DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.07.025

新型电化学储能关键材料与优化技术发展研究

李梓彤，李婉君，张长昆，郑琼，罗丹，肖宇，陈忠伟，李先锋，刘中民*

（中国科学院大连化学物理研究所，辽宁大连 116023）

摘要：新型电化学储能是构建新型电力系统、实现“双碳”目标的关键支撑技术，关键材料的性能直接决定储能器件的能量密度、安全性、寿命与经济性，对保障国家能源安全具有不可替代的战略价值。本文主要围绕锂离子电池、钠离子电池和液流电池三大新型电化学储能体系，系统梳理了电极材料、电解质材料和隔膜材料的研究进展，提出不同材料的分阶段优化技术发展路线。同时，进一步聚焦于材料研发领域的共性关键问题，针对储能材料体系繁杂多样的特点，系统分析了在研究体系布局、资源环境约束、研发模式及成果转化基础设施平台中存在的瓶颈问题。研究提出，应从分散式探索转向体系化布局，强化跨体系的共性基础研究与全价值链协同；从性能单一导向转向全生命周期绿色可持续，将资源可得性、供应链安全与环境影响前置纳入材料研发核心评价维度；从经验试错转向数据智能驱动，构建自主可控的“人工智能+储能材料”研发模式；从实验室孤立创新转向全链条贯通，建立中试验证与标准检测协同推进的成果转化机制，以推动储能关键材料的高质量发展。

关键词：电化学储能；关键材料；电极材料；电解质；隔膜

中图分类号：TM911　　**文献标识码：**A

Key Materials and Optimization Technologies for New-Type Electrochemical Energy Storage

Li Zitong, Li Wanjun, Zhang Changkun, Zheng Qiong, Luo Dan, Xiao Yu, Chen Zhongwei, Li Xianfeng, Liu Zhongmin*

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: New-type electrochemical energy storage are key enabling technologies for building a new power system and achieving the carbon peaking and carbon neutralization goals. The performance of key materials directly determines the energy density, safety, lifespan, and cost-effectiveness of energy storage devices, and they hold irreplaceable strategic values for ensuring national energy security. This study focuses on three major new-type electrochemical energy storage systems (i.e., lithium-ion batteries, sodium-ion batteries, and flow batteries), and reviews the research progress on electrode, electrolyte, and separator materials, while proposing phased optimization roadmaps for the development of these different materials. Meanwhile, the study further focuses on common key issues in the field of material research and development (R&D). Given the complex and diverse nature of energy storage material systems, it analyzes bottlenecks in research framework planning, resource and environmental constraints, R&D models, and infrastructure platforms for the commercialization of research outcomes. The study proposes shifting from a decentralized approach to a systematic one by strengthening cross-system fundamental research and collaboration across the entire value chain; shifting from a performance-oriented approach to a full-lifecycle, green, and sustainable approach, incorporating resource availability, supply chain

收稿日期：2026-07-27；**修回日期：**2026-08-31

通讯作者：*刘中民，中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国工程院院士，主要研究方向为工业催化；E-mail: zml@dicp.ac.cn

资助项目：中国工程院与国家自然科学基金委员会联合专项项目“面向2040的新型储能技术、材料及装备发展战略研究”(L2324215)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

security, and environmental impact as core evaluation dimensions in the early stages of material R&D; transitioning from trial-and-error to data- and intelligence-driven approaches to build an independent “artificial intelligence + energy storage materials” R&D model; and moving from isolated laboratory innovation to end-to-end integration by establishing a technology commercialization mechanism that synergistically advances pilot-scale validation and standards testing, thereby promoting the high-quality development of key energy storage materials.

Keywords: electrochemical energy storage; key material; electrode material; electrolyte; separator

一、前言

“十四五”以来，在“双碳”目标引领下，我国新能源产业快速发展，新能源正由补充能源向主力能源加速转型。然而，装机规模的快速增长与系统调节能力建设滞后之间的矛盾、多能互补与系统集成优化不足等深层次结构性问题逐渐暴露，新型储能作为提升系统灵活性与供电可靠性的核心技术，其关键支撑作用日益凸显。截至2025年年底，我国新型储能累计装机规模为1.36×10^{8} kW，较“十三五”末增长超40倍，居世界首位。2025年10月审议通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》，再次强调加快建设新型能源体系，大力发展新型储能。

在众多新型储能技术路线中，锂离子电池、钠离子电池和液流电池等电化学储能技术凭借响应速度快、选址灵活、模块化程度高等优势，已成为中长时储能场景的核心支撑，在我国新型储能总装机中占比超过98%。然而，这三条技术路线面临同一根本性制约，即能量密度、安全性能、循环寿命与成本之间的制衡关系。这一制约源于电池电极、电解质等核心材料的本征理化特性，是电化学储能技术性能迭代与规模化应用的主要瓶颈。

在全球科技竞争与能源转型背景下，突破新型储能材料瓶颈是技术迭代与产业发展的关键环节和必然路径。上述性能制衡的本质是在资源有限性与物理化学规律的约束下，如何打破多性能指标此消彼长的困局，实现协同优化。因此，面向“十五五”能源发展的新需求，深入研究新型电化学储能关键材料的科学问题、技术瓶颈与创新路径具有必要性和紧迫性。

本文将关键材料作为多能融合体系的微观基石，聚焦锂离子电池、钠离子电池和液流电池三大电化学储能体系，系统分析其关键材料面临的问题与挑战，总结优化策略及发展路径，并提出相应对策建议，以期为推动我国新型电化学储能产业高质量发展、加快构建新型能源体系提供支撑。

二、新型电化学储能典型关键材料发展概况

核心电化学储能器件结构如图1、图2所示，关键材料体系主要由电极材料、电解质及隔膜等构成。以下将围绕这三类材料进行系统梳理。

（一）电极材料

电极是进行电化学反应的核心场所，其性能直接影响反应速率、电池内阻和电解液传输过程，并决定了储能器件的能量密度、功率密度和循环寿命等关键性能指标。电极材料的选择根本上是由不同

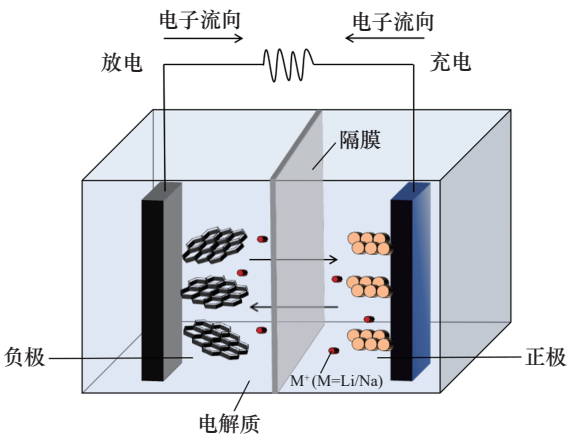

图1　锂/钠离子电池结构图

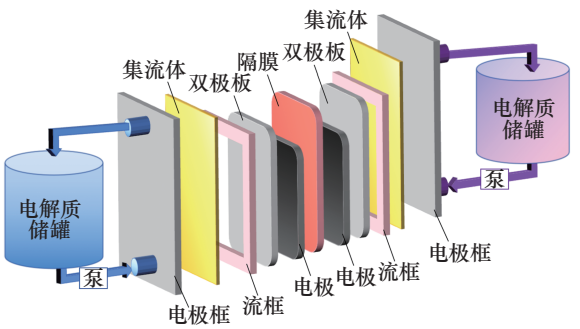

图2　液流电池结构图

电化学储能技术的内在机制所决定，各储能技术对应差异化的电极材料体系，如表 1 所示[1-4]。

1. 电极材料优化技术进展

高性能电极材料的关键在于平衡多种核心指标，并在此基础上优化制备工艺与资源利用策略。理想的电极材料应具备高理论比容量、高导电性及优异的稳定性，同时兼顾环境友好与低成本的要求[5]。

