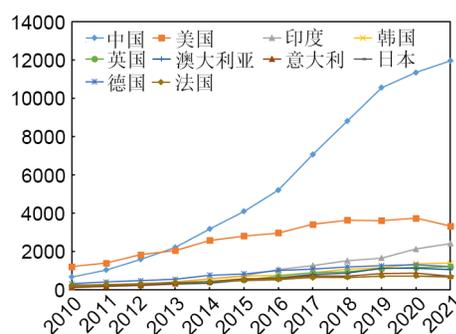


图3 世界主要国家储能技术发表SCI论文数(2010—2021)  
Fig. 3 Number of SCI papers on energy storage technologies published from major countries worldwide(2010—2021)

SCI论文数大致经历了两个时期，即从2010—2016年的快速增长期和2017年开始的基本稳定期；第二类为中国、印度和韩国这三个新兴国家，它们的储能相关SCI论文数自2010年以来一直在增长，目前仍保持明显的上升趋势。第三方面，比较中美两国的储能相关SCI论文数可以看出，2010年中国的SCI论文数只有美国的50%左右，但到2013以后中国已超过美国成为全球储能相关SCI论文数的第一大国，特别是2017年以后美国每年的储能相关SCI论文数基本稳定在3500篇左右，而中国同期每年发表的储能SCI论文数仍然在大幅增长，从2017年的7074篇增加到2021年11949篇，这同中国政府和企业在“十二五”和“十三五”期间加大对储能技术研发支持力度的情况是完全吻合的。

### 13.2 关键技术

表1给出了2021年中国储能关键技术进展的总结。从表中可见，2021年我国主要储能技术研发均取得了重要进展，综合分析大致可以分为三类。

第一类为基本成熟的技术，主要包括抽水蓄能、铅蓄电池和储热储冷三类。它们技术研发的重点在于在原有技术基础上如何进一步改进性能，比如抽水蓄能的可变速机组技术、高活性负极碳材料技术、高温熔盐蓄热技术等。

第二类为集成示范为主的技术，主要包括锂离子电池、液流电池、压缩空气储能和飞轮储能四类。这些储能技术研发的重点为如何突破从集成示范到产业化应用的特定关键技术，比如锂离子电池

表1 2021年中国储能技术与示范进展

Table 1 Progress on energy storage technology and demonstration of China in 2021

序号	技术类型	关键技术进展	集成示范进展
1	抽水蓄能	①大型抽水蓄能电站工程建设技术, 国产盾构机抽水蓄能项目推广应用。②国内单机最大400 MW/700米水头抽水蓄能机组设计制造安装技术。③电动发电机分数极路比绕组技术在国内外首次成功应用。④10 MW可变速海水抽水蓄能机组关键技术	①400 MW/700米级超高水头、高转速、大容量抽水蓄能机组。②首例高转速“零配重”抽水蓄能机组。③世界首条800米水头级的钢筋混凝土衬砌水道。④世界装机容量最大的抽水蓄能电站
2	压缩空气储能	①突破10 MW级六级间冷离心式压缩机、四级再热组合式透平膨胀级、高效超临界蓄热换热器等关键技术。②突破100 MW级宽工况组合式压缩机技术、高负荷轴流式膨胀机技术、高效蓄热换热器技术, 以及系统集成与控制技术	①山东肥城国际首套10 MW盐穴先进压缩空气储能商业示范电站并网发电。②贵州毕节10 MW集气装置储气的压缩空气储能电站并网发电。③江苏金坛建设了60 MW盐穴压缩空气储能示范项目开展并网试验。④河北张家口市际首套100 MW先进压缩空气储能国家示范项目开展并网带电调试
3	储热储冷	①1100℃的储热陶瓷颗粒材料、700℃氯化物熔盐储热材料、复合相变、定形相变和仿生相变储热材料、 $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CoO}$ 等金属氧化物反应物体系和钙基热化学储热材料等。②大容量长周期跨季节储热技术、储热储冷传热强化与材料改性技术、高效动态冰浆蓄冷技术。③系统控制与优化技术等	①采用熔盐储热的50 MW线性菲涅尔式太阳能热发电站和50 MW熔盐塔式光热发电。②张家口建成水体储热的太阳能储热采暖项目、亚临界水蓄热系统以及水合盐相变材料为冬奥会转播中心供暖。④北京实现三联供系统耦合冰蓄冷系统, 基于相变材料的冷链运输技术已获得应用等
4	飞轮储能	①500 kW/180 MJ大容量飞轮本体。②300 kW级2万转高速电机技术。③飞轮储能的双馈电机励磁控制技术	①单机600 kW全磁悬浮飞轮储能系统下线。②霍林河1 MW飞轮储能系统交付。③阜新风电场站一次调频和惯量响应的飞轮储能通过并网前验收。④宁夏22 MW光火储耦合飞轮储能项目开工
5	铅蓄电池	①高电化活性性和铅炭兼容的新型炭材料。②宽温区、超长寿命、高能量转换效率、低成本的铅炭储能电池。③高电压大容量系统集成技术	①中国铁塔和中国联通分别采购1.097和1.089 GW·h铅酸铅炭电池。②2020年并网的雄城(金陵变)12 MW/48 MW·h铅炭储能项目正式运行
6	锂离子电池	①高镍正极材料。②纳米硅碳负极材料、③原位固态化锂电池技术、④混合固液电解质锂离子储能电池技术	①晋江36 MW/108 MW·h锂补偿磷酸铁锂储能系统实现示范应用。②无模组技术与刀片电池技术的推广应用。③提出锂离子和钠离子电池集成解决方案, 以及三元正极与磷酸铁锂电芯混合排布的双体系电池系统等
7	液流电池	①可焊接全钒液流电池技术。②50 kW全钒液流电池大功率电堆技术。③锌基液流电池和铁铬液流电池新技术	①10 MW/40 MW·h网源友好型风场项目投运②全球首个光伏储能户外实证实验平台全钒液流电池储能系统交付③大连200 MW/800 MW·h全钒液流电池储能调峰电站一期工程完成主体工程建设
8	钠离子电池	①正负极材料制备放大技术。②电解液/隔膜体系优选技术。③高安全、高倍率和宽温电芯设计制造技术④电池的安全性设计与评价技术。⑤电池大规模筛选及成组技术等	①全球首套1 MW·h钠离子电池光储充智能微网示范系统投入运行。②宁德时代钠离子电池产品的发布
9	超级电容器	①木质活性炭材料功能化定向调控技术。②物理沉积铝-氧化去除模板-梯度退火的泡沫铝制备技术。③负极预嵌锂技术	①国内首套变电站超级电容微储能装置投运。②国内首个直流微网的超级电容器储能系统实现应用。③超级电容器在新能源交通领域取得了多个示范应用
10	储能新技术	①液态金属大容量电池界面稳定调控技术、表面陶瓷金属梯度化设计工艺、双等效电路融合模型、5.5 kW·h的电池组模型。②铝离子电池正极材料、锌离子负极材料等。③水系电池新型纳米结构正极材料、电解液添加剂、新型盐包水结构和水/有机共溶剂结构等	—
11	集成技术	①智能诊断技术②电池系统和PCS进行深度一体化设计技术。③高效智能温控技术和液冷技术	①高效的智能能量管理及大数据运维管理技术在海阳高能量密度1500 V磷酸铁锂储能电站得到应用。②“防护消泄”四重集成设计在乌兰察布电网友好绿色电站示范项目中应用
12	消防安全技术	①单一式热管理系统的优化和混合式热管理技术。②基于机器学习的优化预警方法和分级预警策略③间歇喷雾优化模式, 新型绝缘灭火剂如全氟己酮、液氮等	多信息融合的监测预警技术和全氟己酮程控喷射技术示范应用

