

特色专题

2025 年锂电池热点回眸

周浩然¹, 陈彪², 赵志坤³, 姜操², 彭乙洋¹, 梁铭远¹, 官勇吉^{3*}, 程方益^{1*}

摘要 锂电池性能的持续突破对推动新能源交通、智能电网及极端环境装备的发展有重要意义。系统梳理 2025 年锂电池在能量密度提升、循环寿命延长、工作温域拓展、安全性强化及回收再利用 5 大关键方向的研究进展。在正极、电解质、负极及界面等材料层面,研究呈现出从“被动应对缺陷”到“主动调控机制”、从“单一性能优化”转向“多目标协同设计”的转变;在系统层面,人工智能预测、智能传感与热管理策略的融合,正推动电池全生命周期管理范式的革新。

关键词 锂电池;能量密度;循环寿命;宽温域;电池安全;回收再利用;界面工程;智能预测

随着全球能源结构转型的持续推进和“双碳”目标的深入实施,锂电池作为高效、清洁的能量转化储能载体,在便携式电子设备、电动汽车(electric vehicle, EV)、规模储能、航空航天等领域展现出不可替代的作用,市场规模呈现爆发式增长。2025 年全球锂电池产量超过 2000 GW·h,同比增长近 50%;在新型储能领域,锂离子电池储能位于主导地位,占已投产装机的 96% 以上。然而,随着应用场景的拓宽,锂电池在能量密度、循环寿命、极端环境适应性及安全性等方面迎来更加严峻的挑战。同时,随着中国新能源汽车快速发展及消费电子产品更新换代加快,中国退役锂电池质量快速增长,2025 年中国退役锂电池质量超 80 万 t,2026 年将达到百万吨量级。废旧电池退役高峰的到来进一步凸显了资源回收与循环利用的

紧迫性。

2025 年,随着材料科学、界面电化学、人工智能(artificial intelligence, AI)与工程技术的深度融合,锂电池研究迎来了系列进展:正极材料在纳米尺度实现相变与应变的精准调控,高镍材料的放电容量已突破 235 mA·h/g、富锂锰基正极容量达到 348 mA·h/g;电解质体系从宏观改良走向微观溶剂化结构设计,电压窗口拓展至 4.6 V 高电压;寿命提升突破传统被动抗衰模式,通过对 1 A·h 磷酸铁锂(LiFePO₄, LFP)∥石墨电芯主动补锂,实现了 11818 次循环后容量保持率 96% 的超长寿命;工作温区层面提出材料与热管理协同覆盖极端环境,实现了 Li-S 电池-40~60℃ 的宽温域稳定运行;安全性防护方面形成全链条管控体系,实现针刺测试中温度升高低于 3.5℃,还开发了自淬灭电池,使热失控起始温度提高 15.5℃、最高温度降低 123.7℃,显著提高了电池的安全性;回收技术向低能耗、高价值的直接修复路线转型,修复后的 LFP 在 5 C 倍率下循环 500 次容量保持率达 96%。

本文围绕能量密度、循环寿命、温域拓展、安全

1. 南开大学化学学院,高效储能教育部工程研究中心,特种化学电源全国重点实验室,天津 300071
2. 天津大学材料科学与工程学院,国家储能技术产教融合创新平台,天津 300354
3. 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100191

收稿日期: 2025-12-16;修回日期: 2026-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(92372203, 52202281, 22171016, 52202259); 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001)

作者简介: 周浩然,博士研究生,研究方向为锂离子电池正极材料,电子信箱: haoranzhou@mail.nankai.edu.cn; 陈彪(共同第一作者),副教授,研究方向为退役锂电池再生循环、原子分散金属材料与双向催化储能研究,电子信箱: bchen@tju.edu.cn; 官勇吉(通信作者),教授,研究方向为二维能源材料及器件,电子信箱: yongjigong@buaa.edu.cn; 程方益(共同通信作者),教授,研究方向为能源材料化学,电子信箱: fycheng@nankai.edu.cn

引用格式: 周浩然, 陈彪, 赵志坤, 等. 2025 年锂电池热点回眸[J]. 科技导报, 2026, 44(2): 54-68; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.12.00083

