

热点点评



锂电池百篇论文点评 (2026.6.1—2026.7.31)

孙蔷馥¹, 岑官骏¹, 乔荣涵¹, 刘长洋¹, 张新新¹, 郑博文¹, 李洛宁¹, 戴玮芃¹, 杨尚东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6月1日至2026年7月31日上线的锂电池研究论文, 共有7014篇, 选择其中100篇加以评论。正极材料的研究集中于高镍三元的掺杂改性和表面包覆, 以及其在长循环过程中的结构演变等。负极材料的研究重点包括硅基负极材料制备优化、金属锂负极的制备以及界面构筑与调控。固态电解质的研究主要包括硫化物固态电解质、氯化物固态电解质和聚合物固态电解质的结构设计以及相关性能研究, 电解液研究则主要包括不同电解质盐和溶剂对各类电池材料体系适配的研究, 以及对新的功能性添加剂的探索。针对固态电池, 正极材料的体相改性和表面包覆、复合正极制备与界面修饰、锂金属负极的界面构筑有多篇文献报道。锂硫电池的研究重点是硫正极的结构设计、功能涂层和电解液的改进, 固态锂硫电池也引起了广泛注意。电池工艺技术方面的研究包括干法电极、黏结剂设计以及开发新型电池技术等。表征分析涵盖了正极材料的结构相变、锂沉积负极的界面演变等。理论模拟工作包括电解液结构预测以及锂沉积和界面形成机制。

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.2095-4239.2026.0719

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3427-21

Reviews of selected 100 recent papers for lithium batteries (Jun. 1, 2026 to Jul. 31, 2026)

SUN Qiangfu¹, CEN Guanjun¹, QIAO Ronghan¹, LIU Changyang¹, ZHANG Xinxin¹,
ZHENG Bowen¹, LI Luoning¹, DAI Weipeng¹, YANG Shangdong¹, 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; ³National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: This bimonthly review paper highlights 100 recent published papers on lithium batteries. We searched the Web of Science and found 7014 papers online from Jun. 1, 2026 to Jul. 31, 2026. 100 of them were selected to be highlighted. The selected papers of cathode materials focus on high-nickel ternary layered oxides, and the effects of doping, interface modifications and structural evolution with prolonged cycling are investigated. For anode

收稿日期: 2026-08-19。

第一作者: 孙蔷馥 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为锂离子电池, E-mail: sunqiangfu22@mailsucas.ac.cn; 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: 孙蔷馥, 岑官骏, 乔荣涵, 等. 锂电池百篇论文点评(2026.6.1—2026.7.31)[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3427-3447.

Citation: SUN Qiangfu, CEN Guanjun, QIAO Ronghan, et al. Reviews of selected 100 recent papers for lithium batteries (Jun. 1, 2026 to Jul. 31, 2026)[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3427-3447.

materials, silicon-based composite materials are improved by optimized electrode structure. Efforts have also been devoted to designing composite metal lithium anode and controlling the inhomogeneous plating of lithium. The relation of structure design and performances of sulfide-based, chloride-based and polymer-based solid-state electrolytes has been extensively studied. Different combination of solvents, lithium salts, and functional additives are used for liquid electrolytes to meet the requirements for battery applications. For solid-state batteries, the modification and surface coating of the cathode, the design of composite cathode, the interface to anode/electrolyte interface have been widely investigated. Studies on lithium-sulfur batteries are mainly focused on the structural design of the cathode and the development of functional coating and electrolytes, and solid state lithium-sulfur battery has also drawn large attentions. Research on battery technology includes dry electrode processes, binder design, and the development of new battery technologies. There are a few papers for the characterization techniques of structural phase transition of the cathode materials and the interfacial evolution of lithium deposition. Theoretical papers are mainly related to mechanisms of lithium deposition and interface formation.

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 22 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、锂硫电池、硅负极等多个关键主题。图 1(C)进一步展示了主要研究机构的近期研究动向。

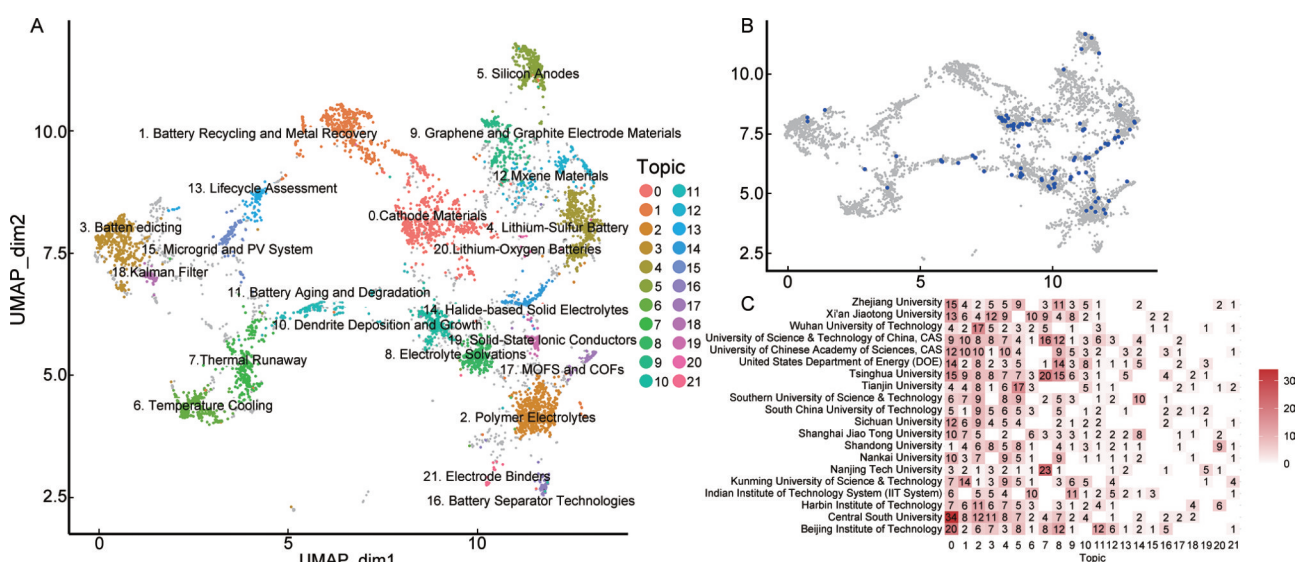


图 1 锂电池论文的研究主题分布 (2026.6.1—2026.7.31)

Fig. 1 The distribution of research topics in lithium battery (2026.6.1—2026.7.31)

1 正极材料

1.1 层状氧化物正极材料

Dong 等^[1]发现, 单晶和多晶 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (PC-NCM811) 在空气中储存时发生类似的表面退化, 而 PC-NCM811 还表现出额外的晶间变化。空气退化诱导形成的 Li_2CO_3 杂质不仅出现在颗粒表面, 还存在于 PC-NCM811 的晶间空隙中。晶间 Li_2CO_3 表现出黏结效应, 导致通过原位纳米压痕仪测得的初始机械强度增加。然而, Li_2CO_3 杂质被证实对循环稳定性非常有害, 它不仅引起不良的界面退化, 还会导致晶间裂纹, 造成循环过程中的容量衰减。因此, 提升多晶富镍层状正极材料的空气储存稳定性需要更加关注晶界部位的稳定化。Li 等^[2]提出了一种基于 Mg/Nb 共掺杂的综合局域晶格调控策略, 从表面到体相构筑了兼具化学稳定性与机械稳定性的 $\text{LiNi}_{0.95}\text{Co}_{0.03}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_2$ 正极材料。表面重构形成的超薄无序岩盐相能够有效稳定电化学界面, 体相中的阳离子无序结构与共格类尖晶石相结合, 可有效缓解晶格应变并增强结构完整性。改性后的超高镍正极在 0.1 C 倍率下, 其首次库仑效率达 93.24%, 放电比容量达到 240.11 mAh/g。在 3 C 倍率下循环 500 周后容量保持率高达 81.65%。即使在高达 15 C 的倍率下, 其仍可提供 147.43 mAh/g 的比容量。Song 等^[3]通过化学诱导处理, 在超高镍层状氧化物正极中构建局域阳离子无序 (LCD) 结构, 以缓解机械-化学耦合作用引起的结构退化。LCD 结构可作为稳定的支撑纳米畴, 增强材料的整体机械强度, 防止层间结构和锂离子扩散通道坍塌, 同时它还能减少晶格氧的电荷补偿并提高电子电导率, 从而增强氧骨架的稳定性。该研究证明局域结构无序并非单纯的缺陷, 而可被设计为同时改善超高镍正极机械稳定性和化学稳定性的功能单元。Chen 等^[4]提出了一种晶格工程与晶界钝化策略, 通过 $\text{La}^{3+}/\text{F}^-$ 共掺杂和 LiF 包覆以提升 NCM9055 结构稳定性。将 La^{3+} 掺入过渡金属 (TM) 位点后, 表面重构诱导了 TMO 层内的“晶格预膨胀”效应, 有效缓冲了 H2→H3 相变过程中的严重晶格收缩, 并抑制了微裂纹的形成。 F^- 在氧位点的掺杂生成了强 TM—F 键, 显著增强了晶格氧的稳定性。此外, 脆弱的晶界通过形成的表面 LiF 包覆层被优先钝化, 有效保护正极免受电解液腐蚀和 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 范围内循环 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 范围内循环 1000 次后容量保持率为 94.72%。Lin 等^[5]通过氨基封端聚二甲基硅氧烷与甲苯二异氰酸酯 (TDI) 的原位聚合, 构建了一种具有弹性和耐电压特性的聚(脲-硅氧烷) (PUSi) 包覆层。该聚合物作为一种保形人工界面相, 稳定了二次颗粒表面及内部一次颗粒表面。PUSi 层作为一种稳定的化学屏障, 将正极与电解液隔离开, 抑制了界面副反应, 并阻碍了层状相向尖晶石相的转变。PUSi 层可调控的弹性使其能够适应循环过程中的体积变化, 并抑制高压循环中的晶间开裂。应用于 $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ 时, 该正极在截止电压 4.5 V 下, 纽扣电池循环 450 次后容量保持率为 81.2%, 锂金属软包电池循环 200 次后容量保持率为 82.4%。通过包覆 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 和富锂层状氧化物, 证明了该方法的普适性。Mao 等^[6]报道了一种具有稳健的由外向内结构的高性能富镍正极, 该结构通过机器学习辅助筛选 Al^{3+} 和 Sn^{4+} 掺杂元素实现。通过竞争性掺杂机制, 这些掺杂元素形成了富 Sn 的岩盐相表面层以及均匀 Al 掺杂的体相。这种由外向内结构通过减缓正极/电解液界面退化, 并缓解与 H2/H3 两相共存相关的各向异性晶格应变, 从而提高了界面稳定性和结构可逆性。此外, 非磁性的 Al^{3+} 和 Sn^{4+} 可削弱超交换相互作用并抑制 Li—Ni 无序。该正极在循环 200 次后仍可保持 96.9% 的容量, 同时仅表现出极小的电压衰减。Zhao 等^[7]研究了不同钼引入方式对超高镍正极微结构及电化学性能的影响, 阐明了材料加工、结构演变与性能之间的关系。与固相梯度引入相比, 共沉淀策略能够实现高度均匀分散的 Mo 掺杂, 形成超细一次颗粒和致密二次颗粒结构, 从而通过内部应力耗散减少微裂纹, 同时限制电解液向颗粒内部渗透。该方法还在 $\text{LiNi}_{0.95}\text{Co}_{0.04}\text{Mo}_{0.01}\text{O}_2$ 体相中诱导形成贯穿整体的 Li/TM 阳离子有序结构, 抑制 $\text{Li}^+/\text{Ni}^{2+}$ 混排并缓解晶内和晶间应变。多重结构效应显著增强了正极的机械稳定性, 使其在 5 C 倍率下仍可提供 204.9 mAh/g 的放电容量。Wang 等^[8]提出利用 Nb 诱导的 $\text{Li}^+/\text{Ni}^{2+}$ 混排, 在超高镍无钴层状正极中自发形成尖晶石纳米畴, 从而解决脱嵌锂过程中各向异性晶格应变和晶格氧不稳定的问题。与传统上将阳离子混排视为有害缺陷

的观点不同,该研究发现适度且局域化的混排能够形成嵌入层状基体的功能性纳米畴,在深度脱锂时释放晶格应变并抑制晶格氧失稳。优化后的正极循环250次后容量保持率达到93.4%,电压衰减速率由1.43 mV/圈降低至0.24 mV/圈,降幅约83%。Zhang等^[9]报道了一种具有快速再充电能力的高倍率单晶富锂层状氧化物。在5 C快充条件下,该材料在0.2 C放电时可实现248 mAh/g的容量,同时在5 C快速放电条件下仍可获得179 mAh/g的容量。这种快速再充电能力可通过一种由共格的层状结构、阳离子混排结构、岩盐型结构和尖晶石型结构组成的复杂阳离子有序结构来实现。高导电性且具有电化学活性的表面相能够缓冲Li⁺浓度梯度,并促进体相实现更深程度的嵌锂。单晶形貌和重新设计的表面相共同保证了循环过程中的机械稳定性和结构稳定性,使材料在0.5 C倍率下循环150次后的容量保持率提高至94.5%。

1.2 其他正极材料

Wu等^[10]介绍了一种通过机械化学方法制备富锰无序岩盐(DRX)正极材料的新策略。设计了一种由钼(Mo)和氟(F)共掺杂的前驱体,该前驱体在球磨过程中会从一种独特的锯齿状层状/硅铈石混合相,高效地转变为DRX结构。这种转变机制源于掺杂剂降低了阳离子无序化的能垒,促进了阳离子迁移。最终得到的DRX材料(LMMOF0.2)实现了297.9 mAh/g的高可逆容量。与未球磨的材料相比,其电化学反应从不可逆的两相过程转变为稳定的单相过程。此外,在较窄的电压窗口(2.0~4.2 V)内循环可以显著抑制晶格畸变,将循环稳定性从宽电压窗口下的53.3%提升至91.7%。Song等^[11]针对富锂无序岩盐(DRX)材料在循环中因不可逆氧化还原反应导致性能衰退的问题,设计并合成了一系列F元素取代改性的DRX材料 $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.4+x/3}\text{Nb}_{0.4-x/3}\text{O}_{2-x}\text{F}_x$ 。其中,优化的 $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.47}\text{Nb}_{0.33}\text{O}_{1.8}\text{F}_{0.2}$ (LMF20)样品表现出卓越的电化学性能,其放电容量和20次循环稳定性分别提升了28.4%和11.7%。氟的引入发挥了“抑制氧、激活锰”的协同作用。在电子结构层面,氟稳定了O 2p轨道,抑制了高电压下晶格氧的不可逆氧化,同时增强了Mn 3d电子的局域性,促进了可逆的 $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{4+}$ 双电子氧化还原反应。在结构层面,强离子性的Mn—F和Nb—F键构建了刚性的键合网络,增强了晶格弹性,减少了循环中的体积