的高安全性技术、液流电池的低成本技术、压缩空气储能的高效技术、以及高速飞轮储能技术等。在这四类技术中，锂离子电池技术的研发最为活跃，示范项目也最多，也是最接近技术成熟和产业链完整的技术。

第三类为关键技术研发为主的技术，主要包括钠离子电池、超级电容器、液态金属、金属离子电池和水系电池技术五类。它们技术研究的重点在于如何突破材料、单体、模块的关键技术，实现从实验室技术到集成示范的转变。这五类技术中，钠离子电池取得了多项技术进展，也在2021年实现了1 MW·h示范，是最受关注的新兴储能技术；超级电容器的研究也非常活跃，且在2021年实现了在规模储能的示范应用，也是值得重点关注的储能技术。

### 13.3 集成示范

表1同时给出了2021年中国储能集成示范进展的总结。从表中可见，2021年我国主要储能技术的集成示范均取得了重要进展，综合分析大致可以分为三类。

第一类为系统规模提升或者性能提升的集成示范，主要包括抽水蓄能、锂离子电池、压缩空气储能和储热储冷等。第二类为验证关键技术突破的集成示范，主要包括锂离子电池、液流电池、压缩空气储能和飞轮储能等。第三类为该类型技术的首次集成示范，主要包括钠离子电池、超级电容器等。

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的不完全统计，截止到2021年底，中国已投运的储能项目累计装机容量(包括物理储能、电化学储能以及储热)达到45.75 GW，同比增长29%<sup>[1]</sup>。图4给出了2021年我国新增储能装机容量，可见我国电力储能装机继续保持高速增长，同比增长220%，新增投运规模达10.19 GW，其中，抽水蓄能规模最大，为8.05 GW；锂离子电池排第二位，投运规模达到1.84 GW；压缩空气储能新增投运规模大幅提升，达到170 MW，是其2020年底前累计规模的15倍；储热储冷和液流电池装机也分别新增100 MW和23 MW装机规模。

如图5所示，综合分析各储能技术2021年的新增装机容量，各种储能技术大致可以分为四个梯队。第一梯队为抽水蓄能，单机规模100 MW以上，占2021年全国储能新增装机的79%左右；第二梯队

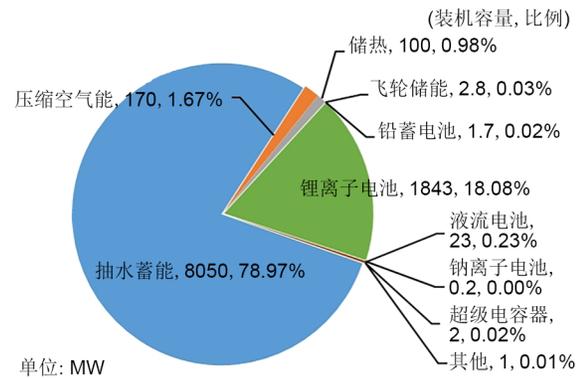


图4 2021年中国储能新增装机容量  
Fig. 4 New installed capacity of energy storage in China in 2021

为锂离子电池、压缩空气储能、液流电池、铅蓄电

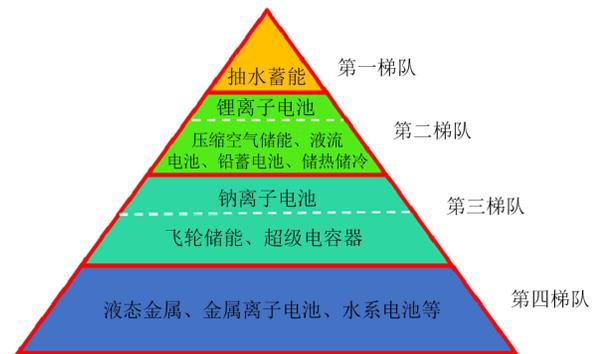


图5 2021年中国储能技术集成示范和产业化梯队  
Fig. 5 Echelon of energy storage technology integration demonstration and industrialization from China in 2021

池和储热储冷技术，单机规模可达10~100 MW，其中锂离子电池新增装机达到18%，未来有可能形成单独的一个梯队；第三梯队为钠离子电池、飞轮储能和超级电容器，目前单机规模可以达到MW级，其中钠离子发展受关注最多，经过一段时间的发展有可能未来进入第二梯队；第四梯队为液态金属、金属离子电池和水系电池等新型储能技术，需要进一步的研究，以尽早实现集成示范和产业化应用。

图6给出了2021年中国和世界储能技术水平对比。从图中可见，经过“十二五”和“十三五”期间国家和产业的持续投入，中国储能技术的水平快速提升，压缩空气储能、储热储冷、铅蓄电池、锂离子电池、液流电池和钠离子电池技术已达到或接近世界先进水平；抽水蓄能、飞轮储能、超级电

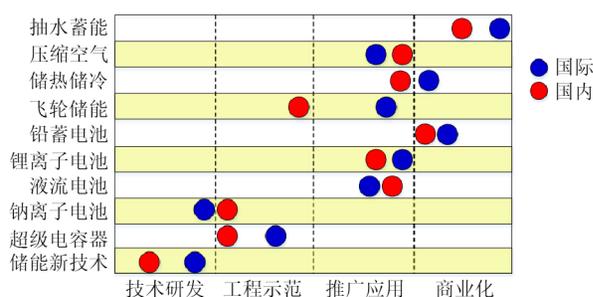


图6 2021年中国和世界储能技术水平对比

Fig. 6 Comparison of energy storage technology between China and other countries in 2021

容器和储能新技术和世界先进水平还有一定的差距，但总体上差距在逐步缩小。

## 14 结论与展望

2021年，中国储能技术在基础研究、关键技术和集成示范方面均取得了重要进展。这一年，中国机构和学者发表SCI论文11949篇，居世界第一位，且遥遥领先于第二位美国，中国已经成为全球储能技术基础研究最活跃的国家。在关键技术和集成示范方面，各主要储能技术也均取得重要进展，中国已成为世界储能技术研发和示范的主要核心国家之一。

