

# 液流电池关键材料发展研究

丁静怡, 常娜娜, 王一兴, 黄康, 范益群\*

(苏州国家实验室, 苏州 215000)

**摘要:** 液流电池作为支撑新型电力系统的关键长时储能技术, 已成为全球能源转型的战略焦点, 其产业化进程高度依赖关键材料的性能突破与成本优化。本文系统梳理了液流电池关键材料的全球技术研究进展与产业发展现状, 探讨了关键材料对液流电池经济性与市场需求的影响, 总结了我国在液流电池关键材料领域面临的长寿命与低成本难以兼顾的瓶颈、高端材料对外依存度高的供应链短板、市场接受度与商业模式挑战以及支撑材料创新的政策标准体系不足等多重制约。为此, 研究提出了面向 2050 年的液流电池关键材料分阶段发展目标与路径, 推动关键材料体系由当前的“全钒-全氟”主流路线, 向“新型-非氟”方向迭代演进。研究建议, 通过强化产业链协同、创新与材料特性匹配的商业模式、完善材料标准与评价体系, 共同加速液流电池在零碳能源体系中的规模化应用, 助力我国在全球能源战略博弈中占据主动地位。

**关键词:** 长时储能; 液流电池; 关键材料; 隔膜; 电解液

**中图分类号:** TM911 **文献标识码:** A

## Development of Key Materials for Redox Flow Batteries

Ding Jingyi, Chang Nana, Wang Yixing, Huang Kang, Fan Yiqun\*

(Suzhou Laboratory, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Redox flow batteries, as a key long-duration energy storage technology underpinning new power systems, have become a strategic focus in global energy transition. Their industrialization process is highly dependent on performance breakthroughs and cost optimization of key materials. This study reviews global technological advancements and industrial development status of key materials for redox flow batteries. It examines the impact of these materials on economic viability and market demand of redox flow batteries, identifying multiple constraints facing China in this field: difficulty in simultaneously achieving a long lifespan and low cost; supply chain vulnerabilities due to high dependence on imported high-end materials; challenges in market acceptance and business model development; and insufficient policy and standards frameworks to support material innovation. The study proposes a phased development pathway for key materials, advocating for the evolution of the material system from the current mainstream “all-vanadium-all-fluorinated” route toward a “novel-nonfluorinated” direction. It further recommends accelerating the large-scale application of flow batteries within zero-carbon energy systems by strengthening industrial chain collaboration, innovating business models aligned with material characteristics, and improving material standards and evaluation systems. These efforts will help China secure a proactive position in global energy competition.

**Keywords:** long-duration energy storage; redox flow batteries; key materials; membranes; electrolytes

收稿日期: 2025-10-21; 修回日期: 2025-12-30

通讯作者: \*范益群, 苏州国家实验室教授, 研究方向为材料化学工程; E-mail: fanyq@srlab.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国化工新材料绿色低碳发展战略研究”(2024-XBZD-09); 国家自然科学基金项目(22508276)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

### 一、前言

“十四五”时期以来，我国新型储能产业在政策、技术与市场的同频共振下实现了从商业化初期向规模化发展的历史性跨越，装机规模爆发式增长至近 $9.5 \times 10^7$  kW，占全球比重超40%，为能源转型注入了强劲动力。当前，随着可再生能源装机占比超过煤电、新能源发电量占比持续提升，电力系统调节需求正从日内调节向跨月、跨季的长周期平衡演进<sup>[1-3]</sup>。长时储能（尤其持续4 h以上的储能系统）逐渐成为支撑新能源的主体电源与构建新型电力系统的战略基石，不仅是破解高比例可再生能源消纳难题的关键技术路径，更是保障国家能源安全、实现“双碳”目标不可或缺的核心基础设施。

在此背景下，液流电池凭借其本征安全、超长寿命和卓越的规模扩展性，在4 h及以上长时储能场景下具有独特优势，正迎来前所未有的发展机遇，成为全球主要经济体能源战略博弈的关键领域，当前，主要国家和地区正通过差异化的政策路径加速技术攻关与产业布局。美国通过“长时储能攻关”和“储能创新2030”计划，明确将液流电池列为下一代储能核心技术并设定明确的降本目标，聚焦非钒电解液与低成本膜材料开发，构建创新驱动体系；欧盟依托《欧洲电池研发创新路线图》，强调全生命周期可持续性与“产学研”协同；澳大利亚则凭借资源优势推动全产业链本土化发展。与此同时，我国已构建起多层次政策支撑体系：从《“十四五”新型储能发展实施方案》（2022年）明确液流电池核心技术地位，到《新型储能标准体系建设指南》（2023年）完善产业规范，再到《关于推进能源装备高质量发展的指导意见》（2025年）提出多元化技术路线，形成了从技术研发到市场应用的全链条支持。在相关政策的推动下，我国液流电池产业化进程逐步加速，装机规模持续增长，但其市场化应用仍处于早期阶段。截至2024年年底，液流电池在新型储能市场中的占比约为1%，初装成本较高仍是制约其规模化发展的关键因素<sup>[4]</sup>。

液流电池系统由电堆、电解液储供单元及控制系统构成。其中，电堆为功率模块，核心材料包括隔膜、电极和双极板；电解液则构成能量模块。上述关键材料的性能，将直接影响液流电池的储能效率、使用寿命及成本，是制约技术发展的核心要

素。目前，我国在液流电池技术的基础研发和产业应用方面已经取得阶段性进展，但高端隔膜等核心材料（如高性能全氟磺酸（PFSA）树脂）的自主研制水平仍较低。2025年，我国发布的《新型储能制造业高质量发展行动方案》进一步明确，开展液流电池电堆、双极板、电解液、离子交换膜等关键材料技术攻关，提升液流电池能量效率、系统可靠性和全生命周期经济性。为保持我国可再生能源成本优势，保障零碳能源体系重构，亟需推动液流电池关键材料革新。

关键材料的突破与产业化进程将直接决定我国长时储能战略的实现高度与自主可控水平。本文围绕液流电池关键材料，梳理其技术研究进展与产业发展现状，探讨关键材料性能如何决定液流电池市场竞争力，总结关键材料发展面临的问题与挑战，分析研判其发展趋势，制定技术发展路线并为其未来发展提供建议，以期突破关键材料性能瓶颈，推动液流电池高质量发展与大规模应用。

### 二、液流电池关键材料发展现状

#### （一）关键材料技术研究进展

##### 1. 液流电池隔膜材料

隔膜作为液流电池的重要组成部分，一方面，负责传递载流子，构成电流回路；另一方面，阻隔正负极活性物质，防止交叉污染。理想的液流电池隔膜应具备优异的离子传导率、较低的活性离子渗透性以及良好的物理化学稳定性。根据离子传输机制的不同，液流电池隔膜主要分为离子交换膜和多孔离子传导膜。

离子交换膜基于其固定的离子交换基团（如磺酸基、季铵基），通过选择性地传导相反电荷的平衡离子并排斥同电荷离子，实现高效的选择性离子传输。目前，PFSA离子交换膜（如Nafion™膜）在液流电池领域应用最为广泛，其优异的化学稳定性和质子传导率已得到充分验证。然而，这类膜材料存在制备工艺复杂、成本高昂且严重依赖进口等局限性。为了避免含氟膜材料的环境风险并进一步降低膜成本，近年来，芳香族聚合物得到了越来越多的重视，制备工艺简单，成本低廉，具备优异的机械性能、热稳定性和氧化稳定性，被认为是最具潜力替代PFSA膜的候选材料之一。通过在芳香族聚

合物上接枝功能化离子交换基团,目前已经开发出一系列非氟离子交换膜:磺化聚醚醚酮(SPEEK)、磺化聚醚砜、磺化聚砜、磺化聚酰亚胺、氯甲基聚砜、聚苯并咪唑(PBI)等<sup>[5-7]</sup>。然而,离子交换基团的引入会显著影响膜的离子传输特性和物理化学稳定性。以最常用的磺酸基离子交换膜为例,目前仍存在离子传导率与选择性之间相互制约的矛盾:在高磺化度下,膜离子传导率提升,但膜易发生溶胀,离子选择性和机械性能下降,导致活性物质交叉污染,使液流电池在储能效率/容量稳定性与电堆功率密度之间存在权衡问题。基于此,有研究提出通过有机共混、无机掺杂、表面涂覆及交联反应等一系列改性策略,增强离子交换膜的综合性能<sup>[8]</sup>。

与传统依赖离子交换基团的选择性离子传导机制不同,多孔离子传导膜通过孔径筛分效应选择性传输离子。通过精准调控孔道结构与微环境,可优化载流子筛分效率,进而提升电池性能。根据成孔机制,多孔离子传导膜分为后形成型与固有孔隙型两类。后形成多孔膜主要通过模板法、机械拉伸法和相转化法制备,其中相转化法工艺成熟且应用最

广。中国科学院大连化学物理研究所(大连化物所)的研究团队最早将相转化法制备的多孔膜应用于全钒液流电池体系中<sup>[9]</sup>。进一步通过运用模板法、机械拉伸法等方法进行优化,以及探索应用多种聚合物材料如聚丙烯腈(PAN)、聚偏氟乙烯(PVDF)、聚醚砜(PES)、聚砜(PSF)、PBI等,制备出一系列具有对称或非对称孔结构特性的多孔膜<sup>[10]</sup>。华东理工大学的研究团队首次研制出基于无机分子筛的规整孔道膜材料,利用二维分子筛高度有序的传质通道,最大化提高了多孔膜的离子筛分性能,打破了传统离子交换膜传导率与选择性之间的平衡限制<sup>[11,12]</sup>。近年来,自具微孔聚合物膜作为一种新型本征多孔膜,基于分子骨架的刚性扭曲或交联结构而形成的独特微孔特性,在液流电池中展现出优异的选择性筛分性能。已有研究开发了一系列自具微孔聚合物离子膜,通过调节离子传导基团局部疏水性,以精准调控膜内亚纳米孔道限域结构,显著减少了电池内部活性物质的交叉渗透<sup>[13]</sup>。