收缩。此外,氟取代还优化了电极-电解质界面,形成了更薄、离子电导率更高的CEI层,并提升了材料本征电子电导率,从而显著改善了锂离子传输动力。Chen等^[12]提出了一种气相处理策略,通过在氧气和少量空气氛围中对 FeF_2 进行短时退火,实现了氧掺杂与纳米无序化,成功将 FeF_2 在硫化物全固态电池中的电压滞后(VH)降至创纪录的153 mV(80℃)。处理后的 FeF_2 形成了独特的“晶态纳米 FeF_2 颗粒分散于无序FeOF网络”(GDDN)结构,该结构将带隙从1.84 eV收窄至1.36 eV,将锂离子迁移能垒从2.2 eV降低至1.2 eV,将电子电导率从 4.1×10^{-6} mS/cm提升至0.48 mS/cm,将离子电导率从 1.1×10^{-6} mS/cm提升至 4.8×10^{-5} mS/cm。因此,经氧气退火处理的 FeF_2 (OAT- FeF_2)/SE//锂-铟(Li-In)复合电池在30℃下实现400次循环后310 mAh/g的容量保持(容量保持率84.6%),在80℃下实现250次循环后394 mAh/g的容量保持。XPS、SEM、cryo-TEM和DFT表明,氧掺杂还显著增强了 FeF_2 与硫化物电解质(LSPSCI)的界面化学稳定性,有效抑制了副反应产物FeS的生成和界面接触失效。

2 负极材料

2.1 硅基负极材料

Bai等^[13]提出了一种碳纳米管(CNT)改性的多孔硅碳复合负极(HC@Si@C@CNT),旨在解决硅基负极因巨大体积膨胀和导电性差导致的容量衰减快和倍率性能差的问题。该材料以多孔硬碳为骨架,通过化学气相沉积负载纳米硅并包覆无定形碳层,最后利用喷雾干燥技术在其表面构建了一个致密且均匀的CNT导电网络。该设计通过CNT网络实现了多重协同效应:在机械上,弹性的CNT网络作为缓冲层,有效容纳了硅的体积变化,抑制了电极开裂;在电学上,三维导电网络显著提升了电荷传输动力学。该负极在软包电池中循环650次后容量保持率高达93.5%,3 C放电容量为695.79 mAh/g。

2.2 金属锂负极材料

Li等^[14]针对全固态锂金属电池(ASLMBs)中锂枝晶生长和界面不稳定的核心难题,提出了一种通过精确调控锂金属晶体取向的解决方案。多晶锂金属因不同晶面剥离能差异导致的不均匀剥离是形成界面空隙和锂枝晶的根本原因。为此,利用

Li_2Ga (131)界面作为晶格匹配模板，将多晶锂金属精确调控为<110>取向的单晶锂金属。这种<110>取向的单晶锂在剥离过程中能实现层状剥离，有效避免了空隙的形成，抑制了锂枝晶的生长。Chen等^[15]提出合金-硫化物协同工程策略，通过向熔融锂中添加 Ag_2S 前驱体并机械轧制，制备厚度可控（10~50 μm ）的复合薄锂电负极（LAS）。原位构建的 $\text{Li}_x\text{Ag-Li}_2\text{S}$ 三维混合离子/电子导电框架中，Li-Ag合金提供丰富成核位点并降低 Li^+ 扩散能垒， Li_2S 相则提供快速离子传输通道并均化 Li^+ 通量，有效平衡电极内部离子扩散与电子传输，抑制死锂形成和体积膨胀。LAS对称电池在51.9%的高锂利用率下稳定循环；匹配NCM811正极的全电池在低N/P比（2.4~1.0）下展现良好循环稳定性，软包电池能量密度达347 Wh/kg。

3 电解质及添加剂

3.1 固态电解质

Wang等^[16]通过在硫银锗矿型电解质中引入 WO_3 调节体相与界面化学，获得组成为 $\text{Li}_{5.49}\text{P}_{0.99}\text{W}_{0.0}\text{S}_{4.47}\text{O}_{0.03}\text{Cl}_{1.5}$ 的固态电解质，该材料在25℃下的离子电导率达到13.5 mS/cm。实验表征与DFT计算表明， WO_3 取代可调节电解质化学势，使其与 $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.03}\text{O}_2$ 正极更匹配，从而降低界面能垒、抑制界面 Li^+ 耗尽并削弱空间电荷层效应。全电池在0.1 C下提供217 mAh/g的比容量，在1 C循环1000次后容量保持率为92%，在5 C循环5000次后仍保持80%。Luo等^[17]分析了黏结剂在硫化物复合固态电解质中的作用。将 $\text{Li}_{5.5}\text{PS}_{4.5}\text{ClBr}_{0.5}$ （LPSCB）与苯乙烯类弹性黏结剂（SEBS）复合，发现该黏结剂不仅使电解质膜柔软，还能在压制过程中形成电极颗粒嵌入电解质的榫卯式过渡界面，并利用弹性恢复缓冲硫正极的反复膨胀和收缩。该结构提高了真实接触面积并减缓低压力下的界面阻抗增长，但绝缘黏结剂也会降低膜的致密度和离子电导率。Li-S电池在12.5 MPa下循环1000次未见明显容量衰减；经高压活化和逐级卸压后，在5 MPa下循环300次仍保持78%容量。Tang等^[18]利用阴离子团簇稳定策略，通过球磨制备低锂含量双阴离子非晶卤化物电解质 $0.5\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-ZrCl}_4$ 。该材料的锂含量仅为2.4%（质量分数），在30℃下仍具有1.5 mS/cm的离子电导率，并在30%相对湿度下表现出优

于 2LiCl-ZrCl_4 的空气稳定性。中子/同步辐射总散射、第一性原理计算及机器学习分子动力学揭示，无序的 $[\text{Zr}_2\text{Cl}_{4.6}(\text{SO}_4)]^{2-}$ 骨架通过低配位氧位点促进 Li^+ 快速扩散。采用NCM811正极的全固态电池在1 C、30℃下循环1400次后容量保持率为81.1%。Yin等^[19]通过将锂源从LiCl替换为易非晶化的 Li_3PO_4 ，设计了一种可以快速非晶化的Zr基氯化物固态电解质 $\text{Li}_3\text{PO}_4\text{-ZrCl}_4$ （LPOZC）。该策略将球磨非晶化时间从40~80 h大幅缩短至3 h。分子动力学（MD）模拟和XRD证实了 Li_3PO_4 诱导的快速非晶化机制。LPOZC电解质在25℃下离子电导率达2.23 mS/cm，Heckel斜率（ $5.36 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ ）显示其良好的机械柔性。采用LPOZC的 LiCoO_2 和NCM92的固态电池分别实现了7.99 mAh/cm²和9.89 mAh/cm²的高面容量，并分别在1000次和2572次循环后仍保持80%以上的容量。Hu等^[20]设计了一种用于全固态锂电池的新型固态电解质—— $1.4\text{Li}_2\text{O-0.75ZrCl}_4\text{-0.25AlCl}_3$ （LZACO），LZACO展现出卓越的机械顺应性，其硬度（0.22 GPa）和杨氏模量（1.41 GPa）低于大多数无机固态电解质，能有效维持电极-电解质界面的紧密接触。同时，它具有2.55 mS/cm的高室温离子电导率。通过用廉价的 Li_2CO_3 替代 Li_2O 作为原料，其合成时间从30 h大幅缩短至4 h，使生产成本降低。基于LZACO的全固态电池在高正极活性物质载量（> 20 mg/cm²）下，经过100次循环后仍能保持约90%的容量。Wu等^[21]提出了一种通过“功能模块”设计高性能无定形复合卤化物固态电解质（SSE）的新策略。将SSE分为“传输模块”（无定形基体）和“功能模块”。首先，引入 LaCl_3 作为功能模块，成功制备了 $\text{Li}_2\text{O-1.8TaCl}_5\text{-0.2LaCl}_3$ （LTLOC）电解质。该材料离子电导率高达13.3 mS/cm，并使NCM88正极电池在-30℃下仍能稳定循环。进一步通过引入低成本、低密度的 AlF_3 ，制备出 $\text{Li}_2\text{O-1.8TaCl}_5\text{-5AlF}_3$ （LTOC-5AlF₃）。该电解质在保持7 mS/cm高离子电导率的同时，显著增强了耐湿性、耐高压性和对锂金属的稳定性。Zhou等^[22]通过将 Fe_2O_3 掺入 Li_2ZrCl_6 （LZC），设计了一种兼具高离子电导率和Fe基氧化还原活性的低成本卤氧化物固态电解质 $\text{Li}_{1.6}\text{ZrFe}_{0.8}\text{O}_{1.2}\text{Cl}_{5.6}$ （LiZrFeOCl-1604）。 Fe_2O_3 和 ZrCl_4 之间的O/Cl阴离子交换促进了LZC的非晶化，形成了Zr-O/Cl、Fe-O/Cl和Li-

Cl_n ($n \leq 6$) 多面体互连网络, 实现了三维 Li^+ 快速传输。同步辐射 XAS、中子 PDF 和高分辨电镜 (HRTEM) 证实了该非晶网络结构。该电解质在 25°C 下离子电导率达 2.55 mS/cm , 并表现出 163 mAh/g 的可逆容量。与 LiFePO_4 正极耦合后, 复合电极在 $1.7 \sim 4.25 \text{ V}$ 下容量达 $321.6 \text{ mAh/g}_{\text{LFP}}$, 能量密度达 982.1 Wh/kg , 较惰性 LZC 提升 101.8% , 且在 1 C 下循环 800 次后容量保持率达 92.7% 。该研究揭示了卤氧化物固态电解质在 LFP 窗口内作为纯离子导体、窗口外作为活性材料的异步充放电机制。

Xu 等^[23]通过热退火 3 nm 金属银涂层, 在脆性石榴石固态电解质 $\text{Li}_{6.6}\text{La}_3\text{Zr}_{1.6}\text{Ta}_{0.4}\text{O}_{12}$ (LLZO) 表面实现 Ag^+ 异质掺杂。 Ag^+ 经 Ag-Li 离子交换扩散至 $20 \sim 50 \text{ nm}$ 深度的晶粒与晶界, 引入表面压应力。纳米压痕实验表明, 掺杂后表面初始断裂力从 $(5.7 \pm 1.5) \text{ mN}$ 增至 $(27 \pm 3.1) \text{ mN}$, 增韧近 5 倍。原位微探针扫描电镜显示, 即使在 3 GPa 压应力诱导的纳米裂纹存在下, Ag^+ 掺杂 LLZO 的局部临界电流密度仍超过 250 mA/cm^2 , 电镀失效直径扩大 4 倍以上。该性能提升源于 Ag^+ 掺杂诱导的表面机械增韧与缺陷容忍度提高, 而非电子电导率或润湿性改变。Cui 等^[24]开发了面内双轴压缩策略, 通过形状记忆合金环对石榴石型 LLZO 固态电解质施加约 330 MPa 双轴压应力, 使锂枝晶传播方向偏转至垂直于电场方向 (水平扩展), 从而在 100 mA/cm^2 极端快充条件下仍避免短路。该策略有效抑制表面起始机制, 直接证实了长期循环中枝晶可在电解质内部 (晶界交汇点、孔隙处) 成核, 且随循环进行遍布整个电解质厚度。Mahanta 等^[25]通过高熵设计 (HE-LLZO) 和原子尺度关联函数分析, 揭示了石榴石固体电解质中离子传输的新型机制。提出基于时间分辨密度关联函数 $[F_s(q, t) \text{ 和 } F_c(q, t)]$ 的框架, 将微观跃迁动力学与宏观输运性能直接关联, 突破了传统依赖长程自扩散系数的分析局限。通过对原始 LLZO (P-LLZO)、Ga 取代 LLZO (Ga-LLZO) 和高熵 LLZO (HE-LLZO) 的对比研究, 发现高熵 LLZO 的 Li 迁移势垒显著降低 (Oh-Td 跳跃势垒为 $0.10 \sim 0.34 \text{ eV}$, 低于 P-LLZO 的 $0.27 \sim 0.29 \text{ eV}$), 且其弛豫时间 t_{self} 和 $t_{\text{collective}}$ 较 Ga-LLZO 降低约 3 个数量级, 表明化学无序通过动态重构 Li 网络 (如缩短 Li-Li 距离至 $2.12 \sim 2.66 \text{ \AA}$) 而非改变扩散拓扑结

构, 加速了集体松弛过程。与单离子掺杂的 Ga-LLZO 相比, HE-LLZO 虽迁移势垒略高, 但因更短的弛豫时间实现了相近的离子电导率 (与 Ga-LLZO 相当), 证明了时间尺度调控在提升传输效率中的关键作用。Zhou 等^[26]提出了一种在原位条件下将 LLZTO 表面的杂质转化为一种无定形的氧卤化物电解质 $\text{Li}_x\text{TaO}_x\text{F}_{5-x}$ (LTOF) 的方法。通过 TaF_5 (TF) 处理, LLZTO 表面的 Li_2CO_3 和 LiOH 杂质被有效去除, 形成了一层均匀、致密的 LTOF 离子桥。经过 TF 处理的 LLZTO-9TF 与 PVDF-HFP 形成的复合电解质 (CSE-9TF) 表现出显著提升的离子导电性, 达到 1.21 mS/cm , 远优于未经处理的 CSE-0TF (2.03 MPa) 和部分处理的 CSE-4TF。CSE-9TF 还表现出卓越的力学性能、良好的柔韧性、较高的电化学窗口 (超过 5.08 V), 以及显著的抗锂枝晶生长能力。所构建的复合电解质在锂对称电池中展现出稳定的循环性能, 且在超高电流密度下 (0.8 mA/cm^2) 具有较低的极化电压。LTOF 作为一种离子桥, 不仅提升了复合电解质的离子传导能力, 还增强了其机械和电化学稳定性。