性及回收再利用 5 大重点、热点方向,系统综述 2025 年的研究成果,旨在分析锂电池领域的前沿科学问题及其解决方法策略,展望未来技术发展趋势。

1 锂电池能量密度提升

1.1 电极材料容量突破

为满足 EV、规模储能等领域对更长续航与更小体积储能系统的核心需求,持续提升能量密度是锂电池技术发展的首要目标。电池能量密度提升本质依赖于材料容量的突破,图 1 对比了不同正极材料的性能指标,其中高镍三元正极与富锂锰基正极被认为是最具潜力的 2 大路线。高镍层状材料所具备的高比容量特性与宽范围可调电压平台,能够精准匹配高能量密度电池的设计需求,成为当前高比能电池的主流选择。然而,随着镍含量的提升,材料面临严重的表面化学不稳定性、微裂纹扩展及热失控风险。富锂锰基正极材料凭借其远超传统三元正极的理论容量 ($>300 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$),成为突破锂电池能量密度瓶颈的下一代有力候选材料,然而,该体系长期受限于电压衰减、热机械失效及锂离子利用率低等瓶颈。

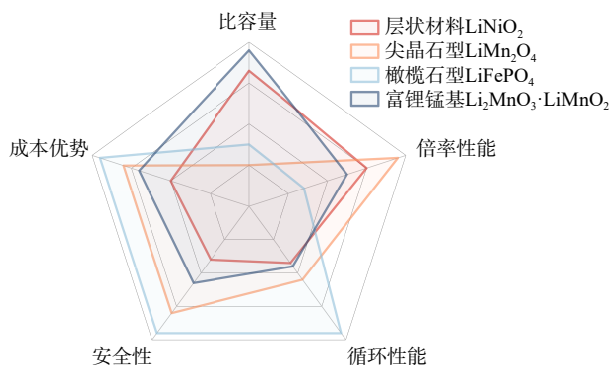


图 1 锂电池常见正极材料性能对比

针对高镍材料的结构稳定性与界面兼容性问题,包覆与掺杂作为经典改性路径仍展现出显著成效。Yu 等^[1]提出 B 预掺杂与 Li_2SiO_3 表面包覆的协同改性策略,B 以可逆转变的三配位(BO_3)和四配位(BO_4)构型掺杂进入晶格:在深度脱锂态,四配位 B 能有效稳定晶格氧并抑制镍离子迁移;在嵌锂态,三配位 B 占主导,其对 Li^+ 扩散几乎无影响,从而避免了动力学阻碍。同时,B 掺杂调控一次颗粒形成细长形貌与径向排列,缓解了循环应变,而 Li_2SiO_3 包覆层则显著降低

了界面副反应。得益于上述协同效应,改性后材料在 0.1 C 倍率下可提供高达 $237.4 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 的可逆容量,对应正极能量密度达到 $924 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 。

除外源性的掺杂包覆协同调控,本征结构设计作为另一核心路径,为提升高镍材料综合性能提供全新视角。Sun 等^[2]提出了一种基于原位晶体生长与多重烧结调控的本征结构设计策略,通过采用细长晶种引导合成,成功制备出具有内部间隙结构和表面岩盐相的超高镍正极材料 $\text{G-Ni91}(\text{LiNi}_{0.91}\text{Co}_{0.045}\text{Mn}_{0.045}\text{O}_2)$ 。该材料独特的间隙结构与细小的初级颗粒显著缩短了锂离子扩散路径并降低了传输阻力;同时,其表面原位形成的岩盐相有效抑制了高电压下的有害相变与界面副反应。得益于上述结构协同优化,G-Ni91 在 0.1 C 倍率下可提供高达 $212.4 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 的初始放电容量,在 5 C 高倍率下仍保持 $159.0 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 。

首次充放电过程中发生不可逆的活性锂损失 (loss of lithium inventory, LLI) 是高镍材料另一痛点,导致其可逆容量显著低于理论容量。Kang 等^[3]提出通过将 LiNiO_2 与 LiFePO_4 混合构建复合电极,利用二者在放电末期存在的电化学势差,驱动内部锂离子自发从 LiFePO_4 转移至缺锂的 $\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$ 。该过程通过“嵌入-转移”循环机制实现:锂离子先嵌入 FePO_4 形成 LiFePO_4 ,随后在电势驱动下快速迁移至高镍相,填补其锂空位,从而显著缓解首周不可逆容量损失,并延缓循环过程中的容量衰减,混合 30% LiFePO_4 后的电极首圈库伦效率提升至 88.5%,在 1 C 下 200 周循环容量保持率高达 84.6%。