(1) 物理储能方面：在抽水蓄能方面，我国在超高水头、超大容量抽水蓄能电站施工建设、设计制造、安装调试等方面实现跨越式发展。在定速抽水蓄能技术方面实现了从跟跑、并跑到领跑的转变，达到了世界领先水平；在变速抽水蓄能技术方面，我国仍处于探索研究阶段，目前虽然取得了一些成果，和国外技术尚有较大差距。

在压缩空气储能方面，我国在10~100 MW压缩空气储能系统方面取得了多个里程碑式的进展。特别是中国科学院工程热物理所的张家口国际首套100 MW先进压缩空气储能国家示范项目并网带电调试，标志我国在压缩空气储能领域已达到国际领先水平。

在储热储冷方面，双碳战略对储热提出了更多需求。高温熔盐储热、大容量跨季节储热和储冷、热泵储热/卡诺电池以及各种化学储热是当前储热研究的热点。

在飞轮储能方面，今年大容量功率型飞轮储能

的自主研发取得了阶段性进展，缩小了与国际先进水平的差距，为将来10 MW级及以上功率等级的飞轮阵列储能示范电站建设奠定了基础。

(2) 化学储能方面：在铅蓄电池方面，技术研发主要集中于铅炭电池，通过在负极添加高活性的碳材料，有效抑制负极硫酸盐化引起的容量快速衰减，提高电池的快速充放电能力。

在锂离子电池方面，我国在正负极材料、快充技术、固态电池技术等关键技术取得重要突破，锂补偿技术、无模组技术和刀片电池技术是今年的技术进展亮点。

在液流电池方面，全钒液流电池为当前液流电池主流技术，解决全钒液流电池的规模化、成本、效率等问题，是当前研究的重点，同时也在积极探索锌溴液流电池、铁铬液流电池等新体系。

在钠离子电池方面，作为最接近锂离子电池的电池技术，我国在钠离子电池基础研究、技术水平和集成示范方面均取得重要进展，已处于国际领先地位。

在超级电容器方面，我国在关键材料、单体技术、成组管控、系统集成与应用和使役性能进行了全链条技术攻关，并实现在规模储能领域的示范。

在新型储能技术方面，研究重点在于液态金属电池、多价金属离子电池和水系电池的材料研究，相关单体、模组和系统关键技术还需进一步深入研究。

(3) 集成与安全方面：在集成技术方面，大容量储能电站的集成、运行和控制技术已经大规模应用，但随着储能规模的扩大，PCS/BMS/EMS的融合技术、云端运维和管理技术、远程智能安全监控等技术将进一步发展和应用。

在消防安全技术方面，标准制定、消防监管、质量管控、技术研究等方面都得到了前所未有的加强，多信息融合的监测预警技术和全氟己酮程控喷射技术等新技术得到示范应用。

展望2022年，中国储能有望保持规模化发展的良好态势。在国家双碳战略的持续推动下，储能政策将继续向好。中国储能技术领域将有望继续“加速跑”，基础研究将继续保持国际最活跃国家地位，抽水蓄能、锂离子电池、压缩空气、液流电池、钠离子电池等多种技术将快速发

展,百兆瓦级大规模集成示范项目将成为常态,储能领域大概率将迎来又一个快速发展的一年。

### 参考文献

- [1] 陈海生,刘畅,徐玉杰,等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1477-1485.  
CHEN H S, LIU C, XU Y J, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1477-1485.
- [2] 李先锋,张洪章,郑琼,等. 能源革命中的电化学储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 443-449.  
LI X F, ZHANG H Z, ZHENG Q, et al. Electrochemical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 443-449.
- [3] 陈海生,凌浩恕,徐玉杰. 能源革命中的物理储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 450-459.  
CHEN H S, LING H S, XU Y J. Physical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 450-459.
- [4] 陈海生. "双碳"目标下的储能发展[J]. 中国电力企业管理, 2021(22): 23-24.
- [5] GONG G X, LV J L, JIANG X J, et al. Grid-connection control of doubly fed variable speed pumped storage unit[C]//2021 5th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), 2021, Singapore, IEEE, 2021: 52-57.
- [6] 龚国仙,吕静亮,姜新建,等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1878-1884.  
GONG G, LYU J, JIANG X, et al. Operation control of doubly fed adjustable speed pumped storage unit for primary frequency modulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1878-1884.
- [7] 陈亚红,邓长虹,武荷月,等. 发电工况可变速抽水蓄能机组模式切换过程多阶段柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5258-5274.  
CHEN Y H, DENG C H, WU H Y, et al. Multi-stage soft coordinated control of variable speed pumped storage unit in the process of mode conversion under the generation condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5258-5274.
- [8] CHEN Y H, DENG C H, ZHAO Y T. Coordination control between excitation and hydraulic system during mode conversion of variable speed pumped storage unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10171-10185.
- [9] 赵志高. 抽水蓄能变速运行及协联调控优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [10] 赵志高,杨建东,董旭柱,等. 基于动态实验的双馈抽水蓄能机组空载特性与变速演化[J/OJ]. 中国电机工程学报, 2022, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211674.  
ZHAO Z, YANG J, DONG X, et al. No-load characteristics and variable speed evolution of doubly-fed pumped storage unit based on dynamic experiment platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211674.
- [11] YAO W W, DENG C H, LI D L, et al. Optimal sizing of seawater pumped storage plant with variable-speed units considering offshore wind power accommodation[J]. Sustainability, 2019, 11(7): doi: 10.3390/su11071939.
- [12] 杨森,张青,高立艾. 风-光-抽水蓄能联合发电系统的优化运行[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 106-112.  
YANG S, ZHANG Q, GAO L A. Optimal operation of wind-light-pumped storage combined power generation system[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2021, 41(1): 106-112.
- [13] XU B B, LI H H, CAMPANA P E, et al. Dynamic regulation reliability of a pumped-storage power generating system: Effects of wind power injection[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222: doi: 10.1016/j.enconman.2020.113226.
- [14] 王珏,廖溢文,韩文福,等. 碳达峰背景下抽水蓄能-风电联合系统建模及有功功率控制特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 172-181.  
WANG J, LIAO Y W, HAN W F, et al. Modeling and active power control characteristics of pumped storage-wind hybrid power system in the context of peak carbon dioxide emission[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9): 172-181.
- [15] TAO R, WANG Z W. Comparative numerical studies for the flow energy dissipation features in a pump-turbine in pump mode and turbine mode[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: doi: 10.1016/j.est.2021.102835.
- [16] ZHANG X X, CHENG Y G, YANG Z Y, et al. Water column separation in pump-turbine after load rejection: 1D-3D coupled simulation of a model pumped-storage system[J]. Renewable Energy, 2021, 163: 685-697.
- [17] GAO C Y, YU X Y, NAN H P, et al. A fast high-precision model of the doubly-fed pumped storage unit[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(2): 797-808.
- [18] 张金凤,赖良庆,陈圣波,等. 基于改进粒子群算法的水泵水轮机多目标优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 86-92.  
ZHANG J F, LAI L Q, CHEN S B, et al. Multi-objective optimization of pump turbine based on improved partial swarm optimization algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 86-92.
- [19] 张庆贺,杨科,汪胜和,等. 基于关闭煤矿沉陷区一地下洞室群的抽水蓄能电站构建与利用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 91-94.  
ZHANG Q H, YANG K, WANG S H, et al. Construction and utilization of pumped storage power station based on subsidence area-underground chamber group of closing coal mine[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 91-94.
- [20] 卞正富,周跃进,曾春林,等. 废弃矿井抽水蓄能地下水库构建的基础问题探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3308-3318.  
BIAN Z F, ZHOU Y J, ZENG C L, et al. Discussion of the basic problems for the construction of underground pumped storage reservoir in abandoned coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3308-3318.

