

热点点评



锂电池百篇论文点评(2026.2.1—2026.3.29)

李珞宁¹, 孙蔷馥¹, 岑官骏¹, 乔荣涵¹, 郝峻丰¹, 张新新¹, 刘长洋¹, 郑博文¹, 田孟羽²,
金 周², 詹元杰², 闫 勇², 贲留斌^{1,2}, 俞海龙¹, 刘燕燕¹, 周 洪³, 黄学杰^{1,2}

(¹中国科学院物理研究所, 北京 100190; ²松山湖材料实验室, 广东 东莞 523890; ³中国科学院武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430071)

摘要: 该文是一篇近两个月的锂电池文献评述, 以“lithium”和“batter*”为关键词检索了Web of Science从2026年2月1日至2026年3月29日上线的锂电池研究论文, 共有4200篇, 选择其中100篇加以评论。正极材料研究以高镍层状氧化物、富锂锰基及部分新型锰基与有机正极为主, 重点关注体相掺杂、表面包覆、异质结构构筑及循环过程中的结构稳定性。负极材料方面, 金属锂负极为研究重点, 集中于三维宿主构筑、合金化调控、人工界面设计及沉积行为调节, 硅基负极则涉及三维结构设计。电解质研究涵盖卤化物、硫化物、氧化物、氟化物、聚合物及其复合固态电解质, 同时也包括面向高电压、宽温域及高安全需求的液态电解液与添加剂设计。电池技术方面, 全固态锂电池仍是关注重点, 干法电极、界面缓冲层、枝晶抑制及低压实运行等均有进展, 并兼顾锂硫电池正极设计与催化调控、无负极及黄铁矿等新体系探索。表征分析主要涉及锂沉积与扩散、界面演化及固态电解质稳定性。电池回收方面涉及预处理过程的生命周期评价、机械化学回收及电化学浸出等湿法路线。计算和深度学习则聚焦于电极应力-输运耦合、扩散动力学、固态电解质筛选及智能化状态估计。

关键词: 锂电池; 正极材料; 负极材料; 电解质; 电池技术

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0358

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 05-1960-21

Reviews of selected 100 recent papers for lithium batteries (Feb. 1, 2026 to Mar. 29, 2026)

LI Luoning¹, SUN Qiangfu¹, CEN Guanjun¹, QIAO Ronghan¹, HAO Junfeng¹, ZHANG Xinxin¹,
LIU Changyang¹, ZHENG Bowen¹, TIAN Mengyu², JIN Zhou², ZHAN Yuanjie², YAN Yong²,
BEN Liubin^{1,2}, YU Hailong¹, LIU Yanyan¹, ZHOU Hong³, HUANG Xuejie^{1,2}

(¹Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ²Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523890, Guangdong, China; ³Wuhan Documentation and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: This bimonthly review paper highlights 100 recent papers on lithium batteries. We searched the Web of Science and found 4200 papers online from Feb. 1, 2026 to Mar. 29, 2026, from which 100 were selected for comments. The studies on cathode materials are focused on high-nickel layered oxides, Li-rich manganese-based oxides and some emerging manganese-based and organic cathodes, with particular attention paid to bulk doping, surface

收稿日期: 2026-04-27。

第一作者: 李珞宁 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为固态电池, E-mail: zseraphine1602@outlook.com; 通信作者: 黄学杰, 研究员, 研究方向为锂二次电池及关键材料, E-mail: xjhuang@iphy.ac.cn。

引用本文: 李珞宁, 孙蔷馥, 岑官骏, 等. 锂电池百篇论文点评(2026.2.1—2026.3.29)[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(5): 1960-1980.

Citation: LI Luoning, SUN Qiangfu, CEN Guanjun, et al. Reviews of selected 100 recent papers for lithium batteries (Feb. 1, 2026 to Mar. 29, 2026)[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(5): 1960-1980.

coating, heterostructure construction and structural stability upon cycling. For anode materials, lithium metal anodes are the major focus, concentrating on 3D host construction, alloying regulation, artificial interphase design and deposition behavior modulation, while Si-based anodes involve 3D structural design. Electrolyte studies cover halide, sulfide, oxide, fluoride, polymer and composite solid-state electrolytes, together with liquid electrolytes and additives designed for high-voltage, wide-temperature and high-safety applications. For battery technologies, all-solid-state lithium batteries remain the focus, with progress in dry-process electrodes, interfacial buffer layers, dendrite suppression and low-pressure operation, along with cathode design and catalytic regulation for lithium-sulfur batteries and explorations of anode-free and pyrite-based systems. Characterization studies mainly cover lithium deposition and diffusion, interfacial evolution and solid electrolyte stability. Battery recycling involves life-cycle assessment of pretreatment processes, mechanochemical recycling and hydrometallurgical routes based on electrochemical leaching. Calculations and deep learning are directed to coupled stress-transport behavior of electrodes, diffusion kinetics, screening of solid electrolytes and intelligent state estimation.

Keywords: lithium batteries; cathode material; anode material; solid state electrolyte; battery technology

基于近两个月发表的锂电池文献，采用BERTopic主题模型对其摘要文本进行分析，构建锂电池论文的研究主题图，展示该领域研究的全局态势，如图1(A)所示。每个点代表一篇论文，点之间的距离反映了论文在主题上的相似度，而不同颜色则代表不同的研究主题。近期研究成果主要集中在17个主要主题，形成了明显的集群，正极材料、聚合物电解质、锂硫电池、硅负极、电解液等关键

材料和组件的研究主题集中在图的右半部分，电池性能预测、热安全等电池管理相关主题主要分布在左半部分。选择其中100篇加以评论，在主题图中以蓝色点标记，如图1(B)所示，广泛覆盖了正极材料、电解液、固态电解质、固态电池、锂硫电池、电池材料回收再生、计算和深度学习等多个关键主题。图1(C)进一步展示了主要研究机构的近期研究动向。

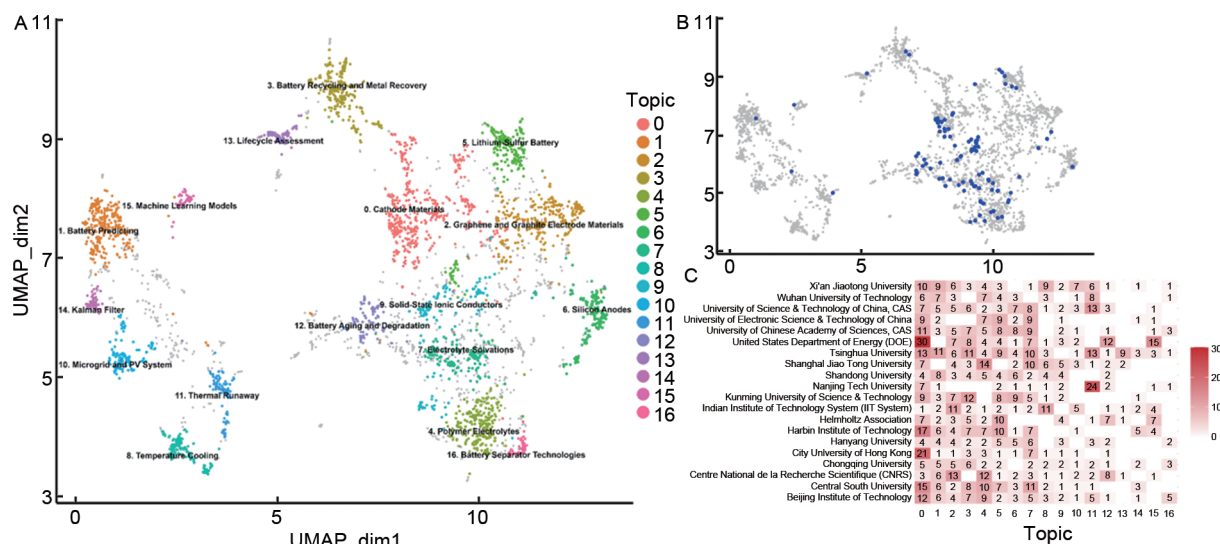


图1 锂电池论文的研究主题分布（2026.2.1—2026.3.29）

Fig.1 The distribution of research topics in lithium battery papers (2026.2.1—2026.3.29)

1 正极材料

1.1 层状氧化物正极材料

Zhao 等^[1]围绕富镍层状氧化物正极材料中 Mo 掺杂路径对微观结构与电化学性能的影响展开研究,指出优化一次颗粒结构是实现高能量密度锂离子电池的关键。研究发现,相较于传统固相梯度掺杂,共沉淀法引入 Mo 能够实现更高度分散的掺杂效果,从而促进一次颗粒显著细化并形成更致密的颗粒结构,这种结构一方面可通过内部应力耗散减少微裂纹的产生,另一方面又能抑制电解液过度渗入颗粒内部,进而影响初始 Li⁺传输动力学。同时,该工艺诱导了贯穿 LiNi_{0.95}Co_{0.04}Mo_{0.01}O₂ 整体体相的 Li/TM 阳离子有序结构,有效抑制 Li⁺/Ni²⁺混排,并缓解晶内与晶间应变,显著增强材料的结构稳定性。得益于这些协同作用,材料表现出优异的倍率性能,在 5 C 条件下仍可实现 204.9 mAh·g⁻¹ 的高放电比容量。

Chueh 等^[2]提出一种简易合成策略,在无需掺杂、包覆或构建浓度梯度的前提下,制备出稳定性极为优异的高镍正极。研究表明,化学力学失效与微观结构不均匀性(尤其是纳米级孔隙)密切相关,而这类缺陷源于煅烧过程中固态反应物之间接触不足。通过提高氢氧化锂(LiOH)的熔融速率,可增强前驱体间的液-固界面接触,从而形成均匀演化的微观结构。这种结构均匀性能够有效耗散应变能,即便在发生高压相变的情况下,仍可缓解化学力学失效,进而实现优异的循环寿命。

Wang 等^[3]提出一种晶格工程与晶界钝化协同策略,通过 La³⁺/F⁻共掺杂与 LiF 包覆相结合,提升 LiNi_{0.90}Co_{0.05}Mn_{0.05}O₂(NCM90)材料结构稳定性。将 La³⁺引入过渡金属(TM)位点后,表面重构会在过渡金属氧层(TMO层)中引发“晶格预膨胀”效应,有效缓冲 H2—H3 相变过程中剧烈的晶格收缩,并抑制微裂纹产生。同时,F⁻掺杂取代氧位点可形成强键合的 TM—F 键,显著提高晶格氧的稳定性。此外,表面生成的 LiF 包覆层可优先钝化脆弱的晶界,有效保护正极免受电解液腐蚀与 HF 侵蚀。得益于体相与界面的协同稳定作用,NCM90-1.5LF 正极在 2.7~4.5 V 电压区间循环 200 次后容量保持率达 93.5%; NCM90-1.5LF||石墨软包全电池在 3~4.2 V 区间循环 1000 次后容量仍保持 94.72%。

Liang 等^[4]开发了一种双重改性策略,利用 Wadsley-Roth 相快离子导体 NaNb₁₃O₃₃(NNO)在 LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂上同时实现铌(Nb)的体相掺杂和外延涂层的构建。具有晶格匹配特性的 NNO 涂层拥有极宽的层间距和强劲的结构稳定性,能够有效抑制相变诱导的结构降解并增强界面锂离子动力学。结合密度泛函理论(DFT)计算、原位 X 射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)和飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)的综合分析表明,即使在严苛的循环条件下,NNO 外延层和 Nb 掺杂也能协同缓解晶胞体积变化并促进锂离子扩散。因此,优化后的正极材料(NCM@NNO-2)表现出卓越的电化学稳定性,在 7C 的高倍率下循环 300 次后容量保持率达 86.7%,并在 10 C 的超高倍率下展现出 149.7 mAh·g⁻¹ 的高放电容量。

Wang 等^[5]通过异相重构策略,制备了无钴正极材料 LiNi_{0.964}Al_{0.03}W_{0.006}O₂(LNAW),用于硫化物全固态锂电池。研究发现,高价钨元素在表面富集形成尖晶石相,可提升界面相容性并抑制副反应;低价铝元素进入体相,通过强 Al—O 键稳定层状结构、减少锂镍混排。二者协同构建层状-尖晶石框架,有效抑制 H2—H3 相变、晶格应变与微裂纹,避免岩盐相产生。同时,该策略在 Al/Mo、B/W、B/Nb 等体系中均表现出普适性。

Zhao 等^[6]通过分段煅烧调控微观结构,制备出具备快速锂离子扩散层的富镍正极材料 FDL-NCM90,用于硫化物全固态电池。研究发现,该扩散层由细小一次颗粒与小角度晶界构成,可显著加快锂离子传输,缓解循环过程中的应变累积与颗粒开裂,提升电化学稳定性。同时,材料表面原位生成的 Li₂CO₃ 包覆层能有效抑制正极与硫化物电解质的界面副反应,降低界面阻抗。

Kwon 等^[7]针对氧化物正极与硫化物电解质之间界面相容性差的问题,提出了一种基于 Li₂WO₄ 的表面工程策略。与传统的惰性离子导体涂层不同, Li₂WO₄ 虽然初始离子电导率低,但在电化学充放电初期会与电解质发生反应,原位形成一层离子导电的界面相(Interphase),从而促进锂离子传输。重点对比了 Li₂WO₄ 与常用的 LiNbO₃ 涂层, LiNbO₃ 在高温(150℃)热压处理下会发生化学降解,导致界面阻抗增加;而 Li₂WO₄ 在高温下保持结构稳定,且热压处理能显著降低其界面电阻(从 518 Ω

降至44 Ω), 提升倍率性能。双层涂层实验证实了该效应主要源于 Li_2WO_4 与电解质界面的反应。

Sun等^[9]利用原子层沉积(ALD)技术, 在正极材料表面精准制备了氧氯化物(Li-Al-O-Cl , 简称LAOC)非晶薄层, 作为人工阴极电解质界面(CEI)。通过交替脉冲 AlCl_3 和 LiO^tBu (叔丁醇锂)及后续水/氧等离子体处理, 在LCO表面自限制生长了约3 nm厚的非晶LAOC涂层。使LCO的离子电导率从 1.785×10^{-7} 提升至 $2.823 \times 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (提升约15倍), 远超氧化物涂层(如 Li-Al-O , 仅略高于本征LCO)。显著提升了钴酸锂(LCO)在5 C高倍率下的循环稳定性(500圈容量保持86.4%)以及在4.6 V高电压下的循环稳定性。