从离子交换膜与多孔离子传导膜的关键性能比较来看(见表1),二者基于不同的离子传输机制呈

表1 不同膜材料在液流电池中的关键性能对比

类型	孔隙形成机制	名称	体系	离子传导率/ ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	渗透率/ ( $10^{-7}\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ )	能量效率	循环次数
离子 交换膜		Nafion 212 <sup>[14]</sup>	全钒	16.67	29.31	73.25%@200 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	300次@200 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		Nafion 212 <sup>[15]</sup>	铁铬	92	—	82.9%@100 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	40次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		Nafion <sup>[16]</sup>	碱性全铁	0.47	6.9	73.4%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	2330次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		Nafion 212 <sup>[17]</sup>	水系有机	6.61	2.7	59.1%@250 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@250 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		Nafion 212 <sup>[18]</sup>	碱性锌铁	1.1	5	68%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	160次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		SPEEK <sup>[19]</sup>	全钒	13.3	0.8	78.2%@160 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@120 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		SPEEK <sup>[17]</sup>	水系有机	9.13	0.003 18	66.2%@250 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@250 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		SPEEK <sup>[20]</sup>	碱性锌铁	11.7	—	89.28%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	700次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		PBI <sup>[21]</sup>	全钒	14.9	0.48	85%@120 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@120 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		PBI <sup>[22]</sup>	碱性锌铁	3.03	—	82.78%@160 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	500次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
多孔离子 传导膜	后形成 孔隙	PAN <sup>[9]</sup>	全钒	—	—	76%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	200次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		PVDF/G-0.15 <sup>[23]</sup>	全钒	37.1	7.09	83.8%@50 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@50 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		PVDF40-B <sup>[24]</sup>	全钒	12.89	8.76	80%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	100次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		PES/SPEEK <sup>[25]</sup>	碱性锌铁	36	5.8	88%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	240次@160 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
	固有 孔隙	PES/PEG <sup>[26]</sup>	碱性锌铁	5.3	3.34	86.8%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	120次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		2D MFI-type zeolite <sup>[12]</sup>	全钒	160	—	82.3%@40 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	1000次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		SPX-BP-0.95 <sup>[27]</sup>	水系有机	9.7	0.046	87.9%@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	1000次@60 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		SCTF-BP <sup>[28]</sup>	水系有机	30	0.056	50.4%@500 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	5000次@160 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$
		cPIM-1 <sup>[13]</sup>	水系有机	38	1.68	—	1300次@80 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$

现出不同的优势与短板。PFSA 离子交换膜虽具有高离子传导率和优异化学稳定性，但其固有的溶胀结构导致活性离子渗透率高，是引发电池容量衰减的主要原因之一。非氟离子交换膜凭借更刚性的聚合物骨架，在抑制溶胀、提升选择性方面展现出潜力，但其离子传导率和长期化学稳定性仍需进一步优化。相比之下，基于孔径筛分的非氟多孔膜，理论上能更好地平衡离子传导率与选择性，成为突破传统传导率与选择性平衡的新路径，但其产业化核心在于如何实现孔道结构的可控构筑与多孔膜的低成本制备。因此，未来隔膜的发展需针对不同电池体系的需求，在材料本征特性、结构设计与规模化工艺之间寻求最佳平衡。

### 2. 液流电池电极材料

电极作为活性物质氧化还原反应的关键场所，其结构与表面特性直接影响电解液的传输与反应速率，是决定电池性能的核心组件。理想的电极材料需具备以下特性：高导电性、高比表面积、高化学与机械稳定性、良好的机械强度、低成本以及环境友好性。

目前主流的电极材料已从早期的金属电极（如金、银、钛等）转向碳基材料，尤其是具有优异导电性、耐腐蚀性及高比表面积的碳毡和石墨毡，其中石墨毡因经过更高温度的热处理而具备更高的石墨化度、电导率和机械强度，逐渐成为市场主导。尽管如此，碳毡 / 石墨毡仍存在亲水性和电化学反应活性不足的问题，限制了电池的能量效率和功率密度，因此当前研究主要集中在对其改性以提升性能<sup>[29-31]</sup>。

电极材料改性策略主要分为宏观与微观两个层面。一是宏观结构设计。通过调控电极压缩比、厚度、形状以及流场结构，优化电解液分布与传输效率，降低极化损耗。例如，合适的压缩比（如 20%）可平衡欧姆极化和传质阻力<sup>[32]</sup>，薄电极和梯形 / 扇形构型有助于实现更均匀的反应分布和较低泵耗<sup>[33]</sup>，流场设计（如平行流场）可以显著提升流速与物质分布的均匀性<sup>[34]</sup>。二是微观设计，侧重于提升电极表面的反应活性，通过造孔、引入活性官能团（如氮、氧）或催化物质，增加活性位点、改善反应动力学。例如，双尺度多孔结构可大幅提高比表面积<sup>[35]</sup>；表面工程化处理可增强碳缺陷和催化活性，促进氧化还原可逆反应进行<sup>[36]</sup>；梯度功能材

料设计还能缓解传输-反应不匹配问题，显著降低过电位并提升电池效率和稳定性<sup>[37]</sup>。液流电池电极材料正通过多尺度协同优化，朝着高活性、高传质、低极化和系统集成化的方向不断发展。

### 3. 液流电池双极板材料

液流电池双极板是电堆中的关键组件，兼具集流、支撑和供给电解液的功能，需具备高电导率、高机械强度、高稳定性以及低渗透率等特性。目前主流材料包括金属板、石墨板和碳塑复合板 3 类：金属板的导电与力学性能优异，但耐蚀性差、成本高；石墨板耐腐蚀但质脆，难以用于大功率场景；碳塑复合板具有成本低、易加工及良好的综合性能，已成为大功率电堆的首选，可通过导电填料与树脂基体复合，经挤出或模压成型制成<sup>[38,39]</sup>。需要指出的是，模压工艺的电导率更高、性能更优，是当前研发的重点；而挤出成型则致力于低树脂含量、复合填料优化等方向以提升导电性。

在结构设计方面，流场优化是提升双极板性能的另一关键因素。通过设计平行、蛇形、交指等流道构型，可改善电解液分布、减少传质死区并降低流阻<sup>[40,41]</sup>。近年来，相关研究借助多物理场模拟与死区补偿策略进一步优化流场<sup>[42]</sup>，显著提高了电解液均匀性与电池性能，推动了高性能、低成本双极板系统的发展。

### 4. 液流电池电解液材料

电解液是液流电池的能量存储介质，其稳定性对电池性能和循环寿命有很大影响。根据活性物质的不同，液流电池具体可分为全钒、铁铬、全铁、水系有机、锌基等不同体系。接下来，将分别阐述各体系电解液的研究进展，并分析其副反应机制以及通过关键材料协同的多维度材料工程策略。

我国已建成具备完全自主知识产权的全钒电解液产业链，但钒电解液成本仍占系统总成本的 40% 以上。当前钒电解液围绕低成本、高稳定、高浓度、宽温域四大核心目标，通过材料创新（添加剂、混酸体系）、工艺革新（萃取法缩短流程 30%、原料来源多样化、电解法工艺改进）以及商业模式（租赁模式）协同优化，进一步降低钒电解液成本。传统硫酸基钒电解液在高温、高荷电态下易发生五价钒的水解沉淀及析氧副反应。通过引入络合剂、缓冲剂等添加剂，可有效稳定钒离子、调节局部 pH，从而将电解液最高工作温度拓宽至 40~50 °C，

并将钒浓度提升至1.8~2 mol/L, 进而发展出了第三代高稳定钒电解液。此外, 探索硫酸-盐酸混合体系、甲基磺酸体系等新型钒电解液, 突破了传统硫酸基体系黏度高、能量密度低的限制。例如, 采用硫酸-盐酸混合体系, 可将钒浓度提升至2.5 mol/L以上, 并支持更宽的温度范围运行<sup>[43]</sup>。同时, 电解液稳定性的提升依赖电池其他关键材料的协同设计。例如, 开发高选择性隔膜以减少钒离子交叉污染引发的副反应, 开发低析氧活性的正极电极材料, 均是抑制全钒体系副反应、实现高稳定目标不可或缺的一环。

开发低成本新型电解液是降低液流电池系统成本的核心路径, 重点方向包括资源丰富的铁基/硫基无机体系和可持续水系有机体系。然而, 新型体系普遍面临由副反应导致的稳定性差、反应动力学差、溶解度低等共性挑战。为此, 研究人员在新型低成本电解液的改性方面开展了一系列工作, 其核心目标在于实现高稳定性、高活性、高浓度与低成本的协同优化。对于沉积型体系(如锌基/酸性全铁)还需抑制枝晶生长, 以提升电极反应可逆性。实际上, 副反应的发生与电解液、隔膜、电极等关键材料的性能紧密耦合, 因此, 电解液体系稳定性的提升需采取多种关键材料协同的设计策略。