（1）锂离子电池电极材料

正极材料对锂离子电池的能量密度与电压起决定性作用。常见正极材料性能如表 2 所示[6,7]。

磷酸铁锂是当前储能锂离子电池中应用最广泛的正极。但其橄榄石型结构导致电子导电性差、锂离子迁移速率缓慢，低温下离子扩散能力骤降，能量密度难以突破等问题[8]；同时，当前高能量密度磷酸铁锂电池循环寿命通常在数千次量级，若要满足长时储能等场景下数万次循环的需求，仍需深入解决材料界面副反应与结构缓变引起的容量衰退问题。围绕上述瓶颈，元素掺杂、晶粒纳米化、碳包覆或金属氧化物包覆等改性策略持续演进[9]，推动高能量密度体系循环寿命从当前数千次向万次以上迈进。在更高能量密度需求驱动下，高镍三元材料（如 NCM811）作为高比能方向快速迭代。为进一步降低成本并提高容量，富锂锰基氧化物等新一代正极受到广泛关注，但其不可逆阴离子氧化还原反应易引发晶格氧释放与结构失稳[10]。通过氧位点的多阴离子熵设计等手段，可有效抑制氧逸出、稳定氧骨架，综合提升容量保持率与电压稳定性[11]。

在负极方面，石墨类材料占主导，市场份额超过 95%。石墨类材料成本低、性能可靠，但理论比容量偏低，能量密度提升空间受限。负极材料正从石墨向硅基负极、锂金属负极等方向延伸，常见负极材料性能如表 3 所示[6,12-13]。

硅具有约 4200 mAh/g 的极高理论容量，然而嵌锂体积膨胀超过 300%，带来颗粒粉化、电接触丧失及固体电解质界面膜（SEI）持续增厚等问题[14]。尺寸效应研究表明，液态电池中硅颗粒避免粉化的临界尺寸为 150 nm[15]。施加堆叠压力被证实可有效影响硅电极的尺寸效应，研究人员[16]通过施加堆叠压力将全固态电池硅电极临界尺寸提升至约 1 μm。同时，借助多孔、核壳等纳米结构设计，结合掺杂、粘结与界面包覆，可缓解体积效应、增强固体电解质中间相的机械与化学稳定性[17-18]。

此外，电极制造工艺的革新亦为电池性能提升注入新动力，如干法电极技术可规避传统湿法涂布存在的面容量低、极片易开裂及干燥能耗高等缺陷，有研究将其与高离子电导率正极添加剂结合，在锂金属电池中实现了 12.7 mAh/cm^2 的高面容量和 464 Wh/kg 的高能量密度[19]。

（2）钠离子电池电极材料

钠离子电池的正极材料存在三条并行技术路线，各有优劣，主要性能如表 4 所示[20-21]。其中可逆比容量作为衡量正极材料储钠能力的关键指标，直接决定了电池的能量密度水平。

表 1　主要储能器件电极材料

储能器件	正极材料	负极材料
锂离子电池	钴酸锂、三元材料、磷酸铁锂、锰酸锂、导电聚合物等	石墨、钛酸锂、硅基材料、锂金属等
钠离子电池	聚阴离子类化合物、层状过渡金属氧化物、普鲁士蓝类化合物	硬碳、软碳、合金类材料等
液流电池	石墨毡、碳毡、碳布等碳基材料	石墨毡、碳毡、碳布等碳基材料

表 2　锂离子电池常见正极材料性能对比表

正极材料	理论容量/(mAh·g^{-1})	工作电压（Li/Li$^+$)/V	成本	工艺成熟度	核心瓶颈
钴酸锂	274	3.0~4.45	高	量产	高压稳定性差，易结构塌陷
锰酸锂	148	3.0~4.3	低	量产	循环中易造成可逆容量大幅下降
磷酸铁锂	170	2.5~4.2	低	量产	能量密度已达天花板、低温性能差
高镍三元	276	2.8~4.3	中	量产	热稳定性差、循环衰减快
富锂锰基	378	2.0~4.8	较低	中试	倍率性能较差、首圈库伦效率低、性能衰减
磷酸锰铁锂	170	4.1	较低	量产初期	离子 / 电子传输能力和晶体结构稳定性较低

表3　锂离子电池常见负极材料性能对比表

负极材料	理论容量/（$mAh·g^{-1}$）	工作电压（Li/Li^+）/V	体积膨胀/%	成本	工艺成熟度	核心瓶颈
石墨	372	0.10~0.2	12	低	量产	理论容量已接近极限，能量密度提升空间有限
钛酸锂	175	1.0~2.5	1	高	量产	理论容量和电导率较低，倍率性能较差
硅	4200	0.01~3.0	>400	中	实验室	体积膨胀致使电池容量衰减、生成新SEI膜阻碍锂离子传导
硅碳复合	取决于复合比例	0.01~3.0	15~120（与复合比例密切相关）	中	低硅量产／高硅小批量量产	循环寿命受限，首周效率偏低，膨胀导致电极结构失效
锂金属	3860	0	无限制	高	实验室／中试	充电过程易形成锂枝晶，从而造成内部短路；易出现热失控

表4　钠离子电池常见正极材料性能对比表

正极材料	可逆比容量/（$mAh·g^{-1}$）	工作电压/V	成本	工艺成熟度	核心瓶颈
层状氧化物	85~200	1.5~4.5	中高	量产	空气敏感、结构相变复杂易导致容量衰减和极化
聚阴离子	85~150	1.5~4.5	中高	量产	电子导电率低
普鲁士蓝	75~170	2.0~4.5	低	中试	结晶水难控制，可能腐蚀材料、影响性能

层状过渡金属氧化物因制备工艺与锂离子电池三元正极兼容、比容量和电压较高、技术相对成熟，率先实现商业化应用，但仍面临结构相变复杂和循环寿命短等挑战。当前主要的解决技术路线有体相结构调控、表面界面工程及两者的协同优化等。研究人员[22]利用表面残留碱性物质通过气固反应构建Na_2CO_3纳米层，增强了空气与电化学界面的稳定性，并借助铝掺杂引入强铝–氧键合并调节键长以抑制相变，实现了循环稳定性和倍率性能的协同提升。聚阴离子化合物具有安全性高、寿命长、热稳定性强等优势，理论循环寿命可超过10 000次，但本征电子电导率较低。碳包覆是提升电导率最为有效的优化策略之一，$Na_3V_2(PO_4)_3$/C复合材料在20 C倍率下循环10 000次后容量保持率仍达79%[23]，展现出优异的长循环稳定性。当前与磷酸铁锂结构类似的磷酸焦磷酸铁钠因结构稳定性和热稳定性优势，已进入规模制备阶段。但该体系压实密度偏低，能量密度偏低使其电池瓦时成本偏高。此外，通过钠超离子导体型三维骨架结构设计、氟取代提升工作电压等策略，可进一步协同优化材料的能量密度与功率性能[24]。普鲁士蓝类化合物理论比容量可达170 mAh/g，兼具成本低、倍率性能好和循环寿命长等特点，然而结晶水脱除困难且易再次吸湿，体积能量密度偏低，优化策略主要包括晶体缺陷调控与元素掺杂两类[25]。

在负极方面，硬碳因初始放电容量较高、结构稳定性良好，被视为最具应用前景的材料，但存在首周库仑效率低、倍率性能差、储钠机制尚未完全明确等问题。在优化策略方面，硬碳主要通过杂原子掺杂（如P、S、N）增大层间距、调控闭孔尺寸，以改善电子结构、提升Na^+扩散动力学[26]；通过表面改性抑制电解液分解、界面副反应、金属离子溶出等界面失效问题，协同改善电极循环稳定性与电化学性能[27]。预计钠离子电池正极将朝着高比能方向开发多元素协同的新型材料，不同正极技术路线将长期共存、相互竞争，负极持续优化硬碳结构。

（3）液流电池电极材料

与锂／钠离子电池中电极材料本身作为活性物质存储能量不同，液流电池的电极仅提供电化学反应的催化界面和电子传导通道，能量存储于液态电解质中。这一本质差异决定了液流电池电极的核心评价指标不是比容量，而是电化学催化活性、传质效率和长周期稳定性。

当前，全钒液流电池商业化电极以碳毡和碳布为主，均具备良好的电化学反应活性、导电性与耐

电解液腐蚀性。其中碳毡由预氧纤维经无纺针刺制成，孔隙率高，已成为市场主导。但碳毡电化学活性不足，限制能量效率与功率密度；且上游预氧丝及预氧毡高度依赖进口，制约了规模化发展。针对电化学活性低的问题，通常采用构建活化处理、引入催化剂、设计新型电极结构等方法提高活性与强化传质，并保持良好的循环稳定性[28]。同时协同优化压缩比、厚度、流场结构与超薄电极设计，缩短电子与活性物质传输路径，基于此，新一代30 kW和70 kW电堆采用超薄电极与流场协同，功率密度较早期提升一倍、成本降低40%[29]。未来液流电池电极将向高活性、高传质、低极化与系统集成化演进，预氧丝及预氧毡国产化加速，产业链自主可控能力持续提升。