Lan 等^[27]构建了由垂直取向 $\text{Li}_{0.3}\text{Cd}_{0.85}\text{PS}_3$ 纳米片层与含锂 PEO 弹性层交替组成的仿生复合固态电解质。通过连续垂直超离子通道与柔性界面层的分工, 使电解质离子传导与机械柔顺性解耦。PA- $\text{Li}_{0.3}\text{Cd}_{0.85}\text{PS}_3/\text{PEO}$ 在 25°C 下的离子电导率达到 10.2 mS/cm ; 锂对称电池在 0.5 mA/cm^2 下稳定循环 1500 小时, 极化仅 18 mV 。在装配压力低于 0.5 MPa 时, $\text{Li}||\text{NCM811}$ 扣式电池以 0.2 mA/cm^2 循环 600 次后仍保持 92% 的放电容量, 平均库仑效率为 99.9% , 并支持堆叠压力低于 0.1 MPa 的 $\text{Li}||\text{LiFePO}_4$ 软包电池运行。以 Mn 替代 Cd 所得 PA- $\text{Li}_{0.46}\text{Mn}_{0.77}\text{PS}_3/\text{PEO}$ 仍实现 6.1 mS/cm 的电导率和良好柔性。Fan 等^[28]采用聚氧化乙烯 (PEO) 基固态聚合物电解质 (SPE) 的全固态锂电池 (ASSLB) 在高电压 ($>3.8 \text{ V vs. Li}^+/\text{Li}$) 下会遭受 PEO 基质中羟基/醚基团的严重降解, 限制其能量密度提升。该降解的根源在于原位生成的腐蚀性酸 (主要为 HTFSI)。传统被动策略仅通过物理隔离保护 PEO 基质, 未能有效抑制 HTFSI 的生成。利用聚胺基试剂 (PA-MS) 对 H^+ (质子) 和 TFSI 阴离子进行双重捕获。该试剂富含高密度强布朗斯特碱位点与氢键供体, 可分别通过静电/氢键作用捕获

游离质子与TFSI⁻，显著抑制HTFSI的形成，从而缓解PEO基质的酸催化链断裂。在4.2 V LiCoO₂基ASSLB中，该系统实现了卓越的循环稳定性（1.0 C、65℃下>600次循环，容量保持率95.5%），优于现有最先进的高压聚合物基全固态锂电池。Yin等^[29]针对固态锂金属电池中浓差极化问题，提出压电辅助机电耦合策略。将压电陶瓷BCTZ引入PVDF基体构建复合电解质，利用锂金属负极体积波动诱导梯度压电场，选择性加速Li⁺迁移并抑制阴离子运动，从而抑制浓差极化。该电解质室温离子电导率为7.13×10⁻⁴ S/cm，临界电流密度达3.7 mA/cm²；Li||NCM811全电池在900 mA/g、2.8~4.5 V下循环逾2600次。

3.2 其他电解液/添加剂

Liu等^[30]针对高载量Si-C||NCM9055全电池在快充条件下的界面动力学与稳定性问题，提出一种新型多功能硅氧烷添加剂——二甲氧基甲基乙烯基硅烷（DOMS），通过协同调控Li⁺溶剂化结构、HF清除及双电极界面构筑，显著提升快充性能。通过DFT计算、MD模拟及光谱分析揭示，DOMS能优先进入Li⁺溶剂鞘，削弱EC的强配位作用，降低脱溶剂化能垒，从而加速界面电荷转移。同时，DOMS通过Si—O和Si—C键断裂高效捕获HF，并生成含Si—O、Si—F的无机组分，分别参与CEI与SEI构建。此外，烯烃片段聚合形成聚乙烯和聚甲基二氟硅基亚乙基等有机组分，有效缓冲硅碳负极体积膨胀。电化学测试表明，含DOMS电解液的扣式电池在2.5 C高倍率下300次循环后容量保持率达71%，软包电池在200 mA/g下400次循环后保持85.58%。XPS、TEM、AFM等表征证实，DOMS衍生的界面层薄而均匀、机械强度高，显著抑制过渡金属溶出和电极结构退化。Afzali等^[31]通过卟啉类添加剂调控Li⁺溶剂化结构以稳定锂金属负极。将四(4-*N,N*-二甲氨基苯基)卟啉（TDMAP）作为多功能添加剂引入碳酸酯电解液，研究了其浓度效应对溶剂化结构、SEI组成及锂沉积行为的影响。FTIR、Raman与DFT计算表明，TDMAP凭借其强配位能力（结合能-2.15 eV，高于EC的-1.92 eV）可取代EC分子进入Li⁺第一溶剂鞘，形成Li⁺-NMe₂与Li⁺-PF₆⁻混合配位环境，并削弱Li⁺-EC相互作用。XPS分析证实，TDMAP参与构建富含LiF和氮化物的SEI，其中N 1s谱显示

Li-N_x物种（397.5 eV）的形成，表明卟啉可作为Li⁺储库改善界面阳离子分布。优化浓度（3 mg/mL）下，锂成核过电位由62 mV显著降至20 mV，Li||Cu半电池库仑效率约99%，Li||LFP全电池在0.5 C下450次循环后容量保持率达97.3%，远超基线电解液（287次循环后失效）。Cryo-FIB-SEM进一步证实TDMAP-3诱导致密柱状锂沉积，而基线电解液则为多孔枝晶形貌。Azam等^[32]针对硫酸乙烯酯（DTD）添加剂化学稳定性差（室温储存15周降解约50%）及化成产气严重等实用化瓶颈，设计合成了一系列DTD衍生物，其中双DTD（Bis-DTD）表现尤为突出。通过亚甲基氢位点的R-基取代保护策略，Bis-DTD在电解液中室温储存30周几乎不发生降解，同时将化成产气量由DTD的约1.8 mL显著降至0.3~0.5 mL。电化学测试表明：NMC442/石墨高压体系（4.4 V，40℃）循环寿命与顶级添加剂S2-3相当（约220圈）；Ni65/石墨中镍体系（4.4 V，40℃）预计循环超2000圈，且在4.45 V高截止电压下仍保持稳定；LFP/石墨体系中，2% VC+2% Bis-DTD协同配方在70℃下循环寿命与4% VC基准相当（约700圈），但电荷转移阻抗仅为后者的约1/6（约80 vs. 500 Ω·cm²），避免了高VC浓度引发的低温锂析出风险。

Cheng等^[33]针对FEC在高温下易脱氟分解产生酸性副产物问题，提出基于分子氟化对称性的电解液设计策略，通过对称二氟取代（2F，二氟碳酸乙烯酯）精准调控溶剂分解路径，使其优先发生开环反应而非脱氟反应，从而抑制HF/PF₅等酸性物种的生成。DFT计算表明，2F的环张力（10.81~12.46 kcal/mol）显著高于FEC（5.99 kcal/mol），使其开环分解在热力学上更为有利；¹⁹F NMR证实2F在高温储存后脱氟产物峰远弱于FEC。NMR、DEMS及ARC测试进一步验证，2F电解液在4.7 V高压下CO₂/H₂析出显著减少，热失控起始温度由FEC体系的160.9℃提升至241.8℃。SECM与TEM表征显示，2F衍生的CEI薄而均匀（约4 nm），有效抑制了NCM811表面岩盐相形成。Li||NCM811半电池在45℃、4.5 V下300次循环保持83%容量；2 Ah石墨||NCM811软包电池在45℃下480次循环保持90%容量，60℃下200次循环保持91%容量。Duan等^[34]开发了5-三甲基硅烷基噻唑（5-SiTz）作为电解液添加剂，用于清除高电压锂

离子电池中含 LiPF_6 的碳酸盐基电解液中产生的 HF 。该添加剂兼具硅氧烷基团和噻唑基团，前者与 HF 快速反应实现初级清除 (<1 秒)，后者作为路易斯碱中和残余 HF ，并螯合 PF_6 抑制 HF 再生，使电解液在空气中稳定超 200 天。同时，5-SiTz 还能促进形成强韧、富含无机物的正极电解质界面层，有效抑制过渡金属溶解和颗粒开裂。电化学测试表明， $\text{Li}|\text{NCM811}$ 电池在 4.6 V 下 300 次循环后容量保持 83.5%，4.8 V 下 240 次循环后仍保持 80%；石墨 $|\text{NCM811}$ 软包电池在 4.6 V 下 700 次循环后容量保持率高达 92.1%。

Xiong 等^[35]提出了一种通过调控电解液构建外延生长型梯度界面层的策略，以稳定超高电压 (4.8 V) 下 LiCoO_2 正极的界面稳定性。研究选用氧化电位 (5.50 V) 的富氟锂盐 LiNFSI ，使其优先分解生成富含 LiF 的 CEI 层，从而构建一层类外延生长的梯度保护层。电化学测试表明，4.8 V LiCoO_2 在 LiNFSI 基电解液中可实现 251 mAh/g 的比容量 (理论容量的 91.7%)，并稳定循环 220 次。此外，组装的 6.82 Ah $\text{Li}|\text{LiCoO}_2$ 软包电池在 4.8 V 下能量密度达 557 Wh/kg，循环 60 次后容量保持率为 85.2%。Jia 等^[36]引入 *N*-甲基三氟乙酰胺 (NMTFA) 作为新型电解质添加剂，并结合二氟 (草酸) 硼酸锂 (LiDFOB)，以调控电解质溶剂化结构与界面化学。NMTFA 凭借孤对电子与 $\text{N}-\text{H}$ 键，可作为电子供体有效清除 LRMO 正极释放的超氧自由基，减弱其亲核性，从而抑制电解质降解与气体产生。同时，NMTFA 与主溶剂间的氢键作用以及 DFOB^- 阴离子进入 Li^+ 初级溶剂化鞘层，削弱了 Li^+ -溶剂相互作用，促进了富氮/硼界面相的形成，加快了 Li^+ 去溶剂化动力学并提升了电极稳定性。基于此， $\text{Li}|\text{LRMO}$ 全电池在 4.8 V 截止电压下循环 800 次后容量保持率超过 70%，在 5.0 V 更高截止电压下循环 300 次后保持率超过 80%。Xue 等^[37]提出基于静电势匹配的溶剂锚定电解液，由 *N,N*-二甲基三氟乙酰胺和间氟甲苯组成，形成阴离子富集内层与溶剂锚定外层簇的分级结构，降低 Li^+ 去溶剂化能垒，构建无机富集界面膜。该电解液使石墨 $|\text{LiCoO}_2$ 全电池在 4.5 V 下 300 次循环保持率 $>80\%$ ，4.4 V 下 3 C 循环 1600 次保持率 80%；在 $-60\sim 80^\circ\text{C}$ 宽温域内稳定运行，1.5 Ah 软包电池能量密度 220.5 Wh/kg，300 次循环保持率 $>90\%$ 。Yang 等^[38]报道了一种分

子设计策略，通过形成氢键域重构电解液溶剂化结构，同步提升 Li^+ 传输的热力学性能和界面动力学。引入电化学稳定的氢键供体 2-氰基-*N*-甲基乙酰胺作为共溶剂，构建出稳定的纳米级氢键域 ($<3.5 \text{ \AA}$, $1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$)。该供体能形成经典氢键 (H 键, $\text{H}\delta^+-\text{O}\delta^-$) 和非经典氢键 (Z 键, $\text{N}\delta^+-\text{H}\delta^+$)，破坏松散结合的溶剂化簇，诱导形成紧密配位的 Li^+ 溶剂化结构，从而构建定向快速 Li^+ 传输通道。在 4.7 V、面容量约 3.0 mAh/cm² 的严苛条件下， $\text{Li}|\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 电池经 400 次循环后容量保持率达 78.8%；同时，4.7 V 锂金属软包电池的比能量 (基于所有组分质量) 达 418.2 Wh/kg。Ma 等^[39]提出一种基于分子几何构型与电子密度分布协同优化的无氟电解液设计策略。所设计的溶剂 2-乙基丁酸乙酯 (2EA) 在调控分子间相互作用和 Li^+ 配位中发挥关键作用。其 2-乙基丁基基团产生显著的空间位阻，同时具有给电子诱导效应，能有效削弱羰基氧与 Li^+ 的结合亲和力；其空间位阻可抑制低温下溶剂分子间的相互作用，使熔点低至 -100°C 以下。空间与电子效应的协同作用将溶剂化结构重构为阴离子主导构型，有利于 Li^+ 去溶剂化，并促进形成坚固、富无机界面层。基于 2EA 的电解液使高压 $\text{Li}|\text{LiCoO}_2$ 电池在 25°C 下循环 1500 次后容量保持率达 80%，10 C 倍率下容量保持率 90%，且可在 -60°C 至 70°C 的超宽温度范围内稳定循环。Liu 等^[40]通过在常规电解液中加入苯并噁嗪基热响应添加剂 ($\text{mCF}_3\text{-BA}$)，在正常工作时该添加剂有助于形成坚固的 SEI 以提升循环稳定性，而在电池过热时则迅速聚合形成交联树脂网络，物理阻断化学反应并将热失控阈值温度从 153.1°C 提升至 187.6°C ，峰值温度从 579.6°C 降至 314.7°C 。Chen 等^[41]设计了一种具有高抗氧化性和快速脱溶剂化行为的富阴离子电解液 (PB-SDDF)，能够形成有效的界面以改善电化学性能。优化后的电解液使硅-石墨电极在 0.1 C 下达 1838.9 mAh/g 的容量，并具有长期电化学稳定性；同时，富锂层状氧化物 (LRLO) 正极在 1 C 下循环 600 次后保持 72.3% 的容量。所设计的不可燃电解液在软包电池针刺测试后也未发生热失控，增强了安全性。

4 电池技术

4.1 固态电池

Feng 等^[42]针对高镍三元正极 (NCM95) 与硫

化物固态电解质界面不稳定的问题，提出了一种基于原子层沉积（ALD）技术的氧氯梯度涂层（LTOC）改性策略。通过精确控制前驱体沉积顺序，构建了具有“富氧内层-富氯外层”的梯度结构。其中，富氧内层作为电化学惰性屏障，增强了结构完整性并抑制了副反应；富氯外层则作为柔性界面，有效缓解了体积变化带来的机械应力。此外，涂层中形成的LiCl纳米晶起到了“钉扎”作用，进一步提升了涂层的机械稳定性和锂离子传输动力学。优化后的NCM95正极在室温下表现出卓越的电化学性能，2 C倍率下容量达103 mAh/g，0.5 C循环200次后容量保持率高达96.9%。Chen等^[43]针对全固态电池高堆叠压力（>200 MPa）需求及4.5 V高电压下固-固界面化学-机械失稳的问题，提出基于黏弹性氧卤化物 $\text{LiAlCl}_{2.5}\text{O}_{0.75}$ （LACO）的180℃中温共烧结策略。LACO非晶结构具有类聚合物热塑性与黏弹性（杨氏模量仅1.2 GPa），无外压下30℃离子电导率达1.52 mS/cm，烧结时软化流动填充颗粒间隙形成共形接触；同时热驱动Al、Cl从LACO向单晶NCM811次表面梯度互扩散（约21 nm），Al抑制氧空位并降低 $\text{Li}^+/\text{Ni}^{2+}$ 反位缺陷，Cl扩大c轴晶格，原位构建耐氧化钝化层并抑制H2—H3相变。通过XRD精修证明反位缺陷由4.62%降至2.66%。所组装电池在10 MPa低堆叠压力下，4.3 V截止0.5 C循环800次容量保持80%，4.5 V截止0.1 C循环275次保持80%，而未改性样品分别仅112次和90次。Liu等^[44]针对全固态电池厚电极冷压成型后固-固界面接触差、离子传输网络不连续及循环体积变化引发颗粒开裂与界面剥离的问题，开发了一种纤维素衍生聚合物添加剂CA-MDI。该添加剂由乙酸纤维素与二苯基甲烷二异氰酸酯经一步偶联反应生成氨基甲酸酯键交联网络，其含氧官能团提供 Li^+ 配位位点，柔性低模量骨架在冷压下增强颗粒间黏附并缓冲循环应力，以轻微牺牲本体电导率换取厚电极结构完整性。使用FTIR（—NCO峰完全消失、C—N键生成）、压缩应力-应变曲线及截面SEM证明该机制，并结合GITT测得200 MPa下改性电极表观 Li^+ 扩散系数更高。所组装NCM89电池在9.27 mg/cm²负载下1 C循环623次容量保持80.1%；32.1 mg/cm²（约6.4 mAh/cm²）厚电极0.3 C初始放电136.6 mAh/g，100次后保持91.1%，而无添加剂电池30次内容量衰减约84%。