全溶解型电解液体系可进一步细分为无机体系与有机体系两类。在无机体系中, 铁铬液流电池是最早被提出的液流电池技术, 因其负极(铬侧)析氢过电位低、析氢副反应严重, 成为导致库仑效率低下和潜在安全风险的主因。因此, 铁铬电解液的改性以及电极表面催化工程主要集中在抑制析氢副反应和提升电极反应可逆性。但由于铁铬体系缺陷明显, 总体发展较慢, 应用前景并不明朗<sup>[44]</sup>。全溶型碱性全铁液流电池因可以规避铁沉积过程带来的枝晶和副反应等问题而成为新兴方向, 其关键在于开发高性能铁配合物, 提升电解液稳定性, 揭示容量衰减机制。铁基配体的互串是导致碱性全铁电解液不稳定的关键因素, 因此, 针对配体分子结构的设计优化是解决这一问题的有效途径。例如, 已有研究采用磺化配体工程策略缓解了配体交叉污染, 显著延长了电池循环寿命<sup>[45]</sup>; 开发高选择性、高稳定性的隔膜, 能够从根本上减少由交叉污染引发的副反应。多硫化物体系凭借低成本、高容量优势崭露头角, 如通过引入仿生分子催化剂核黄素磷酸

钠, 将多硫转化能效提升至实用水平, 系统成本较钒电解液降低约90%<sup>[46]</sup>。近年来, 水系有机体系凭借分子结构可调性实现了氧化还原电位、溶解度等的精准调控, 再加上资源丰富, 近年来备受关注。然而, 有机活性分子在长期循环中易发生降解或聚合, 生成非活性副产物导致容量衰减。对此, 可以通过分子结构强化(如增强共轭效应、保护易受攻击位点)提升其分子本征稳定性。在此基础上, 可基于分子结构设计策略获得高能量密度的有机活性分子, 即通过官能团修饰调控氧化还原电势, 引入亲水基团/打破结构对称性提升溶解度, 设计多电子反应增加比容量<sup>[47,48]</sup>。

沉积-溶解型体系(锌基/酸性全铁)需针对性解决沉积侧的枝晶问题。枝晶源于金属在电极内的沉积不均匀成核与生长, 严重时甚至会刺穿隔膜导致短路。引入电解液添加剂是抑制枝晶生长的有效策略, 针对锌枝晶的电解液添加剂通常有金属离子、聚合物和有机分子3类<sup>[49,50]</sup>。酸性全铁体系采用类似的电解液添加剂策略, 如已有研究证实了N,N-二甲基乙酰胺可优化铁沉积电流分布, 显著提升反应可逆性<sup>[51]</sup>。此外, 提升隔膜材料机械强度和调控电极材料的结构与性质, 也是抑制枝晶生长、提升体系稳定性的重要策略。

图1对比了典型电解液体系在成本、稳定性、溶解度、可放大性、反应动力学及氧化还原电势等关键性能指标上的差异, 直观揭示了各体系在产业化进程中的优势与挑战。总体来看, 全钒体系在综合性能上表现突出, 但受资源价格影响, 成本较高; 铁铬体系在多项指标上缺乏优势, 产业化前景受限; 碱性全铁和水系有机体系在进一步提升稳定性与反应动力学后具备较大发展潜力; 锌基体系作为沉积-溶解型代表, 在反应动力学、能量密度等方面

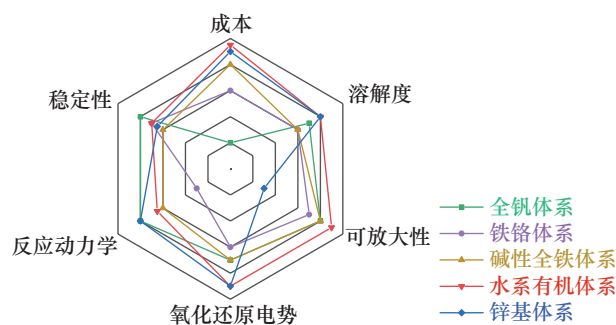


图1 不同电解液体系关键性能指标对比

表现较好，但其可放大性受沉积反应机制制约。

## （二）关键材料产业链发展态势分析

液流电池产业的竞争在本质上是其关键材料产业链完备度与技术水平的竞争。全球竞争格局呈现出多层次、多维度的特点，不仅体现在系统厂商之间，更深刻体现在对关键材料供应链的掌控方面。我国液流电池产业呈现出规模领先与链式短板并存的双重特征。一方面，系统集成规模已实现跨越式

增长；另一方面，产业链韧性面临结构性挑战，突出表现为高端材料依赖进口与上下游协同不足。接下来，将聚焦隔膜、电解液、电极和双极板等关键材料产业链，剖析全球竞争态势。

### 1. 关键材料驱动的液流电池产业全球竞争格局差异

全球液流电池产业的竞争已从终端系统的集成制造，上溯至对隔膜、电解液、电极等关键材料技术路线与供应链掌控权的深度博弈。表2总结了全

表2 全球液流电池关键材料研发布局与产业化进展

国家/地区	核心材料	代表企业/机构	关键技术	产业规模	技术成熟度
美国	隔膜	美国科慕公司（科慕）	PFSA 离子交换膜（Nafion™系列）	全球主要供应商	9
		美国戈尔公司（戈尔）	全氟磺酸增强型复合膜（GORE-SELECT®系列）	全球重要供应商	9
	电解液	美国 Quino Energy 公司	水系有机醌类电解液	推进兆瓦时级项目	5~7
		美国 ESS Tech Inc. 公司	铁基电解液	储能系统成交量突破 2.5 GW·h	7~8
欧洲	隔膜	美国 Storion Energy 公司	全钒电解液	工业产品线成熟	7~8
		索尔维集团（索尔维）	短侧链 PFSA 膜（Aquivion 系列）	工业产品线成熟	8~9
	电极	德国西格里集团（西格里）	PBI 基膜等	具备研发与生产能力	6~7
		德国西格里	石墨毡 / 碳毡电极	全球主要供应商	9
	双极板	德国西格里	石墨双极板	全球主要供应商	9
		德国雄克公司（雄克）	模压 / 挤出石墨双极板	工业产品线成熟	8
电解液	德国 Cmbly Energy 公司	水系有机电解液	推进示范与产业化合作	4~5	
日本	隔膜	旭化成株式会社（旭化成）	全氟磺酸离子交换膜	全球重要供应商	8~9
	电极	东丽株式会社（东丽）	聚丙烯腈基碳纤维（TGP-H）	全球主要供应商	9
中国	隔膜	苏州科润新材料股份有限公司（苏州科润）	PFSA 膜（Nepem 系列）	国内主要供应商，膜年产能为 1.5×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	8
		东岳氟硅科技集团有限公司（东岳集团）	PFSA 膜（DM8120A、DMV850）	国内重要供应商，具备百万平方米级膜产能	8
		苏州国家实验室	非氟多孔膜	建成非氟膜中试验证线	5~7
		宿迁时代储能科技有限公司（宿迁时代）	阴离子交换膜	具备年产能为 1×10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> 的大宽幅产线	5~7
	电极	辽宁金谷炭材料股份有限公司（辽宁金谷）	石墨毡 / 碳毡电极	供应链与制造布局成熟	8
		沈阳富莱碳纤维有限公司（沈阳富莱）	碳纤维毡电极	国内主要供应商	8
	双极板	浙江华熔科技有限公司（浙江华熔科技）	石墨双极板	年产 5×10 <sup>6</sup> 组	8
	电解液	湖南省银峰新能源有限公司（湖南银峰）	钒电解液	全球主要供应商	9
		四川发展欣钒能源科技有限公司（川发新能）	新一代短流程钒电解液制备技术	全球主要供应商，年产能为 1.5×10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup>	8

注：技术成熟度定义参考：1~3 为基础研究，4~6 为技术开发与原型验证，7~8 为系统示范与早期商业化，9 为完全商业化。

球主要国家和地区在液流电池关键材料领域的研发布局与产业化进展。各地依据其资源禀赋、产业基础与技术优势，在关键材料领域形成了差异化的战略布局与发展路径，共同塑造了全球液流电池关键材料产业的全球竞争格局。

美国在液流电池领域的核心优势集中在膜材料产业，尤其是在PFSA离子交换膜方面，已构建起显著的技术壁垒。在电解液体系上，美国的战略核心是规避对钒等关键矿产的进口依赖，聚焦新型非钒材料体系的研发突破，重点布局水系有机、铁基及锌基等体系，旨在开发出成本更低、安全性更高且可依托本土供应链的新型电解液与关键材料。为推进这一目标，美国政府通过税收抵免、贷款担保等政策工具，有力支持了新型材料体系的规模化制造。然而，部分专注于新型电解液路线的企业正经历从实验室技术突破到规模化盈利的艰难跨越。总体而言，美国液流电池产业正处在从研发示范向商业化推广的关键过渡期。

欧洲注重液流电池材料的可持续性与多元化发展。欧洲产业界在持续优化成熟钒基体系的同时，积极布局低成本新型电解液路线，寻求成本突破。欧洲液流电池材料产业的核心竞争力在于深厚的化工产业基础，通过非氟隔膜材料的开发、电解质回收工艺的优化以及生物基等再生材料的探索，降低全生命周期碳足迹，构建绿色、可持续的液流电池材料体系。在商业模式上，欧洲企业积极探索储能与高价值业务的融合，为更具环保溢价的新型材料技术出口创造条件。

日本和韩国在液流电池领域的技术发展，得益于两国在尖端化工材料领域积累的深厚产业基础。以旭化成、东丽等为代表的企业，在PFSA离子交换膜、电极等关键材料上拥有长期的技术积累与领先优势，为两国构建高性能液流电池系统提供了坚实支撑。日本、韩国液流电池产业发展路径的核心在于，通过对关键材料性能的极致优化和对工程细节的精准把控，构建起高质量、高可靠性的技术壁垒，以此弥补其在钒资源上的不足。

