

电化学储能技术发展研究

潘新慧¹, 陈人杰^{1,2*}, 吴锋^{1,2}

(1. 北京理工大学前沿技术研究院, 济南 250300; 2. 北京理工大学材料学院, 北京 100081)

摘要: 作为新型电力系统重要组成部分的电化学储能, 是解决可再生能源高比例消纳的重要手段、促成“源网荷储”协调运行的关键装置; 电化学储能技术作为新型储能的主流技术、未来能源绿色低碳转型的核心技术, 在诸多方面仍待深入发展才能适应储能规模快速增长、储能系统更为复杂带来的挑战。本文从电源侧、电网侧、用户储能侧出发, 分析了电化学储能发展的需求背景, 系统梳理了电化学储能技术在战略布局、关键材料、结构设计等方面的研究进展; 在阐明电化学储能技术发展趋势的基础上, 辨识了产品规格不统一、检测平台不完善、理论与实践不贯通、应用成本不理想等制约发展的关键问题。研究认为, 高性能、高安全性、低成本的关键材料, 储能器件结构优化及评价, 储能系统多能互补及智能化设计, 电化学储能商业化应用模式是后续重点发展方向, 需要强化试点示范应用、制定行业标准体系、完善基础设施建设、培育储能人才团队, 以保障电化学储能技术及产业高质量发展。

关键词: 电化学储能; 关键材料; 结构设计; 标准体系; 新型电力系统

中图分类号: TM91 **文献标识码:** A

Development of Electrochemical Energy Storage Technology

Pan Xinhui¹, Chen Renjie^{1,2*}, Wu Feng^{1,2}

(1. Advanced Technology Research Institute of Beijing Institute of Technology, Jinan 250300, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As an important component of the new power system, electrochemical energy storage is crucial for addressing the challenge regarding high-proportion consumption of renewable energies and for promoting the coordinated operation of the source, grid, load, and storage sides. As a mainstream technology for energy storage and a core technology for the green and low-carbon transformation of existing energy structures, the electrochemical energy storage technology still needs to be further developed to adapt to the challenges brought about by the rapid growth of energy storage scale and the increasingly complex energy storage system. This study analyzes the demand for electrochemical energy storage from the power supply, grid, and user sides, and reviews the research progress of the electrochemical energy storage technology in terms of strategic layout, key materials, and structural design. Moreover, it clarifies the development trend of electrochemical energy storage technologies and identifies the problems such as inconsistency in product specifications, deficiency in detection platforms, and disconnection between theory and practice. Future efforts need to focus on the following directions: key materials with high performance, high safety, and low cost;

收稿日期: 2023-07-28; **修回日期:** 2023-10-30

通讯作者: *陈人杰, 北京理工大学材料学院教授, 研究方向为高比能、高安全二次电池材料及器件, 特种功能电源, 新型功能复合电解质, 二次电池资源化再生等; E-mail: chenrj@bit.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2502102); 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910007023); 山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2023049)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

optimization and evaluation of the structures of energy storage devices; multi-energy complementary and intelligent design of the energy storage systems; and commercial application modes of electrochemical energy storage. Furthermore, it is necessary to strengthen pilot demonstrations, formulate an industry standards system, improve the infrastructure, and cultivate talent teams for energy storage, thereby ensuring the high-quality development of the electrochemical energy storage technologies and industry.

Keywords: electrochemical energy storage; critical materials; structural design; standard system; new power system

一、前言

化石能源资源短缺、能源结构不合理、环境污染严重等问题，成为制约经济社会可持续发展的瓶颈。电化学储能是支撑能源转型的关键技术之一，相应产品广泛应用于新能源汽车、数据中心、通信基站、重大装备、储能电站等，成为构建电力系统的基础装备、促进节能提效的重要依托。《“十四五”新型储能发展实施方案》（2022年）提出，加强储能技术创新战略性布局，积极实施新型储能关键技术研发支持政策。相关行业政策将促进能源消费结构大调整、引导新型储能行业加速布局、助力绿色低碳转型。

近年来，我国作出了构建新型电力系统、加快规划建设新型能源体系的战略部署，这是能源电力转型的必然要求、实现“双碳”战略目标的重要途径。电化学储能是新型电力系统的重要组成部分、解决可再生能源间歇性和不稳定性的重要手段，也是涉及“源网荷储”协调运行的关键技术；具有调节速度快、布置灵活、建设周期短、环境友好等独特优势，有助于解决可再生能源发电的不连续、不可控问题，保障电力系统持续稳定输出电能，更大程度上替代化石燃料发电，克服传统发电机组不能快速切换爬坡方向、易反调的缺陷^[1-4]。中国能源研究会储能专委会/中关村储能产业技术联盟的全球储能项目库统计数据表明，2022年我国新增投运电力储能项目的装机规模突破15 GW，同比增长114%；其中，新型储能的新增规模达到7.3 GW/15.9 GW·h，功率规模、能量规模分别同比增长200%、280%。可再生能源的快速发展及其在电力系统中的不断渗透，为电化学储能的规模化发展奠定了基础^[5]。

当前，电化学储能技术的电力系统应用研究已有开展。在用户端，电化学储能价值明确。在用电量、具有明显电价差的工业企业或工业园区，配置储能可以平抑尖峰负荷、降低用电基本容量、节

省电费支出；在第五代移动通信（5G）基站上配置储能装置，通过闲时充电、忙时放电来实现电力供需的“削峰填谷”；在能耗高、需要不间断供电的数据中心，储能可提高供电可靠性，通过“削峰填谷”、容量调配来提高设备运行的经济性；在微电网配置储能，可缓解对电网的超负荷需求，实现电网系统配置优化^[6,7]。然而，随着储能市场规模快速增长、储能系统趋于复杂，电化学储能技术在关键材料、制备工艺、系统集成等方面面临着诸多新问题与新挑战。现有研究侧重于材料修饰改性、器件结构优化等，而对器件与系统的有效匹配、多尺度构效关系等关注不足。

构建清洁低碳、安全高效的新型储能体系，深入探讨电化学储能电池在示范应用过程中的技术壁垒，极具迫切性。为此，本文从需求背景、发展现状、趋势及挑战等角度开展电化学储能技术的研究综述，进而研判相应技术体系的构建重点、提出行业发展建议，以期为新型电力系统构建、储能行业高质量发展等研究提供基础参考。

二、电化学储能发展的需求背景

随着电化学储能技术成熟度的提高，储能电池应用场景进一步拓宽。从电力系统的角度看，主要应用分为电源侧、电网侧、用户侧三大场景。

（一）电源侧储能

电源侧储能的应用需求规模最大，包括改善能源涉网特征、参与辅助服务、优化潮流分布并缓解堵塞、应急救援等细分方向；重在维持电网的平衡需求，减少弃风弃光，确保风、光发电的顺利并网^[8]。典型的应用场景是高比例可再生能源电力系统中的“削峰填谷”。近年来，风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等可再生能源获得快速发展，以不断提高非化石能源的消费比重。根据《中国能源统计年鉴2022》《中国矿产资源报告2022》数据，我国可再生能源发电装机容量占比由2020年