Zhang等^[45]针对硫化物全固态电池湿法工艺中传统橡胶黏结剂（如NBR）链间作用弱、无法耗散干燥/辊压/循环应力而导致针孔裂纹及界面失效的问题，通过端羟基聚丁二烯-丙烯腈与异氰酸酯封端聚丁二烯缩聚，开发了刚柔嵌段协同的氢键网络黏结剂PNO。聚丁二烯软段保证低极性溶剂加工性，氨基甲酸酯硬段在链间及与硫化物/正极颗粒表面形成动态可逆氢键，其断裂-重组可有效耗散局部应力；经小分子筛选证实氨基甲酸酯较酰胺、脲与 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 化学相容性更优。研究变温FTIR与¹H NMR分析氢键随温度可逆变化及电极循环拉伸在100次后耗散能保持率0.94（vs NBR 0.13）。制得30 μm自支撑LPSC膜（杨氏模量2392.5 MPa）和约30 mg/cm²高负载正极。Li-In对称电池临界电流密度4.3 mA/cm²、0.5 mA/cm²下稳定3000 h；NCM811/Li-In电池1 C下1000次容量保持97.5%（NBR仅22.4%）；31.8 mg/cm²正极搭配30 μm膜实现384 Wh/kg，100次保持85.5%；软包电池200次保持85.1%。Wu等^[46]研究了富锂锰基层状正极与 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 硫化物电解质之间晶格氧氧化还原和界面稳定性的耦合关系。高电位下不可逆晶格氧反应会诱发电解质严重分解，生成多孔的硫酸盐、磷酸盐和 PSO_x 等含氧副产物，主导界面阻抗并抑制后续阴离子氧化还原；放电至2.6~2.0 V时，这些副产物发生还原并嵌入锂，促使界面重构为更致密的钝化层。基于该机理，采用3.9~2.0 V预活化并结合氧改性 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ ，使电池在10 mA/g下达到318 mAh/g，在200 mA/g下提供226 mAh/g，并在60℃循环500次后保持83.2%的容量。Zhang等^[47]研究了硫化物（LSPSC）和卤化物（LIC）两种固态电解质与无钴富锂锰基氧化物（LRNM）正极在全固态锂电池中的界面兼容性问题。LRNM/LIC电池初始放电比容量高达253.4 mAh/g，且在0.5 C倍率下循环100次后容量保持率达87.32%。相比之下，LRNM/LSPSC电池性能较差，主要归因于LSPSC与正极发生不可逆副反应，生成高阻抗物质。而LIC则能与LRNM形成稳定的 In_2O_3 钝化层，有效抑制界面副反应，提升稳定性。此外，研究还优化了导电剂，发现气相生长碳纤维（VGCF）能构建连续的三维导电网络，使LRNM/LIC/VGCF电池在0.2 C下循环100次后容量保持率高达98.72%。

Ohno等^[48]针对全固态电池从实验室压片型向实

用片型转变中运行堆叠压力过高 (10~100 MPa, 工业要求<1 MPa) 及流延电极颗粒接触差的问题, 提出流延法结合冷等静压 (CIP) 的制备策略, 并采用近零体积变化正极 $\text{Li}_{8/7}\text{Ti}_{2/7}\text{V}_{4/7}\text{O}_2$ (LTVO)。CIP 通过各向同性施压实现均匀致密化, 建立连续离子/电子传输通路; LTVO 的尺寸不变特性可缓解循环界面接触损失; 同时优化导电碳含量以平衡电子与离子传导。以截面 SEM (CIP 后孔隙显著减少、三相界面丰富)、电子电导率测试 (由 5.9×10^{-5} 增至 2.1×10^{-2} mS/cm) 及 EIS (晶界电阻半圆消失) 为直接证据, 测得 LPSCI 电解质片室温离子电导率 2.4 mS/cm, Li_xIn 对称电池 0.05 mA/cm² 下稳定循环 800 h。优化后电极 (5% VGCF、480 MPa CIP) 在 <0.5 MPa 极低堆叠压力下 50 mA/g 可逆容量达 222 mAh/g, 200 次容量保持 95%, 而无 CIP 电池无可逆容量。Hu 等^[49]制备了一种用于全固态锂电池的高性能卤氧化物基正极电解质 LiNbCl_4O (LNCO)。该材料兼具超离子导体特性与氧化还原活性, 室温离子电导率高达 7.32 mS/cm, 并能通过 $\text{Nb}^{5+}/\text{Nb}^{4+}/\text{Nb}^{3+}$ 氧化还原对提供 85.5 mAh/g 的可逆比容量。LNCO 在放电过程中电子电导率会显著提升近四个数量级, 这使其在 1 C 倍率下循环 6000 次后容量保持率仍达 65.8%。当 LNCO 作为活性电解质与 NCM811 正极材料复合时, 构建的全固态电池能量密度达到 926.1 Wh/kg, 相比使用惰性电解质的电池提升了 20.5%。同时, 该电池在 0.3 C 倍率下循环 307 次后容量保持率为 80.0%。Liu 等^[50]报道了一种 O/Cl 桥接铁基氧氯化物正极电解质 (1.2LiOH-FeCl_3), 用于零压全固态锂电池。其可自由旋转的 $\text{Fe}_x\text{O}_y\text{Cl}_z$ 框架赋予类聚合物黏弹性, 形成柔软界面以缓解循环体积变化, 并实现 6.1 mS/cm 的高室温离子电导率。可变价铁中心提供额外容量, 与 LiFePO_4 复合后, 零压电池放电容量达 196.4 mAh/g_{LFP}, 能量密度 609.4 Wh/kg_{LFP}, 较 Li_2ZrCl_6 分别提升 31.3% 和 21.1%, 100 圈容量保持率 86.6%。该材料成本仅 \$2.6 kg, 可在 60℃ 规模化合成, 兼具高性能与经济可行性。

Ding 等^[51]在 PVDF-HFP 固态电解质中引入取向 Fe_3O_4 纳米棒, 使电池循环时的内部磁场增强约两个数量级。增强磁场一方面通过磁流体动力学效应调控锂离子沉积、抑制负极枝晶, 另一方面调节 Ni^{3+} 自旋态并促进其返回过渡金属层, 从而减缓

NCM 正极的 Li/Ni 反位无序。取向结构还将离子电导率由 1.55×10^{-4} 提高至 3.38×10^{-4} S/cm。NCM||Li 电池初始比容量达到 192.5 mAh/g, 在 0.2 C、45℃ 下循环 50 次后容量保持率为 88.3%。Li 等^[52]报道了一种高黏性聚合物电解质 (PAMD-SPE) 调控的无枝晶锂沉积策略。利用聚合物与锂晶体表面的强黏附作用, 将锂限制在连续成核状态, 抑制其向 (211) (200) 高指数晶面的垂直生长, 使锂以 (110) 晶面主导的球形颗粒堆叠沉积, 从根本上消除枝晶。该电解质室温离子电导率达 1.83 mS/cm, 临界电流密度高达 9 mA/cm², Li||Li 对称电池在 0.2 mA/cm² 下稳定循环 4500 小时; 固态锂硫全电池在 1 C 下循环 500 圈容量保持率 95.5%, 软包电池实现 10 mg/cm² 高硫载量。

Liu 等^[53]设计了一种 Li-In-S 复合箔负极 (含 Li_2S 、 Li_xIn 和 LiInS_2), 利用 Li_2S 与 Li_xIn 的功函数差在异质界面构建内建电场 (BIEF)。该电场捕获界面电子并限制其向 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 电解质转移, 从而抑制界面副反应; 同时促进 Li^+ 吸附与扩散, 抑制枝晶生长。基于此, 对称电池临界电流密度超 4 mA/cm², 1 mA/cm² 下稳定循环逾 2000 小时。匹配 LiCoO_2 和 NCM811 的全电池分别实现 1 C 下 2000 圈 93% 和 1000 圈 87.7% 的容量保持率, 倍率达 4 C。Zhu 等^[54]通过熔融等温处理及压制工艺制备了 LiAl 固溶体负极, 探究了组成与结构对硫化物基全固态电池 (ASSBs) 电化学性能的影响。其中, LiAl-1:4 负极表现最优: 对称电池临界沉积电流密度达 1.35 mA/cm², 可在 3 mA/cm² 下稳定循环 800 小时; 匹配 NCM90 正极的全电池在 30C 高倍率下容量为 110.4 mAh/g, 1 C 循环 1000 次后容量保持率 89.1%, 并在 20 C 与 100 C 下分别实现超 17000 次与 12000 次循环。研究表明, 均匀 Al 分布与多孔结构协同抑制锂枝晶并缓解体积变化, 表面 Li_2O 物种则增强界面 Li^+ 传输稳定性。Li 等^[55]针对硫化物基全固态锂离子电池中无负极液硅负极初始库仑效率低及循环稳定性差的问题, 提出辊转印预锂化与锂活性软金属 (In、Sn、Al) 复合改性策略。锂化软金属形成混合离子-电子导体 (MIEC) 网络, 作为自适应导电缓冲相, 缓解硅体积变化导致的界面应力集中与接触失效。优化组成的 $\text{PLi}_6\text{Si}_4\text{In}$ 负极 (40% In) 对称电池实现 > 4000 h 稳定循环; 匹配高载量 NCM721 正极 (26.5 mg/cm²) 的全电池经 700 次循环容量保持率

达72.7%，且在超高载量（39.7 mg/cm²）及低N/P比（1.32）条件下仍保持81.8%。Yamamoto等^[60]阐明了多孔硅负极的孔结构设计及表面氧化层对降低全固态电池堆叠压力的关键作用。通过镁热还原及高浓度HCl刻蚀制备的介孔硅（meso-pSi）与大孔硅（macro-pSi）中，meso-pSi利用高孔隙率及薄氧化层实现可逆孔道收缩/膨胀，抑制Li_xSi团聚；macro-pSi则通过塑性变形形成互连网络防止硅孤立。表面氧化层有效阻隔Li_xSi暴露，抑制其与痕量气氛反应导致的化学降解及绝缘副产物累积。该多孔结构-表面化学协同策略使硅负极在20 MPa低堆叠压力下仍保持良好循环稳定性与低界面电阻。

4.2 锂硫电池

Bi等^[57]针对锂硫电池中多硫化锂穿梭、反应缓慢以及宿主材料过重的问题，制备了sp杂化氮掺杂石墨炔多壳层结构（sp-N GDY）。其中，sp杂化氮与相邻碳之间的电荷重新分布，使氮位点负责固定多硫化锂，邻近碳位点促进其向Li₂S转化；多层空腔则容纳硫的体积变化并缩短传输路径。该正极的硫含量达到93.9%，在0.1 C下按硫和宿主总质量计算的容量为1462 mAh/g，在10 C下循环600次仍保持较高输出。进一步制备了容量超过4.2 Ah的软包电池，质量能量密度约为457 Wh/kg。Chen等^[58]针对锂硫电池多硫化物穿梭与氧化还原动力学缓慢，且单原子催化中间层活性位点分布不均的问题，提出逆向扩散工程策略。利用芳纶纳米纤维（ANF）Janus膜的致密表层作为分子扩散门控，调控Zn²⁺/Co²⁺与2-甲基咪唑从膜两侧以相近速率（7.1×10⁻⁹~7.4×10⁻⁹ m²/s）双向扩散，将Zn-Co ZIF前驱体的成核与生长限制在膜内部；热解时Zn挥发、Co被氮配位稳定为原子分散的Co—N₄位点。采用HAADF-STEM与EXAFS（1.45 Å处Co—N峰、无2.15 Å Co—Co峰）证实单原子结构，使用原位Raman揭示长链多硫化物快速消耗、Li₂S均匀析出，并测得Co负载仅约1.2%。对称电池与全电池CV显示氧化还原峰间距由0.54 V降至0.38 V，Li⁺扩散系数达56.8×10⁻⁹ cm²/s；Li₂S成核过电位降至2.34 V。0.5 C下100次可逆容量约950 mAh/g，6 C仍保持清晰放电平台；2 C下350次循环库仑效率近100%；6 mg/cm²高硫载量下仍维持稳定容量。Xu等^[59]针对锂硫电池中高硫负载和多硫化物（LiPSs）溶解的难题，提出了一种的“无电解质正

极”设计策略。构建了由锂化羧甲基纤维素/丁苯橡胶（CL/S）作为黏结剂的3D正极，并搭配填充了LLZTO陶瓷颗粒和LiPSs的高浓度PEO基固态电解质。CL/S黏结剂能形成稳定的3D导电网络，有效吸附长链LiPSs并催化其转化，同时缓冲硫的体积膨胀。电解质中的LLZTO和LiPSs协同作用，显著提升了离子电导率和锂离子迁移数。该设计使电池在0.2 C倍率下循环500次后容量仍高达1106 mAh/g。即使在7.0 mg/cm²的高硫负载下，电池仍能稳定循环。An等^[60]研究了硫在硫-碳（S/C）复合材料颗粒内部的分布状态对无聚合物黏结剂干法电极性能的影响。对比了两种具有相同硫含量（70%）但结构迥异的S/C复合材料：球磨法（B-S/C，硫表面聚集）和熔融扩散法（T-S/C，硫均匀限域于碳孔内）。结构表征与流变学分析表明，B-S/C虽具有更高的内聚力和压缩性，利于颗粒间结合，但在热辊压过程中易形成贫硫表层和裂纹；而T-S/C中均匀分布的硫则能实现颗粒间的内聚融合，形成连续多孔网络。电化学测试显示，基于T-S/C的电极在倍率性能和循环稳定性上均显著优于B-S/C，在扣式电池和软包电池中均表现出更高的容量保持率。