我国依托资源与系统集成优势，正加速推动关键材料的国产化进程。我国选择全钒液流电池路线，直接得益于全球领先的钒资源储量与冶炼能力，已率先实现了钒电解液的自主可控与规模化制备<sup>[52]</sup>。在此基础上，产业发展路径呈现出垂直整合

与专业化分工并存态势：一方面，涌现出了如大连融科储能技术发展有限公司（大连融科）等从钒资源到系统集成的全产业链企业；另一方面，催生了专注于电解液、电堆、隔膜等特定环节实现突破的专业化企业。在空间上，形成了辽宁（技术创新）、四川（资源与制造）、东部沿海地区（资本与市场）等优势互补的产业集群。当前，液流电池产业的竞争焦点已集中至离子交换膜这一“战略制高点”，我国相关企业正加速实现PFSA膜的国产化替代，并寻求在非氟膜领域实现突破，以逐步扭转受制于人的被动局面。

当前，在全球液流电池技术的发展格局中，最为注重的是关键材料的创新水平与供应链安全。美国聚焦新型电解液的开放，欧洲强调可持续性，日本和韩国深耕高端材料制造，而中国则发挥系统集成与规模市场优势，并向上游关键材料开展攻坚。这种基于材料能力的路径分野，共同推动了全球液流电池技术的多元化发展。

## 2. 关键材料产业链的竞争态势分析

在液流电池关键材料产业链中，上游原材料保障是基础，中游关键材料的制造水平直接决定电池系统的性能与成本，下游系统集成与回收则关乎技术的规模化应用与全生命周期的可持续发展（见图2）。整体来看，我国液流电池关键材料产业链呈现出上游供应存在风险、中游制造亟待攻坚、下游集成优势显著但回收环节薄弱的典型特征。

（1）上游：原材料与基材的供应安全存在结构性风险

液流电池关键材料产业的上游环节为关键材料制造提供矿物原料与化工基材，其供应稳定性直接影响整个产业链的安全。在该环节，我国面临资源可获得性与高端材料制造技术的双重挑战。

在矿产资源方面，不同金属元素的供应安全态势各异。我国钒资源储量丰富，全球占比约为22.8%<sup>[53]</sup>，为全钒液流电池路线提供了坚实的资源基础。但我国的铬资源形势严峻、对外依存度高，这对于铁铬液流电池路线构成了根本性的供应链制约。相较之下，美国钒资源也相对匮乏，在一定程度上推动了其向铁、锌等矿产资源丰富且供应风险低的新型液流电池路线转变。

在工业原料型基材领域，技术壁垒更为突出。PFSA树脂作为制造PFSA离子交换膜的核心基材，

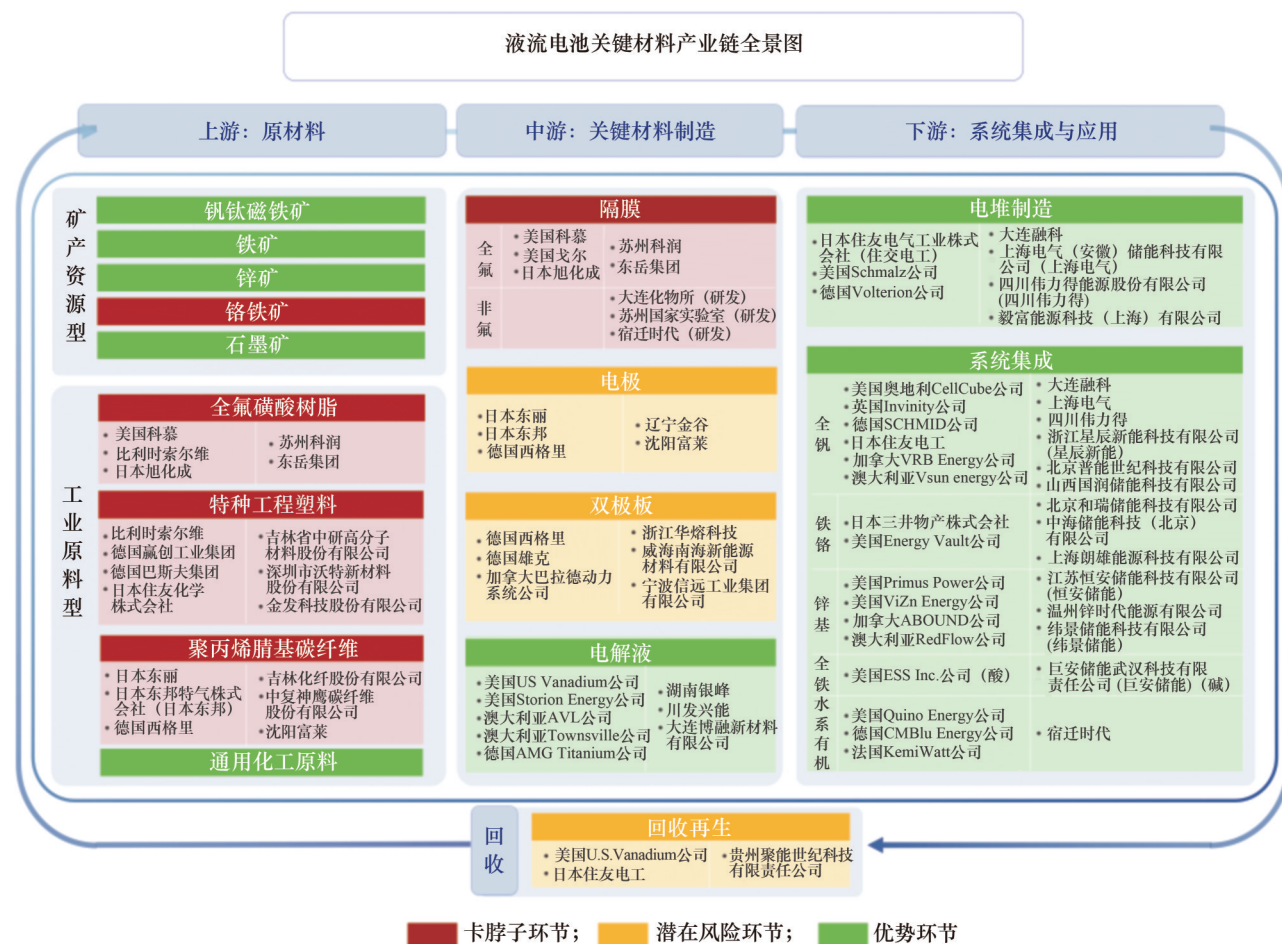


图2 液流电池关键材料产业链全景图

合成工艺复杂，长期由美国、日本的企业主导，是我国实现高端隔膜自主可控的首要技术瓶颈。在高性能聚合物方面，我国在产品纯度、批次一致性和高端牌号方面与国际先进水平仍存在一定差距，包括用于非氟膜的聚醚醚酮（PEEK）、PSF、PBI等特种工程塑料，制造高性能电极所需的PAN基碳纤维原丝等，这些基材的性能短板直接制约了中游关键材料产品质量的提升。

(2) 中游：关键材料制造是技术竞争与产业攻坚的主战场

中游关键材料制造是承接上游原材料、决定下游系统性能的战略制高点。材料的性能突破与产业化能力，是推动产业发展面临的重要挑战。其中，离子交换膜是当前技术竞争最激烈的战略要地。美国科慕公司的Nafion™膜凭借卓越的化学稳定性和离子传导性，在全球范围内形成了事实性垄断，对下游产业链的成本与供应稳定性带来了显著影响。

为突破这一瓶颈，我国苏州科润、东岳集团等企业正全力推进PFSA膜的国产化进程，目前已在全液流电池应用领域实现超过80%的国产化替代。同时，国内企业正不断提升PFSA树脂性能，逐步改变高端树脂材料对外依存度较高的局面，提升了膜产品一致性与长期可靠性<sup>[54,55]</sup>。为从根本上规避含氟膜的技术与成本壁垒，国内相关科研院所与企业在非氟膜开发中投入大量研发力量并取得关键进展：苏州国家实验室建成非氟膜中试验证线，膜性能全面超越国际主流产品，成本显著降低；宿迁时代建成首条大宽幅阴离子交换膜产线，为工程化应用奠定了基础。

在电极与双极板领域，来自日本与德国的相关企业凭借在高性能碳材料方面的深厚积累，主导着高端碳毡/石墨毡电极、碳塑复合板和石墨板等关键材料的技术高地，通过上述材料的供应影响着整个行业的技术上限与成本下限<sup>[56]</sup>。相比

之下,我国在此领域虽具备充足的中低端产品产能,但在高端产品的综合性能方面仍处于追赶国际领先水平的爬坡关键期。

在电解液领域,全钒体系的液流电池技术成熟度最高,已成为当前产业化应用的主流。我国已实现全钒电解液的自主可控与规模化生产,湖南银峰、川发兴能等龙头企业是全球电解液市场重要的供应商。此外,我国也积极布局锌基、铁基及水系有机等新型替代路线,降低资源依赖和成本。但新型电解液材料在长期稳定性、成本可控性、能量密度等关键性能方面仍面临挑战,是当前技术攻关的核心。不同电解液技术路线之间的对比分析与发展现状如表3所示。