的42.5%上升至2022年的49.6%。预计2025年的可再生能源发电装机占比将超过50%。可再生能源的快速发展,离不开储能装备在电力系统中的有效配合^[9,10]。

2022年,我国投运的电化学储能电站项目共有472个,总功率为18.59 GW,总能源为14.05 GW·h(同比增长146.48%)。新疆维吾尔自治区喀什市莎车县建设了国内最大的电化学储能电站(800 MW光伏+200 MW/800 MW·h储能一体化),电站采用了磷酸铁锂电池和先进的储能系统控制技术,每年可发电 2.92×10^8 kW·h,减少CO₂排放 2.3×10^5 t;位于河北省张家口市张北县的国家风光储输示范工程一期和二期,安全运行超3000 d,绿色电能累计输出接近8000 GW·h,有效化解了新能源发电稳定性与输电安全性方面的瓶颈问题,实现了新能源出力状态的全方位预测、控制及监控。

(二) 电网侧储能

电网侧储能需求主要源自提升电力系统灵活调节能力与安全稳定水平、提高电网供电能力与应急供电保障质量、延缓输变电升级改造投资。在配电网中,储能可补充电力供应不足,治理配电网薄弱地区的“低电压”或分布式能源接入后引起的“高、低电压”问题,解决季节电荷、临时用电不符合扩容扩建条件下的配网供电需求。江苏省昆山市储能电站工程是全球单体容量最大的电网侧电化学储能电站,有效克服了负荷峰谷差连年加大的局面,减轻了本地新能源规模化并网给电网安全运维造成的冲击,平抑了风电和光伏发电的出力波动,增强了电网对可再生能源的消纳能力。

数据中心用电是另一类代表,涉及应急电源、常用电源,电化学储能在这两方面均起到稳定供电的作用。百度云计算(阳泉)中心项目采用了绿色低碳数据系列节能技术,由分布式锂电池备电系统替代传统的铅酸电池备电系统;当市电异常时,分布式锂电池备电系统通过直流母线为服务器供电,起到后备电源功能;服务器机柜上线后,供电效率高达99.5%,节省机房面积超过25%,节约电量约为400 MW·h/a。华为数字能源技术有限公司提出的Smart DC低碳绿色数据中心解决方案中,采用磷酸铁锂电芯配合致密电池封装技术构建智能锂电装置,占地面积和装置质量均为铅酸电池方案的1/3,

显著减少运输过程的碳排放。

(三) 用户侧储能

用户侧储能需求主要指与工商业、户用等分布式电源配套或独立工作的储能电站应用,以满足电力自发自用、终端用户的峰谷价差套利、容量费用管理、电能质量提升、降低电价以及新能源汽车充电时负荷平滑、供电可靠性保障等需求。江苏省张家港市海螺水泥厂储能电站工程总容量为8 MW/32 MW·h,其中储能系统采用了电力价差、“削峰填谷”等措施来减少电力消耗成本,将传统沉没成本转化为创造收益的电力投资。电动汽车的动力电池作为用户侧分散式新型储能装置,以充/换电基础设施为“桥梁”参与需求侧响应,实现与电网的实时互动,发挥负荷“削峰填谷”作用,从而支持构建新型电力系统、促进实现“双碳”战略目标。2008年北京奥运会上仅有601辆新能源汽车投入使用,同期锂离子电池产业处于初创期和积累期,产品类型单一、技术稳定性不佳、政策支持力度不足。随着经济社会发展,能源需求量逐年提高,新能源汽车产量规模快速增长,动力电池产业也从导入期转向成长期,装备制造技术更加成熟,产品综合性能稳步提升。实践表明,新能源汽车有望替代传统燃油车,从而减少化石燃料消耗、控制城市空气污染。

在军事装备领域,微型无人侦察机、单兵化智能作战系统、无人水下航行器、潜艇等都需要高比能二次电池提供能量,且相应需求的技术指标要求越来越高。例如,美国军队使用BB-2590型锂离子电池代替BB-390镉镍电池,新电池的工作时间>30 h,显著延长了单兵装置的使用时间,获得作战人员的好评;英国、德国、法国、意大利等国家也将锂离子电池单兵电源列入单兵作战系统发展计划。英国BAE系统公司研制的多用途潜航器,将动力电源更换为可工作24 h的锂离子电池,显著提高了探雷、灭雷的作业效率。此外,电化学储能对航空航天领域的新装备发展起到支撑作用。

三、电化学储能技术发展现状

(一) 战略布局日渐完善

在新一轮能源革命的驱动下,各国高度重视电

化学储能技术发展，主要从原料端、制造端、应用端开展战略布局^[10]。

1. 原料端

各国关注电池原材料的供应链稳定性，制定了电池关键材料的安全供应举措。欧盟为降低供应材料风险，将金属材料、矿产材料作为“绿色欧洲”的关键要素，2011年首次发布关键材料原料清单，将14种具有重大经济和战略价值的原材料纳入清单；每3年更新一次清单，及时反映生产、市场、技术等动态。2018年，欧盟实施“地平线2020”计划项目，发布了《欧盟原材料2050愿景与科技和创新路线图》，强调关键原材料的可持续供应。美国高度重视关键矿物清单，将关键矿产材料增加到50种（与电池相关的有15种）；发布的《国家锂电蓝图（2021—2030年）》，涉及锂、钴、镍等电池关键材料的获取和替代品研发，锂电产业发展，锂电池回收利用等。日本更新了《蓄电池产业战略》，将电池金属材料等列为高风险矿种，制定了赶超竞争对手的新一代电池技术市场发展举措。英国、日本建立了国家贸易伙伴关系，鼓励各自企业投资海外多元化供应链，确保电池产业原材料的全球战略储备。韩国提出加强政府间合作等举措，增强电池材料矿物的稳定供应能力。

我国是关键矿产材料的消费大国且对外依赖度较高，已将关键矿产高效利用纳入《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》，“战略性矿产资源开发利用”“循环经济关键技术与装备”等科技重点专项；组织实施《战略性矿产找矿行动（2021—2035年）》，加大对锂、钴、镍、离子型稀土等关键矿产的找矿投入，推进勘查矿种的结构调整和布局优化。

2. 制造端

美国较早成立了储能联合研究中心，制定了“电池500”计划。美国能源部发布的《储能大挑战路线图》（2020年）提出，在储能技术制造方面积极开展行动，梳理相应的技术障碍和关键技术指标，通过技术创新降低制造成本，制定系统设计及测试标准，2030年实现本土的储能技术、设备开发与制造能力全面满足自身市场需求。《欧洲储能技术发展路线图》（2017年）提出，组建欧洲电池联盟、欧洲技术与创新平台“电池欧洲”，推进“电池2030+”联合计划^[11]，开发和验证涉及多物理量