2. 电极材料优化技术发展路线

基于不同储能体系电极材料的成熟度与产业基础，建议分阶段开展研究部署与重点突破，有效支撑新型能源体系的发展需求。

第一阶段（2025—2030年）：持续推动成熟改性技术深化应用。本阶段以成熟体系的规模化应用与新兴体系的中试验证为主。在锂离子电池领域，磷酸铁锂正极推进多元素共掺杂、晶粒纳米化与先进碳包覆协同优化，从单一性能提升迈向综合电化学性能跃升；硅碳负极视膨胀控制突破情况，推动低硅含量（5%~10%）产品在部分储能场景规模化应用，若性能不及预期则仍以石墨负极为主力，强化预锂化与膨胀抑制技术攻关；开展高比容富锂锰基、低成本高镍三元材料中试验证及优化。在钠离子电池领域，推动商用层状氧化物正极可逆比容量稳定在140~190 mAh/g，加快聚阴离子化合物正极在轻型动力、启停电源等市场导入，持续优化普鲁士蓝类正极的工艺优化；同步推进硬碳负极微观结构调控与表面包覆改性，提升国产化硬碳的稳定性，力争首周库仑效率稳定至90%以上。在液流电池领域，以碳毡/碳布为基体，通过结构设计和表面改性提升电化学活性与亲水性，协同推进超薄电极与流场结构优化。

第二阶段（2031—2035年）：聚焦稳定性验证与中试放大。本阶段以中试体系的中试放大与小批量导入为主，重点开展长周期稳定性验证与工程化适配。在锂离子电池领域，推动高比容富锂锰基正极和低成本高镍三元正极扩大中试规模；在限定膨胀率的前提下，高硅含量硅碳负极进入循环次数验证，与此同时，中低硅含量路线仍作为兜底方案并行推进，其攻关方向侧重于优化预锂化技术与黏结剂体系；同步推进锂金属负极界面稳定性研究。在钠离子电池领域，推动高性能层状氧化物、聚阴离子化合物、普鲁士蓝类正极进入规模化应用，三类材料体系同步推进万次级以上循环稳定性验证与工程化迭代。在液流电池领域，开展高活性改性碳毡/碳布千次至万次循环中试验证，考察高电流密度下的传质效率和耐久性。

第三阶段（2036—2040年）：加速成熟体系工程放大与新体系持续开发。本阶段以新兴体系的量产突破与产业化格局形成为主。在锂离子电池领域，富锂锰基正极与硅碳负极有望协同实现规模化应用。锂金属负极界面工程攻关同步推进，或可实现电芯能量密度进一步突破，若技术成熟不及预期，硅碳负极仍作为主力，攻关方向涵盖低成本界面修饰与体相结构调控。在钠离子电池领域，层状氧化物、聚阴离子、普鲁士蓝三类正极形成并行发展格局，高稳定国产化硬碳制备工艺成熟。在液流电池领域，实现高活性、低极化、超薄化电极与流场–双极板一体化设计的规模化应用，并结合复合膜使电堆成本较当前降低40%以上。在新体系材料方面，支持氧变价正极材料等在富锂体系之外开辟新的高容量电极设计路径；推动新型复合电极在成本可控、制备工艺标准化的前提下，在细分场景中初步形成稳定市场。通过上述部署，引导电极材料体系形成传统改性材料、先进电极材料与新体系材料并行发展、场景适配的多元格局，全面支撑不同储能应用对安全、成本与性能的差异化需求。

（二）电解质材料

电解质作为离子传输的核心介质，其性能直接影响电极反应效率和隔膜的离子导通效果，并与电极材料兼容性、隔膜孔隙结构设计密切相关。理想的电解质应具有高离子电导率、低电子电导率、宽电化学窗口、良好的温度适应性、良好的热稳定性和化学稳定性、安全无毒且成本低廉等优势。

当前，锂离子电池与钠离子电池的电解质体系高度相似，均主要包括液态电解质、固态电解质和凝胶聚合物电解质三大类型。其中液态与固态电解质是重点发展方向，主要类别及特点如表5

所示，全固态和凝胶聚合物电解质尚未实现规模化生产，仍处于研究探索阶段。与锂 / 钠离子电池电解质仅用于离子传输不同，液流电池电解质作为电活性物质的载体直接参与能量存储，兼具离子传导与储能介质双重功能。当前液流电池电解质包括无机体系和有机体系两大类，主要类别及特点如表6所示。

1. 电解质材料优化技术进展

（1）锂离子电池 / 钠离子电池电解质

在液态电解质方面，锂离子电池以六氟磷酸锂（$LiPF_6$）与有机溶剂组合为主流，具备高离子电导率与成熟工艺，但有机溶剂易燃，存在安全隐患。钠离子电池液态电解质以六氟磷酸钠（$NaPF_6$）有机体系为主，热稳定性相对较好；高氯酸钠（$NaClO_4$）热稳定性最优但具有易爆特性，实际应用受限；含氟磺酰亚胺盐类热稳定性好且无毒，但对铝集流体存在腐蚀[30]。围绕上述瓶颈，锂 / 钠离子电池液态电解质的优化主要聚焦于提升界面稳定性、拓宽电压窗口与增强安全性，通过溶剂 – 盐 – 添加剂的协同组分设计及溶剂化结构调控，实现综合性能的平衡[31]。

固态电解质被视为锂离子电池和钠离子电池提升能量密度与安全性的共同发展方向，目前正由液态经固液混合与准固态阶段，逐步向全固态演进。在锂离子电池领域，固态电解质研发应用进度相对领先，已形成聚合物、氧化物、硫化物、卤化物及复合固态电解质等多路线并行格局；钠离子电池固态电解质则整体处于探索阶段，但距离规模量产仍有距离。但目前各技术路线普遍面临内阻较高、电极 / 电解质界面接触电阻大等问题。针对上述瓶颈，学界与产业界正从材料开发和界面修饰两个维度寻求突破。我国科研人员先后开发出PMA/PEG-$LiClO_4$-SiO_2复合聚合物电解质、可液相合成的Li_2ZrCl_6卤化物电解质以及高离子电导率$Li_3Zr_2Si_2PO_{12}$氧化物电解质等[32]。在复合固态电解质方向，构建有机 – 无机复合体系并利用渗流结构增强界面离子传输，已成为提升综合性能的重要策略[33]。在产业化方面，国内形成多技术路线并行发展格局，具体进展如表7所示。

（2）液流电池电解质

当前，液流电池电解质以钒体系最为成熟，其作为核心储能介质，关键指标在于钒离子浓度与离子导电性。目前产业化钒电解液浓度通常为1.6~1.7 mol/L，制约能量密度[34]；且常规电解液热稳定性不足，温度超过50 ℃时水合VO_2^+易脱水脱氢转化为V_2O_5沉淀，易引发局部电压尖峰乃至电堆失效。针对这一瓶颈，研究者发展了阴离子 – 阳离子配位策略，通过引入Cr^{3+}作为稳定剂抑制VO_2^+水合

表5　锂离子电池 / 钠离子电池电解质主要类别及特点

电解质类别	优点	劣势
液态电解质	高离子电导率、优异界面接触、技术成熟	有机溶剂易燃，安全性差
聚合物固态电解质	柔顺性好、安全性高、加工性好	室温离子电导率低，需高温工作
氧化物固态电解质	化学稳定性和热稳定性好，电化学窗口宽	固 – 固界面阻抗大、晶界电阻高
硫化物固态电解质	室温离子电导率高（与液态相当）	化学稳定性和空气稳定性差，产生H_2S存在安全隐患、高电压下易分解
卤化物固态电解质	室温离子电导率较高，与正极兼容性好	与金属锂负极界面稳定性差
复合电解质	兼具柔韧性与高电导率，综合性能好	界面相容性差、规模化制备难度大

表6　液流电池电解质主要类别及特点

电解质类别	优点	劣势
全钒电解质	能量效率高，循环寿命长	原料成本高，能量密度提升空间受限
锌基电解质	电解液成本低，理论能量密度高	易产生枝晶和析氢副反应，限制单堆面容量和长期循环稳定性
铁基电解质	原料储量丰富，电解液成本低，环境友好	能量密度整体偏低，易产生析氢副反应与渗透交叉问题
有机电解质	原料无稀有金属依赖，分子结构可设计，能量密度上限高	分子合成复杂，高浓度稳定性不足，离子电导率相对较低