Wang等^[9]采用一步机械融合法, 在富锂锰基氧化物(LRMO)正极表面同步构筑了近表层 Si/Zr 共掺杂、外层无定形 $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$ 包覆的梯度改性结构。该协同功能化策略能够稳定氧骨架、提升电荷传输能力, 并抑制高电位下的氧二聚化行为。同时, 均匀包覆于LRMO颗粒表面的无定形 $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$ 可保证与固态电解质长期紧密接触, 维持材料电化学活性并抑制界面副反应。得益于上述改性, 优化后的A-LRMO正极在0.1 C倍率下展现出292 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高放电容量, 在1 C下循环2000周后容量保持率仍为81.8%。相应软包电池的面容量可达8.5 $\text{mAh} \cdot \text{cm}^{-2}$, 库仑效率高于99.6%。

1.2 其他正极材料

Xia等^[10]提出一种界面轨道有序化设计思路, 从根源上抑制Jahn-Teller畸变, 构建了具有非共线Jahn-Teller有序结构的尖晶石-层状 LiMnO_2 异质结构(SLNC-LMO), 并与共线构型样品进行对比研究。原子级分辨表征证实, 界面处 MnO_6 八面体呈近正交排布。结合密度泛函理论计算发现, 该非共线有序结构会引发轨道几何阻挫, 使eg轨道分裂能从共线结构的1.12 eV大幅降至0.24 eV。轨道简并度的近乎完全恢复, 有效抑制了长程畸变传播并增强了界面结合力。因此, SLNC-LMO正极表现出优异的循环稳定性, 500次循环后容量保持率达100%, 性能远优于共线结构样品。

Li等^[11]探讨了一种新型的n型导电聚合物正极材料—聚苯并二呋喃二酮(PBFDO)在锂离子电池中的应用及其优势。PBFDO具有高密度的羰基基团, 提供了丰富的锂离子存储活性位点, 同时展

现出优异的离子与电子传输性能及低电解液溶解性。PBFDO的 π - π 堆叠和层状堆叠等有序堆叠结构, 增强了材料的稳定性并抑制了体积膨胀。PBFDO正极在高电流密度($30 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$)下仍能保持150 $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高容量, 并在1 $\text{A} \cdot \text{g}^{-1}$ 和10 $\text{A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下实现稳定的充放电循环, 2000次循环后的电荷转移电阻(R_{ct})仅为23 Ω 。利用PBFDO高导电性和负载能力, 成功制备了2.5 Ah的锂有机软包电池, 能量密度达到255 $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 负极材料

2.1 硅基负极材料

Zhu等^[12]设计了一种三维柱状硅(Si_Col)负极, 通过等离子体增强化学气相沉积制备晶态核/非晶壳交织结构, 用于硫化物全固态锂电池。该结构提供多向 Li^+ 传输通道和内置缓冲体积, 实现均匀的 Li^+ 渗透与循环呼吸, 将应力诱导的脆性断裂转化为可逆微尺度变形, 有效缓解界面应变并保持固态电解质连续接触。 Si_Col 负极在0.2 C下循环800圈后容量保持率达72.4%, 初始库仑效率91.5%; 70 mAh软包电池经270圈循环后容量保持率72.5%。

2.2 金属锂负极材料

Wang等^[13]设计了一种自支撑三维锂复合箔负极(LZNC), 通过熔融锂与 Zn_3N_2 反应原位生成Li-Zn合金和 Li_3N , 并协同碳纳米管网络构建复合结构。Li-Zn合金提供延展性并调控锂沉积, Li_3N -CNTs网络增强机械韧性(断裂韧性达 $1.3 \times 10^6 \text{ J/m}^3$, 较纯锂提升12倍), 实现超薄($<10 \mu\text{m}$)可加工性。该负极具有高比容量($1800 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$)和体积容量($1915 \text{ mAh} \cdot \text{cm}^{-3}$), 循环中厚度变化仅3.6%。匹配NCM811的全电池循环500圈保持稳定, Ah级软包电池300圈容量保持率92%, 8.5 Ah原型电池能量密度达553 $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

Hu等^[14]提出一种基于拓扑优化与数字光处理(DLP)3D打印技术的新型锂金属负极(LMA)宿主结构。该拓扑优化宿主(TP host)通过迭代计算优化材料分布, 在中心、边缘及角落处形成增强结构, 有效分散应力并抑制锂沉积过程中的体积膨胀。对称电池测试表明, TP-Li体系在20 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 超高电流密度和20 $\text{mAh} \cdot \text{cm}^{-2}$ 高容量条件下稳定循环超过1000小时。与磷酸铁锂正极配对的全电池

在 5 C 倍率下循环 150 次后容量保持率达 95.2%，显著优于传统网格结构宿主。

Lin 等^[15]通过共聚马来酸酐与六氟丁基丙烯酸酯，在锂负极表面构建了人工界面层（MAF）。该界面层具有内部无机物富集、外部聚合物包裹的杂化结构，既能提供亲锂位点以促进均匀锂沉积，其氟化低聚物还能在碳酸酯电解液中动态演化，溶解并迁移至正极，诱导形成富含 LiF 的稳定阴极-电解质界面。这一双功能机制同时抑制了锂枝晶生长与正极结构畸变。采用 MAF 修饰的 Li|Li 对称电池在 1 mA·cm⁻² 下稳定循环超 900 小时，Li|LFP 和 Li|NCM811 电池分别于 1 C 下循环 1500 圈与 350 圈后容量保持率达 90.2% 和 80.6%。

Shangguan 等^[16]通过表面拓扑结构调控，构建了正弦波状锂负极（Sin-Li），实现了热力学与动力学耦合的锂沉积平衡。热力学上，表面能梯度优先引导锂在谷底沉积；动力学上，峰谷间离子传输距离差异引起浓差极化，部分锂在峰顶还原后迁移至谷底结晶。优化后的 Sin-Li 负极在 1 mA·cm⁻²/1 mAh·cm⁻² 下稳定循环超 2800 小时，10 mA·cm⁻²/10 mAh·cm⁻² 下达 900 小时。匹配 LiFePO₄ 正极的全电池于 2 C 下循环 5700 圈，容量衰减率仅 0.008%/圈。

Deng 等^[17]提出一种零体积变化（0VC）蜂窝状多孔宿主结构设计，用于解决固态锂金属电池中锂负极体积膨胀/收缩导致的界面失效问题。该 LiZn&Li₂O|IrGO 复合宿主通过原子层沉积和熔融锂灌注工艺制备，将锂沉积/溶解反应限制在宿主内部孔隙中进行，实现电极厚度恒定。原位光学显微镜与原位压力监测证实该宿主在充放电过程中保持零体积变化与紧密界面接触。基于此设计的对称电池实现 ≥99.9% 的锂沉积/剥离库仑效率（400 次循环），无负极全电池在低堆叠压力（440 kPa）下循环 400 次容量保持率达 95.5%。

Liu 等^[18]提出“序列化界面化学”策略，通过二元金属氧化物（特别是 MgO）调控锂金属负极界面反应的有序性。研究表明，MgO 的晶格氧和镁离子位点可协同调控阳离子-阴离子相互作用，促进接触离子对（CIP）形成，实现界面溶剂化结构的有序化。该有序微环境将原本混沌的多步反应（吸附、脱溶剂、成核、沉积）重组为时空连贯的序列，显著降低界面反应无序度（*D* 值

从 3.94 降至 3.00），诱导 Li⁺ 沿 (200) 晶面择优沉积，并促进富无机 SEI（LiF、Li₃N）的形成，从而有效抑制枝晶生长，提升锂金属电池的循环稳定性与库仑效率。

Wang 等^[19]报道了一种锂基多组分固溶体合金（Li-MSSA）负极材料，由 90%（质量分数）金属锂与等原子比 Cd、Ag、Mg、Al（共 10%）组成。高混合熵赋予该合金高锂原子扩散系数（约 6×10⁻⁹ cm²·s⁻¹），实现锂向金属箔内部的体相传输而非表面沉积，同时诱导热力学稳定的 Li(110) 晶面择优生长，有效抑制枝晶形成。该负极兼具高锂质量分数（90%）和高利用率（89%），可逆比容量达 3100 mAh·g⁻¹。基于此的 1 Ah 级 Li-MSSA||NCM811 软包电池实现 385 Wh·kg⁻¹ 能量密度，600 次循环后容量保持率 82%，为高比能长寿命锂金属电池提供了实用化解决方案。

3 电解质及其添加剂

3.1 固态电解质

Kim 等^[20]提出通过引入 [WO₂Cl₄]²⁻ 多面体单元，实现在多种卤化物固态电解质（Li_xMCl₆，M=Zr，Y，Er，In）晶格中受控掺入氧。研究发现，强电正性的 W⁶⁺ 中心能锚定氧，在不破坏母体卤化物框架的前提下调节局部阴离子环境，使 Li₂ZrCl₆ 基电解质在 30℃ 下的离子电导率提升至 1.12 mS·cm⁻¹。计算表明，氧锚定诱导了锂位点从八面体向四面体的转变，削弱了 Li-Cl 相互作用并平坦化了迁移能垒。此外，该策略显著提升了材料的空气稳定性，在 50% 相对湿度下暴露 1 分钟后仍能保持 67% 的电导率；组装的全固态电池在 0.33 C 下循环 100 次后容量保持率达 83.8%。

Gami 等^[21]通过溶液浇铸法，将中熵无机填料 Li_{1.5}Sn_{1.0}Al_{0.5}Zr_{0.5}(PO₄)₃（LSAZP）引入 P(VDF-HFP)/PVP 聚合物基质中，开发出一种 60 μm 厚的复合电解质（IPE15）。研究利用 PVP 侧链羰基与无机盐的络合作用以及填料的协同效应，使该电解质的室温离子电导率达到 0.148 mS·cm⁻¹，锂离子迁移数高达 0.74，且高达 4.58 V 的电化学稳定性。实验表明，IPE15 具有优异的柔韧性和热稳定性（达 345℃），锂对称电池在 2 mA·cm⁻² 下可稳定循环超过 500 h。在全固态 Li||LiFePO₄ 电池中，该电解质在 2 C 倍率下循环 1000 次后容量保持率仍达 78%，

展现了在快充锂金属电池中的应用潜力。

Chen 等^[22]开发出一种具有超细软硬梯度纳米域的高熵聚合物电解质（HEPE）。该电解质由 PEO、PMMA 和 PVDF-HFP 三组分组成，通过锂键抑制了各组分的结晶并减小了相分离尺寸，使其纳米域尺寸减小至 30 nm 以下。这种高熵结构使电解质同时具备室温下 $0.24 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的高离子电导率、 $87.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 的优异机械韧性和 $325 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 的强界面粘附。凭借出色的黏附性，HEPE 能够在无堆栈压力的情况下保持紧密的界面接触，组装的 $\text{Li}||\text{NCM811}$ 全固态电池在无压力条件下表现出 $205.5 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高放电容量。

Tang 等^[23]通过阴离子簇化学，设计出一系列具有低锂含量（2.4%）的非晶态卤化物电解质 $x\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-ZrCl}_4$ 。该电解质利用 SO_4^{2-} 和 ZrCl_4 簇构建出一种无序骨架，通过欠配位氧位点建立起高效的锂离子传输通道，在 30°C 下实现了 $1.5 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的高离子电导率。相比传统卤化物电解质，该体系在 30% 相对湿度下表现出更优的空气稳定性，且显著降低了原材料成本。电化学测试表明，基于该电解质的 $\text{Li-In}||\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 电池在 1 C 倍率下循环 1400 次后容量保持率高达 81.1%。

Wang 等^[24]通过溶液滴涂法，在 LATP 表面构建了一种 PEO 基柔性界面修饰层。该修饰层通过引入 $\text{Li}_{1.05}\text{Fe}_{0.05}\text{Zr}_{1.95}(\text{PO}_4)_3$ 填料，不仅将界面模量提升至 1.11 GPa 以抑制锂枝晶生长，还通过减弱空间电荷层显著提升了界面传输动力学。实验表明，修饰后的 LATP 临界电流密度从 $0.34 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提升至 $1.58 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，并在 $0.20 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下实现了超过 5000 h 的超长稳定锂沉积/剥离。所组装的全固态 $\text{Li}||\text{LiFePO}_4$ 电池在 0.5 C 下循环 250 次后几乎无容量衰减。

Asakura 等^[25]通过引入氧取代硫合成了具有高还原耐受性的 $\text{Li}_3\text{PS}_{4-x}\text{O}_x\cdot\text{LiF}$ 玻璃陶瓷电解质。研究发现，氧取代能够稳定高电导的 $\alpha\text{-Li}_3\text{PS}_4$ 类似相，使其在常规缓慢加热冷却过程中即可析出。其中， $\text{Li}_3\text{PS}_{3.8}\text{O}_{0.2}\cdot\text{LiF}$ 在室温下能表现出 $1.3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的高离子电导率。得益于 P—O 键的高结合能，该电解质在循环后与锂金属界面几乎观察不到反应层，所组装的全固态 $\text{Li}||\text{S}$ 电池成功实现了 100 次无短路循环。

Cui 等^[26]在石榴石型 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{12}$ （LLZT）

表面原位构建了具有大分子离子传导桥的改性填料（LLZT@mPEG）。该设计通过柔性 mPEG 支链改善了无机填料与聚氧化乙烯（PEO）基体的界面相容性，构建了快速离子传输通道，并有效抑制了聚合物的热分解。实验表明，该复合电解质（LLZT@mPEG-CPE）在 120°C 下离子电导率达 $7.6 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。基于该电解质组装的 $\text{Li}||\text{LiFePO}_4$ 电池在 160°C 极端高温及 5 C 高倍率下，循环 500 次后容量保持率仍高达 94%，展现了在高温储能领域的应用潜力。