的多尺度模型，实现未来电芯制造过程的智能化。韩国制定的《2030二次电池产业发展战略》（2021年）提出，研发新一代电池技术，实现全固态电池、锂硫电池、锂金属电池的商业化；设立了电池研发政府创新基金，重点扶持中小企业的电池研发项目^[12]，推动电池关键材料、器件及装备的规模化生产。

我国高度重视储能技术和产业发展，发布了《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》《中国制造2025》《“十四五”新型储能发展实施方案》等政策文件，支持钠离子电池、无钴电池、刀片电池、无模组电池包（CTP）集成等电池技术的创新突破。

3. 应用端

2016年，美国发布了投资税收减免政策：先进储能技术可申请投资税收减免，通过独立部署、并入微网或可再生能源发电系统等形式运行。在补贴方面，自发电激励计划（SGIP）是美国历时最长的分布式发电激励政策，以鼓励用户侧分布式发电；储能被纳入SGIP的支持范围，可获得2美元/W的补贴支持。韩国分别为电池关键材料研发、基础设施投资提供50%、20%的减税额度，2025年电池储能有望达到60 GW·h，2030年拟占据全球市场40%的份额^[12]。日本重点布局全固态锂离子电池、超越锂离子新型电池研发项目，通过《经济安全保障推进法》（2022年）明确了对蓄电池的支持措施（补贴电池工厂设备投资的1/3）。

我国新型储能技术到2030年将全面实现市场化发展，关键技术自主可控，商业模式和标准体系健全，与电力系统各个环节深度融合。

（二）关键材料不断突破

发展高性能关键材料是升级电化学储能技术的重要基础，也是解决化石能源危机和环境污染、支持“双碳”战略目标的重要途径。电芯是电化学储能系统的核心部件，其构成主要包括正极材料、负极材料、电解液、隔膜、其他非活性材料等。

1. 正极材料

正极材料结构及其组成是直接决定电池能量密度的关键因素，在保证电池的可逆容量方面起着重要作用。正极材料的改性手段主要有表界面工程、体相掺杂、形貌控制等。

锂离子电池这一技术路线发展得最为成熟，主

流的锂离子电池正极材料有高镍低钴或无钴三元正极材料、尖晶石型高压镍锰酸锂正极材料、富锂锰基层状正极材料、橄榄石型磷酸铁锂正极材料等^[13]。在电极材料改性方面,采用微观结构优化、表面改性相结合的方法,显著提升了高镍材料($\text{Li}(\text{Ni}_{0.93}\text{Co}_{0.03}\text{Mn}_{0.03}\text{Al}_{0.01})\text{O}_2$)正极的循环稳定性(循环次数达4000周,容量保持率达79.2%)^[14]。表面包覆的F和体相掺杂的Sb,在正极材料表面形成稳定坚固的正极-电解质层,能够有效抑制材料的性能衰退。重庆理英新能源科技有限公司采用超薄纳米层表面修饰、优势晶面可控生长、分级结构优化设计等技术开发的锂离子电池产品,比容量为300 mA·h/g,表现出高放电容量、高压实密度、优异循环稳定性,优于市场同类产品。常州锂源新能源科技有限公司研制的新型球状磷酸铁锂正极材料,在-20℃条件下放电容量保持率从55%提升到85%,在-40℃条件下放电容量保持率从接近0提升到57%,是锂离子电池产品的重大技术突破。

钠离子电池这一技术路线尚处于演进过程中。按照材料成分划分,钠离子正极材料主要有层状氧化物、普鲁士蓝类似物、聚阴离子等^[15]。层状氧化物材料具有制备方法简单、比容量大、电压高等优点,是工程化开发的优选材料,但存在结构相变复杂、循环寿命偏短等问题。2014年,研究人员首次发现 $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{3+}$ 氧化还原电对在钠离子氧化物中具有活性,据此设计了一系列不含Ni/Co、空气稳定性良好、成本较低的氧化物正极材料^[16]。2020年,中国科学院物理研究所研究团队受锂离子电池高比能三元正极材料($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$)的启发,采用价格低廉的Fe替代有毒且昂贵的Co,制备出一系列富Ni的 $\text{O}_3\text{-Na}[\text{Ni}_x\text{Fe}_y\text{Mn}_{1-x-y}]\text{O}_2$ 氧化物正极材料^[17];相关材料在2~4.2 V电压范围内表现出190 mA·h/g的高可逆比容量,组装的钠离子全电池可提供345 W·h/kg的高比容量。2022年,研究人员基于界面工程策略,采用生物质裂解气体电解质、有序碳涂层集流体、层状氧化物正极,制备了具有协同界面的高比能钠电池^[18];组装的安时级钠电池能量密度高于200 W·h/kg,明显优于常规磷酸铁锂/石墨锂电池的平均水平(180 W·h/kg)。除了层状氧化物正极材料以外,聚阴离子正极、普鲁士蓝正极也是富有潜力的关键材料类型。

新型体系电池的技术路线尚处于研发期。相比

锂离子电池,锂硫电池具有能量密度高、成本低廉、环境友好等优点,但其倍率性能、循环性能、安全性能较差,相较商业化要求仍有明显差距。北京理工大学研究团队率先提出采用轻元素、多电子、多离子反应体系实现电池能量密度跨越式提升的发展策略,打破了单电子反应($n=1$)的思维定势。基于摩尔质量轻、具有多电子反应的活性电极材料,设计了高能量密度电池的系列样品。针对硫正极电子导电性差、体积变化剧烈以及充/放电过程中易产生“穿梭效应”等问题,设计了具有三维多孔层状结构的碳/硫复合材料、具有核壳结构的导电聚合物/硫复合材料,构建了三维导电网络和 Li^+ 扩散的多孔通道,使材料比容量 >1300 mA·h/g,是商用锂离子电池正极的8~10倍^[19,20]。针对活性物质流失、影响电极稳定性的问题,采用纳米限域、聚合物包覆等技术来抑制活性物质的溶解流失,使循环寿命达到原有电极的5倍。通过双“费歇尔酯化”反应得到的椭球形微米碳结构正极材料,显著提高了正极材料单位面积载硫量,相应电池的能量密度达到651 W·h/kg。

2. 负极材料

负极材料是电池器件的重要组成部分。国家“十三五”重点研发计划项目对锂离子电池的基础前沿研究及产业化等均提出了具体指标要求,如新型锂离子电池样品能量密度 >400 W·h/kg、电池单体能量 >300 W·h/kg。石墨负极的比容量仅为372 mA·h/g,凭借石墨负极材料容量无法达到相关技术指标要求。硅基材料具有理论容量高(4200 mA·h/g)、环境友好、储能丰富等优点,被视为下一代高能量密度锂离子电池的负极材料类型。