表7 部分国内企业固态电解质进展

企业	技术路线	技术成熟度	进展情况
江西赣锋锂业集团股份有限公司	硫化物	量产	量产高纯度硫化锂关键原材料，固态电池小批量向机器人用户送样
北京卫蓝新能源科技股份有限公司	氧化物–聚合物	半固态量产，全固态中试	以“原位固态化”技术解决固–固界面接触难题
比亚迪股份有限公司	硫化物	中试	硫化物全固态电池通过中国汽车技术研究中心有限公司全项车规认证，中试线投产
宁德时代新能源科技股份有限公司	硫化物、凝聚态（半固态）	半固态量产，全固态中试	凝聚态电池能量密度可达500 Wh/kg
清陶（昆山）能源发展集团股份有限公司	有机–无机复合电解质	半固态量产，全固态中试	拓展卤化物体系并构建新型有机–无机复合电解质，全固态电池开始中试
国轩高科股份有限公司	硫化物	中试	全固态电池产品能量密度≥400 Wh/kg，2 GWh量产线建设有序推进
华为技术有限公司	硫化物	实验室	布局硫化物固态电解质专利，聚焦界面阻抗与寿命问题

产生沉淀，并将工作温区拓宽至−5~55 ℃[35]。除性能优化外，成本控制是推动钒电解质规模化应用的另一关键维度。目前其成本高度依赖V_2O_5原料价格，国内已开发出短流程制备工艺，通过简化合成步骤、减少中间产物损耗，有效提升了原料利用率并降低了生产成本。

锌基、铁基、有机等其他电解质体系虽各有优势，但同样面临技术挑战。以锌基体系为例，研究人员[36]通过螯合剂调控溶剂化结构，将活性物质溶解度提升至1.7 mol/L并可有效抑制锌枝晶，为碱性体系的性能优化提供了可行路径。未来，液流电池电解质将从当前“全钒–全氟”主流路线向“新型–非氟”方向演进，通过产业链协同、电解液租赁等商业模式创新及标准体系完善，加速在零碳能源体系中的规模化应用。

2. 电解质材料优化技术发展路线

基于对各类电解质体系的系统梳理与瓶颈研判，建议分阶段部署、重点突破，实现高安全、高能量密度与低成本的统一。

第一阶段（2025—2030年）：持续推动现有体系优化与验证。本阶段以成熟体系的规模化应用与新兴体系的中试验证为主。在锂离子电池领域，液态电解质仍占主导，推动新型锂盐与功能性添加剂协同优化，引导电解质技术从单一离子传导向多功能界面工程演进；推动半固态电解质规模化应用持续扩大，优化固态电解质界面阻抗问题；同步开展硫化物固态电解质、氧化物固态电解质及复合固态电解质等的性能优化与中试验证。在钠离子电池领域，加快$NaPF_6$基有机溶剂电解液的配方优化与添加剂体系导入，优化电解液与正负极的界面兼容性；同步推进固态电解质的实验室性能验证与小批量制备工艺探索。在液流电池领域，钒电解液提质降本，将钒浓度提升至2.0 M并抑制高温沉淀，系统能量密度提高约30%；同步优化锌基、有机及铁铬等新型电解液，单侧能量密度超50 Wh/L。

第二阶段（2031—2035年）：加速多元体系交叉融合与工程化。本阶段以中试体系的中试放大与小批量导入为主，推动电解质技术向高安全性与宽温域方向深度融合，优化制备工艺以降低成本。在锂离子电池领域，全固态多路线并行择优，扩大半固态电池市场应用规模。各路线依据技术成熟度动态调整投入权重，若硫化物体系界面稳定性与空气敏感性攻关取得突破，则优先推动其中试放大；若进展不及预期，则加大氧化物、聚合物及复合路线的工程化投入力度，共性攻关方向涵盖硫化物空气稳定性改性、固–固界面调控与干法工艺优化。在钠离子电池领域，推动固态电解质开展中试验证，可借鉴锂离子电池体系技术积累进行跨体系迁移，聚焦离子传导机理与低成本合成工艺。在液流电池领域，推动2.0 M级全钒宽温区电解液中试及万次级循环验证，目标直流侧能量效率达80%以上，锌基、铁基与有机体系中试规模放大。氢负离子电解

质等前沿新型体系完成实验室级电化学性能验证与应用场景探索。

第三阶段（2036—2040年）：构建全固态体系成熟与多元电解质格局。本阶段以新兴体系的量产突破与产业化格局形成为主。推进全固态电池在界面阻抗抑制、成本控制及规模化制备方面取得突破，引导优势电解质体系在特定场景实现工程化应用，聚焦低成本制备工艺优化与关键设备国产化协同，以加速良率提升、降低产线投资，同步推进产业链协同降本以提升全面成本竞争力。在液流电池领域，扩大水系电解质基电池在固定式储能领域的份额，推动其与有机系锂离子电池在大规模储能领域形成互补格局，若新型电解质体系规模化受阻，高浓度全钒体系仍可作为大规模储能主力，攻关重点应关注新型电解质长效稳定机制与低成本批量化制备技术。通过上述部署，引导电解质材料形成“固态渗透、多元并存、场景适配”的成熟格局，全面支撑不同储能应用的差异化需求。

（三）隔膜材料

隔膜的作用是隔离正负极以防止短路，同时作为离子迁移通道形成完整电池回路[37]。理想的隔膜材料应兼具高离子电导率与电子绝缘性、适宜的孔径与孔隙率、优良的化学与电化学稳定性、良好的热稳定性与机械强度及具有市场竞争力的成本[37-38]。因工作原理与体系构成不同，不同的储能技术对隔膜的性能要求也各有侧重。

锂离子电池常用隔膜主要为微孔聚烯烃隔膜、改性微孔聚烯烃隔膜、无纺布隔膜和陶瓷复合隔膜四类[39]。其中聚乙烯和聚丙烯微孔膜凭借良好的机械强度、电化学稳定性及成熟的制备工艺，是主流的商用隔膜材料。无纺布隔膜具有高孔隙率和良好的电解质亲和力，常用材料有纤维素、聚四氟乙烯、聚偏氟乙烯等。陶瓷复合隔膜在基膜上涂覆无机颗粒，显著提升隔膜的热稳定性与对有机电解质的润湿性，其孔隙率介于微孔聚烯烃隔膜和无纺布隔膜之间[39]。由于钠离子电池与锂离子电池高度相似，现有聚烯烃隔膜产品也是常用的隔膜体系。

液流电池用隔膜的功能需求核心在于膜的高离子选择性，即在隔绝正负极活性物质交叉共混的同时，保证特定载流子（例如H^+、OH^-、K^+）的传递。目前商业应用以离子交换膜为主，可分为阳离子交换膜（CEM）和阴离子交换膜（AEM）。CEM以全氟磺酸离子交换膜最为常用，其中美国科慕公司的Nafion系列长期占据市场主导地位。近年来，我国在相关领域实现重要技术突破与产业化进展，以山东东岳未来氢能材料股份有限公司、苏州科润新材料股份有限公司、辽宁科京新材料有限公司等为代表的国内企业，相继自主研发并实现了全氟磺酸离子交换膜的规模化制备与稳定供应，逐步扭转了长期依赖进口的局面。国产离子交换膜的市场份额从2022年的约30%迅速提升至2024年的80%以上。与CEM相比，AEM通常具有更好的阻隔性能，但离子电导率较低。

1. 隔膜材料优化技术进展

商用锂离子电池隔膜的改性主要针对其电解质亲和力较低、热收缩和机械强度不足等问题。主要改性策略包括表面涂覆、聚合物功能化以及构建陶瓷–聚合物功能化多元混合结构等[40-42]。有机修饰策略亦展现出独特的调控功能，例如通过构建共价有机聚合物网络改性隔膜来调控锂离子溶剂化结构，促进锂离子传输并有效抑制多硫化物的穿梭效应[43]。此外，氧等离子体处理等方法可在隔膜表面引入功能基团，显著提升电解液润湿性和保留性，展现出更低的界面电阻和稳定的循环性能，但此类表面改性需兼顾对膜老化行为的影响[44-45]。碳基纳米材料、金属氮化物和金属硫化物等也被用于表面功能化，进一步丰富了改性策略。