Kim 等^[27]提出了一种离子导电空穴填充剂（ICCF）策略，用于功能化硫化物固态电解质（LPSCI）薄片。通过筛选离子液体 [EMIM][TFSI]、锂盐 LiTFSI 及添加剂 FEC 的协同配方，构建了兼具高离子电导率（ $2.17 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ）与优异界面稳定性的复合电解质体系。ICCF 有效填充 LPSCI 晶界空隙，促进均匀锂离子通量；FEC 诱导形成富 LiF 的稳固 SEI 层，抑制副反应并降低界面阻抗。所组装的全固态电池在 0.1 C 下循环 100 圈容量保持率达 70.2%，临界电流密度提升至 $1.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

Li 等^[28]系统比较了 N、O、F 三种高电负性元素掺杂对 Li_3PS_4 （LPS）硫化物电解质的结构、离子/电子电导、电化学窗口及界面稳定性的影响，首次揭示了掺杂元素在晶格中的实际存在形式（P—N/P—O 键 vs. LiF 偏析）与电化学性能之间的关联，并证明了 N 掺杂能够在提高离子电导率的同时保持低电子电导率，从而显著提升与高镍正极（NCM811）的兼容性和循环稳定性。在 LPS 体系中， $\text{N} > \text{O} \gg \text{F}$ 。氮（N）是首选，它能实现电导率与稳定性的双赢；氧（O）次之，稳定性好但电导率略有牺牲；氟（F）应谨慎，除非用作独立的界面修饰层，否则体相掺杂弊大于利。

Zhao 等^[29]提出一种分子催化策略，利用血红素（Hemin）小分子催化剂改性聚偏二氟乙烯（PVDF）基固态聚合物电解质。血红素的五配位铁中心与双氟磺酰亚胺（FSI⁻）阴离子发生选择性吸附作用，显著促进锂盐解离，使自由 Li^+ 浓度从 22% 提升至 44%，离子电导率提高至 $1.13 \times 10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ；同时催化 FSI⁻ 在锂负极表面均匀分解，形成致密、低阻抗的富 LiF 固态电解质界面膜（SEI）。该电解质使 $\text{Li}||\text{Li}$ 对称电池稳定循环超过 6000 h， $\text{Li}||\text{LiFePO}_4$ 全电池在 5 C 倍率下循环 2000 次容量

保持率达94.8%，Li||NCM811电池在2 C下循环1000次保持80.3%容量。

Yang等^[30]合成了一种碘代硫化物固态电解质($\text{Li}_{10.5-x}\text{Si}_{1.5}\text{P}_{1.5}\text{S}_{12-x}\text{I}_x$)，以突破全固态锂硫电池中反应动力学迟缓与厚电极离子渗流衰减的工程瓶颈。研究证实，碘并未固溶入主相晶格，而是诱导生成了 $\text{Li}_4\text{PS}_4\text{I}$ 型副相；在正极球磨混合时，该副相完全非晶化，原位构建出兼具高离子电导率($\geq 6.8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)与氧化还原介导活性的富碘非晶网络。该重构相不仅提升了复合正极的致密度，更充当化学介体极大降低了 Li_2S 氧化的过电位。依托此微观设计，电池在C/2倍率下斩获86%的硫利用率，在15 C超高倍率下依然输出 $590 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ；在 $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的严苛高载量下，实现了 $14.4 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的极端面容量。

Peng等^[31]提出了一种规避高昂 Li_2S 前驱体的硫化物固态电解质(SE)低成本合成路线。该工作以低廉的 LiH 、 S 和 Li_2O 为原料，通过一步法高效合成了掺氧的硫银锗矿型电解质 $\text{Li}_{5.5}\text{PS}_3\text{O}_{1.5}\text{Cl}_{1.5}$ ，将其原材料成本压缩至16.85美元/公斤。密度泛函理论及多维结构表征证实，阴离子晶格中精确的氧取代有效拓宽了材料的带隙，并在维持低离子迁移能垒的同时开辟了额外的 Li^+ 传导通道，从而实现了 $2.53 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的高室温离子电导率。此外，氧的引入诱导了富 Li_2O 固态电解质中间相(SEI)的生成，大幅提升了对金属锂的界面稳定性。搭载该SE的NCM83全固态电池在0.5 C下稳定循环逾1000次，在 $10.7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的严苛高负载下依然表现出优异的电化学性能。

Jin等^[32]提出“聚阴离子配位”策略设计氟化物固态电解质：利用 PO_4^{3-} 作为结构节点，与 TiF_6 八面体通过氧桥连接，形成三维非晶网络。实现了氟化物电解质 $\text{Li}_{1.3}\text{Ti}(\text{PO}_4)_{1.3/3}\text{F}_4$ 室温离子电导率达 $1.16\times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，比母体 Li_2TiF_6 ($6.14\times 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$)提高约200倍，是已报道冷压氟化物电解质中的最高值。通过多种先进表征(PDF、NMR、TOF-SIMS、XPS)结合AIMD模拟，揭示了高电导的微观机制：短程有序、长程无序的非晶结构提供大量自由体积； Li^+ 同时与 F 和 PO_4^{3-} 配位，削弱了 $\text{Li}-\text{F}$ 键的束缚； PO_4^{3-} 的旋转(“paddlewheel”机制)和柔性链段的摆动协同促进 Li^+ 迁移。成功应用于5V级全固态电池：以 $\text{Li}_{1.3}\text{Ti}(\text{PO}_4)_{1.3/3}\text{F}_4$ 作为正极电解质(catholyte)或作为LNMO表面涂层，实现了优异的倍率和循环性能

(1 C下200圈容量保持91.6%)，远超传统氯化物电解质 Li_3InCl_6 。

Li等^[33]提出了一种通过“阴离子框架柔性工程”来提升卤化物固态电解质离子电导率的新策略。针对氯化物电解质因阴离子紧密堆积导致离子传输受限的问题，通过在晶格中引入高电价、高电负性的阳离子(如 Ta^{5+} 、 Nb^{5+})并降低锂含量，有效降低了氯阴离子的有效负电荷。理论与实验结果表明，这种电荷调控显著降低了阴离子重取向的能垒，激发了氯离子的剧烈摆动甚至旋转运动。这种动态的阴离子框架能够瞬时拓宽锂离子传输瓶颈并扭曲局部配位环境，从而平坦化能量景观，实现锂离子的快速扩散。基于此策略开发的 $\text{Li}_{1.25}\text{Zr}_{0.25}\text{Ta}_{0.75}\text{Cl}_6$ 电解质在室温下实现了高达 $10.3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的超高离子电导率。将其应用于全固态电池正极层时，电池在4 C倍率下循环20,000次后容量保持率仍达82.5%。

Park等^[34]针对硫化物固态电解质在全固态电池中面临的界面不稳定与离子电导率衰减问题，提出了一种利用氧气掺杂的创新策略。选用 Li_2SO_4 作为氧源，将氧原子选择性地引入到Argyrodite型电解质($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$)的Wyckoff 16e位点。氧掺杂虽然引入了极化率较低的氧原子，但通过诱导锂离子的重新分布，激活了相邻笼状结构之间的“笼间传导路径”(将 $\text{LiT2}-\text{LiT2}$ 距离从1.77 Å缩短至1.65 Å)，从而补偿了传导损失，保持了高离子电导率。在电化学测试中，该改性电解质展现了卓越的性能：在NCM811全电池中实现了 $230 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高容量，并在50 C的超高倍率下稳定运行；在软包电池中实现了 $400 \text{ Wh}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高能量密度及500次循环的稳定性。结合冷冻电镜(Cryo-TEM)等表征手段，该工作揭示了氧诱导结构演化的新机制。

Wang等^[35]针对全固态锂电池在高压($\geq 4.5 \text{ V}$)下电解质氧化分解和界面不稳定的问题，开发了一种氟掺杂的氧卤化物固态电解质 $\text{LiNbOCl}_{3.6}\text{F}_{0.4}$ (LNOCF0.4)。通过机械化学法引入氟元素，不仅将电解质的电化学稳定窗口拓宽至4.65 V，还保持了高达 $2.3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的离子电导率。该电解质能与高镍正极(NCM83)原位构建一层富含氟化物的动态稳定界面(CEI)，有效抑制了高压下的持续氧化分解和过渡金属溶解。全电池测试显示，在4.5 V高压截止电压下，初始放电比容量达 $195.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，200次循环后容量保持率高达84.1%，显著提升了

高压全固态电池的循环稳定性。

He等^[36]提出一种多阳离子（ Ag^+ 和 W^{4+} ）预置的银硫矿型固态电解质（ LAgWPSC ）设计策略，实现超离子电导率（ $>10 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ）与优异界面稳定性的协同。循环过程中， Ag^+ 从电解质中脱出并被还原为 Ag 金属，扩散进入锂负极形成均匀的 Li-Ag 合金层，调控锂均匀沉积/剥离； W^{4+} 则转化为具有适中离子/电子电导率的 LiWS_2 ，构成稳定的固态电解质界面膜（SEI）。该电解质使 $\text{Li}||\text{Li}$ 对称电池在 $0.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下稳定循环超过4000小时， $\text{Li}||\text{NCM811}$ 全电池在2 C倍率下循环1100次容量保持率达82.7%，并在 -30°C 低温及高面载量（ $3 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）条件下展现优异性能。

Shen等^[37]确立了一种基于“电子径向效应”的固态电解质设计新范式。针对传统d带中心理论在5d过渡金属中的失效，引入信息熵描述符（ Sd ），精准量化了5d轨道因相对论效应和自旋轨道耦合产生的径向膨胀。通过结合多维机器学习模型对逾万种材料进行高通量筛选，成功定位并锁定了单斜 HfO_2 。配合毫秒级闪蒸焦耳热法，合成出纳米单晶 HfO_2 并构筑了 $\text{sc-HfO}_2@LCB$ 复合电解质。该电解质底层逻辑在于利用增强的s-d/p-d轨道杂化有效削弱Li-阴离子相互作用，进而实现了 $1.23 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的室温电导率与0.82的高离子迁移数。物理界面的高度兼容性不仅促生了坚韧的双层SEI与致密CEI，更使得2 Ah NCM90||Li软包电池在实现 $472 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 超高能量密度的同时，完美通过 150°C 热失控极限测试。

3.2 其他电解液/添加剂

Zhou等^[38]结合高密度聚苯硫醚（PPS）隔膜与碳酸二甲酯（DMC）基电解液，提高了锂金属电池的安全性。研究发现，利用DMC分子的弱吸附能和细小尺寸，可在PPS晶体界面构建高效的离子跳跃通道，使室温电导率达到 $1.02 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。通过引入 $\text{LiPO}_2\text{F}_2/\text{FEC}/\text{VC}$ 复合添加剂，可在电极表面形成稳定的 $\text{LiF}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ 双相复合SEI膜。组装的6 Ah NCM811/SiC软包电池循环435次后容量保持率超过80%。

Lee等^[39]提出碘驱动的人工固态电解质界面（SEI）工程策略，用于稳定 SO_2 基无机电解液（ $\text{LiAlCl}_4\cdot 3\text{SO}_2$ ）中的锂金属负极。利用 LiI 添加剂在电解液中原位生成 I_2 ，通过 I_2/I^- 氧化还原介导作用调控界面反

应化学，将传统 LiCl 主导的SEI转变为富 $\text{Li}_2\text{S}/\text{Li}_2\text{O}$ 的无机复合层。该人工SEI兼具高离子电导率与机械稳定性，促进均匀锂沉积并抑制枝晶生长。经 I_2 改性锂负极的对称电池在 $3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}/3 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下稳定循环超1000圈， $\text{Li}/\text{LiFePO}_4$ 全电池600圈后容量保持率达63.9%，为高安全性锂金属电池提供了有效的界面调控方案。

Scholl等^[40]系统剖析了90款商业锂离子电池的真实电解液组分，揭示了产业界从传统单一配方向多维协同体系演进的底层逻辑。本研究运用高分辨色谱-质谱联用技术进行逆向工程，确认 PF_6^- 仍是核心导电阴离子，但已被规模化地与 BF_4^- 、 PO_2F_2 及 FSI 形成二元或三元共盐系统，以精准平衡电导率与热稳定性。溶剂维度高度复杂化，四元及以上混合碳酸酯（特别是PC的广泛下放）成为二次电池标配。添加剂层面共鉴定出17种标志性分子，清晰反映出业界正加速摒弃全氟烷基物质（PFAS），转向基于界面成膜与热保护协同的环保化包覆策略。此外，循环老化对比测试（NCA与LCO正极）证实了电解液降解路径高度依附于电极化学，其中LCO系统暴露出了严重的碳酸酯开环氧化低聚化机制。

Wu等^[41]开发了基于单氟代烷烃（如1, 3-二氟丙烷）的纯氟配位电解液，打破了传统氧/氮基电解液去溶剂化能垒过高的底层物理瓶颈。通过提升氟原子的路易斯碱度并精简空间位阻，实现了超 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的锂盐溶解度。体系内部极弱的 $\text{F}-\text{Li}^+$ 配位将离子传输转变为“配体交换”主导机制，彻底解放了界面反应动力学：在 -50°C 下的交换电流密度跃升一个数量级，并诱导生成富 LiF 的坚固双层SEI膜。基于该核心机制，13 Ah级锂金属软包电池在室温和 -50°C 极限工况下，分别交出了 $707 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与近 $400 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的创纪录能量密度。

Deng等^[42]提出一种耐高温电解质体系，即采用高沸点的碳酸丙烯酯（PC），并结合双阴离子工程以改善界面稳定性。阴离子调控的溶剂化结构实现了碳酸丙烯酯与石墨之间的完美兼容，同时双阴离子协同作用在高温下诱导形成了以 $\text{C-F}/\text{LiB}_x\text{O}_y$ 物种为主的有机/无机梯度界面相。 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2||$ 石墨软包电池在极端条件下表现出优异的循环耐久性和倍率性能，在 100°C 下实现了超过1000次的循环寿命，同时在严苛的 100°C 和5 C条件下仍能保

持其额定容量的55.7%。

Zhu等^[43]通过分子级调控电解质溶剂化结构和界面化学的策略,以稳定高电压NCM811||石墨电池。通过引入具有特定官能团的氟化共溶剂和新型锂盐添加剂,重构了Li⁺的初级溶剂化鞘,促进了阴离子优先分解,从而在正极和负极表面构筑了富含无机物(如LiF、Li₃PO₄)的、致密且稳定的CEI和固体电解质界面相(SEI)。这种分子工程化的界面能有效抑制电解质的持续氧化分解、过渡金属溶解以及由晶格氧释放引发的相变。采用优化电解质的NCM811||石墨软包电池在4.4 V的高截止电压下展现出卓越的循环稳定性,在室温下循环500次后容量保持率超过92%,同时在45℃高温下也表现出优异的容量保持和低阻抗增长。