硅基负极材料是替代传统石墨材料的主要技术路线,但在嵌/脱锂过程中会发生显著的体积膨胀效应,因膨胀导致的不稳定固体电解质膜将造成循环稳定较差、容量衰减严重。南方科技大学研究团队提出了一种多级碳结构策略^[21],使用热化学气相沉积方法将垂直石墨烯片锚定在亚微观分散的Si-C复合纳米球表面并进一步嵌入碳基质;形成的三维导电和鲁棒网络,显著提高了电导率,有效抑制了硅的体积膨胀,增强了电荷传输和电极材料的稳定性,使电池表现出卓越快速充电能力。天津大学研究团队发展了将金属铜引入化学气相沉积过程的方法^[22],构建了具有良好化学键合作用的共价包覆

微米硅结构，实现了微米硅负极稳定循环的锂储存。中国科学院物理研究所研究团队针对 Si-C 复合负极的电化学和膨胀行为研究需求，提出了一种耦合的机械-电化学模型^[23]，在未来高能量密度、高安全性电池设计方面具有良好应用前景。针对硅基材料开展的一系列掺杂、包覆、复合、造孔、纳米结构等工作，有效缓解了嵌/脱锂的体积变化，显著提升了循环性能和导电性。

碳基材料逐渐成为钠离子电池的主流材料类型，相关研究集中在石墨类材料、无定型碳材料、纳米碳材料。石墨类负极材料具有完整的层状结构，但钠离子难以嵌入到石墨层间，不易与碳原子形成稳定的化合物。硬碳材料相比石墨材料普遍具有更好的储能性能，但较多采用的生物质或人工合成树脂前驱体，具有成本较高、产碳率偏低的劣势。软碳具有更为有序的结构、更少的缺陷、更短的层间距，但比容量远低于硬碳。为了提高碳基材料的产碳效率并降低制备成本，发展了多类钠离子储存机制，如“插层-填孔”“吸附-插层”“吸附-填孔”“吸附-插层-填孔”等。目前常用的硬碳前驱体主要是毛竹、椰壳、淀粉、核桃壳等生物基高分子材料，具有丰富的杂原子、独特的微观结构。通过碳化植物生物质基材制备的硬碳，保留了植物生物质模板中的材料结构和孔隙通道，对钠离子电池性能具有较大的影响。中南大学研究团队利用废弃木材制备硬碳材料，通过化学预处理和低温热解调节了红木衍生硬碳的微孔结构，获得了硬质碳中钠储存结构^[24]；样品在 20 mA/g 场景下表现出 430 mA·h/g 的高可逆容量以及良好的倍率与循环性能。在碳基负极材料以外，嵌入型钛基材料也受到较多关注，但相应合金及其他负极材料在嵌/脱钠前后的体积变化较大，加之在循环过程中易粉化，短期内难以实现产业化应用。

3. 电解质

电解质是决定电池能量密度、循环寿命、工作温度、安全性能的关键材料，按照形态分为液体电解质、固态电解质、固液混合电解质。液体电解质是技术发展最为成熟的电解质类型，又细分为有机液体电解质、室温离子液体电解质。有机液体电解质具有电化学稳定性好、凝固点低、沸点高等优点，但在极端条件下存在安全隐患；常用的改性方法是在电解液中加入高闪点、高沸点、不易燃的溶

剂，以一定程度上改善电解质的安全性，但并不能从本质上解决电解质的易燃、易爆、易泄漏等问题，难以杜绝电池的本征安全隐患。因此，开发高能量密度、高安全性的新型电解质体系，是当前研发热点，尤其是将传统有机液体电解液替换成固态电解质受到更多关注。

固态电池技术尚处于研发和中试阶段。采用不可燃的电解质替代有机电解液，具有高安全性、高能量密度、高功率密度的优点，受到了学术界和产业界的广泛关注。固态电池的量产和商业化面临着众多挑战，如电解质离子电导率、机械性能等材料问题，电极材料与电解质界面的相容性等界面问题。研制高压稳定的固态电解质是保障电池安全运行的关键工作。固态电解质作为固态电池的核心材料，按照组分分为固态聚合物电解质、氧化物电解质、卤化物电解质、硫化物电解质等。然而，大多数现有的固态电解质，其室温电导率未能达到 1 mS/cm 的基本要求。为此，后续研发集中在将传统的固态电解质改性以提高离子电导率、具有高的离子电导率的新型固体电解质等方面。

硫化物电解质在室温下具有较高的离子电导率、良好的机械性能、较低的晶界电阻、与电极材料接触性好等优点，在众多的无机电解质中脱颖而出；但在空气中的稳定性差，易与水汽发生反应而释放出有毒的 H₂S，生产环境要求苛刻、生产成本较高，制约了规模化生产与应用。通过原子掺杂进行改性，可解决硫化物在空气中的不稳定问题。例如，通过软酸置换，得到 Sn 取代的 Li₆PS₅I、Sb 取代的 Li₁₀GeP₂S₁₂，相应的空气稳定性、离子电导率均显著提高^[25]。开发了包括 PEO、β-Li₃PS₄/S 在内的多种强兼容性的界面保护层，以减轻硫化物与界面之间的副反应^[26]。通过一系列的表征，明确了硫化物 SE Li₇P₃S₁₁ 与有机 LE Li-BP-DME 之间的界面反应机制，据此设计了二者之间稳定的界面层材料。在产业化方面，日本、韩国企业建立了硫化物电解质的试制线（年产量分别为 10 t、24 t），验证了硫化物固态电解质的量产可行性。

近期，卤化物电解质开始受到较多关注。开发的氧氯化物固态电解质 (Li_{1.75}ZrCl_{4.75}O_{0.5}) 在室温下的离子电导率高达 2.42 mS/cm，超过大多数卤化物固态电解质^[27]；具有良好的可变形性，在 300 MPa 冷压后的相对密度高达 94.2%，超过了以良好可变形

性著称的 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ 、 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 、 Li_2ZrCl_6 、 Li_3InCl_6 等固态电解质。作为原料的 LiCl 、 $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、 ZrCl_4 价格低廉，如 $\text{Li}_{1.75}\text{ZrCl}_{4.75}\text{O}_{0.5}$ 的原材料成本仅为 11.6 美元/kg，远低于固态电池的市场竞争力门槛值（50 美元/kg）。据近期报道^[28]，日本东京工业大学研究团队利用高熵材料开发了具有高锂离子电导率的固态电解质，同时保持了超离子传导的结构框架；室温下的离子电导率为 32 mS/cm，约为原始固态电解质的 3 倍，也是迄今已知的最高值。