钠离子电池隔膜实用化需要解决的核心问题有两方面：一是与钠离子电池电解质高化学兼容性的聚烯烃隔膜[46]，二是面向低成本储能定位的高性价比基膜。钠离子电池隔膜提升润湿能力的方法与锂离子电池隔膜类似，如涂覆聚多巴胺等高亲水性材料[47]或通过等离子体处理引入极性官能团[48]。在降本方面，纤维素基隔膜由于其优异的结构和低廉的价格受到关注[49]。钠离子电池隔膜需针对不同电池体系的差异化需求定制化开发，同时兼顾原材料选择、制造工艺与改性策略的综合成本优化，推动功能隔膜规模化商业应用。

液流电池隔膜中全氟磺酸离子交换膜虽已实现规模化应用，但仍存在选择性偏低、成本高昂等问题，非氟离子交换膜虽具有低成本与高选择性潜力，却普遍面临离子电导率偏低及离子交换基团易诱发聚合物骨架降解的挑战[50]。针对上述局限，中

国科学院大连化学物理研究所创新性地提出了“离子筛分传导”概念，首次将多孔膜应用于液流电池中[37,51]。该类膜不依赖离子交换基团，通过控制膜孔径等孔结构，使孔尺寸介于活性物质和载流子尺寸之间，同时提升了膜的选择性与高离子传导率。多孔膜具有较高的成本竞争优势，目前已成功实现规模化制备并在中科能源材料科技（大连）有限公司进行产业化，为降低液流电池系统成本提供了有效路径。此外，液流电池隔膜需进一步解决离子选择性与导电率之间的权衡问题。通过调控膜内微孔结构以构建高效的离子输运通道，已被证实为一条具有前景的技术途径[52-53]。尽管非氟多孔膜在选择性–传导率平衡方面已取得进展，但仍面临膜稳定性不足、膜电阻仍较高、精确表征方法有待完善等技术瓶颈[54]，并且其商业化应用需进一步突破长循环稳定性、规模化制备与低成本制造工艺的难题。

2. 隔膜材料优化技术发展路线

基于不同储能体系的隔膜需求差异与技术成熟度，建议分阶段实现从表面改性到结构创新、从材料迭代到体系适配的跨越。

第一阶段（2025—2030 年）：推进传统隔膜深度改性升级。本阶段以成熟体系的规模化应用与新兴体系的中试验证为主。在锂离子电池领域，微孔聚烯烃膜仍占据市场主导地位，在现有技术基础上，针对表面处理技术的不足开展技术攻关，例如陶瓷涂层均匀性控制等，引导表面处理技术从单一润湿性改善向多功能界面工程演进；推动陶瓷涂层规模化应用持续扩大，优化陶瓷颗粒脱落与堵孔问题；同步开展陶瓷–聚合物功能化多元复合隔膜、共价有机聚合物网络等新型功能化隔膜的实验室验证。鉴于新型功能化隔膜制备工艺复杂、成本较高，若难以实现连续化制备，已具备工程化基础的陶瓷涂层隔膜可作为过渡支撑方案并行推进，攻关重心相应调整为成膜工艺优化与低成本连续化制备技术。在钠离子电池领域，加快亲水材料涂覆与等离子体处理等调控手段导入，优化聚烯烃隔膜与钠离子电池电解质的兼容性；同步推进纤维素基隔膜的实验室性能验证与小批量制备工艺探索，聚焦纤维素基隔膜力学性能提升与热稳定性改性策略等。在液流电池领域，深化离子筛分传导机理研究，推动膜微孔结构调控技术持续优化，提升离子传导率与选择性的平衡水平，同步开展新型膜材料体系探索。

第二阶段（2031—2035 年）：加快新型隔膜中试放大与体系适配。本阶段以中试体系的中试放大与小批量导入为主，推动隔膜技术向功能化与精准调控方向深度融合，优化制备工艺连续化、自动化水平，通过规模效应逐步优化单位成本。在锂离子电池领域，推动陶瓷–聚合物功能化复合隔膜进入中试验证，重点通过界面接枝、原位聚合等手段强化有机–无机层间结合强度；同步部署共价有机聚合物网络等下一代功能化隔膜的工程化前期验证，评估其连续化制备的可行性。在钠离子电池领域，推动纤维素基隔膜从实验室走向小批量中试，验证其与钠离子电池体系的适配性及成本竞争力。在液流电池领域，部署新型离子传导膜进入中试验证，聚焦规模化制备工艺优化、性能均匀性控制策略与万次以上循环验证。建立跨尺度精确表征与高通量筛选体系，通过分子结构设计优化选择性与传导率的平衡，进一步支撑系统能量效率提升。

第三阶段（2036—2040 年）：构建多元体系成熟格局与新体系持续开发。本阶段以新兴体系的量产突破与产业化格局形成为主。在锂离子电池领域，预计陶瓷–聚合物功能化复合隔膜市场占比提升，推动成膜工艺成熟的共价有机聚合物网络改性膜等下一代功能化隔膜突破成膜工艺等瓶颈后进入应用验证。在钠离子电池领域，推进纤维素基隔膜的实际应用，关注纤维素基隔膜规模化制备工艺优化与长期稳定性提升。在液流电池领域，优化完善跨尺度精确表征方法，指导开发新一代离子传导膜材料。通过上述部署，引导隔膜材料体系形成多元并存、场景适配格局，全面支撑不同储能应用对安全、成本与性能的差异化需求。

三、新型电化学储能关键材料面临的共性问题

当前，新型电化学储能材料开发正从单一性能突破，迈向兼顾高能量密度、高安全性、长循环寿命与低成本的全局优化。然而，从材料研发应用到支撑储能产业发展、助力“双碳”目标实现，还存在一系列共性挑战，需要加强规划、有效布局、持续投入。

（一）跨体系共性研究不够深入，材料研发规划需要系统性布局

目前，储能产业已形成以锂离子电池为主体、多元化发展的格局，各类储能体系也对应着庞大而多元的材料支撑系统。尽管不同储能体系对材料的具体性能要求有所差异，但从成分、结构与性能的角度看，各类材料有共性的理论基础。当前研发对共性机制的挖掘与认识仍显不足，材料设计大多依赖既有经验和试错式研发，尚未形成基于理论认知的精准设计与预测能力。新型电化学储能体系面临的深层挑战，归根结底是一系列基础科学问题尚未根本解决，制约着储能材料从经验驱动向理论驱动的范式转变，可归纳为以下三个层面。一是多场耦合下的多物种输运规律尚未厘清。如固态电解质中离子传输路径曲折度与空间电荷层效应直接制约全固态电池性能提升；钠离子电池硬碳负极中Na^+在复杂孔隙结构中的扩散动力学尚未明确，是首周库仑效率偏低的重要原因之一。二是表界面的相互作用机制研究不足。如液流电池隔膜活性物质堵塞问题，本质上均属界面科学问题。目前界面设计仍高度依赖经验试错，精准设计能力有待提升。三是跨尺度结构演变与性能衰减的关联机制认识有限。如富锂锰基正极从晶格氧释放、结构失稳到宏观电压衰减的跨尺度关联机制尚未厘清，性能失效演变规律缺乏定量描述。此外，共性机理研究成果多停留在论文与实验室层面，尚未充分沉淀为可指导材料设计的普遍原则，难以复用到不同储能体系的材料研发之中。

（二）资源环境约束趋紧，全生命周期评价尚未内化于材料研发

新型电化学储能体系的材料创新，不能仅关注电化学性能，还需将资源可获得性、供应链安全性和全生命周期环境影响纳入核心评价维度。在资源利用方面，我国钴储量不足全球的2%，锂、镍等关键矿产对外依存度高，高镍三元正极材料原料供应长期依赖进口。储能技术路线的选择在很大程度上是资源路线的选择，研发起步阶段应优先发展资源约束小的材料体系。在研发导向方面，新材料开发多以能量密度、循环寿命等性能指标为目标，资源和环境因素往往在后期才被考虑。部分高能量密度材料制备能耗高、污染大，综合代价过高，应前置资源与环境要求，在设计阶段即纳入考量。在全生命周期评价方面，有研究表明三元锂离子电池原材料获取阶段环境影响占比超四分之三，综合环境影响约为磷酸铁锂电池的两倍[55]。但多数材料研究缺乏全生命周期评价数据支撑，研发人员难以在设计阶段判断环境友好性。在电池回收方面，精细拆解及材料直接再生等关键回收技术仍待优化，多种正极与电解质体系混杂致拆解困难、效率低，且部分再生材料品质不稳定。在政策法规方面，欧盟的《电池与废电池法规》对电池设置碳足迹申报、2031年起再生材料最低含量等强制约束，倒逼材料端匹配再生含量、全生命周期溯源等配套要求，相关合规条件构成国际市场准入门槛。