- [21] SHANG D C, PEI P. Analysis of influencing factors of modification potential of abandoned coal mine into pumped storage power station[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(11): 1-34.
- [22] 赵海镜, 靳亚东, 刘书宝. 寒冷地区抽水蓄能电站水库最大冰厚计算方法研究[J]. *水力发电*, 2021, 47(7): 30-32, 65.  
ZHAO H J, JIN Y D, LIU S B. Study on calculation method of maximum ice thickness of pumped-storage power station reservoir in cold region[J]. *Water Power*, 2021, 47(7): 30-32, 65.
- [23] GUO H, XU Y J, ZHANG X H, et al. Dynamic characteristics and control of supercritical compressed air energy storage systems[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: doi: 10.1016/apenergy.2021.116294.
- [24] CHEN L X, WANG Y Z, XIE M N, et al. Energy and exergy analysis of two modified adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) system for cogeneration of power and cooling on the base of volatile fluid[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: doi: 10.1016/j.est.2021.103009.
- [25] DZIDO A, KRAWCZYK P, WOŁOWICZ M, et al. Comparison of advanced air liquefaction systems in Liquid Air Energy Storage applications[J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 727-739.
- [26] GUO H, XU Y J, ZHU Y L, et al. Coupling properties of thermodynamics and economics of underwater compressed air energy storage systems with flexible heat exchanger model[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 43: doi: 10.1016/j.est.2021.103198.
- [27] CHEN H, PENG Y H, WANG Y L, et al. Thermodynamic analysis of an open type isothermal compressed air energy storage system based on hydraulic pump/turbine and spray cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: doi: 10.1016/j.econman.2020.112293.
- [28] MUCCI S, BISCHI A, BRIOLA S, et al. Small-scale adiabatic compressed air energy storage: Control strategy analysis via dynamic modelling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 243: doi: 10.1016/j.econman.2021.114358.
- [29] LI J, MAO Y, YANG L X. Temperature distribution and heat saturating time of regenerative heat transfer[J]. *Journal of Thermal Science*, 2006, 15(2): 175-180.
- [30] 张丹, 左志涛, 周鑫, 等. 跨声速轴流压缩机动静叶弯参数耦合关系[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1544-1555.  
ZHANG D, ZUO Z T, ZHOU X, et al. Coupling relationship of compound lean parameters of transonic axial compressor[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1544-1555.
- [31] SUN J T, HOU H C, ZUO Z T, et al. Numerical study on wet compression in a supercritical air centrifugal compressor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2020, 234(3): 384-397.
- [32] SUN J T, ZHOU X, LIANG Q, et al. The effect of wet compression on a centrifugal compressor for a compressed air energy storage system[J]. *Energies*, 2019, 12(5): doi: 10.3390/en12050906.
- [33] 孟冲, 左志涛, 郭文宾, 等. 压缩空气储能系统高压离心压缩机进口导叶调节规律研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(11): 2834-2840.  
MENG C, ZUO Z T, GUO W B, et al. Research on regulation law of inlet guide vane in high-pressure centrifugal compressor of CAES[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(11): 2834-2840.
- [34] GUO W B, ZUO Z T, SUN J T, et al. Experimental investigation on off-design performance and adjustment strategies of the centrifugal compressor in compressed air energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 38: doi: 10.1016/j.est.2021.102515.
- [35] WANG X, LI W, ZHANG X H, et al. Flow characteristic of a multistage radial turbine for supercritical compressed air energy storage system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2018, 232(6): 622-640.
- [36] 孙冠珂, 李文, 张雪辉, 等. 向心涡轮进气结构的气动性能及损失机理[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(8): 1926-1935.  
SUN G K, LI W, ZHANG X H, et al. Aerodynamic performance and losses mechanism of radial turbine intake components[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(8): 1926-1935.
- [37] 孙冠珂, 李文, 张雪辉, 等. 向心涡轮蜗壳截面尺寸对气动性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(26): 72-80, 91.  
SUN G K, LI W, ZHANG X H, et al. Study on the effect of variation of the volute cross-sectional dimension on radial turbine performance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(26): 72-80, 91.
- [38] SHAO Z Y, LI W, WANG X, et al. Analysis of shroud cavity leakage in a radial turbine for optimal operation in compressed air energy storage system[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2020, 142(7): doi: 10.1115/1.4047280.
- [39] LI W, WANG X, ZHANG X H, et al. Experimental and numerical investigations of closed radial inflow turbine with labyrinth seals[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(10): doi: 10.1115/1.4039804.
- [40] 王星, 朱阳历, 张雪辉, 等. 轮背空腔-密封气对CAES向心涡轮变工况流动损失的影响[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(1): 104-112.  
WANG X, ZHU Y L, ZHANG X H, et al. Effect of back cavity-seal gas on flow loss of CAES radial inflow turbine under variable operation conditions[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(1): 104-112.
- [41] 王星, 朱阳历, 李文, 等. NACA翼型叶顶对低展弦比向心涡轮影响特性[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 172-179.  
WANG X, ZHU Y L, LI W, et al. Effects of blade tip profile based on NACA airfoil on aerodynamic performance of low aspect ratio radial-inflow turbine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 172-179.
- [42] WANG X, LI W, ZHANG X H, et al. Coupling optimization of casing groove and blade profile for a radial turbine[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2021, 235(6): 1421-1434.
- [43] 王星, 李文, 朱阳历, 等. CAES轴流涡轮弯导叶优化设计与流动损失控制机理[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1524-1535.  
[43] WANG X, LI W, ZHU Y, et al. Optimal design and flow loss reduction mechanism of bowed guide vane in a CAES axial flow turbine[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1524-1535.