液流电池具有长循环寿命、高安全性、高能量效率等优点，根据电解液中活性物质的不同可分为全钒液流电池、铁铬液流电池、锌铁液流电池等。全钒液流电池是研发工作最为充分、适用于大规模储能的液流电池类型，仍面临着关键科学和技术问题，如电堆内部流体、浓度、温度等多场协同分布的均匀性不佳，材料与容量的衰退，功率及能量密度偏低，综合应用成本偏高等。为此，中国科学院大连化学物理研究所研究团队开发了新型可焊接多孔离子传导膜，改进了全钒液流电池的电堆工艺^[29]。在全钒液流电池的新型电堆方案中，革新传统的组装方式，将激光焊接技术应用于电堆集成，提高了电堆的可靠性和装配自动化程度，降低了密封材料用量和电堆成本。制备新膜、提高电极性能、改善电解质等，是全钒液流电池材料后续研发的主攻方向。我国加快推进全钒液流电池的产业化，国华能源投资有限公司在综合智慧能源项目中启动建设全钒液流储能电站（2022年），开展了世界最大的液流储能电站（100 MW/400 MW·h）单体模块调试（2023年）。

4. 隔膜

隔膜位于正、负极材料之间，是阻止正、负极接触以防止短路，保证电池体系安全的关键材料。虽然隔膜不参与电池中的反应，但其结构和性质影响电池动力性能，决定着电池循环寿命、安全性、能量密度、功率密度等。已经商业化的锂离子电池隔膜以聚烯烃类有机隔膜为主，具有良好的机械强度，但作为高分子材料在高温环境下易发生物相变化。例如，有机隔膜在 130~150 °C 条件下会发生急剧收缩甚至融化，导致电池短路，严重时会引起起火、爆炸等事故。

针对以上缺陷，研究人员在传统的聚烯烃膜基础上开发多种类型的隔膜（提高热稳定性）。北京

理工大学研究团队^[30]在量产隔膜的两侧原位生长聚多巴胺，得到双面聚多巴胺改性隔膜；在锂硫电池应用中，朝向硫正极一侧的聚多巴胺作为物理屏障和化学吸附层以阻挡多硫化物的穿梭，朝向锂金属负极一侧的聚多巴胺提高负极和隔膜之间的相互作用力以防止锂枝晶生长，正、负极两侧的聚多巴胺均选择性透过锂离子以阻挡多硫化物穿梭。在具有三维纳米纤维结构的聚氨酯中，采用静电纺丝技术制备了含填充陶瓷材料的新型隔膜^[31]，这种薄膜具有更小的平均孔径（1.08 μm）、更高的孔隙率（63.7%）、更高的吸液率（371%）、更高的离子电导率（0.65 mS/cm），在 211 °C 条件下热稳定、机械性能较好、无明显收缩。陶瓷隔膜改性虽然提高了隔膜的耐热性、吸液/保液性、电池安全性，但会增加隔膜厚度和电池内阻，使电池能量密度降低、隔膜成本增加。从安全性能、快充性能、循环寿命等角度看，芳纶涂覆全面超出陶瓷涂覆，具有更优异的性能。随着储能电池产业化发展，芳纶涂覆隔膜的市场快速拓宽。目前，国际主流的电动汽车用锂电池多采用芳纶涂覆隔膜，使得市场供应形势趋紧。

（三）结构设计持续创新

储能电池制造工艺分布于从上游原材料到芯包再到成品电池的全流程。按照封装方式、电芯形状的不同，储能电池主要分为方形电池、圆柱电池、软包电池。电池封装工艺的发展趋势，究其本质是在保证安全性的前提下提升电池能量密度的上限。圆柱电池一般是全极耳电池，相对方形电池的制备工艺而言，取消了前段工序中的模切制片工艺。软包电池是使用了铝塑包装膜作为包装材料的电芯，其工艺与方形电池的不同点起始于卷绕工艺，而前段工艺基本一致。一般认为，软包外壳的支撑较弱，而方形、圆柱电池更适合开展结构创新。

国际主流的电动汽车商采用新一代 4680 圆柱电池，其核心创新工艺是大电芯+全极耳+干电池技术；采用了 CTC（Cell to Chassis）电池架构，将电池直接集成在电动车底盘上（取消了 4680 电池阵列上的电池盖板），4680 单体电芯的能量提高至 2170 电芯的 5 倍，使整车续航里程增加 16%。宁德时代新能源科技股份有限公司依据电化学本质，持续开展电池系统的结构创新；2019 年率先推出了无模组

电池包（CTP）产品，电池体积利用率超过50%；2022年推出了第三代CTP产品，通过材料、电芯、系统结构等的全面优化，完全取消了模组形态设计，使电池的体积利用率超过72%，配用三元电池系统、磷酸铁锂电池系统的能量密度分别提升至255 W·h/kg、160 W·h/kg。比亚迪股份有限公司研发的刀片电池，优势体现在磷酸铁锂电池的创新结构，即改变了电池的单体形状并直接布置在电池包内（无模组化）；叠片工艺在安全性、能量密度、工艺控制等方面相比卷绕工艺更具优势，使磷酸铁锂系统能量密度>150 W·h/kg并兼顾了安全性。

四、电化学储能技术发展趋势及面临的挑战

（一）电化学储能技术发展趋势

1. 制备工艺趋向标准化

《国家发展改革委 国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见》（2021年）提出，完善和优化储能项目管理程序，健全技术标准和检测认证体系，提升行业建设运行水平。在行业政策层面，电化学储能产品的质量和稳定性依然是重点监督内容。电池制备工序繁多，单一工序的制造问题都会影响成品电芯的质量。研究储能电池的智能分选优化技术，针对不同电化学性能的电池进行科学分类，减少电池组中单体电池的不一致性，提高电池组的容量使用率和循环寿命。

2. 技术趋向优质化、智能化、数字化

安全问题一直是储能行业发展的重中之重。液流电池、铅酸电池具有较好的安全性，能够满足电化学储能电站的要求，但需要严格控制电池充电截止电压，防止水溶液过压电解后析氢爆炸。锂离子电池安全隐患较为突出，工作温度达到极限时氧化剂和还原剂均易与电解液发生大量生热的化学反应而产生爆炸现象。开发固态电池技术是解决相应安全隐患、提升能量密度的可行方向，而当前研究仍处在实验室到产业化的孵化阶段，固态电解质电导率等技术难点有待突破。

智能化的储能电池管理系统，易于匹配各个电池单元设计方案，可在最大程度上将电池管理系统（BMS）、能量管理系统、储能变流器等软/硬件紧密耦合，实现数据信息实时监测、消防安全资源一体化、电池健康状态可视化。基于长期积累的专业

数据，大数据、云计算、人工智能等信息技术，建立高质量的仿真模型，支持开展电化学储能智能运维；可靠预测电池全生命周期状态、循环寿命、能量输出、功率价值等关键参数，开展电池效率的精准评价，增强储能系统的精细化、自适应控制能力，实现储能系统高效运行和充分利用。