（三）智能化研发范式应用不足，人工智能（AI）赋能储能材料研发的基础尚未确立

AI、高通量计算与自动化实验已在催化、药物设计等领域形成了相对成熟的应用范式与集成工具链，展现出变革性的新材料发现与优化能力。例如，在催化领域，高通量虚拟筛选已能对数万种候选材料进行快速评估，大幅缩短了研发周期；在药物设计中，AI驱动的分子生成与性能预测应用已相对普遍，显著提升了先导化合物的发现效率。然而，在新型储能材料领域，上述智能化手段的应用深度与广度仍显不足，数据驱动的研发范式整体尚处于早期渗透阶段。例如，面向储能材料特性的专用数据库虽有一定基础，但覆盖面有限，其系统性、完整性和标准化程度仍有待提升。储能材料的性能是多因素耦合的复杂函数，涉及电化学、力学、热学等多维参数，而现有数据往往分散在不同实验室、格式不一、条件各异，难以汇聚为可供机器学习模型训练的高质量“数据燃料”。与此同时，面向材料设计与性能预测的专用智能体虽已开始布局，但其功能与精度还需进一步完善，尚未形成从“需求–设计–预测–验证”的闭环加速能力，导致材料探索仍高度依赖研究者的个体经验。

此外，高通量自动化试验平台的建设与其共享机制尚不完善。此类平台能够并行合成与表征海量样品，是连接计算预测与实验验证的关键枢纽，但目前主要由各研发机构自建，类似的相对孤立的建

设模式可能会造成资源的重复投入与数据的碎片化。这也在一定程度上导致了AI辅助设计、虚拟筛选等高效手段在储能材料研发中的应用不足，难以快速响应下游技术迭代的迫切需求。

（四）中试验证与标准体系支撑不足，成果转化通道不畅

中试平台是衔接实验室研发成果和产业化生产的关键桥梁。对储能材料而言，其战略重要性尤为突出。由于储能技术路线多元，所涉及材料种类繁多，涵盖正极、负极、电解质、隔膜等不同体系，各体系在制造方面既具有共性基础问题，又体现出差异化性能需求，加之储能材料迭代速度快，新技术极其依赖中试平台进行放大验证以快速走向工业化。当前，面向储能材料的中试平台普遍存在三个短板：一是规模偏小，单批次合成量多在千克级至百千克级以下，小批量试制成本高，且难以支撑工程验证；二是功能单一，多数平台仅覆盖材料合成，缺乏性能测试、产品验证等能力；三是智能化参差不齐，整体效率有待提升。以硫化物固态电解质为例，其放大需从实验室克级逐级跨越至百吨级乃至千吨级，须全程惰性气氛，还需匹配干法电极、等静压等专用装备，普通仅覆盖合成的中试平台完全无法胜任。目前该领域缺乏开放共享的公共中试平台，企业自建成本高昂，千吨级中试线投资可达数亿元。各企业工艺路线与设备选型各异，中试数据互不共享，同一类放大问题被反复遭遇、重复试错，严重迟滞了全固态电池从实验室走向量产的整体进程。与此同时，公共测试平台亦呈现“小而散”的格局，同类设备在多平台间重复购置、高端仪器配置较少、跨平台数据可比性差，严重制约了对材料构效关系的系统性认知。低水平重复建设进一步加剧了资源浪费。在标准方面，储能材料性能一致性是决定电池一致性与系统安全性的基础，但现行标准多从电池系统角度制定，对材料本征性能缺乏统一规范，难以支撑新体系材料的质量判定与市场准入。

四、新型电化学储能关键材料发展建议

新型电化学储能关键材料正处于从“并跑”到“领跑”的关键跃升期，上述共性问题若不加以破解，将制约产业进阶步伐。面对跨体系协同不足、资源禀赋与环境条件约束、智能化工具应用滞后、中试验证与标准支撑薄弱等现实约束，亟需向“系统布局、智能驱动、贯通转化”的新模式转型。基于此，本文围绕强化材料研发系统性布局、前置资源环境约束、夯实智能化研发基础、打通成果转化通道四个维度，提出面向2040年的发展建议，以期为新型储能关键材料高质量发展提供参考。

（一）强化材料研发系统性布局，突破跨体系共性科学瓶颈

针对跨体系共性研究不够深入、材料设计仍依赖经验试错的问题，需建立从材料本征特性到应用性能需求全链条的科技研发布局，推动材料研发从经验驱动向理论驱动转变。一是加强顶层战略规划。组织专家开展战略研究，形成不同情景下的储能需求分析和布局规划，结合资源禀赋、环境条件、回收处置等约束条件，提出储能产业发展重点领域和阶段规划，进而形成储能材料的规划布局建议，分阶段部署并推动重点项目实施以支持系统化的技术突破。二是聚焦共性科学瓶颈开展定向攻关。设立储能材料共性科学问题攻关专项，重点聚焦界面反应与界面膜形成机制；多价态离子输运与电子传导耦合规律；多场耦合条件下材料结构演变、衰减共性机制与寿命预测等方向，从而强化材料设计的理论支撑，指导实现高效可控的材料合成。三是强化基础研究与应用导向的衔接。构建以企业为主导、市场为牵引的“产学研用”协同体系，通过搭建储能材料协同创新平台，整合科研院所、高校、龙头企业、检测认证机构等创新资源，进而推动共性理论成果能够有效转化为材料设计的指导原则，满足不同储能体系下同类共性材料的系统化研发需求。

（二）前置资源环境全生命周期约束，构筑可持续材料研发体系

针对资源环境约束趋紧、全生命周期评价尚未真正融入材料研发的问题，需将资源可获得性、供应链安全性和全生命周期环境影响纳入材料研发的核心评价维度，在材料设计源头植入绿色可持续理

念。一是优先发展资源约束小的材料体系。在研发起步阶段即向钠、铁等储量丰富的元素倾斜，降低对钴、锂、镍等对外依存度高关键矿产的依赖。同时围绕储能材料建立关键矿产价格波动预警与战略储备机制，依托“一带一路”合作持续拓展海外供给渠道。二是研发导向前置资源与环境要求。改变新材料开发仅以能量密度、循环寿命等性能指标为目标的传统模式，在材料设计阶段即引入全生命周期评价框架，将资源消耗、环境影响、碳排放等指标作为与电化学性能并行的核心评价维度。建立储能材料全生命周期评价基础数据库，为研发人员提供设计阶段的环境友好性判断依据，从源头避免高能耗、高污染材料路线的重复投入。三是完善电池回收与再生利用体系。加快开展退役电池智能拆解、快速检测分选、直接再生利用等关键技术攻关，明确关键材料回收率目标与再生料使用比例要求，形成一次资源与二次资源协同保障格局。四是对标国际绿色贸易规则。加快建立健全储能材料碳足迹核算与认证体系、全生命周期溯源体系，支撑我国储能关键材料及产品满足国际市场准入要求，把握在国际竞争中的主动权。

（三）夯实智能化研发基础，构建AI赋能储能材料新范式

针对储能材料领域智能化应用深度不足、专用数据与模型缺乏等瓶颈，需系统部署“AI+储能材料”的基础能力建设，打通从数据积累到模型预测再到实验验证的闭环。一是构建自主可控的储能材料专用数据基础设施。当前，数据资源正成为各国科技竞争的基础性战略资源。建议由行业主管部门牵头，联合龙头企业与科研院所，统筹建设新型储能材料大数据平台，覆盖正负极材料、电解质、隔膜等全品类，包含电化学性能、力学性能、热学性能、安全性等多维度数据，并统一数据格式、实验条件标注规范与质量评价标准，汇聚分散在各实验室的多维参数数据，形成可供AI模型调用的高质量数据集。二是开发面向核心材料场景的专用模型与工具。开发针对固态电解质、层状氧化物正极、电解液添加剂、高性能隔膜等高端核心材料专用场景的智能体或大模型等AI工具，逐步构建从“需求输入–成分设计–性能预测–实验验证”的闭环加速能力，辅助研究人员提升决策效率。三是建设开放共享的高通量自动化试验平台。依托国家级创新平台建设高通量自动化试验平台，发挥其连接计算预测与实验验证的关键枢纽作用。制定智能实验流程标准和数据标准，建立开放共享机制，打破高通量实验数据与AI数据库之间的壁垒，形成AI与自动化深度融合的高效研发模式。