(3) 下游:系统集成与循环闭环是规模化应用的关键

下游环节的系统集成能力决定了材料性能的最终体现,而回收再生体系则关乎全产业链的可持续

性与经济性。在电堆制造与系统集成领域,日本住友电工等国际企业凭借先发优势仍占据重要地位,而我国的大连融科、上海电气等企业已实现快速崛起。通过关键材料与电堆结构的协同设计,我国电堆技术实现了从早期5~10千瓦级别到32 kW、42 kW、70 kW的迭代升级,在功率密度与成本控制上达到全球领先水平。在系统集成方面,我国拥有全球最大的应用市场,培育了大连融科、上海电气、星辰新能等一批具备吉瓦级项目交付能力的龙头企业,在工程实践与成本优化方面积累了显著优势。回收再生作为产业链的末端,是目前制约产业可持续发展与闭环构建的明显短板。针对全钒电解液的回收技术路径相对明确,但商业化运营体系尚未成熟;对于新型体系的电解液以及退役隔膜、电极等材料的高效、低成本回收技术与标准体系严重缺失。这将影响产业全生命周期的环保性与经济性,制约闭环循环模式的建立,需要引起行业重视。

表3 不同液流电池电解液技术路线对比分析

技术路线	铁铬 <sup>[57]</sup>	全钒 <sup>[58-60]</sup>	全铁 <sup>[60]</sup>	水系有机 <sup>[60]</sup>	锌溴 <sup>[61]</sup>	锌铁 <sup>[61]</sup>
能量密度/ (W·h·L <sup>-1</sup> )	10~15	15~35	10~40	15~40	40~80	10~45
储能效率/ (直流侧, %)	65~80	80~85	70~80	70~80	65~75	80~85
循环寿命次数	≥10 000	≥20 000	≥5000	≥10 000	≥6000	≥10 000
工作温度/℃	-20~70	5~40	-20~50	-40~60	-30~50	-10~45
资源储量	铬矿资源对外依存度高	钒矿资源有缺口	铁资源丰富	不受矿产资源限制	溴络合剂产量低,对外依存度高	锌、铁资源丰富
技术成熟度	5~7	8~9	4~5	5~6	5~7	5~7
优势	初装成本低、宽温域	成熟度高、稳定可靠	初装成本低、环境友好	环保、设计灵活	能量密度高、稳定性高	初装成本低、工作电流密度高
挑战	析氢副反应、能量密度低、铬资源供应风险	初装成本高、适用温度范围较窄	酸性体系析氢/铁枝晶,碱性体系容量衰减	有机分子稳定性不足	工作电流密度低、锌枝晶问题	容量较低、锌枝晶问题严重
国内现状	已有兆瓦时工程示范、百兆瓦级量产线(国家电网投资集团有限公司)	已开展吉瓦时级大规模商业化应用(大连融科主导)	已有兆瓦时工程示范(巨安储能,碱性体系)	已开展兆瓦时工程示范(宿迁时代)	已有兆瓦时电站、百兆瓦时级量产线(恒安储能)	已开展百千瓦时技术示范、已有吉瓦级量产工厂(纬景储能)
国际现状	已有兆瓦时电站(美国EnerVault公司)但未大规模推广应用	已开展百兆瓦时级大规模商业化应用	已有兆瓦时工程示范(美国ESS Inc.公司,酸性体系)	已开展百兆瓦时工程示范(德国CMBlu公司)	已开展兆瓦时商业示范(澳大利亚RedFlow公司)	已开展兆瓦时商业示范(美国ViZn Energy公司)

### 三、液流电池关键材料驱动的经济性与市场需求分析

#### (一) 基于关键材料的成本与经济性分析

液流电池的经济性由关键材料的初始成本及其在全生命周期内的性能衰减共同决定，可以从初始投资和全生命周期度电成本（LCOS）两个维度，综合分析关键材料对经济性的根本性影响。

在初始投资方面，对典型全钒液流电池储能项目的成本分析显示，初始投资成本主要集中在电堆和电解液两大材料体系。以1 MW/4 MW·h系统为例，如图3所示，钒电解液成本占比最高，约占系统总成本的50%。隔膜作为电堆的核心部件，约占电堆成本的37%，占系统总成本的6.2%；电堆中的其他关键材料如电极和双极板，成本占比分别约为3.1%和3.8%。需要注意的是，不同电解液路线的成本结构具有显著差异，铁基、锌基等非钒体系的电解液成本较低，成本重心将相应转移至电堆系统。

近期产业招标数据显示，全钒液流电池系统成本呈显著下降趋势。根据新疆吉木萨尔、内蒙古包头百灵等百兆瓦时级储能项目的公开招标信息，其工程总承包中标价格已降至约1.9元/(W·h)。然而，这一成本水平仍为锂离子电池储能系统的2倍以上。此成本差距的核心原因在于，以隔膜和电解液为代表的材料，其综合成本尚未进入理想区间。具体来看，隔膜曾因技术垄断而价格高昂，目前随着国产化推进已呈现显著下降趋势；而在电解液方面，钒资源价格波动及复杂的提纯工艺，导致成本持续居高不下。

公式(1)展示了用于评估液流电池全生命周期

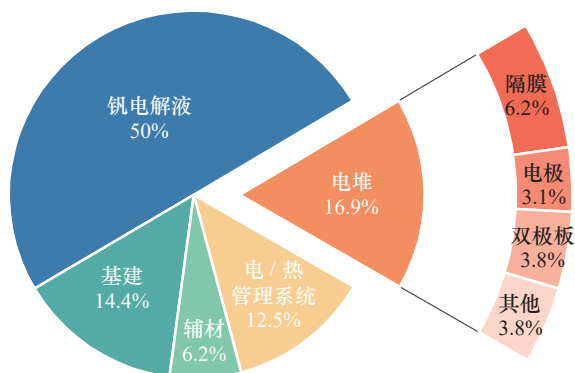


图3 1 MW/4 MW·h全钒液流电池系统成本组成示意图

经济性的平准化储能成本计算模型。该公式将系统生命周期内总成本现值与总发电量相关联，并进一步分解为初始投资（含功率与容量成本）、运维费用、效率损耗及残值等关键变量。尽管初始投资偏高，但液流电池在长时储能场景下的经济性优势随运行时间延长而凸显。这一优势取决于关键材料的本征特性：首先，随着储能时长增加，电解液作为容量单元的成本被有效摊薄；其次，电极、双极板等功率材料具有卓越的化学稳定性，能够支撑系统20~25年的超长寿命；最后，以全钒液流电池体系为例，电解液残值率高达50%以上，可以进一步降低电池全生命周期的实际成本<sup>[62]</sup>。

$$L = \left[ \left( \frac{1}{\eta_1} - 1 \right) P \sum_{t=1}^T \frac{n(t)}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{O(t)}{(1+r)^t} + \left( \frac{C_1}{\eta_2} + \frac{C_2}{d} \right) \right] \div \left[ \sum_{t=1}^T \frac{n(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (1)$$

式(1)中， $L$ 表示全生命周期度电成本，单位为元/(kW·h)； $P$ 表示充电时的买电价格，单位为元/(kW·h)； $\eta_1$ 表示储能站交流-交流循环效率； $T$ 表示系统寿命，单位为年； $n(t)$ 表示第 $t$ 年的循环次数； $r$ 表示折现率； $O(t)$ 表示第 $t$ 年的运维费用，单位为元/(kW·h)； $C_1$ 表示容量成本，单位为元/(kW·h)； $\eta_2$ 表示储能站交流放电效率； $C_2$ 表示功率成本，单位为元/kW； $d$ 表示额定功率下的放电时长，单位为h。

为定量评估关键材料性能与成本对全钒液流电池全生命周期经济性的影响，本文基于典型系统参数构建了LCOS基准模型并开展敏感性分析<sup>[63]</sup>。模型基准参数设定参考了当前行业的典型数据，同时选取电解液、辅材、隔膜成本、维护成本、放电时长、年循环次数、系统寿命和工作电流密度等关键性能参数，依据市场波动性与性能边界等因素，设定关键参数变动区间，代入公式(1)获得相应的LCOS值及其变化幅度（具体参数见图4）。在进行放电时长和工作电流密度的敏感性分析时，由于二者分别直接影响系统的容量成本和功率成本，故对其相应数值变化进行了标注。例如，储能时长的增加会摊薄固定成本，因此当时长延长1倍时，除电解液外的容量成本可降至原先的约50%。图5直观揭示了关键材料在成本与性能方面的双重影响机制：电解液与隔膜成本的高敏感性体现了关键材料

关键因素	变动参数	基准数据	参数变化 <sup>a</sup>								
			±30%	±30%	-50%~250%	±33%	-50%~100%	-18%~48%	±40%	-50%~150%	
装机成本	容量成本 (元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	电解液成本(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	1000	700~1300	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
		电池管理系统(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	140.6	140.6	140.6	140.6	140.6	281.2~70.3	140.6	140.6	140.6
		热交换系统(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	40.6	40.6	40.6	40.6	40.6	81.2~20.3	40.6	40.6	40.6
		辅材(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	125	125	87.5~162.5	125	125	250~62.5	125	125	125
		基建 <sup>b</sup> (元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	287.5	287.5	287.5	287.5	287.5	575~143.7	287.5	287.5	287.5
	功率成本 (元·kW <sup>-1</sup> )	电堆/隔膜成本(元·kW <sup>-1</sup> )	500	500	500	250~1750	500	500	500	500	990~200
		其他(元·kW <sup>-1</sup> )	850	850	850	850	850	850	850	850	1395~520
	电力转换系统(元·kW <sup>-1</sup> )	275	275	275	275	275	275	275	275	275	
运维成本	操作与维护费用(取装机成本的百分比, %)	3	3	3	3	2-4	3	3	3	3	
性能参数	放电时长/h	4	4	4	4	4	2~8	4	4	4	
	年循环次数	365	365	365	365	365	365	300~540	365	365	
	系统寿命/a	25	25	25	25	25	25	15~35	25	25	
	工作电流密度/(mA·cm <sup>-2</sup> )	200	200	200	200	200	200	200	200	100~500	
LCOS/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )		0.70	0.59~0.81	0.69~0.71	0.68~0.880	0.64~0.76	1.0~0.53	0.85~0.47	0.85~0.65	0.78~0.56	
LCOS变化幅度/%			±15.4	-2.0~1.8	-2.8~14.1	-8.7~8.6	48.8~24.4	21.7~32.4	20.7~7.4	11.7~20.0	