Chen等^[61]针对全固态锂硫电池中硫/导电碳/硫化物电解质三相界面不稳定，导致硫转化动力学缓慢、电解质分解生成惰性LiCl以及硫体积膨胀引发界面接触失效的问题，向正极中引入天然共轭分子虾青素（AXT）作为电子开关型界面调节剂。基于低覆盖度AXT通过低电位下（0.7 V Li vs. Li⁺）“电子口袋”效应将部分电解质分解导向生成电化学活性Li₂S；极性含氧官能团构建低势垒Li⁺通道并稳定Li₂S₂中间体，加速硫氧化还原；链状分子结构作为柔性骨架缓冲体积波动。研究以³¹P NMR、TOF-SIMS及原位压力监测为直接证据，证实0.5% AXT使S²⁻/Cl⁻比显著升高、Li⁺迁移能垒由0.28 eV降至0.17 eV、首圈净压力变化仅0.01 MPa。改性电池在1 C下仍保持1307 mAh/g，9.49 mg/cm²高硫负载下面容量达16.56 mAh/cm²，-10℃下150次无明显衰减，2 C循环300次每循环衰减0.060%。Cronk等^[62]针对全固态锂硫电池活性物质利用率低、硫转化动力学缓慢及79%体积变化引发界面接触失效的问题。采用高能短时间一步机械化学法，使硫与Li₆PS₅Cl在颗粒表面原位反应生成富硫离子导电相Li₃PS_{4+n}，并将活性物质粒径调控至微米级。

该界面相降低锂化能垒、促进 Li^+ 快速传输,同时激活硫化物电解质的可逆氧化还原活性以贡献额外容量;正极膨胀还可补偿负极体积收缩,缓解内部应力。研究以 Raman 光谱($\text{S}-\text{S}$ 峰红移至 149 cm^{-1})、 dQ/dV 分析及原位压力监测为直接证据,证实 LPSCI 可逆容量约 350 mAh/g ,微米硫 500 次容量保持率 81%, $\text{Si} \parallel \text{Li}_2\text{S}$ 电池首次压力变化近乎为零。所设计电极在 11 mAh/cm^2 面容量下 140 次保持率 87%; Li_2S 无负极软包电池在 10 MPa 低堆叠压力下可逆容量达 900 mAh/g 。Jiang 等^[63]针对固态锂硫电池室温离子电导率低、固-固界面接触差及锂枝晶穿刺的问题,设计了一种基于动态润湿机制的固态聚合物电解质 SPSLL。该电解质以阻燃磺化酞嗪酮联苯醚砜(SPPBES)静电纺丝薄膜为超薄骨架,填充 PVDF-HFP/丁二腈/LiTFSI 混合相,并引入 GaSn 液态金属作为界面润湿层。磺酸基团促进锂盐解离并提供低势垒 Li^+ 传输通道;液态金属作为动态活性位点增强界面物理接触,在负极侧通过可逆合金化诱导形成富 $\text{LiF/Li}_2\text{O}$ 的稳定 SEI,均匀电荷载体传输以抑制枝晶。通过 DFT 计算、计时电流法(Li^+ 迁移数 0.76)及锂对称电池循环为直接证据,测得室温离子电导率 $3.64 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ 、临界电流密度 2.0 mA/cm^2 ,锂对称电池稳定循环 900 h。所组装 $\text{Li} \parallel \text{SPAN}$ 电池 1 C 下 500 次容量保持率 92.2%、库仑效率 99.9%,单层软包电池在 6.9 mg/cm^2 硫负载下初始比容量达 948 mAh/g 。Hong 等^[64]提出了一种高价阳离子诱导晶格膨胀策略,通过在 Li_2S 晶格中引入大离子半径的四价 Zr^{4+} 取代 Li^+ 位点,从根本上解决了 Li_2S 正极本征导电性差和活化能垒高的难题。 Zr^{4+} 替代不仅扩大了 Li_2S 晶格并产生大量锂空位,使离子电导率提升近两个数量级,同时 $\text{Zr}-\text{S}$ 轨道杂化显著窄化带隙,将电子电导率提升超过三个数量级,并弱化了 $\text{Li}-\text{S}$ 键以降低反应活化能。得益于电子/离子混合导电特性的激活, Zr 掺杂 Li_2S 正极实现了高度可逆的硫转化,在 0.5 mA/cm^2 电流密度下稳定循环超过 2000 次并保持 827 mAh/g 的比容量。该策略使得正极中 Li_2S 活性物质含量高达 65% (质量分数),组装的全固态锂硫电池基于正极的质量能量密度达到 996.2 Wh/kg ,并在 100 次循环中保持稳定,远超传统设计(40%)。Wang 等^[65]通过将 Co 团簇限域于超微孔碳中,设计了空间选择性催化架构,揭示了全固态锂硫电池中硫催

化与硫化物电解质分解之间的催化剂尺寸界限。该结构通过调控沸石咪唑骨架(ZIFs)中 Co/Zn 的摩尔比实现了 0.25~1.4 nm 的团簇尺寸精确控制,其中中等尺寸(约 0.6 nm)的 Co 团簇在催化硫转化(SRR 活化能从 12.6 降至 3.8 kJ/mol)的同时最大限度抑制了 LPSC 电解质的催化分解(分解活化能从 3.9 升至 6.9 kJ/mol)。COMSOL 模拟、ToF-SIMS 和 DRT-EIS 证实了该尺寸效应。采用 Co/S 正极的全固态电池在 15 C (25.0 mA/cm^2) 超高倍率下循环 15000 次后仍保持 520 mAh/g 的可逆容量,在 4 mg/cm^2 硫载量下经 300 次循环后面容量超过 5.4 mAh/cm^2 。Kissel 等^[66]设计了一种用于全固态锂硫电池(ASSLSB)的氧化还原活性固态电解质(SE) $\text{Li}_{10.5-x}\text{Si}_{1.5}\text{P}_{1.5}\text{S}_{12-x}\text{I}_x$ 。通过碘(I)取代,在材料中形成了富碘的非晶相,该相不仅提升了离子电导率,更作为氧化还原介质,显著加速了硫的转化动力学。其中, $\text{Li}_{10.1}\text{Si}_{1.5}\text{P}_{1.5}\text{S}_{11.6}\text{I}_{0.4}$ 表现最佳,室温离子电导率达 9.2 mS/cm 。将其作为正极电解质(catholyte)时,电池展现出卓越性能:在 0.5 C 倍率下硫利用率达 86%,并在 5 C 和 15 C 的高倍率下分别实现了 1175 mAh/g 和 590 mAh/g 的比容量。

4.3 其他电池技术

Papailias 等系^[67]统探究了 $\text{Li}-\text{CO}_2$ 电池中 O_2 含量对反应路径、放电产物及电化学性能的影响机制,并开发了中熵催化剂 $\text{Cu}_3(\text{VBi})_{0.5}\text{Se}_4$ 与稳定的离子液体基电解液体系。研究发现,在纯 CO_2 条件下,反应以表面机制为主,放电产物为 Li_2CO_3 和固态碳,碳的生成导致高电流密度下放电电位显著降低($<2.0 \text{ V}$)。当引入 O_2 后,反应路径转变为溶液相机机制:表面 O_2 还原反应引发 O_2 与 CO_2 形成 $\text{C}_2\text{O}_6^{2-}$ 等中间体,最终仅生成 Li_2CO_3 且无固态碳析出,动力学显著改善。20% O_2 条件下,0.8 mA/cm^2 时放电电位提升 58% (从 1.7 V 升至 2.7 V)。电池在 0.2 mA/cm^2 的电流密度和 0.1 mAh/cm^2 的容量下实现了 1200 次稳定循环,并在 0.8 mA/cm^2 的电流密度和 0.4 mAh/cm^2 的容量下循环 140 次。但是 O_2 在充电过程中被不可逆消耗,导致放电电位逐渐回复至纯 CO_2 水平,持续补充 O_2 可恢复性能。Zhang 等^[68]提出了一种功能区域化电极设计,通过将氧还原反应(O_2 单电子还原)与 Li_2O_2 存储区域分离,解决了 $\text{Li}-\text{O}_2$ 电池中氧传输、离子和电子同步传质的固有冲突问题。该方法通过物理分区与化学键桥

结合，构建了包含反应区（ERR）和产物存储区（PSR）的双区结构，使ERR中的单电子氧还原反应被限制在活性电学位点，避免了 Li_2O_2 诱导的钝化；PSR则通过定向沉积实现 Li_2O_2 高效存储，降低氧传输阻力。该设计在 0.1 mA/cm^2 电流密度下表现出 0.2 V 超低放电过电势和368次稳定循环性能，其放电容量（ 4.46 mAh/cm^2 ）较传统电极（ 2.80 mAh/cm^2 ）提升60%，循环稳定性提升240%。性能提升源于电极结构优化实现了高效电化学界面与多物种传输通道的协同作用，同时通过控制 RM^+ 浓度和气电极厚度抑制了穿梭效应。Zhao等^[69]针对转化型电池能量存储效率低（59%~95%）、充放电极化大（200~1500 mV）的问题，提出硫-氯协同化学，构建 $\text{Li} \parallel \text{SO}_2\text{Cl}_2\text{-Cl}_2$ 可充电电池。该电池以 3.6 mol/L LiCl 与 3.6 mol/L AlCl_3 溶于磺酰氯（ SO_2Cl_2 ）的LAS电解液为核心， SO_2Cl_2 兼作溶剂与正极活性物质，科琴黑为正极、锂金属为负极。充电时原位生成的 Cl_2 介导 $\text{SO}_2/\text{SO}_2\text{Cl}_2$ 可逆转化，反应为 $\text{SO}_2\text{Cl}_2 + \text{Cl}_2 + 4\text{Li} \leftrightarrow \text{SO}_2 + 4\text{LiCl}$ ；DFT计算表明 Cl_2 将 S-Cl 键解离能垒降低 0.84 eV ，经 SO_2Cl^+ 、 Cl_3^- 等中间体实现快速动力学。采用DEMS通过 SO_2^+ 与 Cl_2^+ 信号可逆变化，结合 S/Cl K 边XAS价态分析证明反应过程。测得充放电极化仅 9 mV 、能量存储效率达99.5%，极限电流密度 400 mA/cm^2 ； 13.5 mAh/cm^2 高面容量下效率>93%， -20°C 下效率94.6%，250 mAh软包电池效率96.2%，并演示了片上微型电池（面功率 11.3 mW/mm^2 ）与纤维电池。Feng等^[70]通过配位电化学调控，设计了一种基于乙基紫精二溴盐正极（ EVBr_2 ）的六电子转移 Li-Br 电池。该体系通过引入含 LiCl 的电解液，构建了 Cl-Br 配位作用，激活并稳定了 $2\text{Br}^-/2\text{Br}^+$ 四电子可逆转化过程，同时乙基紫精配体（ EV^{2+} ）提供两步 Li^+ 嵌入/脱出，协同实现容量（ $632.8\text{ mAh/g}_{\text{Br}}$ ）和放电电压（ 3.7 V ）的显著提升。原位/非原位光谱表征及密度泛函理论（DFT）计算证实， EV^{2+} 骨架吸附和 BrCl_2 配位构型有效稳定了高价 Br^+ 并构建了高效电荷转移路径。 $\text{Li} \parallel \text{EVBr}_2$ 全电池在 1 A/g 下比能量达 $1810\text{ Wh/kg}_{\text{Br}}$ ，且在 3 A/g 下循环1400次后平均容量衰减率每圈仅0.03%。Baumgartner等^[71]通过电化学耦合氧原子转移（OAT）策略，设计了碳载铁纳米颗粒（ Fe@C ）作为双功能催化剂和转化型正极材料。该体系利用 Fe

纳米颗粒催化的OAT过程，将 LiClO_4 的 $\text{Cl}^+ \cdot \text{O}_4^-/\text{Cl}^-$ 八电子还原与 Fe/FeO_x 的转化反应耦合，实现超过50%的 ClO_4^- 转化率。SEM/EDX及XRD证实了热化学还原步骤中 LiCl 和 Fe_3O_4 的生成，并通过扣除副反应贡献确认了 ClO_4^- 还原占电池总能量的约90%。 $\text{Fe@C} \parallel \text{LLZO} \parallel \text{Li}$ 全电池在 125°C 下放电容量达 $1150\text{ mAh/g LiClO}_4$ ，能量密度为 1950 Wh/kg （相对 Li ），远超传统正极。敏感性分析表明，通过提高 ClO_4^- 浓度和选择高电位TM催化剂，电极能量密度可提升至 3431 Wh/kg 。Geng等^[72]把 I_2 视为弱路易斯酸，提出用 I-I 键长统一衡量碘与正极宿主或电解液溶剂之间的作用强度。配体向 I_2 提供电子后， I-I 键会伸长并使拉曼峰向低波数移动，因此可以用常规拉曼测试快速比较不同材料。依据这一规律，选择强配位的1,4-二氮杂双环[2.2.2]辛烷（DABCO）固定正极中的碘，同时选择弱配位氟醚共溶剂（TTE）减少电解液对碘的竞争溶解。优化后的 Li-I_2 电池在 1 C 循环1000次后容量保持率为87.6%，在更容易暴露穿梭问题的 0.1 C 下稳定运行超过4000 h。该工作建立了“宿主强结合、电解液弱结合”的协同设计原则，使正极和电解液可以用同一可测参数进行筛选。Wu等^[73]设计了一种通过调控界面动力学来激活高能量密度金属氟化物正极（ CuF_2 ）的策略。针对 CuF_2 在充放电过程中固有的不可逆性，通过在 CuF_2 /碳基质中引入液态金属镓（Ga）渗透网络，成功实现了可逆的双电子转移转化反应。Ga中间层能将界面氟离子的迁移率降低至原来的 $1/5$ ，促进中间相 Li_2CuF_4 的形成，从而在反应中保持氟化物亚晶格的稳定。同时，Ga协同降低了 $\text{Li}_2\text{CuF}_4/\text{Cu}$ 界面的晶格失配和界面能，诱导形成了由 $2\sim 4\text{ nm}$ 铜纳米颗粒与 LiF 互连的双连续导电网络。进一步优化设计了 $\text{pGa-CuF}_2/\text{C@TiO}_2$ 核壳结构，在20次循环后，于 2.8 V 的平均电压下实现了约 300 mAh/g 的可逆容量。

Ali等^[74]利用干法电极技术制备无裂纹、高负载的富镍单晶正极材料。对比了多晶（ P-NCM811 ）与单晶（ S-NCM811 ） $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 材料在干法电极压延过程中的表现。传统的多晶材料由于存在大量晶界，在压延过程中极易发生颗粒破碎和开裂，破坏电极的导电网络并降低孔隙率。相比之下，单晶 S-NCM811 材料凭借其无晶界的结构优势，展现出卓越的机械强度，能够有效抵抗压延应