- [44] WANG X, LI W, ZHANG X H, et al. Efficiency improvement of a CAES low aspect ratio radial inflow turbine by NACA blade profile[J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 1214-1231.
- [45] WANG X, LI W, ZHANG X H, et al. Flow analysis and performance improvement of a radial inflow turbine with back cavity under variable operation condition of compressed air energy storage[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(12): 6396-6408.
- [46] WANG X, ZHANG X H, ZUO Z T, et al. Effect of chamber roughness and local smoothing on performance of a CAES axial turbine[J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 500-516.
- [47] 刘祖煜, 王星, 李文, 等. 启动过程压缩空气储能向心涡轮三维流动特性研究[J/OL]. *推进技术*, 2022, doi: 10.13675/j.cnki.tjjs.201016.
- [48] LI H, LI W, ZHANG X H, et al. Characteristic of a multistage reheating radial inflow in supercritical compressed air energy storage with variable operating parameters[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2019, 233(3): 397-412.
- [49] 刘栋, 李文, 李辉, 等. 多级向心涡轮可调导叶多级联调特性分析[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(6): 1286-1294.
- LIU D, LI W, LI H, et al. Characteristic analysis of combined regulation of adjustable guide vanes of multistage radial inflow turbines[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(6): 1286-1294.
- [50] LIAO Z R, ZHONG H, XU C, et al. Investigation of a packed bed cold thermal storage in supercritical compressed air energy storage systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: doi: 10.1016/j.apenergy.2021.115132.
- [51] LI H Y, SHAO Z Y, ZHANG X H, et al. Preliminary design and performance analysis of the liquid turbine for supercritical compressed air energy storage systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 203: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117891.
- [52] ZHANG L, LIU L X, ZHANG C, et al. Performance analysis of an adiabatic compressed air energy storage system with a pressure regulation inverter-driven compressor[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 43: doi: 10.1016/j.est.2021.103197.
- [53] LIU Z X, KIM D, GUNDERSEN T. Optimal recovery of thermal energy in liquid air energy storage[J]. *Energy*, 2022, 240: doi: 10.1016/j.energy.2021.122810.
- [54] HEO J Y, PARK J H, LEE J I. Experimental investigation of tank stratification in liquid air energy storage (LAES) system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117841.
- [55] FU H L, HE Q, SONG J T, et al. Thermodynamic of a novel advanced adiabatic compressed air energy storage system with variable pressure ratio coupled organic Rankine cycle[J]. *Energy*, 2021, 227: doi: 10.1016/j.energy.2021.120411.
- [56] ALIRAHMI S M, BASHIRI MOUSAVI S, RAZMI A R, et al. A comprehensive techno-economic analysis and multi-criteria optimization of a compressed air energy storage (CAES) hybridized with solar and desalination units[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 236: doi: 10.1016/j.enconman.2021.114053.
- [57] LI R X, ZHANG H R, CHEN H, et al. Hybrid techno-economic and environmental assessment of adiabatic compressed air energy storage system in China-Situation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 186: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116443.
- [58] 王琴, 徐会金, 韩兴超, 等. MgO/Mg(OH)<sub>2</sub>热化学储热反应的第一性原理研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(3): 1242-1252, 1783.
- WANG Q, XU H J, HAN X C, et al. First principle calculation of thermochemical heat storage with MgO/Mg(OH)<sub>2</sub> reaction[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(3): 1242-1252, 1783.
- [59] 盛鹏, 徐丽, 赵广耀, 等. 新型混合硝酸盐熔盐的制备及热物性研究[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1): 170-176.
- SHENG P, XU L, ZHAO G Y, et al. Preparation and thermophysical properties of novel mixed nitrate molten salts[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(1): 170-176.
- [60] TIAN Y, LIU X L, XU Q, et al. Bionic topology optimization of fins for rapid latent heat thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 194: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117104.
- [61] YAO Q Y, ZHAO C Y, ZHAO Y, et al. Topology optimization for heat transfer enhancement in latent heat storage[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 159: doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106578.
- [62] YU Q, LU Y W, ZHANG X P, et al. Comprehensive thermal properties of molten salt nanocomposite materials base on mixed nitrate salts with SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanoparticles for thermal energy storage[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: doi: 10.1016/j.solmat.2021.111215.
- [63] LIN L, WANG L, LIN X P, et al. Experimental investigation on the distribution uniformity and pressure drop of perforated plate distributors for the innovative spray-type packed bed thermal storage[J]. *Particology*, 2022, 61: 60-73.
- [64] DU P X, LIU C H, FANG B, et al. Experimental investigation on the stability and heat transfer enhancement of modified microencapsulated phase change materials and latent functionally thermal fluids[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: doi: 10.1016/j.est.2021.102846.
- [65] WANG G, DANNEMAND M, XU C, et al. Thermal characteristics of a long-term heat storage unit with sodium acetate trihydrate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 187: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116563.
- [66] LIU Y H, WANG L, PENG L, et al. Effect of additives on the cyclic thermal stability and thermal properties of sodium acetate trihydrate as a phase change material: An experimental study[J]. *Solar Energy*, 2022, 231: 473-483.
- [67] CHEN L, WANG L, WANG Y F, et al. Influence of phase change material volume shrinkage on the cyclic process of thermal energy storage: A visualization study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 203: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117776.
- [68] FENG C L, E J Q, HAN W, et al. Key technology and application analysis of zeolite adsorption for energy storage and heat-mass transfer process: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: doi: 10.1016/j.rser.2021.110954.
- [69] XU X H, SONG J, WU J F, et al. Preparation and thermal shock