在制造过程中，储能电池趋向于原材料、装备、工艺、辅材、人工等均使用数字编码定义。建立数字化的电池器件制造车间，在制造过程中引入制造参数及质量的在线检测能力，闭环制造工艺调整过程。例如，对电池生产过程中的各种原材料、产品生产步骤进行跟踪并记录，确保电芯的制造质量；对于存在问题的电芯，可追溯制造过程并检验生产环节的准确性。

（二）电化学储能技术面临的挑战

1. 产品规格不统一

当前，储能电池产品的尺寸、形状、容量、电压各不相同，不具有通用性，不仅给新能源汽车、储能电站研发企业的匹配、选型、采购带来了困扰，也不利于储能电池企业的规模化生产和制造成本优化，进而阻碍了规模化和标准化应用。储能电池规格的不统一，直接导致产品互换性较差；电池使用者每开发一种产品，就对储能电池提出新增需求，再由电池制造企业调整生产工序以对产品进行定制化生产，不利于集约化、高效化生产和产品质量的一致性。电池制造工序繁杂，若同时生产规格过多的电池，将显著加大电池制造信息获取、质量检测、工艺分析等环节的难度及成本。电池种类繁多，也将加大退役电池回收再利用的难度。

2. 检测平台不完善

随着储能电池产品的规模化应用，各类应用场景下的不同运行工况导致了特性各异的电池老化失效机制，而电池老化对整个储能系统的可靠运行有着关键影响。目前，“材料-器件-系统”的连续研发评价模式尚未形成，全生命周期内的原位表征技术及模拟计算方法也待发展。为了满足市场对储能电池产品的应用需求，亟需研究服役工况下电化学储能器件与系统的原位实时表征技术，从“材料筛选-器件制备-电池选型-电池性能测试-失效机制分析”的全流程出发，形成电池产品的全生命周期评价系统；探索应用大数据、人工智能等信息技

术,构建兼顾精度和可靠性的分析方法。

3. 理论与实践不贯通

关键材料研究是发展电化学储能技术的基础。当前的储能材料研发高度依赖研究者的“尝试法”实验、积累经验与科学直觉,实验室研究也无法满足各类应用场景对储能器件能量密度、功率密度、循环寿命的需求。需要采取由应用驱动的“逆向思维”来设计材料结构。发挥大数据、人工智能技术对相关模拟计算的赋能作用,面向各类具体应用场景,针对性开展储能系统、储能器件、关键材料设计并挖掘有效组合;以基础技术创新提高电池材料和组件的研发水平,促进电池的优质制造与规模化部署。在工业应用背景下开展相关基础研究,立足现实条件对新材料及组件技术进行交叉验证,加快确定科学的选材方向以加速推动电池技术演进^[32]。

4. 应用成本不理想

储能的成本问题一直是制约商业化、规模化发展的瓶颈因素。以当前的主流产品为例,百兆瓦级锂离子电池的全生命周期内成本最低约为0.67元/kW·h,明显高于抽水蓄能成本(0.21~0.25元/kW·h)^[33]。近年来,我国储能技术尽管进步明显,但与发达国家的先进水平相比仍存在差距。电化学储能主要用于调频、容量备用等,如美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰市场中调频辅助服务约有80%采用锂离子电池,澳大利亚参与调频的在运储能装机(110 MW)中约有98%采用锂离子电池^[34]。电化学储能的优势在于响应能力快速、地理环境要求不高,更适合较高功率要求的应用场合;但在较高放电时长需求的调峰方向,相应技术成本尚难以与传统发电资源竞争。

五、我国电化学储能技术发展方向与建议

(一) 发展目标

面向“双碳”战略目标,以产业创新发展、示范应用为牵引,针对实际应用场景下的电化学储能性能需求,以电化学储能关键材料和结构创新为主攻方向,深化电化学储能技术体系的基础创新与应用研究。建设并完善关键材料的研发、测试、应用验证智能化平台,尽快形成自主可控的关键核心技术体系,推动储能技术发展,促进能源绿色低碳转型。

到2025年,运用低碳化、数字化、智能化方法,健全电化学储能标准体系,实现关键技术自主可控;

能量型锂离子电池的单体比容量 ≥ 300 W·h/kg,功率型和混合型电池的单体比容量 ≥ 200 W·h/kg,通过结构创新实现材料利用率 $\geq 92\%$;基本建成储能电池的模型化、数字化体系,显著提升产品性能及制造技术水平;电化学储能累计装机规模 ≥ 40 GW,系统综合成本降低30%以上。

到2035年,全面掌握锂离子电池、钠离子电池、新体系电池的的储能单元、系统集成、模块以及智能制造技术;锂电池的单体比能量 ≥ 500 W·h/kg,半固态电池、全固态锂电池、锂硫电池等新体系电池的比能量 ≥ 400 W·h/kg,循环次数 ≥ 1000 次,材料利用率 $\geq 98\%$ ^[13,35];储能电池产业链成熟,全面实现智能化制造;电化学储能累计装机规模 ≥ 110 GW,与电力系统各个环节深度融合,满足新型电力系统的构建需求。

(二) 发展方向

1. 高性能、高安全性、低成本的关键材料

开发高比容量、高电压锂离子电池/钠离子电池的正极材料,通过过渡金属取代、表面修饰、体相掺杂等方式改善深脱离状态下的结构稳定性和放电电压。开发高稳定性、高容量的负极材料,解决充/放电过程中体积膨胀、导电性差等问题;开发高电压、高安全性、宽温区的新型固态电解质,阐明电极材料与电解质的界面特性。攻关隔膜制备工艺及技术,开发高安全性、防短路、耐热的隔膜类型,提升锂离子电池的能量密度、功能密度、循环寿命、安全性并降低产品成本。针对锂硫电池、锂空电池、全固态电池等新体系电池,前瞻研究电池反应新原理与新机制、电极反应动力学调控机制及改性策略,提高技术成熟度以逐步适应工程应用。

2. 储能器件结构优化及评价

开发高能量、高功率、长寿命、低成本的储能器件,设计和优化电芯结构,通过工艺过程、装备标准化控制等技术手段提高单体电池的一致性。研究材料结构、表面、界面、器件与电化学性能的关联及规律,发展电池性能、安全状态的在线智能诊断及预警技术,阐明电池安全影响因素与失效机制。针对储能过程“热-电-力”耦合模型和寿命衰减,突破仿真分析、测试验证、智能检测、精密控制等技术难点,改善电池制造效率和产品质量。推进储能器件规格标准化,提高电池梯次利用、器

件互换的便利性，促进低损耗、低投入、高效率的拆解技术发展，建设智能化、高效率、低成本的锂电池回收生产线。

3. 储能系统多能互补及智能化设计

针对新型电力系统不同应用场景对储能器件的需求，研发储能系统与电池器件的智慧协同控制关键技术。基于能量信息化处理、动态可重构电池网络等技术，建立服役工况下电化学储能器件的在线原位实时监测表征方法；针对全部单体电芯及模组，实时采集电池端的温度、电压、充/放电电流数据，基于统计分析数据合理规避电池的过充、过放现象。运用大数据、可视化、BMS优化等技术，对电池组开展实时数据分析及均衡管理，保持电池状态的趋同性，从使用过程中改善电池的一致性问题。