力,保持颗粒完整性。电化学性能测试表明,尽管多晶材料初始容量略高,但单晶电极表现出更优的循环稳定性和倍率性能。在约 35 mg/cm^2 的高负载下, S-NCM811 电极在 0.5 C 倍率下循环 50 次后,容量保持率高达 91.5%, 远超 P-NCM811 的 63.4%, 这主要归功于其更低的电荷转移电阻和更稳定的电极结构。该研究证实, 单晶富镍正极材料是实现高能量密度、可持续干法电极制造的理想选择。Zhang 等^[79]针对高比能锂电池厚电极在高活性物质比例与高截止电压下电子渗流差、反应不均及界面副反应严重的问题, 设计了一种干法电极架构。该方法利用高长径比气相生长碳纤维 (VGCF) 与 PTFE 在剪切混合中的分子级耦合。PTFE 原纤化缠绕并包覆 VGCF, 构建高效电子渗流网络, 同时减少碳-电解液直接接触以抑制高电压分解, 无需材料改性或特殊添加剂。研究以 operando 单颗粒 XRD 证明浆料法 4.25 V 以上颗粒脱锂不同步而干法同步、PFIB-SEM 和 STEM-EELS 进行电极连通性分析。证明干法电极曲折度由 2.87 降至 2.49、有效 Li^+ 扩散系数提升 33%。99% 活性物质电极 C/10 放电 225 mAh/g、C/3 约 210 mAh/g; 4.55 V NMC811||石墨软包电池 C/3 下 1000 次容量保持 78%, 平均库仑效率超 99.9%。

Fan 等^[79]针对富锂层状氧化物正极的研究发现, 对传统化成的必要性提出了质疑——传统化成甚至会缩短电池寿命。相反, 快速化成不仅能降低生产成本, 还能提升容量和稳定性。多尺度同步辐射技术表明, 首次充电后残留的锂离子对后续的结构演化和循环性能至关重要。深度锂脱嵌会导致缺锂基体本征脆弱, 引发严重的结构退化和容量损失。相比之下, 快速化成残留的锂离子通过自钉扎效应增强了可逆性, 抑制了有害的晶格畸变, 并强化了离子存储框架。将首次充电电流密度从 0.2 C 调整至 2 C, 可使可逆容量提升 20%, 循环寿命延长超过 36%。该方法还可推广至其他电极体系, 为更高效的电池生产提供新思路。

Wang 等^[77]开发了一种喷雾辅助原位组装策略, 在玻璃纤维基底上直接构建唑类杂化框架 (AHF), 再经热聚合得到化学集成的准固态电解质 (QSSE)。该杂环 AHF 提供有序亲锂配位位点和连续离子传输通道, 在保持高热稳定性的同时实现高效 Li^+ 迁移。组装成的 $\text{LiFePO}_4|\text{FP10v-GF}|\text{Li}$ 电池在

25℃ 下可稳定循环超过 500 次, 60℃ 下超过 100 次。此外, 框架结构能在分子水平上束缚阻燃剂磷酸三乙酯 (TEP), 形成氮磷协同阻燃机制, 且不牺牲电化学兼容性。高载量 $\text{Li}||\text{LiFePO}_4$ 电池在实际条件 ($E/C=0.56 \text{ g/Ah}$, N/P 为 3.27) 下仍稳定循环, 并通过 25℃ 至 300℃ 的加速量热测试, 未发生热失控。

5 电池表征、电池模型和测量技术

Mu 等^[78]首次采用机器学习辅助的超分辨电子显微技术, 以原子分辨率直接观察 LiCoO_2 在 5 V 条件下的结构劣化过程。深度脱锂会激活整体性形变, 其中, 面内剪切使 O3 晶格破裂为由 O1 相和重新取向的 O3 畴构成的纳米尺度镶嵌结构, 而面外畸变则会驱动裂纹产生以及动力学受困结构基元的形成。随着循环进一步延长, 这些耦合的化学—力学过程逐渐演化成为一种受挫的表面结构, 该结构由相互交织的错取向畴和反相边界组成。基于这些机制层面的认识, 进一步进行了概念验证, 证明合理设计的共掺杂能够提供一种具有针对性的途径, 以缓解耦合形变和相退化的级联过程, 从而显著推动 LiCoO_2 在前所未有的超高电压下实现更高的循环稳定性。Fajardo 等^[79]结合 X 射线共振光电子能谱、单杂质 Anderson 模型、光谱模拟以及理论计算, 对锂基电池运行过程中正极材料的氧化还原机制进行了研究。利用 Zaanen-Sawatzky-Allen 框架, 从不同程度电荷转移的角度, 对两种正极活性材料—— $\text{LiMn}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{PO}_4$ 和 LiNiO_2 的氧化还原行为进行了统一描述。对于 $\text{LiMn}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{PO}_4$, 由于缺乏强烈的轨道杂化, 其容量来源于金属 3d 态电子占据数的降低, 即传统的金属氧化还原过程。然而, 在采用 LiNiO_2 基正极的电池中, 负电荷转移占据主导地位, 氧化还原过程通过配体空穴态的形成与消除实现。Zhao 等^[80]在 60℃、4.6 V 高电压浮充条件下研究了 LiCoO_2 内部裂纹的形成与扩展机制。深度脱锂诱发的 $\text{O3} \rightarrow \text{O1} \rightarrow$ 阳离子混排相连续转变会产生显著的晶格失配应力, 并由此引发内部裂纹。与此同时, 阴离子氧化还原活动促使氧化态晶格氧 O^n ($0 < n < 2$) 向裂纹区域迁移, 并在其中积聚形成分子 O_2 ; 当裂纹扩展至颗粒表面时, O_2 可能进一步释放。持续发生的 O1 向阳离子混排相转变与体相活性氧迁移协同推动裂纹向外扩展, 最终造成

LiCoO₂颗粒解体和电化学性能衰减。Dou等^[81]利用了¹³C同位素标记的石墨材料，结合时间分辨的原位固态核磁共振技术（¹³C MAS NMR），实现了对Li_xC₆不同阶段的信号区分和定量分析。石墨在化学驱动的脱锂过程中，主要通过两个有序的两相转变：LiC₆→Li_{0.5}C₆和Li_{0.5}C₆→Li_{0.33}C₆，且这两个转变都可以用Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov（JMAK）动力学模型来描述。在近平衡的脱锂条件下，阶段转变主要基于扩散受限的界面传播机制，且LiC₆→Li_{0.5}C₆被视为限制反应速率的关键步骤。当石墨外部脱锂速率超过内部锂离子重分布速率时，阶段转变过程变得非顺序且异质，导致更高级阶段（如Li_{0.33}C₆）的提前出现和多相共存现象。定量描述这种非顺序阶段转变的动态过程，并发现当脱锂速率加快时，LiC₆→Li_{0.5}C₆的实际速率常数较小（ $k_1 \approx 2.34 \times 10^{-4} \text{ s}$ ），而Li_{0.5}C₆→Li_{0.33}C₆的速率常数更大（ $k_2 \approx 6.36 \times 10^{-4} \text{ s}$ ），表明后者具有更快的转变速率。研究中还使用了不同的氧化温度（35℃、80℃、130℃）进行了实验证明，当脱锂速率较高时，阶段转变表现出明显的异质性；而当脱锂速率较低时，阶段转变则较为均匀。Battistella等^[82]通过深度分辨辉光放电质谱（GD-MS），首次在锂离子电池中发现了与循环过程相关的锂同位素分馏现象。该方法利用⁷Li/⁶Li比值的深度分布变化，追踪了NMC111||石墨扣式电池在不同倍率下的电极/电解质界面的演化过程。循环后正极表面富集⁷Li，而负极界面处⁶Li优先富集，且分馏程度与充电倍率密切相关；低倍率时（C/3）正极⁷Li/⁶Li比值升至约7，而高倍率时（2C）分馏减弱，这与⁶Li的迁移速率以及⁷Li在单电子反应中的热力学倾向有关。Cattermull等^[83]通过结合XAS与XRD的原位表征方法，揭示了K₂Mn[Fe(CN)₆]中非平衡相变机制的耦合规律。该方法通过Fe和Mn的K边谱分析，证实了电化学行为中存在两个独立的氧化还原过程：Fe²⁺→Fe³⁺对应第一充电平台（4.08 V），Mn²⁺→Mn³⁺对应第二平台（4.16 V），并通过MMF算法分离出不同氧化态的相分数。低空位PBAs在充电初期表现出单斜相向立方相的非平衡转化，伴随框架窗口面积增加50%的结构开敞性，促使K离子迁移率提升，而传统观点认为此过程应为固溶体机制。相比之下，高空位PBAs则通过固溶体机制实现高倍率性能。Im等^[84]提出了一种基于弯曲闪烁体的光

学耦合X射线断层扫描技术，用于提高圆柱形锂电池的高分辨率成像能力。该研究提出通过弯曲闪烁体设计，将检测器曲面与电池的圆柱几何形状匹配，从而有效缩短边缘ODD，抑制焦点模糊并保持高功率X射线源的使用。实验结果表明，与平板探测器相比，30 mm和50 mm曲率半径的弯曲闪烁体分别在边缘区域实现了约8%的分辨率提升，且50 mm曲率配置在中心和边缘区域均表现出更高的对比噪声比（CNR）。理论分析进一步证实，50 mm曲率在抑制离焦模糊与降低焦点尺寸模糊之间取得了最佳平衡。Kim等^[85]提出了一种基于阳极表面退化分布（ASDD）的非破坏性诊断方法，用于评估商业锂离子电池（LIBs）的老化状态并预测其容量衰减。通过脉冲诱导过电压（ $\Delta\eta_p$ ）的测量，研究揭示了阳极相异质性与退化行为的关系，并结合电化学信号与表面退化熵（SDE）的关联性，建立了一种量化ASDD的指标。SDE被定义为空间分布复杂度与黑色区域面积占比的乘积，能够同时反映退化模式的空间分布和整体严重性。研究通过在特定SOC（50%~70%）范围内分析 $\Delta\eta_p$ 的峰值特性，发现其形状（如半峰宽FWHM和峰高）与SDE高度相关，且SDE在不同循环协议和SOC状态下均能稳定估算。该方法在81种操作序列中实现了平均0.81%的容量预测误差，与其他数据驱动方法（如弹性网络、CNN、GRU）相比， $\Delta\eta_p$ 的预测误差更低，且可无缝集成至现有电池管理系统（BMS）算法。Wang等^[86]针对金属外壳屏蔽无线信号、穿壳导线破坏电池密封的问题，开发了无源超声探头系统（PUPS）。把柔性温度和压力传感器植入电池内部，通过多输入多输出通信（MIMO）让超声信号穿过金属壳体，不需要内部电源和信号处理电路。植入后的温度、压力和时间分辨率分别达到0.1℃、0.5 kPa和100 ms；在200次循环后，60 Ah方形电池容量保持率仍为99.6%。热失控实验进一步表明，内部压力开始快速上升的时间比温度突升约早800 s，因而更适合作为早期预警信号。该工作提供了一种不破坏封装即可连续获取电池内部状态的方法，但目前最长验证时间为2600 h，长期耐腐蚀性仍需继续检验。

Han等^[87]建立了三维电化学-力学耦合有限元模型，揭示NCM811/Li₆PS₄Cl/锂金属体系在全固态锂金属电池充放电过程中的体积变化机制。锂金属

负极表面沉积主导整体体积膨胀,充电时体积应变超60%。增加负极厚度可利用软锂塑性变形容纳沉积,降低厚度膨胀与外部压力;降低炭黑-黏结剂区域的杨氏模量可缓冲正极体积变化并缓解应力;而提高NCM颗粒体积分数则增大正极应变与整体膨胀。Kremer等^[88]研究了硫化物固态电池 $\text{Li}|\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ 界面SEI生长动力学及接触条件对抗分析的影响。基于Wagner扩散模型与三维阻抗网络模拟,发现SEI电阻呈扩散控制的 $t^{0.5}$ 增长;增加堆压/连接压力会增大真实接触面积,导致表观速率常数被低估。锂金属原生钝化层(如 Li_3N)可引起阻抗表观饱和,掩盖真实SEI生长。对比库仑滴定时间分析(CTTA),两者表观速率常数随压力变化趋势相反。研究强调,阻抗提取的SEI动力学参数强烈依赖于接触条件与界面异质性,需审慎解读。Adam等^[89]提出了一种无需参数拟合的TWIF-Li传输-动力学框架,直接验证了厚负载电极中锂传输与界面反应的非均匀性演化规律。该模型引入了基于孔隙率的宏观均质化假设,但通过FIB-SEM重构的非理想几何结构和实际离子/电子路径曲折度参数,解决了传统均质模型对厚电极中局部动力学异质性的预测不足问题,无需拟合实验数据即可复现中子成像观测到的锂浓度梯度演化(模型预测51.2%平均耗尽率与实验数据53.2%高度吻合),并通过异步-同步充放电机制的动态模拟揭示了锂饱和度分布与界面反应速率的关联性。研究发现降低离子-电子路径曲折度差异可有效抑制充电诱导梯度,而通过界面工程可将同步操作窗口扩展至更高电流密度(如0.04 C和0.12 C工况下的模拟结果与实验数据同步性达90%以上)。Deng等^[90]聚焦于全固态锂电池(ASSLBs)中阻碍其大规模应用的固-固界面接触问题,通过数值模拟与实验验证相结合的方法,探究了界面结构设计对电化学和力学性能的影响。设计了四种典型的正极-固态电解质接触构型(Inter-CC, Semi-Cir-CC, Trap-CC, Tri-CC),并利用有限元分析模拟了其电化学阻抗、电流密度及应力分布。半圆形接触构型(Semi-Cir-CC)展现出最优的综合性能,其接触电阻低($11.77 \Omega \cdot \text{cm}^2$),电流密度分布最均匀,且应力集中现象最轻微(最大主应力9.28 MPa)。相比之下,Inter-CC虽电荷转移电阻最低,但应力分布不均;而Tri-CC和Trap-CC则存在严重的应力集中和