Yang等^[44]引入了电化学稳定的氢键供体2-氰基-N-甲基乙酰胺作为共溶剂,以构建稳定的纳米级氢键域(<3.5Å)。2-氰基-N-甲基乙酰胺同时产生经典氢键(H键, H^{δ+}—O^{δ-})和非经典氢键(Z键, N^{δ-}—H^{δ+}),这破坏了松散结合的溶剂化簇并诱导出紧密配位的Li⁺溶剂化结构。氢键域促进了定向快速Li⁺传输通道的形成。在苛刻条件下(4.7 V, 面积容量约3.0 mAh·cm⁻²)循环的Li||LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂电池中,该电解质使得电池在400次循环后容量保持率达到78.8%。此外,展示了一个稳定的4.7 V锂金属软包电池,其比能量(基于所有组件的质量)达到418.2 Wh·kg⁻¹。

Chen等^[45]合成了一种新型氰乙胺功能化三硅氧烷化合物——3, 3'-{[3-(1, 1, 3, 3, 5, 5, 5-七甲基三硅氧烷基)丙基]氮杂二基}二丙腈(HMSAN),并将其与二氟草酸硼酸锂(LiODFB)结合作为双添加剂,以协同在NCM811表面构建稳固的电极-电解质界面。此外,HMSAN能有效清除电解质中的氢氟酸(HF)。因此,使用该双添加剂的NCM811/石墨全电池在4.5 V电压和55℃高温下以1 C倍率循环200次后,容量保持率达到58.6%,优于基线电解液(25.4%)。此外,该策略有效稳定了3.9 Ah软包电池的运行,其在相同条件下循环200次后显示出77.8%的容量保持率。

Luo等^[46]研究了一种分子工程策略,引入一种基于苯甲腈的电解质(BNE),从而实现长循环、高电压和高倍率的锂金属电池。利用了苯甲腈(BN)独特的分子特性:氰基动态配位锂离子

(Li⁺),缺电子的苯基与阴离子发生弱相互作用,而关键的是,庞大的BN分子通过空间位阻效应压缩了Li⁺的溶剂化鞘。BN在Li⁺溶剂化过程中施加的空间位阻需求,加上其同时配位Li⁺并与阴离子相互作用的能力,诱导形成了更紧密的聚集体(t-AGG)溶剂化结构,这一点通过各种光谱技术和分子动力学模拟得到了证实。从机理上讲,t-AGG溶剂化结构消除了大部分游离的BN分子,从而增强了在LMA处的稳定性;通过增加跳跃频率加速了Li⁺传输动力学;并促进了阴离子衍生的固态电解质界面膜的形成。因此,BNE使得4.5 V NCM811||Li电池在5 C倍率下实现了500次循环并保持80%的容量。

Li等^[47]通过调控分子间相互作用和溶剂分子体积,重构锂离子(Li⁺)的配位几何结构,引入一种具有低偶极矩和小分子尺寸的优化型调节剂,有效地将大范围的阴离子聚集打破为紧凑的离子传导区域,从而同时增加了自由电荷载流子的数量并提升了离子迁移率。基于这一原理,所设计的以二氯甲烷(85.11 Å³, 2.36 德拜)为溶剂的电解质,实现了锂离子在相邻配位点之间的快速跳跃(乙腈中为152.3 皮秒,FSI中为115.7 皮秒)。该电解质使1.0 Ah、4.5V的石墨(3.13 mAh·cm⁻²)||LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O₂(2.85 mAh·cm⁻²)软包电池在-40℃下仍能稳定循环。

4 电池技术

4.1 固态电池

Zhang等^[48]突破了传统锂电池在能量密度与高压稳定性上的工程天花板,系统性地重构了一种基于聚四氟乙烯(PTFE)与气相生长碳纤维(VGCF)分子级耦合的干法电极架构。利用剪切应力诱发的表面“烯醇-酮”化学转化,PTFE链紧密包覆VGCF,不仅在物理层面构建了超低迂曲度且高连通率的三维电子渗流网络,更在化学层面阻断了碳-电解液界面的高压寄生反应。这种纯结构工程策略彻底消除了传统厚电极内部的反应异质性,在无任何活性材料改性的前提下,于>5 mAh·cm⁻²超高面载量、>99%极限活物占比及4.70 V高压苛刻工况中实现了卓越的动力学稳定性。其软包电池在4.55 V下循环1000次容量保持率高达78%。

Ko等^[49]研究了全固态电池中富镍层状氧化物正极（NMC622和NMC811）与硫化物固态电解质（ $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ ）界面不稳定的关键问题。传统的导电炭黑（Super P）会催化硫化物电解质氧化分解，生成反应性多硫化物，进而腐蚀正极表面，形成绝缘的阴极-电解质界面层（CEI）。这导致部分活性NMC颗粒发生“电化学隔离”，即失去电子或离子连接而失效，表现为容量快速衰减和新的低电位氧化还原峰。为解决此问题，引入了一种含氧官能团修饰的导电碳材料（rGO）。这种功能化碳能在碳-电解质界面形成钝化层，有效抑制硫化物的氧化分解和多硫化物的生成。采用rGO的电池显著提升了活性物质利用率，在高负载（ $\geq 12 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ）和高温（ 60°C ）下表现出卓越的稳定性：NMC622在5 C倍率下循环500次后容量保持率高达95%，库仑效率平均为99.8%。

Yu等^[50]通过在石榴石型固态电解质 $\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{12}$ （LLZTO）中施加可控厚度方向热梯度，利用热膨胀失配诱导产生压缩残余应力，实现锂枝晶机械抑制。实验表明，在镀锂侧（高温侧）形成的压应力场可降低枝晶尖端的应力强度因子，有效提升断裂韧性；当温差达 20°C 时，临界电流密度（CCD）提升至约3倍，循环寿命延长4倍。应变片与光学曲率测量独立验证了热致应力大小，有限元分析进一步量化了热应力强度因子与枝晶长度的关系。该工作首次实验证实了纯机械应力对固态电解质电化学性能的独立调控作用，为无化学改性的应力工程策略提供了设计原则。

Jeong等^[51]针对全固态锂电池中锂枝晶穿透固态电解质导致短路的难题，提出了一种自修复机制。将锂盐LiTFSI引入到硫化物固态电解质（LPSCI）中作为自修复剂，其核心原理在于：当锂枝晶生长并穿透电解质时，会与LiTFSI发生反应，原位形成一层钝化层，从而阻止枝晶进一步蔓延。引入LiTFSI不仅将电解质的电子电导率降低了约60%，还促进了富含LiF的稳定固态电解质界面（SEI）形成，引导锂金属均匀沉积。在对称电池测试中，临界电流密度（CCD）从 $0.75 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提升至 $1.25 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；在NMC622全电池测试中，该策略有效抑制了枝晶生长，实现了稳定的长循环性能。

Park等^[52]针对全固态电池（ASSBs）在低堆叠

压力下运行的难题，提出了一种基于硫醇-烯点击反应的改性策略，用于优化丁苯橡胶（SBR）黏结剂。在浆料制备过程中原位引入该反应，实现了两种关键改性：一是通过接枝羧基增强电极的粘附性；二是通过交联形成三维网络结构以提升机械模量和弹性。相比于单纯的黏附性增强，交联结构对于维持低压力（ 0.3 MPa ）下的电极完整性更为关键。改性后的黏结剂（X-SBR）能有效抑制活性材料在充放电过程中的体积变化，减少颗粒剥离和界面阻抗积累。在单晶 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2|\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}|\text{Li-In}$ 电池测试中，优化后的交联黏结剂使电池在 0.3 MPa 超低压下实现了 $163 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的初始放电容量和优异的循环稳定性，显著优于未改性的SBR黏结剂。

Wu等^[53]提出了一种双功能界面工程策略，通过纳米级 $\text{Li}_{6-x}\text{PS}_{5-x}\text{Cl}_{1+x}$ 固态电解质（ $D_{50}=0.36 \mu\text{m}$ ）与自适应聚乙烯-醋酸乙烯酯/二氟草酸硼酸锂（PEVA-LiDFOB）复合界面胶的协同设计，解决硫化物基全固态锂电池在低堆叠压力下的界面退化问题。该界面胶通过粘弹性应力调节动态维持固-固接触，同时抑制高电压界面副反应。优化后的电池在 10 MPa 、室温条件下实现1000圈1 C循环90.6%容量保持率及9000圈2 C循环61.4%保持率，软包电池在 2 MPa 下100圈循环保持率90.6%。

Ohno等^[54]采用流延成型与冷等静压（CIP）工艺，制备出可在极低堆叠压力下工作的片状硫化物全固态电池复合电极。研究发现，CIP处理能够实现电极均匀致密化，强化颗粒间接触，构建连续的锂离子与电子传导通路，显著提升离子电导率与界面稳定性。同时，选用低体积变化的 $\text{Li}_{8/7}\text{Ti}_{2/7}\text{V}_{4/7}\text{O}_2$ （LTVO）作为正极材料，并优化导电剂VGCF含量，平衡离子与电子传导网络，避免过量碳材料破坏离子通路。优化后的电极在低于 0.5 MPa 的极小堆叠压力下，实现 $222 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高可逆容量，循环200次容量保持率达95%。

Elina等^[55]针对全固态电池中离子与电子传输受限及界面不稳定的问题，提出了一种多功能“正极电解质”（Catholyte）策略。通过一步水相合成法，将混合离子-电子导电聚合物PEDOT:PSSTFSI（作为功能聚合物黏结剂）引入到卤化物固态电解质 Li_3InCl_6 （LIC）中，制备了LIC|FPX复合材料。该聚合物不仅能作为黏结剂提高电极致密性（孔隙率

降低41.8%)，同时提升材料的电子电导率（最高提升12倍）和离子电导率（最高提升15倍）。在电化学测试中，含有该功能聚合物的电池表现出更优的倍率性能和循环稳定性，在1 C倍率下实现了完全可逆循环。

Lee等^[56]提出了一种“卤素编程”的 Li_3PO_4 (LPOFCI) 涂层，其中F和Cl的共掺杂不仅降低了 Li^+ 迁移能垒，更重要的是Cl在与硫化物电解质(LPSCI)接触时会原位生成LiCl富集的自适应界面层，该界面层能够在循环过程中动态重组，抑制硫化物分解并维持快速的离子传导。在纯 Li_3PO_4 中， Li^+ 迁移的活化能为0.62 eV。而在LPOFCI中，由于F和Cl的引入改变了局域电场，能垒显著降低至0.41 eV（降幅34%）。LPSCI与LPOFCI的界面形成能（-27.71 eV）远低于与纯 Li_3PO_4 的界面（-18.61 eV）。更负的值意味着热力学上更稳定，即LPOFCI与硫化物电解质更“亲近”，更不容易发生排斥和反应。这种“静态涂层+动态界面”的双层保护策略，使得NCM811正极在硫化物全固态电池中实现了250圈80%容量保持率的优异性能。

4.2 锂空/锂硫电池

Cronk等^[57]提出了一种基于硫化物固态电解质(SSE)的锂硫正极设计，克服了固态电池中的界面、动力学和化学机械问题。该方法采用高能单步机械化学合成工艺，在硫颗粒表面形成离子导电的界面相，提高了硫的利用率和循环稳定性。通过调控硫化物颗粒尺寸至微米级，降低了离子传输的曲折度，提升了高倍率性能。实验结果显示，硫正极在 $10 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下可实现87%的容量保持率，循环超过140次。同时， Li_2S 正极在无负极的固态软包电池中表现出 $900 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高可逆容量，且无需催化剂或液态电解质。该设计有效激活了SSE的氧化还原活性，并通过正负极体积变化的平衡缓解了电池内部应力，使系统在 25°C 下实现稳定循环。

Gu等^[58]提出了一种新型无活性物质(AM-free)设计的锂-硫全固态电池(Li-S ASSB)阴极，通过利用硫化物固态电解质($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$, LPSCI)的氧化分解特性，实现活性物质的原位生成。该设计解决了硫聚合体内部的传输限制问题，通过缩短扩散路径和自限性分解反应，实现了高能量密度(1, 277.8 $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$)和长循环寿命(767次循环后容量保持率95%)。LPSCI-KB阴极中活性

物质层呈现亚微米尺度，且硫与磷的富集区域分离，揭示了原位生成活性物质的异质性；通过调整碳材料的体积比例，优化了有效界面面积，其中Ketjen黑因高比表面积(约 $1368 \text{ m}^2/\text{g}$)和枝状结构，在室温下表现出最佳性能($882 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)；通过LiI添加剂降低界面电荷转移电阻，进一步提升了阴极能量密度和循环稳定性。

Hong等^[59]提出了一种通过高价阳离子掺杂实现 Li_2S 阴极激活的新策略，以解决全固态锂硫电池(ASSLSBs)中 Li_2S 电导率低、反应动力学缓慢等问题。研究发现，将 Li^+ 位点替换为四价过渡金属离子(如 Zr^{4+})可诱导 Li_2S 晶格膨胀，显著改善其电化学性能。 Zr^{4+} 因离子半径最大，成为最有效的掺杂元素，其掺杂使 Li_2S 的带隙缩小，电子导电性提升超过三个数量级(从 $<10^{-12} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增至 $8.50\times10^{-9} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$)，并产生大量锂空位，促进 Li^+ 快速迁移，离子迁移率提升近两个数量级。实验结果表明，掺杂后的ZLS-0.2阴极在65%活性物质含量下，可实现 $827 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高可逆容量，循环2000次后仍保持稳定。通过COMSOL模拟与电化学阻抗谱(EIS)分析，验证了掺杂后电荷传输路径更均匀，局部电流热点减少，同时阻抗强度降低30%。