（四）拓宽成果转化通道，完善中试验证与标准检测协同体系

针对中试验证与标准体系支撑不足、成果转化通道不畅的问题，需系统解决中试平台规模偏小、功能单一、共享不足以及材料标准缺失等短板，打通从实验室到产业化的“最后一千米”。一是建设高水平公共中试平台，破解放大验证瓶颈。针对储能材料品类多、工艺共性强的特点，依托龙头企业或国家级工程中心统筹建设高水平公共中试线。在平台建设上，覆盖如混合、烧结等相对通用工序，采用模块化设计，配备可快速更换的组件或工具，以适应不同材料的柔性切换，将单批次产能提升至百千克级、千千克级以上验证要求；在平台功能上，面向行业提供工艺放大、质量控制、成本核算、产品验证的全流程服务。同时强化中试平台智能化水平。部署自动化数据采集与工艺参数优化系统，实现多技术路线的并行验证与快速筛选，缩短验证周期，提升中试平台的整体效率与数据产出质量。二是建立开放共享机制，避免低水平重复建设。建立健全平台开放共享机制，制定统一的服务规范与收费标准，探索“共享工厂”等灵活形式，避免企业重复投资同类装备。在测试平台方面，建立资源共享平台，推动仪器设备等开放共享，配备统一的测试操作规范与数据标准，提升数据精度与资源利用效率，并逐步建设同一材料跨领域兼容性测试能力，支撑多元化测评需求。三是完善储能关键材料标准体系。聚焦材料本征性能，优先制定材料粒度分布、电解质离子电导率测试、隔膜孔径分布等关键材料性能标准，规范测试方法与允差范围，同步探索建立跨领域材料兼容性评价标准，以加速研发协同与产业化应用。借鉴成熟材料发展经验，建立质量一致性评价体系，以标准推动国产材料批次稳定性提升，为新体系材料的质量判定与市场准入提供依据。

五、结语

全球能源转型深入推进，新型电化学储能已成为重塑能源格局的战略支点，储能关键材料则是决定这一支点强度的根基。本文聚焦锂离子电池、钠离子电池和液流电池三大体系，围绕电极、电解质和隔膜三类关键材料，揭示了材料发展的核心瓶颈与优化路径，阐明了材料发展共性难题；提出了面向2040年分阶段协同技术发展路线，形成了从现有体系深度优化到多元并行、新体系持续开发的渐进式演进蓝图；凝练了跨体系共性基础研究薄弱、资源环境约束趋紧、智能化研发不足、中试验证与标准支撑不够四大挑战，并提出强化系统性布局、前置资源环境约束、夯实智能化基础、拓宽成果转化通道的四维建议。面向2040年，我国应围绕新型电力系统构建与“双碳”目标重大需求，以强化系统性布局锚定方向，以夯实智能化基础注入动能，以贯通成果转化通道架设桥梁，全面打造自主可控、安全高效、绿色低碳的新型电化学储能材料产业体系，为建成新型能源体系、支撑能源强国建设奠定坚实的材料根基。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 27, 2026; **Revised date:** August 31, 2026

Corresponding author: Liu Zhongmin is a research fellow from the Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, and a member of the Chinese Academy of Engineering. His major research feild is industrial catalysis. E-mail: zml@dicp.ac.cn

Funding project: Joint Project of the Chinese Academy of Engineering and the National Natural Science Foundation of China “Strategic Research on the Development of New-Type Energy Storage Technologies, Materials, and Equipment Toward 2040” (L2324215)

参考文献

[1] Mishra A，Mehta A，Basu S，et al. Electrode materials for lithium-ion batteries[J]. Materials Science for Energy Technologies，2018，1(2)：182–187.

[2] 董溱，魏远航，贾雨，等. 钠离子电池聚阴离子型正极材料研究进展[J]. 电源技术，2025，49(6)：1111–1117.
Dong Z，Wei Y H，Jia Y，et al. Research progress of polyanionic cathode materials for sodium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources，2025，49(6)：1111–1117.

[3] Gupta P，Pushpakanth S，Ali Haider M，et al. Understanding the design of cathode materials for Na-ion batteries[J]. ACS Omega，2022，7(7)：5605–5614.

[4] 陈钊，梁沁沁，李玉婷，等. 钠离子电池锡基合金类负极材料研究进展[J]. 储能科学与技术，2025，14(3)：883–897.
Chen Z，Liang Q Q，Li Y T，et al. Recent progress of tin-based alloy-type anode materials in Na-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology，2025，14(3)：883–897.

[5] 崔海星，马莉. 铁铬液流电池专利技术分析[J]. 电源技术，2024，48(5)：812–817.
Cui H X，Ma L. Patent review in Fe/Cr flow battery technology[J]. Chinese Journal of Power Sources，2024，48(5)：812–817.

[6] 韩啸，张成锟，吴华龙，等. 锂离子电池的工作原理与关键材料[J]. 金属功能材料，2021，28(2)：37–58.
Han X，Zhang C K，Wu H L，et al. Working mechanism and key materials of the lithium ion batteries[J]. Metallic Functional Materials，2021，28(2)：37–58.

[7] 詹皓博，刘世琦，王勤，等. 锂离子电池磷酸锰铁锂正极材料研究进展[J]. 稀有金属，2023，47(12)：1669–1688.
Zhan H B，Liu S Q，Wang Q，et al. Development of lithium manganese iron phosphate cathode material for lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Rare Metals，2023，47(12)：1669–1688.

[8] Xue J J，Wang Y，Lin J J，et al. The influence of iron site doping lithium iron phosphate on the low temperature properties and the diffusion mechanism of lithium ion[J]. Ionics，2024，30(12)：7939–7951.

[9] Khan A，Al Rashid H，Roy P K，et al. Challenges and the way to improve lithium-ion battery technology for next-generation energy storage[J]. Energy & Environmental Materials，2025，8(6)：e70088.

[10] Zhu Z，Yu D W，Yang Y，et al. Gradient Li-rich oxide cathode particles immunized against oxygen release by a molten salt treatment[J]. Nature Energy，2019，4(12)：1049–1058.

[11] Zheng C L，Zhang J，Mao H C，et al. Entropic design of anionic site to improve anionic redox stability in lithium-rich cathode[J]. Advanced Materials，2024，36(52)：2413785.

[12] 王娟，张香兰. 锂离子电池硅碳负极材料的应用研究进展[J]. 化学工业与工程，2024，41(6)：75–90.
Wang J，Zhang X L. Research progress on the application of silicon-carbon anode materials in lithium-ion batteries[J]. Chemical Industry and Engineering，2024，41(6)：75–90.

[13] 乔荣涵，桑林，张中洋，等. 石墨与锂金属负极对混合固液锂离子电池短路与针刺安全性的影响[J]. 储能科学与技术，2025，14(10)：3657–3665.
Qiao R H，Sang L，Zhang Z Y，et al. Graphite *vs*. Lithium metal anodes：Safety of hybrid solid-liquid lithium batteries under short circuit and nail penetration[J]. Energy Storage Science and Technology，2025，14(10)：3657–3665.

[14] Xin X Z，Yin Q H，Zhao Z Y，et al. Wheel-hub-inspired silicon anodes with superior stress tolerance for high-energy lithium-ion batteries[J]. Advanced Energy Materials，2026，16(13)：e06650.

[15] Liu X H，Zhong L，Huang S，et al. Size-dependent fracture of silicon nanoparticles during lithiation[J]. ACS Nano，2012，6(2)：1522–1531.

[16] Li M L，Xue D C，Rong Z Y，et al. Stack pressure enhanced size threshold of Si anode fracture in all-solid-state batteries[J]. Advanced Functional Materials，2025，35(8)：2415696.

[17] Li J R，Nie Q，Kang T，et al. Ultrafast joule-heating disproportionation for engineering sub-2 nm Si nanodomains toward stable，

high-performance SiO anodes[J]. Journal of the American Chemical Society,2026,148(25):26017–26026.

[18] Li L Z,Deng Y,Hu K K,Et Al. Nanostructure designing and hybridizing of high-capacity silicon-based anode for lithium-ion batteries[J]. Progress in Natural Science (Materials International),2023,33(1):16–36.

[19] Gao Y N,Yang Y,Yang T Z,et al. Design lithium exchanged zeolite based multifunctional electrode additive for ultra-high loading electrode toward high energy density lithium metal battery[J]. Advanced Energy Materials,2025,15(5):2403063.

[20] Wathoni A Z,Madurani K A,Lai C W,et al. Comprehensive review of sodium-ion battery materials:Advances and performance challenges[J]. ChemPhysMater,2025,4(4):344–359.