- resistance of mullite and corundum co-bonded SiC ceramics for solar thermal storage[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2020, 35(1): 16-25.
- [70] 罗海华, 沈强, 林俊光, 等. 新型低熔点混合熔盐储热材料的开发[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1755-1759.
- LUO H H, SHEN Q, LIN J G, et al. Development of new low melting point mixed molten salt heat storage material[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(6): 1755-1759.
- [71] GUO L L, LIU Q, YIN H Q, et al. Excellent corrosion resistance of 316 stainless steel in purified NaCl-MgCl<sub>2</sub> eutectic salt at high temperature[J]. *Corrosion Science*, 2020, 166: doi: 10.1016/j.corsci.2021.108473.
- [72] 韩翔宇, 王亮, 葛志伟, 等. Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CoO氧化还原反应储/释热动力学特性[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1701-1708.
- HAN X Y, WANG L, GE Z W, et al. The thermal storage and release kinetics of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CoO redox reaction[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1701-1708.
- [73] LIU X L, SHI H, MENG X G, et al. Solar-enhanced CO<sub>2</sub> conversion with CH<sub>4</sub> over synergetic NiCo alloy catalysts with light-to-fuel efficiency of 33.8%[J]. *Solar RRL*, 2021, 5(8): doi: 10.1002/solr.202100185.
- [74] 贺明飞, 王志峰, 原郭丰, 等. 水体型太阳能跨季节储热技术简介[J]. *建筑节能(中英文)*, 2021, 49(10): 66-70.
- HE M F, WANG Z F, YUAN G F, et al. A technical introduction of water pit for long-term seasonal solar thermal energy storage[J]. *Building Energy Efficiency*, 2021, 49(10): 66-70.
- [75] GUO F, ZHU X Y, ZHANG J Y, et al. Large-scale living laboratory of seasonal borehole thermal energy storage system for urban district heating[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114763.
- [76] ZHU M H, HUANG J, SONG M J, et al. Thermal performance of a thin flat heat pipe with grooved porous structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: doi: 10.1016/applthermaleng.2020.115215.
- [77] LIU Z C, QUAN Z H, ZHAO Y H, et al. Experimental research on the performance of ice thermal energy storage device based on micro heat pipe arrays[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 185: doi: 10.1016/applthermaleng.2020.116452.
- [78] CHEN M B, FU D K, SONG W J, et al. Performance of ice generation system using supercooled water with a directed evaporating method[J]. *Energies*, 2021, 14(21): doi: 10.3390/en14217021.
- [79] 秦宇泉, 刘培, 李政. 光热电厂储热系统动态建模及仿真[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(12): 3125-3132.
- QIN Y X, LIU P, LI Z. Dynamic modeling and simulation of the thermal storage system in solar thermal power plant[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(12): 3125-3132.
- [80] 郭泉, 邱云峰, 史志国, 等. 储热型太阳能供暖系统热输送全过程特性研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(10): 5384-5395.
- GUO X, QIU Y F, SHI Z G, et al. Study on whole process characteristic of heat transfer in solar heating system with heat storage[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(10): 5384-5395.
- [81] 唐杰, 吕林, 许立雄, 等. 多时间尺度下计及光热-储热的主动配电网主辅联合优化调度[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(3): 190-194, 189.
- TANG J, LV L, XU L X, et al. Optimization of main and auxiliary joint dispatching of active distribution network considering solar thermal and thermal storage under multiple time scales[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(3): 190-194, 189.
- [82] 张淑婷, 陆海, 林小杰, 等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 93-103.
- ZHANG S T, LU H, LIN X J, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 93-103.
- [83] 张涵, 王亮, 林曦鹏, 等. 基于逆/正布雷顿循环的热泵储电系统性能[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1796-1805.
- ZHANG H, WANG L, LIN X P, et al. Performance of pumped thermal electricity storage system based on reverse/forward Brayton cycle[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1796-1805.
- [84] 林酿志, 李传常. 相变储能材料及其冷链运输应用[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(3): 1040-1050.
- LIN N Z, LI C C. Phase change materials for energy storage in cold-chain transportation[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(3): 1040-1050.
- [85] 徐德厚, 周学志, 徐玉杰, 等. 新型地下跨季节复合储热系统性能规律[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1768-1776.
- XU D H, ZHOU X Z, XU Y J, et al. Performance law of a new composite seasonal underground thermal storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1768-1776.
- [86] 宋金鹏, 王金炜, 罗浩, 等. 碳纤维复合材料圆环拉伸力学性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(6): 65-71.
- SONG J P, WANG J W, LUO H, et al. Study on the performance of stretching mechanics of carbon fiber reinforced composite ring[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(6): 65-71.
- [87] 戴兴建, 胡东旭, 张志来, 等. 高强合金钢飞轮转子材料结构分析与应用[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1667-1673.
- DAI X J, HU D X, ZHANG Z L, et al. Analysis and application of high strength alloy steel flywheel structure and material[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1667-1673.
- [88] 孙玉坤, 陈家钰, 袁野. 飞轮储能用高速永磁同步电机损耗分析与优化[J]. *微电机*, 2021, 54(8): 19-22, 79.
- SUN Y K, CHEN J Y, YUAN Y. Analysis and optimization of loss of high speed PMSM for flywheel energy storage[J]. *Micromotors*, 2021, 54(8): 19-22, 79.
- [89] 贾翔宇, 汪军水, 徐昉, 等. 接触参数对储能飞轮转子碰撞行为的影响[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1643-1649.
- JIA X Y, WANG J S, XU Y, et al. Rubbing behavior research of flywheel rotor for energy storage in view of influence of contact parameters[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1643-1649.
- [90] 任正义, 黄同, 杨立平. 刚性飞轮转子-基础耦合系统的径向振动分析[J]. *机械设计与制造*, 2021(3): 27-32, 38.
- REN Z Y, HUANG T, YANG L P. Radial vibration analysis of rigid flywheel rotor-foundation coupling system[J]. *Machinery Design &*