Jiang等^[60]提出了一种新型的f-d杂化强度描述符(I_{fd})，用于定量评估稀土氧化物在全固态锂-硫电池(ASSLSBs)中的催化性能。通过引入 I_{fd} 参数，揭示了稀土氧化物的电子结构与硫转化动力学之间的直接关联，其中 I_{fd} 值越高，金属-硫相互作用强度(IR-S)和锂离子电导率(σ_{Li^+})越显著，从而降低硫还原反应(SRR)的活化能(E_a)和过电位(η)。以 Lu_2O_3 为催化剂的复合正极通过球磨工艺实现均匀分散，其完全占据的4f电子态使 I_{fd} 值达到最大，使电池在5 C高倍率下实现超过20000次稳定循环，并在室温下达成 $14.48 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的超高面积容量，远超此前高温(60°C)条件下高负载电池的 $4 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 水平。 Lu_2O_3 的强f-d-p轨道杂化效应一方面增强了界面电子/离子传输效率，另一方面通过抑制电化学惰性硫的累积及减少界面裂纹，实现了固态电解质与电极相间的持续接触与低界面电阻。

Chen等^[61]开发了一种通过电化学原位自生成硫代磷酸盐(Li_3PS_4)分子介体的策略以解决锂硫电池中 Li_2S 沉积钝化与多硫化物穿梭的物理化学瓶颈。该研究设计了牢固锚定于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片上的三

维磷-硫共价无机骨架 (TNS/P-S CIF), 在放电过程中动态生成分子级均匀分散的 Li_3PS_4 。该极性介体凭借极高的结合能精准引导 Li_2S 发生异质成核, 构建出化学计量比最优 (1:6) 的 $\text{Li}_3\text{PS}_4@\text{Li}_2\text{S}$ 三维多孔异质簇薄膜, 从分子层面彻底阻断了大块 Li_2S 晶体的聚集与界面钝化。该全电池在 $1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的电流下历经 1000 次循环, 单圈容量衰减率极低 (仅 0.022%), 并在 $9.8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的超高负载下稳定输出 $6.24\text{mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的面积容量。

An 等^[62]开发了一种完全消除有毒溶剂与绝缘聚合物黏结剂的硫碳正极规模化干法制造工艺。该研究跳出传统电极配方框架, 精准利用单质硫在 80°C 下的热软化与塑性变形特征, 赋予其“活性物质”与“结构黏结剂”的双重本征功能。通过热辅助辊压技术在常规铝箔上直接构建了兼具低孔隙迂曲度与高机械内聚力的均质电极架构。这种内在的结构连贯性有效抵御了多硫化物在“固-液-固”多相转换中引发的体积膨胀与应力破坏, 使电极在 1.0C 大倍率下循环 500 次后仍维持 $932\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的优异容量。

Wang 等^[63]提出了一种基于磁场协同调控的锂硫电池全局优化策略, 利用具有双层中空结构的 FeNi-B 纳米锥作为正极反应器, 在外部磁场介入下, Fe/Ni 的 3d 轨道电子发生低自旋至高自旋的物理跃迁, 其 d 带中心精准上移, 从底层电子结构维度最大化了对多硫化物的化学吸附与催化转化动力学。同时, 在负极侧利用磁流体动力学 (MHD) 效应, 通过洛伦兹力直接规制 Li^+ 的传输轨迹, 强行消除局部浓度梯度, 实现了无枝晶的均质锂沉积。这种自旋极化与 MHD 效应的物理-化学双重耦合, 使电池在 $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高硫负载及 -40°C 的极端热力学条件下依然展现出极高的容量保留率与长效稳定性。

Lyu 等^[64]引入了一种独立的、自分离的三层聚合物电解质, 该电解质通过两种不混溶聚合物的自主相分离, 在正极和负极界面形成两层纳米级厚度的离子选择性涂层, 同时保留了高导电性的本体基质。在锂硫电池中, 这些涂层同时排斥硫正极处溶解的多硫化物, 并稳定锂金属负极上的锂沉积/剥离过程, 且不牺牲离子传输。原位光学电池监测和理论建模表明, 这种双功能涂层是实现锂金属负极稳定运行和有效抑制穿梭效应的关键。该三层聚合

物电解质在 0.2C 倍率下实现了 $1369\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的初始放电容量 (理论容量的 81.7%), 并在 50 次循环中保持了稳定的容量。

Peng 等^[65]设计了一种 Li_xTiS_2 催化剂, 它可以促进 $\text{S}_8/\text{Li}_2\text{S}_8$ 向 Li_2S_4 的直接化学转化, 并随后促进 Li_2S_4 的电化学还原为 Li_2S 。此串联催化机制改变了反应动力学, 将其从传统的浓度依赖的一阶反应转变为与浓度无关的零阶反应, 使得在低电解液到硫 (E/S) 比 ($5\mu\text{L}\cdot\text{mgS}^{-1}$) 和高硫负载 (约 $5\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$) 条件下实现高效的硫转化。这一策略显著降低了活化能 (约为 0.3eV , 比无催化剂时降低约 50%), 并提高了电池性能。在 1C 下, 其初始容量达到 $796\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 且经过 1500 次循环后每圈容量衰减仅为 0.028%。 0.2C 下的实际应用中, 电池的面积容量为 $4.32\text{mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$, 300 次循环后仍保持超过 70% 的容量保留率, 显示出良好的循环性能和高能量密度 ($550\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$)。同时, 组装的 2.0Ah 软包电池在低 E/S 比 ($2\mu\text{L}\cdot\text{mgS}^{-1}$) 条件下仍能稳定循环。

4.3 其他电池技术

Liu 等^[66]提出了一种基于分隔型离子簇电解质 (PIE) 的界面环境调控策略, 从根本上攻克了高比能转换型黄铁矿 (FeS_2) 正极在循环过程中的相偏析难题。该电解质利用空间位阻反溶剂 (DIPE) 重构溶剂化微环境, 有效阻断了多硫化物的溶解途径, 迫使放电产物在局部发生原位转换, 最终在纳米尺度下均匀重构为热力学稳定的球形形貌, 彻底消除了金属相团聚与界面解耦。实验结果表明, FeS_2 正极在 10C 高倍率下循环 10,000 次后容量保持率高达 72.4%。此外, 研究团队成功将该体系放大至 8.8Ah 软包电池, 实现了 $511\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的极高能量密度, 且通过严苛的针刺测试证实了其零热失控的本征安全性。

Luo 等^[67]研究一种碱木质素交联丙烯腈和丙烯酸共聚物作为三维正极黏结剂 (PNAL), 它能有效清除高电压下产生的氧自由基, 抑制过渡金属离子的不可逆溶解, 并稳定电极-电解质界面和正极结构。因此, 基于 PNAL 的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ 锂金属电池在 4.6V 电压、 3C 倍率下循环 300 次后, 实现了 75.7% 的高容量保持率。此外, 采用 PNAL 制备的 Ah 级软包电池能量密度达到 $376.5\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 4.6V 下循环 100 次后容量保持率为 81.7%。

Lee 等^[68]通过引发式化学气相沉积 (iCVD) 在

铜集流体上构筑了超薄（约 15 nm）聚合物层（pPFDMA），该聚合物兼具电解液疏性与溶剂疏性，可有效抑制界面副反应并诱导局部盐富集，从而调控 Li^+ 溶剂化结构。这一界面设计促进了薄层、无机物富集（ LiF 、 Li_2S 等）的固态电解质界面（SEI）形成，同时保持高体相离子电导率。pPFDMA 修饰的 Cu 在半电池中循环寿命提升 3 倍，在 NCM811 基无负极软包电池中实现了 413 Wh/kg 的能量密度与 826 W/kg 的功率密度，展现出优异的循环稳定性。

5 表征和测量技术

Kim 等^[69]基于三维电化学-热耦合模型，对商用软包锂离子电池开展混合脉冲功率表征（HPPC）仿真，系统揭示动态工况下的极化行为规律。研究发现，放电过程电压降与能耗主要受固相浓差极化和活化极化控制，充电过程则以活化极化主导；低温与高倍率会显著加剧极化，延长电压恢复时间，且低温静置阶段电解液浓度差未充分弛豫，会在充电初期产生负扩散极化，提升析锂风险。此外，正极因交换电流密度更低，活化极化占比最高，是能量损耗的主要来源；温升随放电倍率升高与温度降低而增大，充电可逆热则随温度上升而增加。

Grey 等^[70]针对具有八面体形貌 $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ 正极，探究其各向异性锂离子传输行为。通过在充电-静置制度下采用电荷光度法（CP）表征，研究揭示了 NMC 颗粒不同晶面上存在显著差异的输运特性。有限元模拟结果验证了上述发现，凸显了颗粒间相互作用的关键作用——这一效应此前未受足够重视，而本研究证实影响十分显著。通过结合实验证据与计算模拟，本研究更深入地阐明了锂离子传输规律及其内在机理。

Wang 等^[71]采用多尺度关联原位光谱技术与原子到介观尺度的模拟方法，对比研究了 NMC811 与 LiNiO_2 中由掺杂介导的煅烧动力学规律。尽管两种材料均通过相同的中间体路径向热力学稳定的层状相转变，但 NMC811 更早出现层状结构形成，该过程与氢氧化物分解同步发生，且后续结晶速率缓慢。模拟结果表明，锰、钴元素可降低锂嵌入与有序排列的能垒，同时增大层间滑移阻力，从而在高温下抑制晶体生长。这种由掺杂介导的锂化与结晶过程解耦，解释了 NMC811 呈现细晶微观结构而

LiNiO_2 形成粗化颗粒的原因，并为镍基正极材料的可预测微观结构调控建立了机理框架。

Wang 等^[72]采用多尺度原位表征技术，系统对比了高镍（ $\text{Ni} \geq 90\%$ ）无钴富镍层状氧化物正极中单晶与多晶材料的电化学性能差异。研究发现，单晶材料在充电过程中镍氧化反应呈现显著不均匀性，引发额外不可逆氧化还原行为，加剧晶格应变与颗粒内部微裂纹，同时促进岩盐相生成，造成结构与化学稳定性劣化。相比之下，多晶材料因晶界存在与电解液渗透，氧化反应更均匀，虽表面重构更明显，但体相结构更稳定。结果表明，单晶高镍正极的性能衰减并非由界面副反应主导，而是体相结构退化起决定性作用。该研究揭示了镍氧化反应对化学力学稳定性的影响机制，阐明了单晶与多晶正极长期存在的性能差距根源。

Lee 等^[73]以典型 DRX 材料 $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Nb}_{0.2}\text{O}_2$ 为研究对象，结合原位/非原位表征、密度泛函理论计算与机器学习，证实不可逆氧流失会触发 DRX 材料发生级联式晶格膨胀，从而在化学不稳定性与力学不稳定性之间建立强耦合关系，最终造成复合电极结构破损并加速性能衰减。值得注意的是，研究表明采用高浓度电解液可显著缓解这种耦合式衰减路径，其能够抑制氧流失并稳定 DRX 晶体结构。该研究完善了对 DRX 正极衰减机理的认知，表明电解液工程是从材料、复合电极到电芯多尺度提升高能量 DRX 正极循环稳定性的关键策略。

Yang 等^[74]研究在受控热滥用条件下，通过同步测量温度、压力、气体释放和燃烧行为，系统研究了采用两种代表性二元电解质（EC/EMC 和 EC/DMC）的 NCM811 软包电池的热失控行为。结果表明，线性碳酸酯溶剂显著影响热失控动力学。与 EC/DMC 相比，EC/EMC 系统表现出更快的温升、更早的加速热失控起始，以及更早的电压失效和气体排放。燃烧测试进一步表明，EC/EMC 具有更低的临界点火热通量（ 15.00 kW/m^2 ）和更高的有效燃烧热（ 30.83 kJ/g ），表明其火灾增长趋势更强。不含电解质的对照实验证实，电解质是热失控过程中热量和气体释放的主要来源。

Liu 等^[75]主要探讨了基于硫化物的全固态锂硫电池（ASSLS）中硫正极在充放电过程中的动态演变过程。重点揭示了在充放电过程中，硫（S）颗粒的体积变化与电化学转化（ $\text{S} \rightarrow \text{Li}_2\text{S}$ ）之间的

关系，并指出了这一过程在充电过程中表现出较差的可逆性。在放电过程中，硫颗粒逐渐膨胀并融合，这是由于电化学转化生成锂硫化物（ Li_2S ）。而在充电过程中，这些硫颗粒无法恢复到原始尺寸，导致容量衰减。研究还发现了硫与固态电解质 $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ （LGPS）之间的副反应，表现为硫溶解和LGPS的分解，进一步加剧了活性物质的损耗并增加了离子传输阻力。

Wang等^[79]提出了一种基于原位总散射（PDF）和X射线吸收谱（XAS）联用的新方法，系统揭示了非晶态硫-聚合物复合材料（SPAN）合成过程中硫链长度与 π - π 堆叠结构的动态演变规律。通过高温原位PDF分析，他们首次在实空间捕捉到硫链从长链（SPAN300）向短链（SPAN500）的渐进性缩短过程，并发现 π - π 堆叠的出现与硫链缩短密切相关。结合XAS研究，证实了残余质子引发的硫-氮共轭体系中硫醇-硫酮互变异构是首循环不可逆容量损失（20%）的根源，而短链硫结构能有效抑制多硫化物溶解并降低电荷转移阻抗，SPAN500在1000次循环后仍保持89%容量，远高于S8的23%。该方法突破了传统表面敏感技术（如XPS、FTIR）仅能研究退火态或纳米尺度表面层的局限性，通过同步监测介观结构与电化学行为，建立了硫链长度与循环稳定性（SPAN300首循环容量保持率仅23% vs. SPAN500的89%）之间的定量关联。

Wu等^[77]明确区分并量化了“体相化学不相容性”与“电化学界面退化”在热失控中的不同角色。前者是“火药库”，后者是“引信”。研究证明，引信（亚稳态界面相）的点燃温度（约200℃）远低于火药库（体相反应，>350℃）。系统揭示了硫化物全固态电池中热失控的“双阶段”机制—第一阶段由电化学循环中形成的界面分解产物（-S-S-、-P-S-P-等）与脱锂态正极的优先反应引发，第二阶段由正极与硫化物电解质本体的高温固-固反应主导。作者进一步证明，通过Ge—S键稳定的 Li_4GeS_4 界面层可以显著抑制第一阶段的热失控，将电池的自热起始温度（ T_{onset} ）从168℃提升至223℃，热失控温度从228℃提升至312℃。