4. 电化学储能商业化应用模式

立足电力系统的实际需求，提炼“源网荷”侧电化学储能应用场景并推动储能规模化发展，切实解决新能源发电的有效消纳问题。重点依托“新能

源+储能”、基地电力开发外送等模式，合理布局发电侧储能，建立电力“源网荷储”一体化模式；灵活布局用户侧新型储能，发挥供电系统安全稳定运行的辅助保障作用。健全调度运行机制，促进新型储能发挥电力、电量双调节的功能。部署高效率、低成本、高安全性的储能装备，提升储能系统集成的专业化水平，实现储能系统与用能设备之间的良好适配。以电化学储能为代表的新型储能是能源革命的关键支撑技术，本研究针对性提出了发展战略研究框架（见图1）。

（三）发展建议

1. 聚焦储能技术攻关，强化试点示范应用

针对高安全性、长循环、低成本的电化学储能系统开展关键技术攻关，前瞻部署下一代电池体系研发，以电池技术进步驱动规模化市场应用。引导高校、企业、科研院所联合开展技术攻关，建设“产学研”协同的储能技术研发试验基地。重点发展关键核心材料，优化制备技术，探索新型电化学

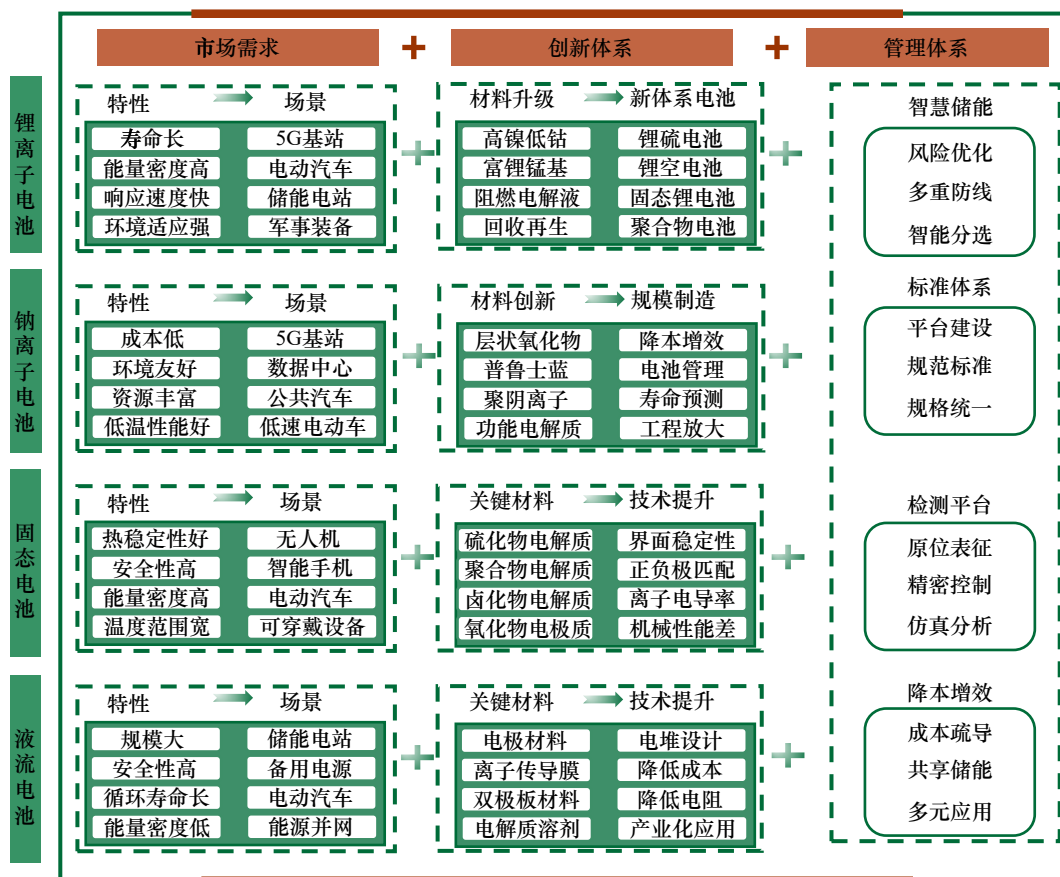


图1 电化学储能技术发展策略研究框架

储能应用场景,着力推进试点示范项目。遴选优势企业、明确重点场景,以“揭榜挂帅”方式推进新型储能应用示范企业与示范场景建设。

2. 聚焦安全发展需求,制定行业标准体系

科学制定行业政策、标准规范、评价体系,及时完善电化学储能产业国家标准、行业标准、团体标准,注重技术开发、产业布局、安全控制的顶层设计与纵向统筹。根据储能发展形势、安全运行的需要,开展主导应用场景的储能标准制定和修订,建立覆盖全产业链的技术标准体系。从储能标准体系的顶层设计出发,加强储能标准体系与现行能源电力系统标准的衔接,推动储能标准的落地实施。

3. 聚焦智能平台能力,完善基础设施建设

以大数据、云计算、人工智能、区块链为支撑,构建智慧管理平台系统,用于电化学储能系统的优化调度、在线监控、安全预警、运行评估等。鼓励采用电化学储能作为数据中心、5G 基站的多元化储能及备用电源装置,支持建设重点实验室、工程研究中心、产业创新中心等技术与发展研究平台。创建新型储能关键材料与工程化应用平台、新型结构与安全防护管理系统平台、新型储能资源再生创新中心,以机制创新为突破口,实现科技成果向产业的转移转化。强化新型储能的应用示范、检测评价等平台作用。

4. 聚焦学科长远发展,培育储能人才团队

加强电化学储能学科建设,鼓励多学科交叉,实施“产教融合”人才培养模式,增强技术人才的理论与应用水平。着重培育电化学储能基础研究人才团队,加大储能技术基础研究投入力度,注重知识产权保护。基于面向应用的储能学科特征,革新应用型科技人才的评价标准,引导高校、科研院所的人才团队主动对接企业实际需求。面向大规模可再生能源消纳的专业发展目标,加快电化学储能专业发展,更好支撑长周期储能产业发展需求。在主要能源企业中,择优设立储能方向的博士后工作站,促进高水平储能科技人才成长。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 28, 2023; **Revised date:** October 30, 2023

Corresponding author: Chen Renjie is a professor from the School of Materials Science & Engineering, Beijing Institute of Technology. His major research fields include high specific energy, high safety secondary

battery materials and devices, special functional power supply, new functional composite electrolyte, and recycling of secondary batteries.
E-mail: chenrj@bit.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2022YFB2502102); Beijing Outstanding Young Scientists Program (BJJWZYJH01201910007023); Shandong Provincial Central Leading Local Science and Technology Development Fund Project (YDZX2023049)