- Manufacture, 2021(3): 27-32, 38.
- [91] XIANG B, WANG X, WONG W O. Process control of charging and discharging of magnetically suspended flywheel energy storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 47: doi: 10.1016/j.est.2021.103629.
- [92] 刘鸣, 王攀, 毕伟, 等. 磁悬浮飞轮中位移检测信号工频干扰分析及消除研究[J]. *电子器件*, 2021, 44(3): 579-584.
- LIU M, WANG P, BI W, et al. Analysis and elimination of power frequency interference of displacement signal in magnetic suspension flywheel[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2021, 44(3): 579-584.
- [93] 陈仲伟, 李达伟, 邹旭东, 等. 双馈电机驱动的飞轮储能系统稳定运行控制方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(1): 177-184.
- CHEN Z W, LI D W, ZOU X D, et al. Research on stable operation control method of flywheel energy storage system driven by doubly fed machine[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(1): 177-184.
- [94] 沈舒楠, 朱焜秋. 外转子无铁心无轴承永磁同步电机参数优化设计[J]. *微电机*, 2021, 54(5): 20-26.
- SHEN S N, ZHU H Q. Optimization design of outer rotor coreless bearingless permanent magnet synchronous motor[J]. *Micromotors*, 2021, 54(5): 20-26.
- [95] 陈远强. 聚苯胺/木素复合膨胀剂的制备及其在铅酸电池中的应用[J]. *电子元件与材料*, 2021, 40(2): 150-155.
- CHEN Y Q. Preparation of polyaniline/lignosulfonate composite expander and its applications in lead-acid batteries[J]. *Electronic Components and Materials*, 2021, 40(2): 150-155.
- [96] 陈远强. 聚吡咯/炭黑复合材料制备及其在铅酸电池中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(8): 1-7.
- CHEN Y Q. Preparation of polypyrrole/carbon black composites and their applications in lead-acid batteries[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(8): 1-7.
- [97] SHI X, ZUO Y, ZHAI P, et al. Large-area display textiles integrated with functional systems[J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 240-245.
- [98] LIU T, YU L, LIU J, et al. Understanding Co roles towards developing Co-free Ni-rich cathodes for rechargeable batteries[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(3): 277-286.
- [99] YUE J, ZHANG J, TONG Y, et al. Aqueous interphase formed by CO<sub>2</sub> brings electrolytes back to salt-in-water regime[J]. *Nature Chemistry*, 2021, 13(11): 1061-1069.
- [100] WANG K, REN Q, GU Z, et al. A cost-effective and humidity-tolerant chloride solid electrolyte for lithium batteries[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: doi: 10.1038/s41467-021-24697-2.
- [101] GAO J X, WU J, HAN S Y, et al. A novel solid electrolyte formed by NASICON-type Li<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> and poly(vinylidene fluoride) for solid state batteries[J]. *Functional Materials Letters*, 2021, 14(3): doi: 10.1142/s1793604721400014.
- [102] CHI X, LI M, DI J, et al. A highly stable and flexible zeolite electrolyte solid-state Li-air battery[J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 551-557.
- [103] YAO Y, LEI J, SHI Y, et al. Assessment methods and performance metrics for redox flow batteries[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(6): 582-588.
- [104] XU J C, PANG S, WANG X Y, et al. Ultrastable aqueous phenazine flow batteries with high capacity operated at elevated temperatures[J]. *Joule*, 2021, 5(9): 2437-2449.
- [105] YU X, SONG Y X, TANG A. Tailoring manganese coordination environment for a highly reversible zinc-manganese flow battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 507: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230295.
- [106] XIE C X, LIU Y, LU W J, et al. Highly stable zinc-iodine single flow batteries with super high energy density for stationary energy storage[J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(6): 1834-1839.
- [107] QIAO L, XIE C X, NAN M J, et al. Highly stable titanium-manganese single flow batteries for stationary energy storage[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021: 12606-12611.
- [108] LI T Y, XING F, LIU T, et al. Cost, performance prediction and optimization of a vanadium flow battery by machine-learning[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(11): 4353-4361.
- [109] LI T Y, LU W J, YUAN Z Z, et al. A data-driven and DFT assisted theoretic guide for membrane design in flow batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(25): 14545-14552.
- [110] CHEN Q R, LV Y G, YUAN Z Z, et al. Organic electrolytes for pH-neutral aqueous organic redox flow batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(9): doi: 10.1002/adfm.202108777.
- [111] ZHANG C K, LI X F. Perspective on organic flow batteries for large-scale energy storage[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2021, 30: doi: 10.1016/j.coelec.2021.100836.
- [112] USISKIN R, LU Y, POPOVIC J, et al. Fundamentals, status and promise of sodium-based batteries[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(11): 1020-1035.
- [113] HU Y S, LI Y Q. Unlocking sustainable Na-ion batteries into industry[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(11): 4115-4117.
- [114] DING F X, ZHAO C L, ZHOU D, et al. A novel Ni-rich O<sub>3</sub>Na [Ni<sub>0.60</sub>Fe<sub>0.25</sub>Mn<sub>0.15</sub>]O<sub>2</sub> cathode for Na-ion batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 30: 420-430.
- [115] RONG X H, HU E Y, LU Y X, et al. Anionic redox reaction-induced high-capacity and low-strain cathode with suppressed phase transition[J]. *Joule*, 2019, 3(2): 503-517.
- [116] QI Y R, TONG Z Z, ZHAO J M, et al. Scalable room-temperature synthesis of multi-shelled Na<sub>3</sub>(VOPO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>F microsphere cathodes[J]. *Joule*, 2018, 2(11): 2348-2363.
- [117] BAUER A, SONG J, VAIL S, et al. The scale-up and commercialization of nonaqueous Na-ion battery technologies[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(17): doi: 10.1002/ae-nm.201702869.
- [118] ZHAO C L, WANG Q D, LU Y X, et al. High-temperature treatment induced carbon anode with ultrahigh Na storage capacity at low-voltage plateau[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1125-1129.
- [119] MENG Q S, LU Y X, DING F X, et al. Tuning the closed pore structure of hard carbons with the highest Na storage capacity[J].

- ACS Energy Letters, 2019, 4(11): 2608-2612.
- [120] WANG Y, YU X, XU S, et al. A zero-strain layered metal oxide as the negative electrode for long-life sodium-ion batteries[J]. Nature Communications, 2013, 4: doi: 10.1038/ncomms3365.
- [121] RUDOLA A, RENNIE A J R, HEAP R, et al. Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(13): 8279-8302.
- [122] LI Y Q, YANG Y, LU Y X, et al. Ultralow-concentration electrolyte for Na-ion batteries[J]. ACS Energy Letters, 2020, 5(4): 1156-1158.
- [123] HU Y S, LU Y X. The mystery of electrolyte concentration: From superhigh to ultralow[J]. ACS Energy Letters, 2020, 5(11): 3633-3636.
- [124] HUANG Y X, ZHAO L Z, LI L, et al. Electrolytes and electrolyte/electrode interfaces in sodium-ion batteries: From scientific research to practical application[J]. Advanced Materials, 2019, 31(21): doi: 10.1002/adma.201808393.
- [125] 容晓晖, 陆雅翔, 戚兴国, 等. 钠离子电池:从基础研究到工程化探索[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 515-522.
- RONG X H, LU Y X, QI X G, et al. Na-ion batteries: From fundamental research to engineering exploration[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 515-522.
- [126] ZHOU Q, LI Y Q, TANG F, et al. Thermal stability of high power 26650-type cylindrical Na-ion batteries[J]. Chinese Physics Letters, 2021, 38(7): doi: 10.1088/0256-307x/38/7/076501.
- [127] ZHAO Z Y, XIA K Q, HOU Y, et al. Designing flexible, smart and self-sustainable supercapacitors for portable/wearable electronics: From conductive polymers[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(22): 12702-12743.
- [128] LIANG J, JIANG C Z, WU W. Printed flexible supercapacitor: Ink formulation, printable electrode materials and applications[J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(2): doi: 10.1063/5.0048446.
- [129] WU Y C, YE J L, JIANG G P, et al. Electrochemical characterization of single layer graphene/electrolyte interface: Effect of solvent on the interfacial capacitance[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(24): 13317-13322.
- [130] WU Z T, LIU X C, SHANG T X, et al. Reassembly of MXene hydrogels into flexible films towards compact and ultrafast supercapacitors[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(41): doi: 10.1002/adfm.202102874.
- [131] AN Y B, LIU T Y, LI C, et al. A general route for the mass production of graphene-enhanced carbon composites toward practical pouch lithium-ion capacitors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(28): 15654-15664.
- [132] SUN X Z, WANG P L, AN Y B, et al. A fast and scalable pre-lithiation approach for practical large-capacity lithium-ion capacitors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(11): doi: 10.1149/1945-7111/ac38f7.
- [133] YIN Y, FANG Z, CHEN J W, et al. Hybrid Li-ion capacitor operated within an all-climate temperature range from -60 to +55 °C[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(38): 45630-45638.
- [134] WANG K, JIANG K, CHUNG B, et al. Lithium-antimony-lead liquid metal battery for grid-level energy storage[J]. Nature, 2014, 514(7522): 348-350.
- [135] LI H M, WANG K L, CHENG S J, et al. High performance liquid metal battery with environmentally friendly antimony-tin positive electrode[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(20): 12830-12835.
- [136] LI H M, YIN H Y, WANG K L, et al. Liquid metal electrodes for energy storage batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(14): doi: 10.1002/aenm.201600483.
- [137] LI H M, WANG K L, ZHOU H, et al. Tellurium-tin based electrodes enabling liquid metal batteries for high specific energy storage applications[J]. Energy Storage Materials, 2018, 14: 267-271.
- [138] YAN S, ZHOU X B, LI H M, et al. Utilizing *in situ* alloying reaction to achieve the self-healing, high energy density and cost-effective Li||Sb liquid metal battery[J]. Journal of Power Sources, 2021, 514: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230578.
- [139] DAI T, ZHAO Y, NING X H, et al. Capacity extended bismuth-antimony cathode for high-performance liquid metal battery[J]. Journal of Power Sources, 2018, 381: 38-45.
- [140] ZHAO W, LI P, LIU Z, et al. High performance antimony-bismuth-tin positive electrode for liquid metal battery[J]. Chemistry of Materials, 2018, 30(24): 8739-8746.
- [141] LIU G A, XU C, LI H M, et al. State of charge and online model parameters co-estimation for liquid metal batteries[J]. Applied Energy, 2019, 250: 677-684.
- [142] WANG X, SONG Z X, YANG K, et al. State of charge estimation for lithium-bismuth liquid metal batteries[J]. Energies, 2019, 12(1): doi: 10.3390/en12010183.
- [143] 张斌, 徐成, 王晟, 等. 基于模糊逻辑控制器的液态金属电池组两级均衡系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 4024-4033.
- ZHANG E, XU C, WANG S, et al. Two-stage equalizing system of liquid metal batteries based on fuzzy logic controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 4024-4033.
- [144] PEI C Y, XIONG F Y, SHENG J Z, et al. VO<sub>2</sub> nanoflakes as the cathode material of hybrid magnesium-lithium-ion batteries with high energy density[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(20): 17060-17066.
- [145] ZHANG Z H, CUI Z L, QIAO L X, et al. Novel design concepts of efficient Mg-ion electrolytes toward high-performance magnesium-selenium and magnesium-sulfur batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(11): doi: 10.1002/aenm.201602055.
- [146] XU Y, ZHOU G M, ZHAO S Y, et al. Improving a Mg/S battery with YCl<sub>3</sub> additive and magnesium polysulfide[J]. Advanced Science, 2020, 7(2): doi: 10.1002/advs.201903603.
- [147] NG K L, AMRITHRAJ B, AZIMI G. Nonaqueous rechargeable aluminum batteries[J]. Joule, 2022, 6(1): 134-170.
- [148] SUN H B, WANG W, YU Z J, et al. A new aluminium-ion battery with high voltage, high safety and low cost[J]. Chemical Communications, 2015, 51(59): 11892-11895.
- [149] TU J G, SONG W L, LEI H P, et al. Nonaqueous rechargeable aluminum batteries: Progresses, challenges, and perspectives[J].