Liang等^[78]针对卤化物基全固态电池在存储过程中的日历老化机制进行了深入探究。复合正极的

容量保持率与荷电状态（SOC）之间存在非单调关系。揭示了两种主要的退化机制：在低SOC下，卤化物电解质（LIC）发生还原分解，生成 LiCl ；在高SoC下，正极材料（NCM89）发生严重的晶格畸变和结构退化。电池在50%SOC（中等电量）下存储时，容量衰减最小，稳定性最佳。此外，利用原子层沉积（ALD）技术在NCM89表面构建了超薄 Li_2PO_4 （LPO）涂层，有效抑制低SOC下的电解质分解，显著提升界面的电化学稳定性。该工作为理解卤化物基电池的界面老化提供了机理依据，并提出了通过荷电状态管理和界面工程来延长电池寿命的有效策略。

Battistella等^[79]提出利用GD-MS技术对全锂离子电池电极进行深度同位素分析，揭示了锂同位素分馏现象与电极退化之间的关联。通过对比传统MICAP-MS方法，GD-MS在扁平电池结构中实现了逐层元素/同位素分析，正极每次扫描的平均侵蚀率为0.15 μm ，负极每次扫描的平均侵蚀率为0.5 nm，并显著降低基质效应。研究发现，在C/3慢充条件下，正极 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 比值提升至7，而负极 ^6Li 富集层厚度达500 nm。但在2 C快充条件下，负极 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 比值降至3.5，表明动力学效应主导下 ^7Li 更易参与单电子转移反应，同时正极 ^7Li 富集减弱。

Hüger等^[80]介绍了一种通过结合同位素多层电极（IML）与中子反射（NR）技术，以直接探测锂离子电池在工作过程中锂化机制的方法。利用同位素多层电极将复杂的反射性模式转化为由单一、明确布拉格峰表征的简单模式，从而简化了数据分析并使得机制识别成为可能。这种技术为理解锂离子在电极材料中的分布和扩散提供了新的实验手段。使用了自然锗（Ge）与同位素锗（ ^{73}Ge ）形成的多层结构，通过改变这些材料的层厚度，产生清晰的布拉格峰。实验中选择了多种电流密度，从接近热力学平衡的状态到较快的充放电速率，以研究不同的锂化过程。实验结果表明，在均质锂化机制下，布拉格峰的位置保持不变，而峰的强度随充放电状态的变化而改变；相比之下，异质锂化机制会导致布拉格峰位置的变化。实验数据与对应的模拟结果对比，显示了锂化的均质机制在整个充放电过程中都是有效且稳定的，而异质机制则表现出不同的特征，如布拉格峰位置的变化和峰强度的分布。

Wang等^[81]报告了一种基于电子背散射衍射

(EBSD)的成像方法,用于定量分析两种层状氧化物正极中晶格应变的演化及其空间异质性。通过对数千个正极颗粒的晶体取向差数据进行数值分布分析,实现了定量评估,研究发现这些数据符合右偏态分布。研究揭示了单晶颗粒内部以及不同颗粒之间均存在显著的晶格应变异质性。这些应变差异在放电过程中会自我修复,但随着充电深度的增加和循环次数的增多而加剧。不断增加的应变阻碍了锂离子在材料体相中的扩散,从而限制了最大可释容量,尤其是在高电流密度下。三维极图分析进一步确认,层状弯曲和层状扭曲是电化学循环后的正极颗粒中两种主要的晶格畸变模式。这种不可恢复的层状弯曲的不断积累,是导致层状氧化物正极动力学控制型容量衰减的主要原因。

Vestin等^[82]利用X射线与中子原位双模态断层扫描技术,结合Li-7同位素对比增强策略,实现了全固态电池内部锂传输的4D时空映射。研究通过图像配准与双模态分割,精准重构了正负极及隔膜的三维拓扑结构。结果表明,隔膜中的锂扩散并非一维均匀推进,而是受局部应力或电场不均驱使呈现优先传输路径;正极脱锂过程暴露出显著的径向与纵向三维浓度梯度;负极则揭示了伴随体积膨胀的非均匀LiIn合金化机制。

Menon等^[83]证明了在标准、未改性且未氘代的单层软包(SLP)NMC-石墨电池上进行原位中子衍射(ND)的可行性。依托WISH高分辨冷中子衍射仪,该研究克服了传统中子实验中氢的非相干散射和锂强吸收造成的极高背景干扰,无需昂贵的同位素富集或定制化电池即可获取半定量的晶体结构演变数据。通过对比新旧电池,精准量化了老化电极中NMC体相脱锂受阻、浓度梯度增加以及石墨负极中锂不可逆捕获等衰减机制。

Chu等^[84]建立了一种基于原位同步辐射X射线衍射(SXRD)与纳米衍射(XND)的表征方法,实现了对全固态锂电池(ASSLBs)复合正极中固态电解质(Li₃InCl₆)内Li⁺扩散动力学的纳米级精准追踪。研究表明,Li⁺在充放电过程中可逆地嵌脱电解质晶格,其结构演变受控于界面阻抗与静电排斥的竞争博弈。XND多维空间映射证实,晶格内Li⁺分布极不均匀,高结晶度区域因结构稳定,构成了穿透界面的优选离子传导网络;而高负应变区域对Li⁺嵌入呈物理惰性。结合电化学分析断定,扩散

不可逆性根本源于高瞬态充电速率诱发的界面极化,而非绝对充电深度。

Ai等^[85]开发了一种真空气转移方法,在扫描电镜中利用纳米操纵器对原位生长的锂枝晶进行单轴拉伸测试。结果表明,锂枝晶呈现反常的强脆性特征:断裂应力超过150 MPa,无可见塑性变形,与体相锂金属的延展性(屈服强度0.6 MPa)形成鲜明对比。冷冻透射电镜揭示锂枝晶具有核壳结构——体心立方单晶锂核(沿<110>方向生长)被约15 nm厚的固体电解质界面膜(SEI)包覆。有限元模拟与位错力学分析表明,纳米尺度锂核中位错源匮乏及SEI层对位错形核与运动的约束效应,导致锂核屈服强度超过115 MPa,解释了其高强度与脆性断裂行为。

Li等^[86]采用同步辐射X射线衍射技术,研究无负极固态电池中电沉积锂的织构演变规律。研究发现,温和条件(低温、低电流密度)下锂呈现显著的<110>纤维织构,[110]晶向平行于生长方向;而高电流密度或高温条件导致织构随机化。该织构转变与锂形核能垒降低、晶面选择性生长及高温蠕变效应密切相关。研究建立了电化学沉积参数与锂晶体学取向的定量关联,为调控锂沉积行为、提升固态电池循环稳定性提供了理论依据。

Huang等^[87]构建了集成超声成像、原位质谱(DEMS)与阻抗谱(EIS)的原位表征系统,精准解耦了过渡金属(TM)溶解引发的锂离子电池产气与界面失效底层逻辑。研究探明不同TM离子的降解机制存在根本分歧:Mn²⁺具备极强的电催化活性,可改变电解液还原路径优先生成H₂/CO₂,导致生成疏松多孔的SEI并伴随持续且剧烈的产气,通过物理破坏界面引发活性锂不可逆流失,对容量杀伤力极大(危害排序:Mn²⁺>Co²⁺>Ni²⁺);Co²⁺表现为延迟性大量产气;而Ni²⁺几乎不产气,其机制在于诱导生成致密且富无机物的SEI,从而主导界面阻抗的急剧攀升。此外,本工作证实静置期的“气体吸收”假象实为消耗CO₂的界面副反应,不仅无法恢复容量,反会激增电荷转移阻抗。

Donais等^[88]通过测量容量衰减、电解质电阻变化以及通过转动惯量测量和X射线CT成像观察电解质整体运动,探讨了不同阳极氧化硅(SiO_x)含量(0~15%重量比的Si)对圆柱形18650电池中EMSI的影响。随着SiO_x含量的增加,电池泵出更

多电解质，电解质电阻随循环次数增加而增大，并显示出加速的容量衰减。然而，这一趋势对于 SiO_x 含量最高的电池并不成立，该电池显示出电解质泵送但没有电解质运动引起的盐浓度不均一性（EMSI）。这是由于低孔隙率的电极同时从正极和负极产生电解质泵送，但不会导致盐浓度分布不均。该电池也可能存在注液不足，这减少了电解质运动的量。提出了一个简单的模型，用于预测电池平衡电解质盐梯度所需的静置时间，该模型与实验数据吻合良好。对于这些电池，典型的“弛豫半衰期”为3天，经过30次1 C/1 C循环后完全恢复容量可能需要长达两周时间。

Furtmair等^[90]研究对具有石墨负极和基于NMC 811正极的工业锂离子电池进行了长期循环和高充电倍率测试。采用X射线计算机断层扫描（CT）结合扫描电子显微镜（SEM）和能量色散X射线光谱（EDX），以及离子交换色谱、傅里叶变换红外光谱（FTIR）和深度分辨X射线光电子能谱（XPS）来研究SEI组成随循环温度和循环次数的变化。结果表明，循环温度对电池老化的影响明显强于完成的循环次数。高温促进了SEI内含氟相（特别是LiF）的形成，并很可能伴随着负极-隔膜界面处枝晶诱导的电解质传输路径阻塞。此外，量化了与含氟SEI化合物（LiF和 $\text{Li}_x\text{PO}_y\text{F}_z$ ）相关的不可逆容量比例，揭示了其对界面降解的温度依赖性贡献。

Guo等^[90]揭示了高比能锂金属电池中长期被忽视的“负极至正极”串扰降解机制。通过在局域高浓度电解液中将不同镍含量的层状氧化物正极（NMC622, NMC811, NMC90）分别与锂金属或石墨负极配对循环，确证了高活性锂金属负极会向正极释放反向迁移物质。利用磷酸铁锂作为对电极的动态恒流电化学阻抗谱（GEIS）测试剥离单电极阻抗，发现与锂负极配对的正极具有更高的电荷转移阻抗。XPS和ToF-SIMS深度剖析表明，锂负极加剧了正极界面的溶剂分解，导致形成更厚、异质且富含有机物的正极电解质中间相（CEI）。该串扰效应在NMC90中因其极高的表面反应性尤为剧烈，而在NMC622中则受锰溶解驱动加速。此工作作为正负极跨界面串扰提供了坚实的实验证据，为破局锂金属电池底层降解逻辑指明了方向。

6 电池回收

Liu等^[91]研究了废旧锂离子电池转化为黑粉的预处理环节对整体回收效能及相关环境足迹的影响，通过对预处理工艺（机械法、热处理法及化学法等）、正极材料体系及区域场景下，驱动材料回收率与环境影响差异的内在机制进行了分析，确认预处理环节造成了大部分材料损失，且贡献了锂电池回收全过程16%~38%的环境影响。作者提出针对性的工艺升级策略，可将预处理阶段的环境影响降低一半。

Wang等^[92]对层状正极材料的回收提出了简单有效的机械化学（MC）回收方法，通过球磨加浸出的方法，获得高锂浸出率（在活化态的NMC811中，锂浸出率>95%）。浸出过程中仅用 CO_2 做为反应试剂，同时，过渡金属可被转化为高性能析氧反应（OER）催化剂，从而获得一举三得的效果。

Huang等^[93]构建了一种基于氧化还原靶向液流体系的互补型废旧电池回收新范式。该系统巧妙利用废旧材料固有的热力学电位差，将低电位（LFP）与高电位（NMC/LCO）正极分别作为阳极与阴极原料。通过特异性氧化还原介体（ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/\text{THBDS}$ ）的穿梭，在提取核心金属（浸出率>95%）的同时将废料化学能转化为电能。系统突破性地整合了用于沉淀锂离子的 CO_2 捕获模块，以及用于原位再生酸碱的电化学氢循环网络，从物理与化学双重层面实现了零净试剂消耗的完美闭环。技术经济分析证实，该设计在利润率（\$3.18/\text{kg}\$）与碳足迹表现上全面碾压传统湿法冶金。该工作通过极度理性的电化学机制解耦了资源回收与试剂损耗的必然联系，为下一代可持续电池回收确立了高收益、高能效的硬核工程逻辑。

Zhong等^[94]提出了一种“两阶段连续氧化提锂方法”——先短时电化学双氧化（EDO），再零能耗静置弛豫，将锂浸出效率提升至>99%，同时节省近50%的电能消耗。阶段I（EDO阶段）：施加2.5 V恒电位，进行55分钟的电化学双氧化。此阶段不仅驱动锂从晶格中浸出，更关键的是在材料内部“预埋”后续反应的驱动力——将晶格氧（ O^{2-} ）转化为高价态的氧化晶格氧（ O^n , $n<2$ ）。阶段II（浸泡松弛阶段）：停止所有电能输入，让电极在氧化性电解液中静置。此时，阶段I生成的 O^n 和残留的自

由氯等活性物种,将持续驱动锂的深度浸出和离子交换。作者深入揭示了晶格氧(O^{2-})在电氧化阶段被激活为氧化态晶格氧(O^n , $n < 2$),进而在静置阶段驱动离子交换和持续锂浸出的新机制。进而将电化学回收的认知从单纯的“电子转移”提升到了“晶格氧化学与离子交换耦合”的新高度。

Wu等^[95]开发了一种天然丝胶蛋白与硫酸超分子双交联的水溶性SPS黏结剂,其在NCM111、LFP、LNMO正极与石墨负极中展现出与PVDF相当的电化学性能;NCM111与石墨组成的1.3 Ah软包电池500次循环容量保持率85.0%。该黏结剂在50℃水中1分钟内即可完全溶解,实现电极材料与集流体无损分离,能耗与排放远低于火法/湿法冶金,为锂电池从设计端实现绿色循环提供全新方案。

7 计算和深度学习

Tu等^[96]建立了一个统一的定量框架,在近表面扩散条件下,将表观扩散系数与交换电流密度同裂纹衍生的界面关联起来。将该框架应用于组分完全一致的单晶与多晶NMC811,并结合从头算计算、机器学习分子动力学以及有限元断裂模拟,结果表明:在裂纹产生前,二者本征的晶格动力学与界面动力学完全相同。多晶材料表观上的动力学优势,源于电解液渗入晶间裂纹,既形成了新的电化学活性界面,又缩短了扩散路径。经实验验证的颗粒尺寸-倍率模型进一步表明,减小尺寸后的单晶颗粒可在保持力学完整性的同时,实现与多晶相当的快充性能。