图4 全钒液流电池LCOS对关键材料性能与成本参数的敏感性分析

注：<sup>a</sup>表示以上参数变动范围的设定，结合了市场波动性与性能边界等因素，设定合理的波动区间，以定量评估关键变量对LCOS的影响程度；<sup>b</sup>表示为简化计算模型，计算时将基建成本归入容量成本单元，不再区分其属于容量相关或功率相关部分；<sup>c</sup>表示电堆中关键材料单价来源于最新市场报价，用量数据来源于本单位研发的液流电池电堆参数。

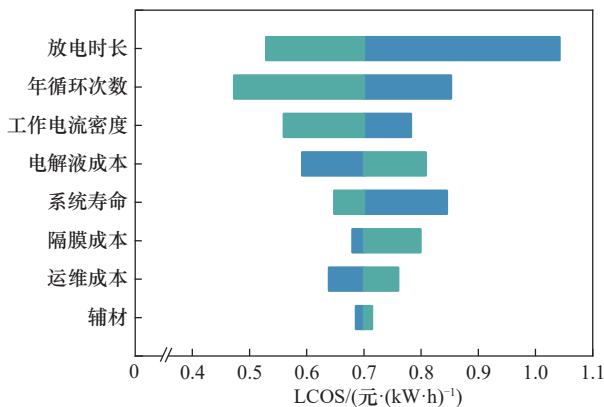


图5 全钒液流电池LCOS关键参数敏感性分析

注：放电时长的基准数据为4 h，变化幅度为-50%~100%；年循环次数的基准数据为365次，变化幅度为-18%~48%；工作电流密度的基准数据为200 mA/cm<sup>2</sup>，变化幅度为-50%~150%；电解液成本的基准数据为1000元/(kW·h)，变化幅度为±30%；系统寿命的基准数据为25 a，变化幅度为±40%；隔膜成本的基准数据为500元/kW，变化幅度为-50%~250%；运维成本占装机成本的3%，变化幅度为±33%；辅材的基准数据为125元/(kW·h)，变化幅度为±30%。

成本对初始投资的主导作用；而关键材料性能则通过影响放电时长、循环寿命、运行电流密度等参数，对LCOS产生更为显著的间接调控作用。例如，隔膜的离子传导性决定了工作电流密度，其离子选择性又直接影响循环寿命（包括年循环次数与系统寿命），并间接影响最大放电时长；电解液的稳定性同样制约循环寿命，其活性物质浓度则与最大放电时长密切相关。

未来，液流电池成本下降的核心路径在于关键材料的持续突破。在材料降本方面，低成本关键材料替代、产业规模效应以及商业模式创新共同构成了液流电池降本的关键要素。同时，关键材料在性能上的突破及其与系统层面的协同优化，将进一步增强液流电池的全生命周期经济性。电解液与隔膜材料的降本将结合循环寿命、工作电流密度等多参数的协同提升，为全钒液流电池达成0.05美元/(kW·h)的储能度电成本目标提供了核心支撑。

## (二) 关键材料驱动的市场需求牵引

液流电池市场加速扩张的根本驱动力逐渐从宏观政策指引转向关键材料所支撑的经济性优势在特定应用场景下的价值兑现。市场规模的增长，如2025年前三季度新增年产能超61.7 GW·h（中国化学与物理电源行业协会统计数据）<sup>[64]</sup>，本质上是关键材料产业化能力提升的直接体现。2025年，我国钒电解液的满产产能约为4.5×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/a，规划总产能突破3.5×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/a，为吉瓦时级项目的交付奠定了材料基础<sup>[55]</sup>。同时，隔膜的年需求量将突破2×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>，其产能扩张与成本下降正成为系统降本并进一步激发市场需求的重要支点。

从技术路线看，全钒液流电池体系在2024年液流电池新增装机中占比高达80%，这表明钒电解液

在循环寿命与本征安全上的材料优势已获得市场广泛认可。当前，项目大型化与储能时长向4~10 h发展的趋势，既是对液流电池经济性优势的肯定，也是对关键材料长期运行稳定性与成本竞争力的持续考验。

尽管当前液流电池在新型储能中的占比仍较低，但其在长时储能领域份额的稳步提升，印证了其材料体系的独特竞争力。展望未来，随着新型电力系统对长时储能需求的进一步释放，市场增长将更加依赖于关键材料技术持续创新所带来的LCOS优势扩大。可以预见，以关键材料性能的持续迭代和成本优化为先导，到2030年我国液流电池年新增装机规模将达到数十吉瓦时，实现从示范应用到规模化商业发展的关键跨越。

## 四、液流电池关键材料面临的问题与挑战

### （一）关键材料自身的性能瓶颈

液流电池在长时储能应用中的低成本与长寿命优势未能充分发挥，其核心制约在于关键材料难以协同优化“长寿命”与“低成本”这一固有矛盾。隔膜、电解液分别作为功率、容量模块的核心材料，直接影响液流电池储能效率、使用寿命及成本。隔膜材料普遍面临离子传导率与选择性相互制约的难题，其中PFSA膜受国际垄断导致成本居高不下，而非氟离子膜的长期化学稳定性仍需大量工程实践验证。在电解液材料中，成熟的全钒电解液体系成本受钒价波动影响较大，而新型铁基、锌基及水系有机电解液等体系则在长期运行稳定性、能量密度及反应动力学等方面存在明显不足，这些材料层面的性能短板共同构成了产业化的首要技术障碍。

### （二）关键材料的产业链与供应链短板

产业链韧性不足的突出表现为高端材料对外依存度高与产业链协同效应不足。上游关键材料如高端离子交换膜所需的PFSA树脂、制造高性能电极所需的PAN基碳纤维等核心基材仍高度依赖进口，构成供应链潜在风险。在中游制造环节，离子交换膜领域尤为薄弱，国产全氟膜在长期可靠性方面仍需提升，而非氟膜的工程化验证与大规模制备能力亟待实质性突破。在下游协同方面，从材料到系统

的产业链各环节间缺乏统一的技术标准与接口规范，导致关键材料与部件的最佳匹配效率较低，严重制约了规模化降本与产业协同发展。

### （三）由关键材料特性衍生的市场与商业模式挑战

关键材料特性直接影响了市场接受度与商业模式创新。当前，液流电池初装成本偏高仍是主要制约，其关键在于隔膜与电解液的成本居高不下，导致在短期经济性上与锂电池相比优势不明显。虽然钒电解液具备租赁的资产属性，但其价值评估和流通体系尚未获得金融市场的广泛认可，制约了“电解液租赁”等创新商业模式的大规模推广。此外，市场定价机制更关注初始采购成本，而关键材料所支撑的长寿命、低衰减和高残值等全生命周期优势未能被充分定价，削弱了液流电池的商业竞争力。

### （四）支撑关键材料创新与应用的政策标准体系不足

现行政策与标准体系尚未完全适应关键材料的发展需求。行业缺乏针对新型隔膜离子传导率与选择性、电解液长期化学稳定性等关键材料核心性能的专项评价标准。在系统层级，电池安全与寿命测试规范仍多参照锂电池体系，未能充分体现液流电池本征安全与长寿命特性。在政策层面，对研发端的支持较多，但对连接实验室与产业化的材料中试平台和应用场景验证支持不足，延缓了关键材料的成熟与迭代速度，影响了整个产业的技术进步进程。

## 五、液流电池关键材料发展对策与建议

针对当前隔膜、电解液等关键材料在性能、成本、供应链及标准体系等方面面临的挑战，需构建以关键材料创新为核心驱动力，产业协同、市场培育与国际标准化为支撑的全链条支撑体系。通过系统推进材料研发与产业生态建设，突破液流电池在长时储能领域规模化应用的关键障碍，为我国在全球储能产业竞争中确立持续优势奠定坚实基础。

### （一）以成本目标为导向，分阶段突破关键材料性能瓶颈，制定发展路径

关键材料是液流电池降本增效的战略支点。隔

膜、电解液作为功率、容量的核心材料，其性能直接决定电池可靠性与经济性。以国际竞争性指标和绿色零溢价指标作为储能技术成本目标，考虑中远期储能配比提升对储能系统提出的更高成本要求，基于成本目标反演重要节点关键材料性能指标，以此为导向分阶段开展关键材料技术攻坚。突破关键材料性能瓶颈，推动长时储能技术大规模应用，是捍卫我国能源转型主导权的重要支撑。图6构建了我国液流电池关键材料面向2050年的分阶段发展路径，明确了隔膜和电解液两大核心材料各阶段的技术目标与实施策略。

近期（2026—2030年）：聚焦“全钒+全氟”传统路线降本，推动低成本材料的国产化与工艺优化。PFSA膜通过国产化替代与超薄复合化设计，攻克高阻钒、长寿命技术，目标成本降低50%以上。全钒体系围绕低成本、高稳定、高浓度、宽温域目标，以短流程工艺和组分调控为核心优化钒电解液成本与性能，目标成本降至800元/(kW·h)以下。

中期（2031—2035年）：聚焦“新型+非氟”路线规模化，围绕膜组分与结构设计，重点突破非氟膜的离子传导率与选择性间相互制约的矛盾、稳定性与规模化制备瓶颈。新型非钒体系专注于低成本、高丰度元素电解液稳定性提升，解决铁基电解液配体互串导致的长期运行稳定性瓶颈；设计高稳