参考文献

- [1] 郑琼,江丽霞,徐玉杰,等.碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议[J].中国科学院院刊,2022,37(4):529-540.
Zheng Q, Jiang L X, Xu Y J, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 529-540.
- [2] Jiang P K, Huang X Y. Editorial: Dielectric materials for electrical energy storage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 675.
- [3] 成润婷,张勇军,李立涅,等.面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J].中国工程科学,2023,25(2):89-99.
Cheng R T, Zhang Y J, Li L C, et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 89-99.
- [4] 任景,周鑫,薛晨,等.发用两侧参与调峰的现货市场联合出清模式设计[J].电力工程技术,2022,41(1):26-33.
Ren J, Zhou X, Xue C, et al. Spot market joint clearing mode with both sides of generation and customer participating in peak regulation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 26-33.
- [5] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
Wu Q, Tu K, Zeng Y F. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884-1898.
- [6] 齐宁,程林,田立亭,等.考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(10):193-207.
Qi N, Cheng L, Tian L T, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [7] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [8] 李晓宇,吴果莲,苑秀娥,等.可再生能源发电侧储能项目经济评价研究[J].电力科学与工程,2023,39(8):41-52.
Li X Y, Wu G L, Yuan X E, et al. Research on economic evaluation of renewable energy generation side energy storage projects [J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(8): 41-52.
- [9] 汤广福,周静,庞辉,等.能源安全格局下新型电力系统发展战略框架[J].中国工程科学,2023,25(2):79-88.
Tang G F, Zhou J, Pang H, et al. Strategic framework for new

- electric power system development under the energy security pattern [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 79–88.
- [10] Su Y N, Dai H L, Kuang L Q, et al. Contemplation on China's energy-development strategies and initiatives in the context of its carbon neutrality goal [J]. *Engineering*, 2021, 7(12): 1684–1687.
- [11] Fichtner M, Edström K, Ayerbe E, et al. Rechargeable batteries of the future—The state of the art from a BATTERY 2030+ perspective [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(17): 2102904.
- [12] 史冬梅, 王晶. 中国、日本、韩国电池技术和产业发展战略态势分析 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(2): 615–628.
- Shi D M, Wang J. Analysis of battery technology and industry development strategy and trend in China, Japan, and South Korea [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(2): 615–628.
- [13] 黄学杰, 赵文武, 邵志刚, 等. 我国新型能源材料发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 60–67.
- Huang X J, Zhao W W, Shao Z G, et al. Development strategies for new energy materials in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(5): 60–67.
- [14] Ryu H H, Lim H W, Kang G C, et al. Long-lasting Ni-rich NCMA cathodes via simultaneous microstructural refinement and surface modification [J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(3): 1354–1361.
- [15] 党荣彬, 陆雅翔, 容晓晖, 等. 钠离子电池关键材料研究及工程化探索进展 [J]. *科学通报*, 2022, 67(30): 3546–3564.
- Dang R B, Lu Y X, Rong X H, et al. Research progress of key materials and engineering exploration for Na-ion batteries [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(30): 3546–3564.
- [16] Xu S Y, Wu X Y, Li Y M, et al. Novel copper redox-based cathode materials for room-temperature sodium-ion batteries [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(11): 118202.
- [17] Ding F X, Zhao C L, Zhou D, et al. A novel Ni-rich O₃-Na [Ni_{0.60}Fe_{0.25}Mn_{0.15}]O₂ cathode for Na-ion batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 30: 420–430.
- [18] Li Y Q, Zhou Q, Weng S T, et al. Interfacial engineering to achieve an energy density of over 200 W·h·kg⁻¹ in sodium batteries [J]. *Nature Energy*, 2022, 7: 511–519.
- [19] Chen R J, Zhao T, Wu F. From a historic review to horizons beyond: Lithium-sulphur batteries run on the wheels [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(1): 18–33.
- [20] Wu F, Ye Y S, Chen R J, et al. Gluing carbon black and sulfur at nanoscale: A polydopamine-based “nano-binder” for double-shelled sulfur cathodes [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 7(3): 1601591.
- [21] Han M S, Mu Y B, Wei L, et al. Multilevel carbon architecture of subnanoscopic silicon for fast-charging high-energy-density lithium-ion batteries [EB/OL]. (2023-06-21)[2023-08-15]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cey2.377>.
- [22] Li Z S, Zhao Z Y, Pan S Y, et al. Covalent coating of micro-sized silicon with dynamically bonded graphene layers toward stably cycled lithium storage [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(28): 2300874.
- [23] Chen Y, Yang L F, Guo F L, et al. Mechanical-electrochemical modeling of silicon-graphite composite anode for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 527: 231178.
- [24] Tang Z, Zhang R, Wang H Y, et al. Revealing the closed pore formation of waste wood-derived hard carbon for advanced sodium-ion battery [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6024.
- [25] Liang J W, Chen N, Li X N, et al. Li₁₀Ge(P_{1-x}Sb_x)₂S₁₂ lithium-ion conductors with enhanced atmospheric stability [J]. *Chemistry of Materials*, 2020, 32(6): 2664–2672.
- [26] Peng J, Wu D X, Jiang Z W, et al. Stable interface between sulfide solid electrolyte and room-temperature liquid lithium anode [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(13): 12706–12722.
- [27] Hu L, Wang J Z, Wang K, et al. A cost-effective, ionically conductive and compressible oxychloride solid-state electrolyte for stable all-solid-state lithium-based batteries [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3807.
- [28] Li Y X, Song S B, Kim H, et al. A lithium superionic conductor for millimeter-thick battery electrode [J]. *Science*, 2023, 381(6653): 50–53.
- [29] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(9): 2772–2780.
- Zhang H M. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(9): 2772–2780.
- [30] Wu F, Qian J, Chen R J, et al. Sulfur cathode based on layered carbon matrix for high-performance Li-S batteries [J]. *Nano Energy*, 2015, 12: 742–749.
- [31] Cheng C Y, Liu H Z, Ouyang C Y, et al. A high-temperature stable composite polyurethane separator coated Al₂O₃ particles for lithium ion battery [J]. *Composites Communications*, 2022, 33: 101217.
- [32] Xiao J, Shi F F, Glossmann T, et al. From laboratory innovations to materials manufacturing for lithium-based batteries [J]. *Nature Energy*, 2023, 8: 329–339.
- [33] 刘阳, 滕卫军, 谷青发, 等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(1): 312–318.
- Liu Y, Teng W J, Gu Q F, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(1): 312–318.
- [34] 张鸿宇, 王宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(2): 766–773.
- Zhang H Y, Wang Y. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(2): 766–773.
- [35] Ren D S, Lu L G, Hua R, et al. Challenges and opportunities of practical sulfide-based all-solid-state batteries [J]. *eTransportation*, 2023, 18: 100272.