Gümrükçüoğlu等^[97]构建了一种用于推断锂电池固态扩散系数的“一致模型推断”(ICM)系统框架。传统的GITT结合Sand方程的方法耗时极长,且其底层的半无限大平板假设与实际预测所用的球形扩散模型存在本质上的数学不一致。ICM方法打破了这一技术壁垒,直接使用单颗粒非线性球面扩散模型进行正向计算,通过最小化预测与实测电压的残差平方和来反演扩散系数。结合商用电池实验与DFN合成数据的双重验证表明,ICM不仅成功解除了模型对脉冲-弛豫定制数据的依赖,更能直接解析低倍率恒流数据。

Zhang等^[98]提出了一种名为“发现学习(discovery learning)”的科学机器学习框架,旨在突破电池寿命预测中数据获取成本高昂与分布偏

移的物理瓶颈。该框架由Learner(主动学习)、Interpreter(物理指导特征对齐)和Oracle(零样本预测)三大代理构成,形成类人推理闭环。其底层逻辑在于:通过物理模型提取目标电池前50圈的早期热力学/动力学特征,将未见过的电池设计映射至现有的低成本、跨体系小电池历史数据库中进行零样本推断。Oracle生成的“伪标签”直接指导Learner的主动查询,从而完全免除了漫长且昂贵的衰减测试。在123块工业级大容量(73~84 Ah)锂离子软包电池(覆盖NMC811/NMC9与石墨/硅碳负极)的验证中,该模型仅需51%电芯的前50圈数据,即可实现均值绝对百分比误差仅7.2%的高精度寿命预测。

Zhao等^[99]提出了一种基于低成本预训练大语言模型(DeepSeek-R1)的电池健康状态(SOH)多特征线性估算架构DS-SOH。该工作从恒流充放电及增量容量曲线中提取并清洗出6维核心退化特征,利用特征重处理网络与固定提示词学习框架,将传统数值回归任务重构为LLM兼容的文本生成任务。结合LoRA低秩微调技术,DS-SOH以极低的计算代价完成了跨领域知识迁移。实验表明,该模型在基准集上的平均绝对误差(MAE)较对比模型降低逾60%,在未见数据的泛化验证中MAE降低超76%,并表现出卓越的抗噪鲁棒性。更关键的是,得益于蒸馏模型的轻量化特性,DS-SOH成功打破了传统大语言模型对高端硬件的依赖,在无GPU及低算力CPU环境中依然保持高效的推理与部署,为下一代高精度、低硬件成本的电池管理系统提供了切实可行的边缘计算方案。

Banerjee等^[100]通过三维动力学蒙特卡罗(KMC)模型,系统探究了固态电池中锂金属-固态电解质(Li-SE)界面在剥离过程中的空洞形成与演化机制。研究揭示了界面反应动力学与体相空位扩散的竞争机制(M1-M3)对固-固接触稳定性和表面形貌的决定性作用,建立了以量纲为1扩散描述符($\bar{K}_V$)和电流描述符($\bar{\eta}$)为坐标轴的界面稳定性相图。研究发现,升高温度可通过增强锂离子体相扩散显著改善接触保持率;晶界异质性(反应异质性 χ_R 和传输异质性 χ_T)会诱导局部电流集中与凹坑形成,加速界面退化。该工作为优化固态电池界面稳定性提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] ZHAO G Q, SUN Y J, WANG X, et al. Uncovering electrochemical-mechanical interplay of stable ultrahigh-nickel cathode *via* fine structure regulation[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(16): e23526. DOI:10.1002/adma.202523526.
- [2] EUM D, RAMACHANDRAN H, SUN T X, et al. Uniform pore structure enables negligible degradation in undoped and uncoated Ni-rich cathodes[J]. *Nature Energy*, 2026, 11(4): 593-602. DOI:10.1038/s41560-026-01988-w.
- [3] CHEN J, WANG H J, SUN J G, et al. Achieving long-life high-voltage Ni-rich cathodes by mitigating lattice and grain-boundary degradation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 534: 174912. DOI:10.1016/j.cej.2026.174912.
- [4] LIANG J T, YAN D L, ZHANG X M, et al. Wadsley-Roth phase armored ultra-stable Ni-rich cathodes *via* synergistic interfacial engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, e75050. DOI:10.1002/adfm.75050.
- [5] WANG Y, NI D X, LI H, et al. High-voltage and stable co-free LiNiO₂ positive electrode for sulfide-based all-solid-state batteries [J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 3661. DOI: 10.1038/s41467-026-70405-3.
- [6] ZHAO B S, REN D S, LI D Q, et al. Microstructure-tailored Ni-rich cathode with fast Li⁺ diffusion layer boosts high-rate and long-cycling all-solid-state batteries[J]. *Joule*, 2026, 10(3): 102273. DOI:10.1016/j.joule.2025.102273.
- [7] KWON O, OH G, HIROSE T, et al. High-temperature-compatible surface engineering with Li₂WO₄ for interfacial activation in sulfide-based all-solid-state batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 672: 239521. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2026. 239521.
- [8] SUN Y P, MA J J, YAO X Z, et al. Atomic level fabrication of oxychloride interface for high-rate and high-voltage lithium-ion batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65 (11): e17806. DOI:10.1002/anie.202517806.
- [9] CHEN Y, HUANG L, GHANI A, et al. Gradient-modified Li-rich manganese-based oxides cathodes with breakthrough of kinetic limitation for high-performance all-solid-state lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(13): e21690. DOI: 10.1002/adma.202521690.
- [10] LIU H H, SHEN T, ZHU X H, et al. Interface-mediated jahn - teller effect in a structure-reinforced LiMnO₂ Cathode[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(7): 7388-7400. DOI: 10.1021/jacs.5c20036.
- [11] LI Z F, TANG H R, LIANG Y Y, et al. Practical lithium-organic batteries enabled by an n-type conducting polymer[J]. *Nature*, 2026, 651(8104): 100-106. DOI:10.1038/s41586-026-10174-7.
- [12] ZHU X J, XIA S J, ZHENG H N, et al. Three - dimensional "Breathable" silicon anodes for durable all-solid-state lithium batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2026, 86: 104939. DOI: 10.1016/j.ensm.2026.104939.
- [13] WANG Y H, TAN S J, ZHANG C H, et al. Engineering thin 3D Li-composite foil negative electrodes with high mechanical toughness[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 2345. DOI: 10.1038/s41467-026-69155-z.
- [14] HU X, CHEN Y M, FU Y F, et al. Revolutionizing lithium metal anodes with 3D-printed topology-optimized hosts for enhanced stability[J]. *Advanced Science*, 2026, e21086. DOI: 10.1002/advs.202521086.
- [15] LIN W R, ZHOU K, YANG C, et al. Dynamic anode/cathode-electrolyte interface induced through polymer evolution for durable lithium metal batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(7): 7056-7064. DOI: 10.1021/jacs.5c18082.
- [16] SHANGGUAN T T, KONG X K, ZHANG Y Y, et al. Topological regulation of lithium metal anode for ultra-stable cycling *via* thermodynamic-kinetic balancing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 528: 172505. DOI:10.1016/j.cej.2025.172505.
- [17] DENG L Q, WANG Z F, QI H Y, et al. Realizing ≥99.9% Li plating/stripping coulombic efficiency in a solid-state Li metal battery *via* constant interfacial contact-targeted zero-volume-change host design[J]. *ACS Nano*, 2026, 20(10): 8394-8405. DOI: 10.1021/acsnano.5c18814.
- [18] LIU L Q, WANG B, TU Y, et al. Sequenced interfacial chemistry for stabilizing reactive lithium metal anodes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(12): 12921-12931. DOI: 10.1021/jacs.5c21643.
- [19] WANG J X, ZHU J W, CAI Y C, et al. Multicomponent solid-solution alloy negative electrode for Li-metal batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 3958. DOI: 10.1038/s41467-026-70301-w.
- [20] KIM J S, PARK H, KIM H Y, et al. Universal oxychlorination strategy in halide solid electrolytes for all-solid-state batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, e06744. DOI: 10.1002/aenm.202506744.
- [21] GAMI P, KUMAR S. High-performance composite electrolytes for solid-state lithium metal batteries: Enhancing ionic conductivity and interfacial compatibility through polyvinylpyrrolidone blending and inorganic filler incorporation[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 668: 239382. DOI:10.1016/j.jpowsour.2026.239382.
- [22] CHEN Y, JING L, CAI W R, et al. A gradient nanodomain high-entropy polymer electrolyte tape for pressure-free solid-state lithium batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(12): e20657. DOI:10.1002/adma.202520657.
- [23] TANG W, WANG F L, LIANG S K, et al. Polyanion-stabilized amorphous halide electrolytes with low lithium content for all-solid-state lithium batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 3326. DOI:10.1038/s41467-026-69737-x.
- [24] WANG F, YANG B, HUANG C, et al. Flexible interfacial modification layers towards enhanced performance in LATP-based all-solid-state batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2026, 14(9): 5273-5281.
- [25] ASAKURA T, IZAWA R, SATO S, et al. Oxygen- and fluorine-doped Li₃PS₄Glass-ceramic electrolytes compatible with lithium

- metal electrodes for all-solid-state batteries[J]. *Chemistry of Materials*, 2026, 38(3): 1253-1260. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5c02634.
- [26] CUI Y, SHI S S, LU C K, et al. *In-situ* coupled macromolecular bridge enables all-solid-state lithium metal batteries capable of extremely high temperature operation[J]. *Carbon Neutralization*, 2026, 5(1): e70099. DOI:10.1002/cnl2.70099.
- [27] KIM M, KWON Y, SEO J, et al. Ion-conducting cavity filler enabling *in-situ* formation of SEI in sulfide-based solid electrolyte sheets for all-solid-state batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 529: 173036. DOI:10.1016/j.cej.2026.173036.
- [28] LI Y J, HAO W, YUE X Y, et al. Highly electronegative anions doping effects in sulfide-based electrolytes: Toward high-voltage all-solid-state batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, e70855. DOI:10.1002/aenm.70855.
- [29] ZHAO Y F, YANG H T, HU Z H, et al. Catalyzing Li-salt dissociation and decomposition for a conformal low-impedance solid electrolyte interphase in solid-state Li metal batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(11): 11540-11550. DOI:10.1021/jacs.5c16750.
- [30] YANG J G, ZHANG R Z, ZIMMERMANN R, et al. Tailored redox-active catholytes enabling high-rate and high-loading all-solid-state lithium-sulfur batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(15): e13204. DOI:10.1002/adma.202513204.
- [31] PENG G, HUANG Z Y, WU Z, et al. Toward affordable all-solid-state lithium batteries: A novel Li_2S -free synthesis for high-performance sulfide electrolytes with \$16.85/kg low cost[J]. *Small*, 2026, 22(21): e72986. DOI:10.1002/smll.72986.
- [32] JIN H M, WANG X Y, ZHANG S M, et al. Boosting ionic conductivity of fluoride electrolytes by polyanion coordination chemistry enabling 5 V-Class all-solid-state batteries[J]. *Joule*, 2026, 10(1): 102233. DOI:10.1016/j.joule.2025.102233.
- [33] LI R, WEN S H, XU K Q, et al. Ultrahigh ionic conductivity in halide electrolytes enabled by anion framework flexibility engineering[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(3): 3114-3127. DOI:10.1021/jacs.5c15937.
- [34] PARK Y, JANG M, KIM J, et al. Oxygen-induced lithium inter-cage conduction for enhanced performance in all-solid-state batteries[J]. *eScience*, 2026, 6(3): 100502. DOI: 10.1016/j.esci.2025.100502.
- [35] WANG Z, YU K Z, TUO W J, et al. Fluorine inducing dynamic cathode/electrolyte interphase for high-voltage all-solid-state batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 673: 239699. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2026.239699.
- [36] HE Z Y, YU T, LIANG L X, et al. Self-adaptive superionic electrolytes *via* multiple-cation modulation for all-solid-state lithium-metal batteries[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(12): 12805-12815. DOI:10.1021/jacs.5c20920.
- [37] SHEN J D, KIM G, CHUNG J W, et al. Engineering electronic radial effects for fast Li^+ transport in solid-state electrolytes[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(13): e20337. DOI: 10.1002/adma.202520337.
- [38] ZHOU H T, GU J, ZHOU H Y, et al. Interfacial solvent molecular engineering *via* high-safety dense separators for high-rate lithium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2026, e70303. DOI:10.1002/eem2.70303.
- [39] LEE J, DO MUN S, CHOI S H, et al. Iodine-driven artificial SEI layer for high performance lithium metal batteries in an SO_2^- -based electrolyte[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2026, 14(15): 8836-8845.
- [40] SCHOLL J, SCHARPMANN P, BAGHERI A, et al. Beyond the lab: Real-world composition of commercial Li-ion battery electrolytes[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 673: 239739. DOI:10.1016/j.jpowsour.2026.239739.
- [41] WU L Q, ZHANG J Y, LI Y, et al. Hydrofluorocarbon electrolytes for energy-dense and low-temperature batteries[J]. *Nature*, 2026, 651(8105): 383-389. DOI:10.1038/s41586-026-10210-6.
- [42] DENG J X, WANG X G, LU H, et al. Functionalized and customized electrolyte enabling NCM811||Gr pouch cells operation at 150°C [J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(14): e70718. DOI:10.1002/aenm.70718.
- [43] ZHU Z X, WU X B, XU H, et al. Molecular engineering of fluorinated hybrid gel polymer electrolytes enables ultra-wide-temperature operation of high-voltage lithium metal batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(15): e06074. DOI:10.1002/aenm.202506074.
- [44] YANG Z H, ZENG L C, JU Z Y, et al. Electrolyte chemistry of adaptive hydrogen bonded domains for high voltage lithium metal batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 2379. DOI: 10.1038/s41467-026-69160-2.
- [45] CHEN C, WANG S N, ZHANG L Z. Structure tailoring of trisiloxane as electrolyte additive for high voltage and high temperature $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 534: 175010. DOI: 10.1016/j.cej.2026.175010.
- [46] LUO C, NING C P, HUANG X H, et al. Benzonitrile-based electrolyte with tighter aggregate solvation structure enables ultralong cycling and high-rate 4.5 V lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(21): e72819. DOI: 10.1002/adma.72819.
- [47] LI M L, LU D, WANG J Z, et al. Solvation sheath reorganization enables fast ion transfer kinetics in lithium-ion battery[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 3953. DOI: 10.1038/s41467-026-70570-5.
- [48] ZHANG M H, STOYCHEV B K, ZHANG X Y, et al. Dry electrode architecture design to push energy density limits at the cell level [J]. *Nature Energy*, 2026, 11(3): 490-502. DOI: 10.1038/s41560-026-01981-3.
- [49] BHADRA A, BRUNISHOLZ M, RAWAL A, et al. Mitigating electrochemical isolation in Ni-rich layered cathodes for durable solid-state batteries[J]. *Advanced Science*, 2026, 13(19): e18327. DOI:10.1002/adv.202518327.
- [50] YU Z K, GAN C J, SONG S Y, et al. Dendrite suppression in garnet electrolytes *via* thermally induced compressive stress[J].