[21] 黄洋洋,方淳,黄云辉. 高性能低成本钠离子电池电极材料研究进展[J]. 硅酸盐学报,2021,49(2):256–271.
Huang Y Y,Fang C,Huang Y H. Recent development on electrode materials with high performance and low cost for sodium-ion batteries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2021,49(2):256–271.

[22] Wang Y,Yang T Z,Liu J W,et al. Air-stable manganese-based layered oxide cathode enabled by surface modification and doping strategy for advanced sodium-ion batteries[J]. Nano Energy,2024,131:110260.

[23] Cao X X,Pan A Q,Yin B,et al. Nanoflake-constructed porous $Na_3V_2(PO_4)_3$/C hierarchical microspheres as a bicontinuous cathode for sodium-ion batteries applications[J]. Nano Energy,2019,60:312–323.

[24] Lv Z Q,Ling M X,Yue M,et al. Vanadium-based polyanionic compounds as cathode materials for sodium-ion batteries:Toward high-energy and high-power applications[J]. Journal of Energy Chemistry,2021,55:361–390.

[25] Huang Y F,Mu W N,Meng J J,et al. Modification of Prussian blue analogues as high-performance cathodes for sodium-ion batteries[J]. Chemical Engineering Journal,2024,499:156410.

[26] Sun C C,Kong F J,Fan L L,et al. Modulating electronic structure with heteroatom dopants in porous hard carbon towards ultralong lifespan sodium-ion batteries[J]. Chemical Engineering Journal,2023,470:144419.

[27] Wu Y J,Shuang W,Wang Y,et al. Recent progress in sodium-ion batteries:Advanced materials,reaction mechanisms and energy applications[J]. Electrochemical Energy Reviews,2024,7(1):17.

[28] Yu Z H,Jia X J,Gao H,et al. Unlocking interfacial dynamics of porous electrode *via* vertical-aligned bismuth-nanosheet decorating for vanadium redox flow batteries[J]. Advanced Functional Materials,2025,35(17):2420534.

[29] Lu W J,Li X F. Scaling vanadium flow battery for long-duration energy storage[J/OL]. Nature Energy,2026-06-23. https://doi.org/10.1038/s41560-026-02053-2.

[30] 谢浩杰,郑冬芳,罗霞,等. 钠离子电池关键材料研究进展[J]. 浙江化工,2023,54(12):8–14.
Xie H J,Zheng D F,Luo X,et al. Research progress of key materials for sodium-ion batteries[J]. Zhejiang Chemical Industry,2023,54(12):8–14.

[31] Jiang M Q,Qiu Y L,Mu C K,et al. Unsaturated organic sulfonate-based electrolyte reinforced interface for stable $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$|HC full-batteries with long duration at 4.1 V[J]. Advanced Functional Materials,2025,35(43):2507767.

[32] 李泓,陈立泉. 固态电池关键材料体系发展研究[J]. 中国工程科学,2024,26(3):19–33.
Li H,Chen L Q. Development of key material system for solid-state batteries[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(3):19–33.

[33] Yan Y Y,Ju J W,Dong S M,et al. *In situ* polymerization permeated three-dimensional Li^+-percolated porous oxide ceramic framework boosting all solid-state lithium metal battery[J]. Advanced Science,2021,8(9):2003887.

[34] 李全龙,陶媛媛,王梦迪,等. 全钒液流电池用关键材料技术指标特性需求分析和产业发展状况[J]. 储能科学与技术,2025,14(11):4170–4183.
Li Q L,Tao Y Y,Wang M D,et al. Technical indicator requirement analysis and industrial development status of key materials for vanadium flow battery[J]. Energy Storage Science and Technology,2025,14(11):4170–4183.

[35] Long H Y,Liao C Y,Xie C X,et al. Highly stable electrolyte enables wide temperature vanadium flow batteries[J]. Journal of Energy Chemistry,2025,106:1038–1045.

[36] Zhi L P,Liao C Y,Xu P C,et al. New alkalescent electrolyte chemistry for zinc-ferricyanide flow battery[J]. Angewandte Chemie International Edition,2024,63(28):e202403607.

[37] 鲁文静,李先锋. 液流电池多孔复合离子传导膜研究进展[J]. 化工学报,2024,75(11):3870–3882.
Lu W J,Li X F. Research process of porous composite ion conducting membranes for flow batteries[J]. CIESC Journal,2024,75(11):3870–3882.

[38] 于捷,张文龙. 锂离子电池隔膜的发展现状与进展[J]. 化工进展,2023,42(4):1760–1768.
Yu J,Zhang W L. Development status and progress of lithium ion battery separator[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2023,42(4):1760–1768.

[39] Lingappan N,Lee W,Passerini S,et al. A comprehensive review of separator membranes in lithium-ion batteries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2023,187:113726.

[40] Hyun D E,Jung Y J,Kim T W,et al. Multi-functional Al_2O_3-coated separators for high-performance lithium-ion batteries:Critical effects of particle shape[J]. Ceramics International,2023,49(18):30147–30155.

[41] Yu Z F,Wu S L,Ji C H,et al. Enhancing the β phase of poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membranes for thermostable separators in lithium-ion batteries[J]. ACS Applied Nano Materials,2023,6(12):10340–10350.

[42] Choi H,Lee B S. Pilot scale hybrid organic/inorganic coatings on a polyolefin separator to enhance dimensional stability for thermally stable long-life rechargeable batteries[J]. Polymers,2022,14(21):4474.

[43] Zhao Z Q,Pan Y K,Chen H L,et al. A lithium-affinitive covalent organic polymer network functionalized separator for dendrite-free and high-durability lithium–sulfur batteries under harsh conditions[J]. Advanced Functional Materials,2024,34(37):2402182.

[44] Marques I R，Silveira C，Leite M J L，et al. Simple approach for the plasma treatment of polymeric membranes and investigation of the aging effect[J]. Journal of Applied Polymer Science，2021，138(24)：50558.

[45] Jin S Y，Manuel J，Zhao X H，et al. Surface-modified polyethylene separator *via* oxygen plasma treatment for lithium ion battery[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry，2017，45：15–21.

[46] 王学军，杨峰，杨孝虎，等. 可充电钠离子电池隔膜研究进展[J]. 工程塑料应用，2023(9)：181–188.
Wang X J，Yang F，Yang X H，et al. Research progress on separator of rechargeable sodium-ion battery[J]. Engineering Plastics Application，2023(9)：181–188.

[47] Ho V C，Nguyen B T D，Thi H Y N，et al. Poly（dopamine）surface-modified polyethylene separator with electrolyte-philic characteristics for enhancing the performance of sodium-ion batteries[J]. International Journal of Energy Research，2022，46(4)：5177–5188.

[48] Xue Z X，Zhu D Y，Shan M H，et al. Functional separator materials of sodium-ion batteries：Grand challenges and industry perspectives[J]. Nano Today，2024，55：102175.

[49] Wang J，Xu Z，Zhang Q C，et al. Stable sodium-metal batteries in carbonate electrolytes achieved by bifunctional，sustainable separators with tailored alignment[J]. Advanced Materials，2022，34(49)：2206367.

[50] Yuan Z Z，Li X F，Duan Y Q，et al. Application and degradation mechanism of polyoxadiazole based membrane for vanadium flow batteries[J]. Journal of Membrane Science，2015，488：194–202.

[51] Zhang H Z，Zhang H M，Li X F，et al. Nanofiltration（NF）membranes：The next generation separators for all vanadium redox flow batteries（VRBs）?[J]. Energy & Environmental Science，2011，4(5)：1676.

[52] Zhang H Q，Xu W，Song W J，et al. High-performance spiro-branched polymeric membranes for sustainability applications[J]. Nature Sustainability，2024，7(7)：910–919.

[53] Wang A Q，Breakwell C，Foglia F，et al. Selective ion transport through hydrated micropores in polymer membranes[J]. Nature，2024，635(8038)：353–358.

[54] 鲁文静，李先锋. 液流电池多孔离子传导膜研究进展[J]. 化工学报，2023，74(1)：192–204.
Lu W J，Li X F. Research process of porous ion conducting membranes for flow batteries[J]. CIESC Journal，2023，74(1)：192–204.

[55] Zhang H，Wei Z L，Zhen H S. Carbon footprint comparison and environmental impact analysis of ternary lithium-ion and lithium iron phosphate power batteries[J]. Energies，2025，18(18)：4914.