- Chemical Reviews, 2021, 121(8): 4903-4961.
- [150] YANG C, CHEN J, JI X, et al. Aqueous Li-ion battery enabled by halogen conversion-intercalation chemistry in graphite[J]. Nature, 2019, 569(7755): 245-250.
- [151] SUO L M, OH D, LIN Y X, et al. How solid-electrolyte interphase forms in aqueous electrolytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(51): 18670-18680.
- [152] ZHANG H, QIN B S, HAN J, et al. Aqueous/nonaqueous hybrid electrolyte for sodium-ion batteries[J]. ACS Energy Letters, 2018, 3(7): 1769-1770.
- [153] KANG Z, WU C L, DONG L B, et al. 3D porous copper skeleton supported zinc anode toward high capacity and long cycle life zinc ion batteries[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(3): 3364-3371.
- [154] SUN K E K, HOANG T K A, DOAN T N L, et al. Suppression of dendrite formation and corrosion on zinc anode of secondary aqueous batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(11): 9681-9687.
- [155] LI W, WANG K L, CHENG S J, et al. An ultrastable presodiated titanium disulfide anode for aqueous "rocking-chair" zinc ion battery[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(27): doi: 10.1002/aenm.201900993.
- [156] LI W, MA Y S, LI P, et al. Electrochemically activated  $\text{Cu}_{2-x}\text{Te}$  as an ultraflat discharge plateau, low reaction potential, and stable anode material for aqueous Zn-ion half and full batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(42): doi: 10.1002/aenm.202102607.
- [157] LIU P J, LI Y Q, MAO B B, et al. Experimental study on thermal runaway and fire behaviors of large format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116949.
- [158] MAO B B, LIU C Q, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of a 300 A·h lithium ion battery with  $\text{LiFePO}_4$  as cathode[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: doi: 10.1016/j.rser.2021.110717.
- [159] LIU Y J, YANG K, ZHANG M J, et al. The efficiency and toxicity of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one in suppressing lithium-ion battery fire[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 65: 532-540.
- [160] MENG X D, LI S, FU W D, et al. Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires[J]. eTransportation, 2022, 11: doi: 10.1016/j.etrans.2021.100142.
- [161] SU S S, LI W, LI Y S, et al. Multi-objective design optimization of battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117235.
- [162] QIN P, LIAO M R, MEI W X, et al. The experimental and numerical investigation on a hybrid battery thermal management system based on forced-air convection and internal finned structure[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117212.
- [163] YANG W, ZHOU F, CHEN X, et al. Performance analysis of axial air cooling system with shark-skin bionic structure containing phase change material[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 250: doi: 10.1016/j.enconman.2021.114921.
- [164] ALIHOSSEINI A, SHAFARAEI M. Experimental study and numerical simulation of a Lithium-ion battery thermal management system using a heat pipe[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: doi: 10.1016/j.est.2021.102616.
- [165] JIANG L L, DENG Z W, TANG X L, et al. Data-driven fault diagnosis and thermal runaway warning for battery packs using real-world vehicle data[J]. Energy, 2021, 234: doi: 10.1016/j.energy.2021.121266.
- [166] JIN Y, ZHENG Z K, WEI D H, et al. Detection of micro-scale Li dendrite via  $\text{H}_2$  gas capture for early safety warning[J]. Joule, 2020, 4(8): 1714-1729.
- [167] 刘同宇. 大容量磷酸铁锂电池热失控行为监测预警研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [168] HUANG Z H, LIU P J, DUAN Q L, et al. Experimental investigation on the cooling and suppression effects of liquid nitrogen on the thermal runaway of lithium ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2021, 495: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.2306595.
- [169] QIN P, JIA Z Z, JIN K Q, et al. The experimental study on a novel integrated system with thermal management and rapid cooling for battery pack based on  $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$  spray cooling in a closed-loop[J]. Journal of Power Sources, 2021, 516: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230659.