较高阻抗。通过增加半圆形结构的周期数和半径,可有效降低总阻抗并改善应力分布。最后,通过立体光刻(SLA)3D打印技术成功制备了Semi-Cir-CC结构,验证了其制造的可行性。Park等^[91]研究了固态电池中薄层阴极的压力异质性及其对材料利用和电化学性能的影响。通过实验与模拟结合的方法,发现非均匀压力分布会导致应力在阴极厚度方向上不均,进而影响界面反应动力学和材料利用率。在非均匀压力条件下(中心区域2.5 MPa,周边区域0.5 MPa),LCO阴极的晶格参数变化呈现显著空间异质性,高压力的晶格膨胀达到1.8%,但未达到完全脱锂所需的2%膨胀,表明局部反应受限。这种压力不均引发级联机制:低压区反应受抑制使电流集中于高压区,导致局部电流密度提高约40%,但最终所有区域均未实现完全利用。高压区表现出更高的反应可逆性和更均匀的电化学反应,而低压区因界面脱层和应力集中导致容量衰减。通过电化学-传输模型验证,界面接触损失(如60%接触时)会显著降低放电容量(从103降至67 mAh/g),并引发局部锂化不均匀性。Guan等^[92]提出了一种基于路径熵(path entropy, S_p)的熵驱动设计策略,用于优化固态电解质(SSEs)的离子传导性能。通过结合马尔可夫状态模型(MSM)与过渡路径理论(TPT),首次将路径熵作为描述离子扩散无序的关键参数,揭示了锂离子在无机硫代磷酸盐中扩散路径的多样性与局部环境的关联性。实验与模拟结果表明,锂缺陷型LPSCI-III材料因引入S/Cl位点无序和锂空位,显著提升了路径熵和逃逸熵,从而促进长程离子传输。进一步通过高通量筛选,识别出7种高路径熵候选材料($S_p > 200.0 \text{ J/mol/K}$),包括已验证的硫代磷酸盐型(如 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$)、硫化物型(如 Li_3NbS_4)和类LGPS结构材料,并发现 $\text{Li}_4\text{Cr}_2\text{C}_4\text{SO}_{16}$ 的 S_p 值接近 $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ [(273.52 ± 0.00) J/(mol/K)]。Giri等^[93]提出了一种基于深度学习的超分辨率方法,以克服传统X射线CT在高分辨率与大视场(FOV)之间的权衡问题。研究使用了NMC622正极材料作为测试对象,训练模型通过配对的HRES(0.49 μm 体素)和LRES(1.95 μm 体素)数据来增强图像的功能性。SRES方法不仅提高了图像的空间分辨率,还通过更广的FOV实现了更全面的微结构分析,从而显著减少了采集时间。重建后的图像在结

构一致性上得到了验证，采用空间和频率域分析的方法，结果表明SRES重建减少了过度平滑，并在低频误差方面的表现优于LRES。在图像分析方面，SRES的体素大小与HRES一致，得以保留更多的微结构特征，如孔隙度、颗粒直径和体积比表面积。

Zhang等^[94]针对新型电池寿命验证周期长、能耗高的问题，提出了“发现式学习”预测框架。该方法先利用物理模型把不同材料和结构的电池映射到统一的特征空间，再从历史公开数据中学习寿命规律，并通过主动学习挑选最值得制造和测试的样品。以123只73~84 Ah工业软包电池验证模型，仅对51%的原型进行前50个等效完整循环测试，即以7.2%的平均百分比误差预测37组电池寿命。按保守条件估算，验证时间由1333天缩短至33天，能耗由8.523 MWh降至0.468 MWh。Wach等^[95]针对硫化物全固态电池大面积软包测试中高压夹具弹性变形导致实际压力失准，且扭矩与角度上紧法重复性差的问题，设计了一种弹簧加载单轴压力夹具并提出基于挠度补偿的压力设定策略。该夹具采用30个碟形弹簧（6组并联）适配120 mm×80 mm活性面积，允许电池呼吸；通过有限元分析计算上/下板挠度与螺栓伸长的总变形量 $R^2>99.99\%$ ，在液压机中过压以补偿卸压后的弹性回弹。研究对比了扭矩法变异系数、螺栓角度法与直接挠度监测法。结果表明挠度法在10~30 MPa范围内设定误差仅1.67%、重复性0.77%；实测电池压力整体平均绝对百分比误差2.16%、变异系数1.32%，压力均匀性指标 $H=2.16\%$ （优于5%目标）。Attia等^[96]指出电压、电流、容量和阻抗等电化学数据虽然是寿命预测的基础，却不能覆盖所有失效模式。电解液或添加剂耗尽时，不同副反应可能产生相似的整体信号；机械屈曲和压力开关动作取决于电池内部的应力与压力；金属颗粒、涂布缺陷等局部问题在形成明显短路前通常低于检测限。对于这些阈值型失效，准确预测需要同时知道内部状态的初始值、变化速度和失效临界值，而电化学测试往往只能提供其中一部分。因此建议将电芯设计参数、制造过程记录、无损成像、压力或膨胀测量与物理模型共同纳入预测体系。

6 理论计算

Tu等^[97]建立了一个统一的定量框架，在近表面

扩散条件下，将表观扩散系数和交换电流密度与裂纹产生的界面联系起来。将该框架应用于成分完全相同的单晶和多晶NMC811，并结合第一性原理计算、机器学习分子动力学以及有限元断裂建模后发现，在裂纹产生之前，两者具有相同的本征晶格动力学和界面动力学。多晶材料所表现出的表观动力学优势来源于电解液渗入晶间裂纹，这一过程不仅形成了新的电化学活性界面，同时还缩短了 Li^+ 的扩散路径。进一步通过实验验证的颗粒尺寸-倍率性能模型表明，通过减小单晶颗粒尺寸，可以在保持机械完整性的同时，实现与多晶材料相当的快充性能。Xavier等^[98]结合微调机器学习原子间势与大规模分子动力学模拟，揭示了零过量锂电池中锂在Cu及金属中间层（Zn、Mg、Bi）上的原子级合金化与结晶路径。Cu表面锂经亚稳无序、HCP及FCC中间相逐步转变为BCC锂，形核非均匀；Zn与Mg中间层通过合金介导机制促进锂三维扩散与结构均匀化，其中Zn形成Li-Zn合金并稳定HCP锂，Mg形成Li-Mg固溶体并诱导BCC锂结晶；Bi则生成有序 Li_3Bi 金属间化合物，但因晶格失配导致相分离与界面开裂。实验表征验证了上述相演化规律。Faryat等^[99]基于第一性原理DFT计算，研究了LLZO/Li界面处六种关键无机SEI化合物（ La_2O_3 、 Li_2O 、LiF、LiCl、LiOH、 Li_2CO_3 ）的电子、热力学、力学及离子传输性质。所有相均为宽带隙绝缘体，其中LiF具有最大的电子隧穿势垒（12.89 eV）。然而， La_2O_3 和 Li_2CO_3 的 Li^+ 扩散势垒分别高达0.88 eV和0.86 eV，严重阻碍离子传输，导致界面电阻升高与锂沉积不均；而 Li_2O （0.48 eV）和LiOH（0.54 eV）则有利于 Li^+ 传导。力学分析显示氧化物/氟化物模量较高，有利于界面机械稳定。抑制 $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3$ 并构建LiF-LiCl-Li₂O富集界面是优化LLZO/Li界面稳定性的有效策略。Li等^[100]提出界面过剩电荷分布因子（ $f=J_0/\sigma_{\text{net}}$ ）作为定量描述符，整合电极表面过剩电荷、电荷耗尽速率与溶剂化化学，揭示固液界面动态平衡对锂枝晶生长的调控机制。 Li^+ -偶极-阴离子相互作用主导的电荷耗尽与阳离子屏蔽效应竞争决定界面电荷再分布，快速再分布可降低ECSA增长速率、促进平面锂沉积。据此设计的局域高浓度弱溶剂化电解液（LHWSE）在约6.4 Ah锂金属电池中实现515 Wh/kg及90次循环97.3%容量保持率，建立了热力学-动力学协同优化框架。

参 考 文 献

- [1] DONG E H, et al. Air instability-induced mechanical degradation plaguing cyclability of polycrystalline nickel-rich layered cathode [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(25): 25641-25650. DOI:10.1021/jacs.6c02705.
- [2] LI Z Y, JIN Y K, QIN N, et al. Integrated local-microstructure engineering toward mechanochemically robust ultra-high nickel cathodes[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(40): e73673. DOI: 10.1002/adma.73673.
- [3] SONG Y J, WANG B, CUI Y P, et al. Mechanically and chemically robust ultrahigh-Ni cathodes enabled by localized cation disorder design[J]. *eScience*, 2026, 6(1): 100435. DOI: 10.1016/j.esci.2025.100435.
- [4] 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: 1749 12. DOI:10.1016/j.cej.2026.174912.
- [5] LIN F, FAN H Q, WANG Z Y, et al. In situ-constructed elastomeric interphase for grain boundary stabilization in high-voltage layered oxide cathodes[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(46): e74129. DOI:10.1002/adma.74129.
- [6] MAO G H, WANG Y, YAO T Y, et al. Machine learning-assisted discovery of outside-in structure Ni-rich cathode with high performance[J]. *Science Advances*, 2026, 12(14): eadz8130. DOI: 10.1126/sciadv.adz8130.
- [7] 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.
- [8] WANG B, WANG K J, REN H T, et al. Spinel nanodomains relieve strain and stabilize lattice oxygen in ultrahigh-nickel zero-cobalt cathodes[J]. *eScience*, 2026, 6(4): 100509. DOI:10.1016/j.esci.2025.100509.
- [9] ZHANG J X, CHEN S L, XIA Y T, et al. High-rate single-crystalline Li-rich layered oxide with diversified surface-phase cation ordering for Li-ion batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 8207. DOI:10.1038/s41467-026-75101-w.
- [10] WU Y C, AHN Y, CHEN T Y, et al. Mechanochemical transformation from zigzag-type layered/phenakite to disordered rocksalt in Mn-rich cathodes for Li-ion batteries[J]. *Small*, 2026, 22(35): e73666. DOI:10.1002/smll.73666.
- [11] SONG S T, YE Y, FU Z X, et al. Fluorine-modified Li-rich disordered rock salt cathodes for stable high-capacity lithium batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2026, 1056: 186 574. DOI:10.1016/j.jallcom.2026.186574.
- [12] CHEN J Y, ZHANG X D, LI X L, et al. Reducing voltage hysteresis of FeF_2 *via* oxygen doping and nano-disordering in sulfide all-solid-state batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, e74270. DOI:10.1002/adma.74270.
- [13] BAI H Y, YE C C, YI S, et al. Carbon nanotube-modified Si/C anodes enabling high-rate capability and long cycle life in lithium-ion batteries[J]. *Ionics*, 2026, DOI:10.1007/s11581-026-07267-8.
- [14] LI Q D, CHEN L K, JIAO J Y, et al. Single-crystal orientation lithium for ultra-stable all-solid-state batteries[J]. *National Science Review*, 2026, 13(2): nwaf540. DOI:10.1093/nsr/nwaf540.
- [15] CHEN Q Y, ZHU J, ZHAO Y F, et al. Alloy-sulfide co-engineered thin Li anodes suppress dead-Li for practical high-energy-density lithium metal batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2026, 528: 172249. DOI:10.1016/j.cej.2025.172249.
- [16] WANG J J, JIA L N, DU Y B, et al. Space charge regulation for ultra-stable all-solid-state lithium batteries by engineering of argyrodite electrolyte[J]. *National Science Review*, 2026, 13(5): nwag015. DOI:10.1093/nsr/nwag015.
- [17] LUO H L, REN Y Y, DING P P, et al. Effect of binders in composite solid electrolytes on electrode-electrolyte contact for low-operating-pressure all-solid-state batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(51): e76163. DOI: 10.1002/adfm.76163.
- [18] 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.
- [19] YIN M R, LI C S, HU L, et al. Designing intrinsically fast-amorphizing solid electrolytes with low processing cost[J]. *ACS Energy Letters*, 2026, 11(8): 5403-5415. DOI: 10.1021/acsenenerglett.6c01077.
- [20] HU L, HE Y L, WANG D, et al. Mechanically compliant and cost-effective $1.4\text{Li}_2\text{O}-0.75\text{ZrCl}_4-0.25\text{AlCl}_3$ solid electrolyte for all-solid-state batteries with improved cycling stability[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 1474. DOI: 10.1038/s41467-025-68210-5.
- [21] WU Y L, WANG X M, WANG X Y, et al. Functional modules for enhanced amorphous composite halide solid electrolytes for low-temperature all-solid-state lithium batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 6891. DOI: 10.1038/s41467-026-71876-0.
- [22] ZHOU Z M, LU P S, LIANG S Z, et al. Embedding Fe-based redox chemistry into low-cost oxyhalide solid electrolytes for high-performance all-solid-state batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(18): e72694. DOI:10.1002/adma.72694.
- [23] XU X, CUI T, MCCONOHY G, et al. Heterogeneous doping *via* nanoscale coating impacts the mechanics of Li intrusion in brittle solid electrolytes[J]. *Nature Materials*, 2026, 25(4): 627-634. DOI: 10.1038/s41563-025-02465-7.
- [24] CUI T, WANG S, LEE S S, et al. Dendrite initiation and deflection in biaxially stressed solid electrolytes[J]. *Nature*, 2026, 655 (8123): 631-637. DOI:10.1038/s41586-026-10734-x.
- [25] MAHANTA S R, BANERJEE S. Time-scale renormalization of correlation decay governs Li-ion transport in garnet solid electrolytes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(27): 29050-29063. DOI:10.1021/jacs.6c07393.
- [26] ZHOU X M, CAI R Y, CHEN Q W, et al. Constructing ion bridges with competitive coordination effects to promote Li^+ conduction in