- Joule, 2026, 10(1): 102232. DOI:10.1016/j.joule.2025.102232.
- [51] JEONG S, KIM C, AVVARU V S, et al. Self-healing lithium dendrites through spontaneous passivating layer formation for stable solid-state lithium-metal batteries[J]. ACS Nano, 2026, 20(12): 10198-10209. DOI:10.1021/acsnano.6c01373.
- [52] PARK Y J, KIM K T, JUN S, et al. Multi-faceted binder enhancement *via* slurry-applicable thiol-ene click chemistry for low-pressure-operable all-solid-state batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(15): e16017. DOI:10.1002/adfm.202516017.
- [53] WU D X, ZHANG Z Q, WANG L T, et al. Self-adaptive interfacial glue for low-pressure sulfide-based all-solid-state lithium metal batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2026, 19(5): 1630-1641.
- [54] OHNO T, UGATA Y, YABUUCHI N. Design strategy for sheet-type composite electrodes in all-solid-state batteries operable under minimal stack pressure enabled by cold isostatic pressing[J]. ChemElectroChem, 2026, 13(6): e202500463. DOI:10.1002/celec.202500463.
- [55] NAZMUTDINOVA E, NUGRAHA I M, OLCHOWKA J, et al. Enhancing ion-electron transport in positive electrode of solid-state lithium metal batteries with multifunctional catholyte made of polymer mixed ionic-electronic conductor PEDOT: PSSTFSI and Li_3InCl_6 [J]. Advanced Energy Materials, 2026, 16(14): e06757. DOI:10.1002/aenm.202506757.
- [56] LEE J, MOON H, LEE J, et al. Halogen-programmed Li_3PO_4 coating for self-adaptive and durable interfaces in sulfide-based all-solid-state batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 530: 173574. DOI:10.1016/j.cej.2026.173574.
- [57] CRONK A, WANG X W, OH J A S, et al. A highly utilized and practical lithium-sulfur positive electrode enabled in all-solid-state batteries[J]. Nature Communications, 2026, 17: 3298. DOI:10.1038/s41467-026-69750-0.
- [58] GU Z C, WEI S F, ZHANG X, et al. "Active material-free" design to overcome mass-transport limitations for high-energy-density all-solid-state Li-S batteries[J]. Joule, 2026, 10(2): 102239. DOI:10.1016/j.joule.2025.102239.
- [59] HONG S, CAO Y, QI J S, et al. High-valence-cation-induced lattice expansion for activating Li_2S cathode in all-solid-state lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2026, 38(15): e72513. DOI:10.1002/adma.72513.
- [60] JIANG M Y, SHI J W, WANG J J, et al. Optimizing f-d hybridization descriptor in rare-earth oxides for efficient sulfur catalysis in all solid-state lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2026, 38(14): e20011. DOI:10.1002/adma.202520011.
- [61] CHEN L, GUO J, WU W W, et al. Li_2S anti-passivation deposition guided by electrochemically self-generated thiophosphate molecular mediators for lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2026, 38(12): e19401. DOI:10.1002/adma.202519401.
- [62] AN Y H, KIM K, LEE Y J, et al. Binding properties of sulfur to enable solvent-free fabrication of high-performance polymer-free sulfur-carbon positive electrodes[J]. Nature Communications, 2026, 17: 2360. DOI:10.1038/s41467-026-69097-6.
- [63] WANG B, GUO B N, MAMMOOR M, et al. Constructing wide-temperature-range Li-S batteries through synergistic boride spin-polarization coupling regulation and magnetohydrodynamic effects[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2026, 65(12): e19187. DOI:10.1002/anie.202519187.
- [64] LYU H, GAO X, MICHALEK L, et al. Stabilizing all-solid-state Li-S batteries by a polysulfide-repelling and anode-protecting self-segregated trilayer polymer electrolyte[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(5): 5275-5286. DOI: 10.1021/jacs.5c18042.
- [65] PENG L K, GENG C N, HE Y Q, et al. Chemo-electrochemical tandem catalysis unlocking sulfur reaction in practical lithium-sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2026, 38(11): e21611. DOI:10.1002/adma.202521611.
- [66] LIU H Y, WANG H, GAO P, et al. Combating phase segregation in earth-abundant pyrite cathodes for high-energy-density lithium-metal batteries[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(8): 8634-8642. DOI:10.1021/jacs.5c20477.
- [67] LUO X T, CHEN Z Z, QIU X Q, et al. Structure and interfacial-stable binder engineering enables high-rate capability of NCM811 cathodes at 4.6 V[J]. Advanced Energy Materials, 2026, e70842. DOI:10.1002/aenm.70842.
- [68] LEE J, KIM J, JANG W, et al. A strategic tuning of interfacial Li^+ solvation with ultrathin polymer layers for anode-free lithium metal batteries[J]. Joule, 2026, 10(1): 102226. DOI:10.1016/j.joule.2025.102226.
- [69] KIM D, HONG J. Dynamic polarization behavior in a commercial-scale pouch-type lithium-ion battery examined by a three-dimensional electrochemical-thermal modeling framework[J]. Journal of Power Sources, 2026, 668: 239358. DOI:10.1016/j.jpowsour.2026.239358.
- [70] ŠEDAJOVÁ V, HORWITZ G, HAN J, et al. Interparticle communication and lithium dynamics in faceted nickel-rich NMC cathodes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(4): 4097-4109. DOI:10.1021/jacs.5c15171.
- [71] BARAI P, LIU S Z, GARCIA J C, et al. Substitution-mediated calcination of nickel-based cathodes: Decoupling lithiation and crystallization[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(5): 4999-5011. DOI:10.1021/jacs.5c14714.
- [72] WANG J, HUANG J H, HUANG W Y, et al. Understanding the performance gap between polycrystalline and single-crystal nickel-rich layered oxide cathodes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(9): 9421-9432. DOI:10.1021/jacs.5c18922.
- [73] FONG R, TREVINO LARA P, MUBARAK N, et al. Suppressing oxygen-loss-driven lattice expansion cascades in disordered rock-salt Li-ion cathodes *via* electrolyte engineering[J]. Chemistry of Materials, 2026, 38(7): 3596-3610. DOI:10.1021/acs.chemmater.6c00046.
- [74] YANG W, LUO Z M, DENG J, et al. Solvent selection for high-safety lithium-ion batteries: Unravelling the divergent mechanisms of EC/EMC and EC/DMC governing thermal runaway hazard severity[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 533: 174897. DOI:10.1016/j.cej.2026.174897.
- [75] LIU G X, LI Y, TIAN J X, et al. Elucidating dynamic evolution of the sulfur cathode in sulfide-based all-solid-state lithium-sulfur batteries[J]. Nano Letters, 2026, 26(10): 3542-3549. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6c00075.
- [76] WANG N, WANG S, ZHENG Y, et al. Revealing key structures for reversible sulfur redox in amorphous polymeric sulfur[J]. Nature

- Materials, 2026, 25(5): 791-798. DOI: 10.1038/s41563-026-02484-y.
- [77] WU Y H, ZHANG S, SUN Y L, et al. Electrochemical initiation and chemical reaction cascades in dual-stage thermal runaway in sulfide-based all-solid-state batteries[J]. Nature Communications, 2026, 17: 2928. DOI:10.1038/s41467-026-69472-3.
- [78] LIANG S Z, LU P S, HU H X, et al. State-of-charge dependent aging mechanism of halide-based composite cathodes for all-solid-state batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2026, 16(9): e05745. DOI:10.1002/aenm.202505745.
- [79] BATTISTELLA B, HOFFMANN V, AGUDO JÁCOME L, et al. Depth-resolved lithium isotope fractionation as a diagnostic of interphase evolution and degradation in lithium-ion batteries[J]. ACS Energy Letters, 2026, 11(3): 2851-2857. DOI: 10.1021/acsenerylett.5c04137.
- [80] HÜGER E, STAHN J, SCHMIDT H. Identification of lithiation mechanisms in Li-ion batteries: Multilayer electrodes and neutron reflectometry[J]. ACS Energy Letters, 2026, 11(2): 2275-2281. DOI:10.1021/acsenerylett.5c04221.
- [81] WANG W N, LI Z Y, WANG J, et al. Visualization and quantification of lattice strain in battery cathode particles through electron backscatter diffraction imaging[J]. Nature Communications, 2026, 17: 1421. DOI: 10.1038/s41467-025-68166-6.
- [82] VESTIN P, SCHLAUTMANN E, SANS-PLANELL O, et al. 4D multimodal neutron and X-ray tomography of lithium transport in all-solid-state batteries using Li-7 contrast enhancement[J]. Cell Reports Physical Science, 2026, 7(2): 103136. DOI: 10.1016/j.xcrp.2026.103136.
- [83] S MENON A, ORLANDI F, MANUEL P, et al. Advancing battery diagnostics through *operando* Neutron diffraction of unmodified nondeuterated Li-ion single-layer pouch cells[J]. Chemistry of Materials, 2026, 38(9): 4517-4527. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5c03201.
- [84] CHU P J, HUANG J Y, LIU Y S, et al. Diffraction-enabled *operando* nanoscale tracking of Li-ion dynamics of solid electrolyte and inhomogeneous diffusion in composite cathode[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2026, 65(10): e20281. DOI:10.1002/anie.202520281.
- [85] AI Q, ZHANG B Y, LIU X, et al. Strong and brittle lithium dendrites [J]. Science, 2026, 391(6790): 1125-1129. DOI: 10.1126/science.adu9988.
- [86] LI Z, WU D R, JI S S M, et al. Texture evolution of plated lithium in anode-free solid-state batteries[J]. ACS Energy Letters, 2026, 11(2): 1705-1713. DOI:10.1021/acsenerylett.5c03205.
- [87] HUANG K, HAN Y, XIE Z, et al. Ultrasonic study of lithium-ion battery degradation induced by transition metal dissolution[J]. ACS Energy Letters, 2026, 11(4): 3572-3580. DOI: 10.1021/acsenerylett.6c00411.
- [88] DONAIS M, BUTLER E J, CONDON A, et al. Electrolyte motion induced salt inhomogeneity in Si-containing cylindrical cells-a case study[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2026, 173 (5): 050519. DOI:10.1149/1945-7111/ae4b6e.
- [89] FURTMAYER M, WOLTERS A, ŠIMIĆ S, et al. The effect of fluorine-containing SEI on aging at the anode-separator interface in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2026, 673: 239675. DOI:10.1016/j.jpowsour.2026.239675.
- [90] GUO Z Z, DOLOCAN A, MANTHIRAM A. Impact of anode to cathode crossover in lithium-metal batteries with high-nickel cathodes[J]. Advanced Materials, 2026, 38(13): e18490. DOI: 10.1002/adma.202518490.
- [91] LIU B, ZHOU J, YANG L Y, et al. Impacts of pretreatment routes on spent lithium-ion batteries recycling[J]. Nature Sustainability, 2026, 9(4): 626-638. DOI:10.1038/s41893-026-01767-1.
- [92] WANG Y, ZHENG X H, LV W G, et al. A three-in-one strategy for lithium recovery and upcycling of spent cathode materials[J]. Nature Communications, 2026, 17: 1153. DOI: 10.1038/s41467-025-67912-0.
- [93] HUANG S Q, HUANG S P, LI M X, et al. Self-driven recycling of spent Li-ion battery materials with electricity generation[J]. Nature Communications, 2026, 17: 2996. DOI: 10.1038/s41467-026-69868-1.
- [94] ZHONG W X, GU X S, FENG X Z, et al. Maximizing energy utilization and lithium leaching efficiency *via* sequential electrochemical dual-oxidation and soaking-relaxation[J]. Nature Communications, 2026, 17: 2050. DOI: 10.1038/s41467-026-69834-x.
- [95] WU S X, HUANG C X, SHEN W B, et al. A water-soluble binder for recyclable lithium-ion batteries[J]. Nature Sustainability, 2026, 9(4): 575-584. DOI:10.1038/s41893-026-01773-3.
- [96] TU C H, TSENG C E, LAI W C, et al. Quantifying lattice-crack-electrochemical transport coupling for durable, fast-charging battery cathodes[J]. Advanced Energy Materials, 2026, 16(13): e06427. DOI:10.1002/aenm.202506427.
- [97] GÜMRÜKÇÜOĞLU A E, BURRIDGE J, O'REGAN K, et al. A fast and accurate method for inferring solid-state diffusivity in lithium-ion battery active materials[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 153: 120831. DOI:10.1016/j.est.2026.120831.
- [98] ZHANG J W, ZHANG Y F, YI B Z, et al. Discovery Learning predicts battery cycle life from minimal experiments[J]. Nature, 2026, 650(8100): 110-115. DOI:10.1038/s41586-025-09951-7.
- [99] ZHAO Q H, LI Y H, KONG L Y, et al. Multifeature battery state-of-health linear estimation based on low-cost pretrained inference LLM[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2026, 12(1): 902-912. DOI:10.1109/TTE.2025.3623295.
- [100] BANERJEE S, VISHNUGOPI B S, SINGLA A, et al. Void formation and evolution dynamics for lithium metal and solid electrolyte interfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2026, 18(5): 7981-7991. DOI:10.1021/acsami.5c14957.