定、高活性的有机活性分子，实现水系有机体系长循环稳定运行；攻克锌基电解液锌枝晶难题，实现高功率等级系统稳定运行。通过极性溶剂调控电解液凝固点至-20℃以下，适配高寒地区应用场景。

远期（2036—2050年）：聚焦“新型+非氟”路线升级迭代与全产业链闭环优化。适配高功率电堆发展，通过微观离子通道调控、无缺陷超薄制备工艺，降低膜电阻，开发一体化膜电极等新型结构，优化高电流密度工况下的膜性能。通过多电子活性物种设计及高溶解度活性物种开发，实现新型体系的高能量密度稳定运行，突破电解液能量密度限制。构建“电解液租赁-退役-再生-材料回收-系统再设计”闭环产业链生态，实现液流电池全生命周期成本的进一步降低，最终形成长时储能领域的支柱技术。

隔膜材料革新需平衡成本与性能，技术演进呈现全氟膜国产替代、非氟膜工程化应用、高电密非氟膜突破三大主线，从而支撑电堆向高功率、低成本发展。电解液材料聚焦成本与稳定性攻坚，开展全钒体系降本提效、新型非钒体系的稳定性与能量密度突破，实现低成本、高稳定性、高能量密度的电解液应用。引入人工智能技术，通过智能算法加速关键材料的设计与性能预测，精准识别材料性能优化路径、指导实验方向。通过材料体系的协同创

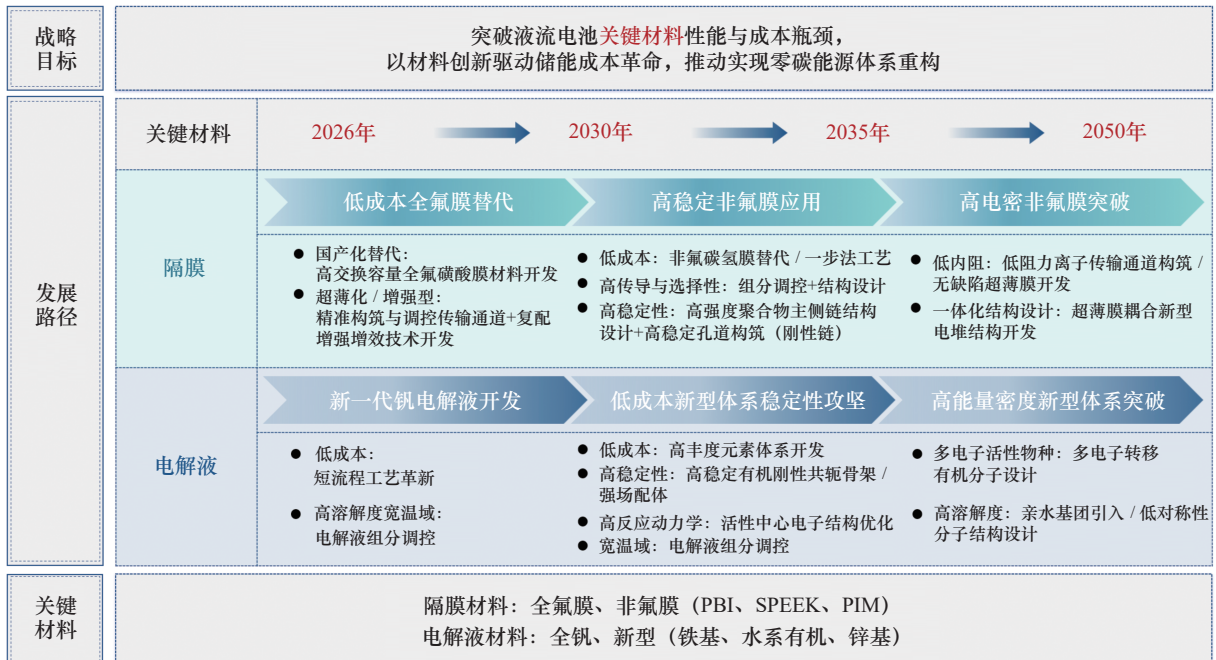


图6 液流电池关键材料发展路径

新,持续降低度电成本,使液流电池成为推动新型电力系统发展的重要支撑。

### (二) 构建支撑关键材料发展的政策与标准体系

为推动关键材料的创新突破与产业化应用,需要建立和完善的政策保障与标准引领体系,从技术攻坚、产业生态、市场环境和标准监管4个层面系统推进。

在技术攻坚层面,创新研发组织模式,实施关键材料定向攻关。建议变革传统研发资助方式,围绕隔膜、电解液等关键材料在成本、寿命与性能上的核心矛盾,强化目标导向与全链条协同。推行“揭榜挂帅”机制,发挥国家实验室“总平台、总链长”的职责,发布明确的关键材料指标榜单,引导“产学研”联合体攻关。同时,支持建设国家级中试验证平台,建立关键材料数据库与选型指南,加速可靠材料的工程化应用。

在产业生态层面,构建稳健的关键材料供应链体系。针对产业链上游关键原材料对外依存度高的挑战,建议绘制供应链风险清单,设立关键原材料国产化替代应用示范专项,通过应用激励政策扶持国内技术突破与规模应用。针对产业链协同效率低下问题,构建全链条标准接口体系与公共验证平台,统一材料、部件与系统的技术规范,降低适配成本。

在市场环境层面,完善金融支持体系,推动开发基于钒电解液等关键材料长期价值的金融产品,增强资本市场信心。鼓励发展与材料特性精准匹配的创新商业模式,如“电池即服务”,由厂商提供全生命周期管理并降低初始投资门槛,为关键材料的规模化应用创造可持续的市场需求。

在标准监管层面,构建全生命周期标准体系,强化监管引导。加快建立符合技术特性的标准与评价体系,建议加快构建覆盖“材料-部件-系统-回收”的全链条标准体系。重点制定隔膜、电解液等关键材料的专项测试方法以及相应系统安全与寿命评价规范。同时,要求将关键材料回收再生方案纳入项目准入条件,推动建立规范、可追溯的退役电池材料回收体系。

#### 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:** October 21, 2025; **Revised date:** December 30, 2025

**Corresponding author:** Fan Yiqun is a professor from Suzhou

National Laboratory. His major research field is materials-oriented chemical engineering. E-mail: fanyq@szlab.ac.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Green and Low-Carbon Development Strategy of New Chemical Materials in China” (2024-XBZD-09); National Natural Science Foundation of China (22508276)

#### 参考文献

- [1] 卢奇秀. “十五五”全国新型储能装机有望达3亿千瓦 [N]. 中国能源报, 2025-09-22(16).  
Lu Q X. New energy storage capacity expected to reach 300 GW nationwide during the 14th Five-Year Plan period [N]. China Energy News, 2025-09-22(16).
- [2] 尤方明. 储能, 推动全球加速迈向零碳未来——2025世界储能大会主论坛观察 [N]. 福建日报, 2025-09-18(04).  
You F M. Energy storage accelerates global transition to a zero-carbon future—Observations on the main forum World Energy Storage Conference 2025 [N]. Fujian Daily, 2025-09-18(04).
- [3] 我国新型储能行业步入规模化发展阶段 [N]. 中国石化报, 2025-09-08(05).  
China's new energy storage industry enters phase of large-scale development [N]. China Petrochemical News, 2025-09-08(05).
- [4] 李静, 许林艳. 新型储能应用效果逐步显现 锂电池技术路线占据主导地位 [N]. 证券日报, 2025-08-02(B01).  
Li J, Xu L Y. New energy storage applications are gradually showing results, lithium battery technology dominates the landscape [N]. Securities Daily, 2025-08-02(B01).
- [5] Wang F R, Ai F, Lu Y C. Ion selective membrane for redox flow battery, what's next? [J]. Next Energy, 2023, 1(3): 100053.
- [6] Wang F, Luo S, Lei J, et al. Nonfluorinated membrane with a decentralized ion-transport network enables efficient and sustainable polysulfide redox flow batteries [J]. Science Advances, 2025, 11(45): eaea0032.
- [7] Ye J Y, Xia L, Li H Y, et al. The critical analysis of membranes toward sustainable and efficient vanadium redox flow batteries [J]. Advanced Materials, 2024, 36(28): e2402090.
- [8] Huang K, Liu G P, Shen J, et al. High-efficiency water-transport channels using the synergistic effect of a hydrophilic polymer and graphene oxide laminates [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(36): 5809–5815.
- [9] 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): 1676–1679.
- [10] Lu W J, Yuan Z Z, Zhao Y Y, et al. Porous membranes in secondary battery technologies [J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46(8): 2199–2236.
- [11] Xu Z, Michos I, Wang X R, et al. A zeolite ion exchange membrane for redox flow batteries [J]. Chemical Communications, 2014, 50(19): 2416–2419.
- [12] Zhang D Z, Huang K, Xia Y S, et al. Two-dimensional MFI-type zeolite flow battery membranes [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(43): e202310945.