- solid-state electrolytes for high-performance lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(14): e23369. DOI: 10.1002/adma.202523369.
- [27] LAN X X, LI Z, ZHAO C, et al. Superionic composite electrolytes with continuously perpendicular-aligned pathways for pressure-less all-solid-state lithium batteries[J]. *Nature Nanotechnology*, 2026, 21(3): 388-396. DOI:10.1038/s41565-025-02106-9.
- [28] FAN Y, ZHU M L, WANG H C, et al. Polyamine-mediated proton/TFSI-dual capture enables high-voltage PEO-based all-solid-state Li batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(11): e20538. DOI:10.1002/adma.202520538.
- [29] YIN J Y, CHEN L K, XIAO G Y, et al. Suppressing concentration polarization in lithium battery composite polymer electrolytes *via* piezo-assisted electromechanical coupling effect[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 5902. DOI: 10.1038/s41467-026-72527-0.
- [30] LIU Y S, WU C Q, YANG X R, et al. A multifunctional siloxane additive enabling fast charging of high-areal-loading Si-C||Ni-rich full batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 169: 122765. DOI:10.1016/j.est.2026.122765.
- [31] AFZALI P, WANG J, RODRIGUEZ S, et al. Concentration-driven Li⁺ solvation engineering with TDMAP-based porphyrin additives for dendrite-free Li metal batteries[J]. *Advanced Science*, 2026, e76009. DOI:10.1002/advs.76009.
- [32] AZAM S, MACLENNAN H, MEISNER Q, et al. Ethylene sulfate derivatives as general-purpose electrolyte additives for NMC Li-ion, LFP Li-ion and Na-ion cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2026, 173(11): 110518. DOI:10.1149/1945-7111/ae764e.
- [33] CHENG F Y, ZHANG W, FANG C, et al. Tuning reaction pathways *via* symmetric fluorination enables high-temperature and high-voltage electrolytes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(31): e5558984. DOI:10.1002/anie.5558984.
- [34] DUAN J C, KANG G H, LIU Q, et al. Ultrafast and persistent electrolyte acid scavenger for stable high-voltage lithium batteries [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(29): e8016076. DOI:10.1002/anie.8016076.
- [35] XIONG Q, et al. Electrolyte-regulated epitaxial-like gradient interface for stable 4.8 V LiCoO₂[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(25): 26248-26257. DOI: 10.1021/jacs.6c05552.
- [36] JIA M M, WU C H, HU M J, et al. Electrolyte engineering for 5 V lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(46): e74040. DOI:10.1002/adma.74040.
- [37] XUE L L, YAO M, PENG Y Y, et al. Solvent anchored electrolytes for lithium-ion batteries working at high voltage and wide temperature[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(22): e2731926. DOI:10.1002/anie.2731926.
- [38] 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.
- [39] MA C, CHANG S, ZHANG G X, et al. A fluorine-free solvent based on dual descriptors for ultrawide-temperature lithium metal batteries (−105°C to 70°C)[J]. *Advanced Materials*, 2026, e74179. DOI:10.1002/adma.74179.
- [40] LIU J C, HUO Y L, WANG C H, et al. Rethinking battery safety through *in situ* polymerizing additives for real-world lithium battery applications[J]. *Science Bulletin*, 2026, 71(3): 466-468. DOI:10.1016/j.scib.2025.12.008.
- [41] CHEN J H, LI F K, XI L, et al. High-voltage and high-safety lithium-ion batteries enabled by nonflammable electrolyte with enhanced Li⁺ desolvation behavior[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 8745. DOI:10.1038/s41467-026-75482-y.
- [42] FENG Y M, UNIVERSITY C S, WANG Z X, et al. Hard-soft gradient-engineered oxychloride coating on Ni-rich cathodes for all-solid-state lithium batteries[J]. *ACS Nano*, 2026, 20(21): 15662-15674. DOI:10.1021/acsnano.6c04897.
- [43] CHEN X, ZHAO N, LIU B H, et al. A viscoelastic oxyhalide catholyte for 4.5 V all-solid-state batteries under low stack pressures[J]. *Applied Physics Letters*, 2026, 128(21): 213901. DOI:10.1063/5.0338242.
- [44] LIU T T, WANG R H, YANG S X, et al. A cellulose-derived polymer additive for stabilizing thick cathodes in all-solid-state batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, e5596828. DOI:10.1002/anie.5596828.
- [45] ZHANG W J, MU P Z, SUN C H, et al. Hydrogen-bond-networked robust binder enabling long-cycling sulfide-based all-solid-state lithium batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(28): e9777405. DOI:10.1002/anie.9777405.
- [46] WU Y Q, REN F C, LI C, et al. Interplay between oxygen redox and interfacial stability of Li-rich positive electrodes in sulfide-based all-solid-state batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 8114. DOI:10.1038/s41467-026-74601-z.
- [47] ZHANG M M, DAI Z, WANG Y Q, et al. Sulfide or halide solid electrolyte: Which is more suitable for co-free Li-rich Mn-based oxide cathode all-solid-state batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2026, 572: 149168. DOI:10.1016/j.electacta.2026.149168.
- [48] OHNO T, UGATA Y, YABUCHI 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/celc.202500463.
- [49] HU K W, LONG Z X, SUN J C, et al. A superionic oxychloride redox catholyte enables high-energy and long-life all-solid-state lithium batteries[J]. *Nano Energy*, 2026, 156: 112163. DOI: 10.1016/j.nanoen.2026.112163.
- [50] LIU H Y, LIANG S K, DUAN Y H, et al. Capacity-expanding O/Cl-bridged catholyte boosts energy density in zero-pressure all-solid-state lithium batteries[J]. *National Science Review*, 2026, 13(4): nwaf584. DOI:10.1093/nsr/nwaf584.
- [51] DING H, TIAN H Q, SHI J, et al. Enhanced internal magnetic field for long-cycle NCM-Li all-solid-state batteries *via* dual-inhibition of anode dendrite and cathode cation disorder[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(31): e73186. DOI:10.1002/adma.73186.

- [52] LI C, LU G X, WU X, et al. Confining lithium in a continuous nucleation state for dendrite-free solid-state lithium metal batteries[J]. *Nature Synthesis*, 2026, 5(7): 1043-1053. DOI: 10.1038/s44160-026-01010-x.
- [53] LIU C, WANG R Y, WANG D W, et al. Li-In-S composite foil with built-in electric fields to stabilize Li/Li₆PS₅Cl interface for long-life all-solid-state batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 7190. DOI:10.1038/s41467-026-74049-1.
- [54] ZHU L, et al. Ultrahigh-rate all-solid-state batteries with a dendrite-free LiAl anode via compositional and structural engineering[J]. *ACS Energy Letters*, 2026, 11(6): 4675-4684. DOI: 10.1021/acsenergylett.6c00968.
- [55] LI L, LIU D, SU Q L, et al. Mitigating anolyte-free Si anode failure in all-solid-state lithium-ion batteries via roll-transfer printing prelithiation and soft metal conductive additives[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2026, 18(30): 40778-40790. DOI:10.1021/acsaami.6c06848.
- [56] YAMAMOTO M, HINO S, KATO A, et al. Structural design strategies for porous silicon anodes to reduce stack pressure in all-solid-state batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 669: 239427. DOI:10.1016/j.jpowsour.2026.239427.
- [57] BI R Y, WANG J Y, WAN J W, et al. Spatially coupled adsorption and catalysis for sustainable lithium-sulfur batteries[J]. *Nature Sustainability*, 2026, 9(5): 763-773. DOI: 10.1038/s41893-026-01794-y.
- [58] CHEN Y J, YE H T I, CHANG C Y, et al. Contra-diffusion engineering of single-atom catalytic interlayers enables reversible sulfur redox chemistry[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(24): e7009531. DOI:10.1002/anie.7009531.
- [59] XU M Q, CAI B B, LIU W, et al. Electrolyte-free cathode design for high-sulfur-loading all-solid-state Li-S batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(46): e75442. DOI: 10.1002/adfm.75442.
- [60] AN Y H, MONROE J E, KIM K, et al. Intraparticle sulfur distribution effects in dry-processed polymer-free sulfur electrodes for high-performance lithium-sulfur batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(64): e76845. DOI: 10.1002/adfm.76845.
- [61] CHEN Z Y, LIU H, YAN Y C, et al. Electron-switching astaxanthin enables programmable triple-phase interface chemistry for high-loading all-solid-state lithium-sulfur batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, e8226776. DOI: 10.1002/anie.8226776.
- [62] 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.
- [63] JIANG W Y, WANG D H, LI B R, et al. Compatible dynamically wetting electrolyte-electrode interface design for solid-state lithium-sulfur batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(27): e1261984. DOI:10.1002/anie.1261984.
- [64] HONG S, CAO Y, QI J S, et al. High-valence-cation-induced lattice expansion for activating Li₂S cathode in all-solid-state lithium-sulfur batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(15): e72513. DOI:10.1002/adma.72513.
- [65] WANG J J, GENG C N, QI J S, et al. Size-dependent trade-off between sulfur catalysis and sulfide electrolyte decomposition for room-temperature ultrahigh-rate all-solid-state Li-S batteries[J]. *Advanced Materials*, 2026, e74115. DOI:10.1002/adma.74115.
- [66] YANG J G, ZHANG R Z, ZIMMERMANN S 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.
- [67] PAPAILIAS I, NAMAIEGHASEMI A, NCUBE M K, et al. Pathways for sustainable reaction kinetics in Li-CO₂ batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 4048. DOI: 10.1038/s41467-026-69751-z.
- [68] ZHANG Z J, XIAO X, YAN A J, et al. Regulating targeted reactions via functionally regionalized electrodes toward lithium-oxygen batteries with high reversibility[J]. *Joule*, 2026, 10(6): 102360. DOI:10.1016/j.joule.2026.102360.
- [69] ZHAO X J, LIAO M, GENG S T, et al. Synergistic sulfur-chlorine battery chemistry towards efficient energy storage[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 3088. DOI: 10.1038/s41467-026-69748-8.
- [70] FENG R M, XU W Y, WANG H W, et al. Coordination electrochemistry taming reversible hypervalent bromine redox for energetic six-electron-transfer lithium-bromine battery[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 8799. DOI: 10.1038/s41467-026-75860-6.
- [71] BAUMGÄRTNER J F, VIJAY A, et al. Unlocking anion reduction of lithium perchlorate via electrochemically coupled oxygen atom transfer[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(29): 30754-30761. DOI:10.1021/jacs.5c18724.
- [72] GENG M Z, WANG Y Y, ZENG F B, et al. Bond length as a unified descriptor for stable iodine battery[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, e9885697. DOI: 10.1002/anie.9885697.
- [73] WU Y R, GUO X Y, et al. Unlocking high-energy metal fluoride cathodes through modulated interfacial kinetics[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(23): 23666-23677. DOI: 10.1021/jacs.6c00516.
- [74] ALI J, CHOI J H, PARK S, et al. Crack-free nickel-rich single-crystal LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ thick dry electrode fabrication for application in high-performance lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Engineering Materials*, 2026: acsaenm.6c00424. DOI: 10.1021/acsaenm.6c00424.
- [75] 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.
- [76] FAN M J, LI J T, GAO G Y, et al. Fast formation to reinforce lithium-rich cathodes[J]. *Nature*, 2026, 655(8121): 116-124. DOI: 10.1038/s41586-025-09553-3.

- [77] WANG S, ZHU Q M, TIAN Y Y, et al. Flame-retardant quasi-solid-state electrolytes from self-assembled azolate hybrid frameworks for highly safe lithium batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(34): e1279221. DOI: 10.1002/anie.1279221.
- [78] MU X L, et al. Atomic origins of ultrahigh-voltage failure in LiCoO₂ cathodes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(27): 28518-28525. DOI:10.1021/jacs.6c04958.
- [79] PÁEZ FAJARDO G J, DOGARU D E, BANERJEE H, et al. Direct evidence of metal-ligand redox processes in positive electrodes during lithium-based battery operation[J]. *Nature Nanotechnology*, 2026, 21(7): 957-966. DOI:10.1038/s41565-026-02189-y.
- [80] ZHAO W G, LI Z J, LI M Y, et al. Origin of crack propagation in lithium cobalt oxide positive electrode for lithium-ion batteries[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 8525. DOI: 10.1038/s41467-026-75373-2.
- [81] DOU Y, ZHU W H, et al. Probing stage transition kinetics in Li-graphite intercalation compounds by time-resolved *in situ* solid-state NMR via ¹³ labeling[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2026, 148(27): 28858-28866. DOI:10.1021/jacs.6c06506.
- [82] BATTISTELLA B, REVILL A, VENZAGO C, 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/acsenergylett.5c04137.
- [83] CATTERMULL J, JAGGER B, CASSIDY S J, et al. Nonequilibrium ion transport in a hybrid battery material[J]. *Science Advances*, 2026, 12(24): ead1629. DOI:10.1126/sciadv.aed1629.
- [84] IM J, KIM S, JANG H J, et al. High-resolution imaging of cylindrical cells using curved-scintillator-based optically coupled X-ray computed tomography[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2026, 7(6): 103342. DOI:10.1016/j.xcrp.2026.103342.
- [85] KIM I, AN S, KIM H, et al. Rapid and non-destructive diagnosis of lithium-ion batteries via quantification of anode spatial degradation[J]. *Joule*, 2026, 10(5): 102343. DOI: 10.1016/j.joule.2026.102343.
- [86] WANG M Y, YANG Z X, MAO S Y, et al. Passive ultrasonic probe and communication for internal hazards in lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2026, 10(6): 102353. DOI:10.1016/j.joule.2026.102353.
- [87] HAN M H, ZHANG H, et al. Understanding the electrochemical-mechanical coupled volume variation of all-solid-state lithium metal batteries[J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2026, 23(2): 021101. DOI:10.1115/1.4069379.
- [88] KREMER S, ALT C D, SCHUSTER L, et al. SEI formation in sulfide-based solid-state batteries: Influence of contact conditions on impedance-derived interphase growth kinetics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2026, 18(23): 33450-33468. DOI:10.1021/acsami.6c07844.
- [89] ADAM A, KIM C, LI Y S, et al. *operando* neutron radiography validates a parameter-free transport-kinetics model for thick solid-state battery cathodes[J]. *Materials Horizons*, 2026, 13(13): 6380-6385. DOI:10.1039/d6mh00464d.
- [90] DENG Z R, CHEN K Q, LING X X, et al. Investigations on structural design for improving interfacial contact in solid-state batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 170: 122791. DOI: 10.1016/j.est.2026.122791.
- [91] PARK S H, NAIK K G, et al. Pressure heterogeneity and material utilization in thin-film solid-state cathodes[J]. *ACS Energy Letters*, 2026, 11(7): 5086-5094. DOI:10.1021/acsenergylett.6c01154.
- [92] GUAN Q Y, WANG K Y, YEO J, et al. Path entropy-driven design of solid-state electrolytes[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 4736. DOI:10.1038/s41467-026-71316-z.
- [93] GIRI G, TONGE S, BOYCE A M, et al. Super-resolution X-ray CT for battery applications: A machine learning approach to high-resolution and large volume imaging[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 690: 240731. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2026.240731.
- [94] 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.
- [95] WACH L, RUESS C, GRABMANN S, et al. Overcoming cell fixture challenges in high-pressure operation of solid-state batteries[J]. *Energy Science & Engineering*, 2026, 70581. DOI: 10.1002/ese3.70581.
- [96] ATTIA P M, WENG A, CHUEH W C. Limits of electrochemical data for predicting battery lifetime and failure[J]. *Joule*, 2026, 10(5): 102423. DOI:10.1016/j.joule.2026.102423.
- [97] 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.
- [98] XAVIER N F Jr, ROSPARS N, SROUT M, et al. Atomistic insights into lithium alloying and crystallization at metal interlayers in zero-excess lithium batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(26): e70973. DOI:10.1002/aenm.70973.
- [99] FARYAT S, CHAOUI K, EZ-ZAHRAOUI H, et al. Inorganic interphases for a stable garnet solid electrolyte-lithium metal interface[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 169: 122790. DOI: 10.1016/j.est.2026.122790.
- [100] LI X Z, LAI G M, DENG W, et al. Interfacial excess charge dynamics as a quantitative descriptor to understand lithium dendrite growth[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 5916. DOI: 10.1038/s41467-026-72472-y.