- [13] 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.
- [14] Zhao Y Y, Zhang D H, Zhao L N, et al. Excellent ion selectivity of Nafion membrane modified by PBI *via* acid-base pair effect for vanadium flow battery [J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 394: 139144.
- [15] Sun C Y, Zhang H. Investigation of Nafion series membranes on the performance of iron-chromium redox flow battery [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(14): 8739–8752.
- [16] Cheng X S, Xuan T, Wang J C, et al. Membrane contamination-driven sulfonate structuring for enhanced stability in all-iron redox flow batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 78: 104226.
- [17] De Porcellinis D, Mecheri B, D'Epifanio A, et al. Communication—Sulfonated poly (ether ether ketone) as cation exchange membrane for alkaline redox flow batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(5): 1137–1139.
- [18] Gao W L, Wang X Y, Liu S M, et al. Electrostatic effect synergistically enabling the superior ion selectivity and ion conductivity of composite membrane for alkaline zinc-iron flow batteries [J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 717: 123646.
- [19] Yuan Z Z, Li X F, Hu J B, et al. Degradation mechanism of sulfonated poly (ether ether ketone) (SPEEK) ion exchange membranes under vanadium flow battery medium [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(37): 19841–19847.
- [20] Yuan Z Z, Liang L X, Dai Q, et al. Low-cost hydrocarbon membrane enables commercial-scale flow batteries for long-duration energy storage [J]. *Joule*, 2022, 6(4): 884–905.
- [21] Hampson E, Duburg J C, Casella J, et al. A simple approach to balancing conductivity and capacity fade in vanadium redox flow batteries by the tunable pretreatment of polybenzimidazole membranes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149930.
- [22] Yuan Z Z, Duan Y Q, Liu T, et al. Toward a low-cost alkaline zinc-iron flow battery with a polybenzimidazole custom membrane for stationary energy storage [J]. *iScience*, 2018, 3: 40–49.
- [23] Lai Y M, Wan L, Wang B G, et al. PVDF/graphene composite nanoporous membranes for vanadium flow batteries [J]. *Membranes*, 2019, 9(7): 89.
- [24] Yoon S, Lee E, Yoon S J, et al. Geometry-induced asymmetric vanadium-ion permeation of PVDF membranes and its effect on the performance of vanadium redox flow batteries [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(5): 4473–4481.
- [25] Yuan Z Z, Liu X Q, Xu W B, et al. Negatively charged nanoporous membrane for a dendrite-free alkaline zinc-based flow battery with long cycle life [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3731.
- [26] Chen D J, Kang C Z, Duan W Q, et al. A non-ionic membrane with high performance for alkaline zinc-iron flow battery [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 618: 118585.
- [27] Zuo P P, Li Y Y, Wang A Q, et al. Sulfonated microporous polymer membranes with fast and selective ion transport for electrochemical energy conversion and storage [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(24): 9564–9573.
- [28] Zuo P P, Ye C C, Jiao Z R, et al. Near-frictionless ion transport within triazine framework membranes [J]. *Nature*, 2023, 617(7960): 299–305.
- [29] He Z X, Lv Y R, Zhang T A, et al. Electrode materials for vanadium redox flow batteries: Intrinsic treatment and introducing catalyst [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131680.
- [30] Ye L Z, Qi S T, Cheng T K, et al. Vanadium redox flow battery: Review and perspective of 3D electrodes [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(29): 18852–18869.
- [31] Jiang Y Q, Wang Y H, Cheng G, et al. Multiple-dimensioned defect engineering for graphite felt electrode of vanadium redox flow battery [J]. *Carbon Energy*, 2024, 6(2): e537.
- [32] Park S K, Shim J, Yang J H, et al. The influence of compressed carbon felt electrodes on the performance of a vanadium redox flow battery [J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 116: 447–452.
- [33] Muñoz-Perales V, van der Heijden M, de Haas V, et al. Understanding the role of electrode thickness on redox flow cell performance [J]. *ChemElectroChem*, 2024, 11(2): e202300380.
- [34] Hao H H, Zhang Q, Feng Z Y, et al. Regulating flow field design on carbon felt electrode towards high power density operation of vanadium flow batteries [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138170.
- [35] Zhou X L, Zeng Y K, Zhu X B, et al. A high-performance dual-scale porous electrode for vanadium redox flow batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 325: 329–336.
- [36] 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.
- [37] Wang R, Hao M S, He C, et al. Gradient-distributed NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanorod electrode for redox flow batteries: Establishing the ordered reaction interface to meet the anisotropic mass transport [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 332: 122773.
- [38] Choe J, Lim J W. Carbon-composite bipolar plate-integrated current collector for vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 589: 233751.
- [39] Ashok A, Kumar A. A comprehensive review of metal-based redox flow batteries: Progress and perspectives [J]. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2024, 17(1): 2302834.
- [40] Gautam R K, Kumar A. A review of bipolar plate materials and flow field designs in the all-vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 48: 104003.
- [41] Peng K, Jiang C X, Zhang Z R, et al. Flow field design and visualization for flow-through type aqueous organic redox flow batteries [J]. *PNAS*, 2024, 121(50): e2406182121.
- [42] Pan L M, Sun J, Qi H H, et al. Dead-zone-compensated design as general method of flow field optimization for redox flow batteries [J]. *PNAS*, 2023, 120(37): e2305572120.
- [43] Li L, Kim S, Wang W, et al. A new vanadium redox flow battery using mixed acid electrolytes [R]. Washington DC: US Department of Energy, Energy Storage Systems Program Review, 2010.
- [44] Sun C Y, Zhang H. Review of the development of first-generation redox flow batteries: Iron-chromium system [J]. *ChemSusChem*, 2022, 15(1): e202101798.
- [45] Yang W D, Jiang H, Wang L F, et al. Sulfonated-ligand engineering enables a stable alkaline all-iron ion redox flow battery [J]. *ACS Energy Letters*, 2024, 9(8): 3859–3868.

- [46] Lei J F, Zhang Y Q, Yao Y X, et al. An active and durable molecular catalyst for aqueous polysulfide-based redox flow batteries [J]. *Nature Energy*, 2023, 8(12): 1355–1364.
- [47] 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): 2108777.
- [48] Yang G J, Zhu Y X, Hao Z M, et al. Organic electroactive materials for aqueous redox flow batteries [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(33): 2301898.
- [49] Zhi L P, Yuan Z Z, Li X F. Recent development and prospect of membranes for alkaline zinc-iron flow battery [J]. *Advanced Membranes*, 2022, 2: 100029.
- [50] Trudgeon D P, Qiu K P, Li X H, et al. Screening of effective electrolyte additives for zinc-based redox flow battery systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 412: 44–54.
- [51] Yang J, Yan H, Zhang Q, et al. A universal additive design strategy to modulate solvation structure and hydrogen bond network toward highly reversible Fe anode for low-temperature all-iron flow batteries [J]. *Small*, 2024, 20(8): 2307354.
- [52] 魏甲明, 陈宋璇, 付云枫, 等. 全产业链贯通布局下钒液流电池长时储能发展思考 [J]. *中国有色冶金*, 2024, 53(3): 7–18.  
Wei J M, Chen S X, Fu Y F, et al. Strategic considerations for the development of vanadium redox flow batteries for long-duration energy storage within a fully integrated industry chain [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2024, 53(3): 7–18.
- [53] U. S. Geological Survey. 2025 Mineral commodity summaries 2025 [R]. Reston: U.S. Geological Survey, 2025.
- [54] 郭梦扬. 全氟磺酸膜国内专利技术分析 [J]. *天津化工*, 2025, 39(3): 23–25.  
Guo M Y. Analysis of domestic patent technology of perfluorosulfonic acid membrane [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2025, 39(3): 23–25.
- [55] 亚化咨询. 2025 中国全钒液流电池产业年度报告 [R]. 上海: 亚化咨询, 2025.  
YaHua Consulting. 2025 China vanadium redox flow battery industry annual report [R]. Shanghai: YaHua Consulting, 2025.
- [56] 王帅, 乔冰. 国内外碳纤维行业发展现状与建议 [J]. *化学工业*, 2024, 42(3): 17–26.  
Wang S, Qiao B. Domestic and international development situation and suggestions of carbon fiber [J]. *Chemical Industry*, 2024, 42(3): 17–26.
- [57] 李晓蒙, 项俊帆. 铁–铬液流电池电解液研究进展 [J]. *电源技术*, 2024, 48(2): 206–210.  
Li X M, Xiang J F. Research progress of electrolyte of iron–chromium redox flow battery [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2024, 48(2): 206–210.
- [58] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2023 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1359–1397.  
Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023 [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1359–1397.
- [59] 刘素苹. 液流电池储能技术分析与实践应用 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(11): 3871–3873.  
Liu S P. Analysis and practical application of energy storage technology of flow redox cells [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(11): 3871–3873.
- [60] Zhang C K, Yuan Z Z, Li X F. Designing better flow batteries: An overview on fifty years' research [J]. *ACS Energy Letters*, 2024, 9(7): 3456–3473.
- [61] 许鹏程, 袁治章, 李先锋. 锌基液流电池储能技术研究进展 [J]. *科学通报*, 2024, 69(21): 3110–3121.  
Xu P C, Yuan Z Z, Li X F. Progress on zinc-based flow batteries [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(21): 3110–3121.
- [62] 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会. 2024 中国液流电池产业发展白皮书 [R]. 北京: 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会, 2024.  
Energy Shortage Application Branch of China Industrial Association of Power Sources. 2024 China flow battery industry development white paper [R]. Beijing: Energy Shortage Application Branch of China Industrial Association of Power Sources, 2024.
- [63] Root S J, Knighton L T, Cheng W C, et al. Comparison of energy storage and arbitrage options for nuclear power [R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2023.
- [64] 吴涛. 1—9 月液流电池超 61 GW·h 产能扩张, 核心材料发力 [EB/OL]. (2025-10-20)[2025-10-26]. <https://www.escn.com.cn/news/show-2141121.html>.  
Wu T. Flow battery production capacity expanded by over 61 GW·h between January and September, with core materials playing a key role [EB/OL]. (2025-10-20)[2025-10-26]. <https://www.escn.com.cn/news/show-2141121.html>.