针对富锂锰基正极材料在阴离子氧化还原过程中可逆锂离子脱嵌量低的问题,Liu 等^[4]提出了一种“动力学激活”策略,以典型的 O3 型富锂正极 $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$ 为模型体系,通过熔盐烧结与氨处理引入氧空位,并结合高温动力学激活构建 KA-O-LMR 材料。该种材料过渡金属 (transition metals, TM) 离子面内迁移形成的锂空位簇不仅能激活周围晶格氧的氧化还原活性,还能为锂离子再嵌入提供低能垒通道,从而同时提升阴离子反应可逆性与锂离子迁移速率。最终材料实现了 $348 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 的高放电容量,锂离子利用率超过 1.1 化学计量单位,达到理论容量的 92% 以上。Li 等^[5]通过精确调控氢氧化物共沉淀与烧结工艺,合成出侧面暴露大量锂离子快速传输

通道{010}晶面的“微砖”状初级 $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_2$ 颗粒,并使其紧密堆积成次级球形颗粒,赋予电极高达 3.4 g/cm^3 的压实密度;同时,在晶体结构中引入约 11.6% 的 Li/Ni 混排,该缺陷像“铆钉”般有效抑制了高压实和循环过程中的结构滑移。得益于此,该材料实现了 $264.4\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 高比容量与 $3431.0\text{ W}\cdot\text{h/L}$ 的超高体积能量密度。Yang 等^[6]提出了一种山梨酸辅助界面工程,通过一步法在材料表面构建了兼具层状-尖晶石异质结构与氧空位的多功能界面层。该界面层不仅能提供三维锂离子扩散通道、降低锂离子迁移能垒,还能提高晶格氧的氧化还原可逆性、抑制氧释放与不利相变。优化后的材料在 0.1 C 下显示出 $314.5\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 的高放电容量和 88.3% 的初始库仑效率,每周电压衰减率仅为 1.26 mV 。

高镍三元与富锂锰基路线之外, Park 等^[7]开发了新型富锰“准有序”正极 QO-NCM45,通过 Li/TM 纳米级交替排列结构,在不依赖额外掺杂包覆的情况下,实现了 c 轴仅 0.36% 变化的近零应变特性。这种本征的结构稳固性,使其在 4.6 V 高电压下循环时有效改善传统高镍材料常见的晶格塌陷与微裂纹问题,同时兼具低成本、高热稳定性和高可逆容量 ($224.7\text{ mA}\cdot\text{h/g}$) 的综合优势。

1.2 高压电解质匹配

实现高能量密度不仅需要高容量的电极,还依赖于正极材料的高电压运行。当电池体系迈向大于 4.5 V 的高压平台时,电解液的氧化分解与正极电解质界面 (cathode electrolyte interface, CEI) 的持续增厚成为主要的性能损耗机制。目前,提升电解质高压性能的策略可主要归纳为 3 类:一是溶剂化结构工程,通过降低电解液中游离溶剂分子的活性,从微观尺度提升其氧化动力学稳定性;二是分子改性与成膜添加剂,利用氟代修饰等手段增强溶剂本身的耐压能力或通过牺牲性分解构建钝化层;三是采用具备宽电化学窗口的固态/准固态电解质,从物理层面对正极与有机溶剂进行隔离。

在溶剂化结构工程方面, Han 等^[8]设计了一种离子液体 (Pyr13TFSI) 调控的局部高浓度电解液。该策略通过离子液体的 TFSI 与溶剂 DME 之间的离子-偶极作用,强化了 DME 与 Li^+ 的配位,有效减少了高电压下具有反应活性的游离溶剂分子,从而促进了富

含无机物、稳定性更高的 CEI 与固体电解质界面 (solid-electrolyte interphase, SEI) 的形成。这使得 Li||NCM811 电池即使在 4.6 V 的苛刻电压和 60°C 的高温下,依然能保持超过 75% 的容量保持率。

成膜添加剂方面, Ji 等^[9]制备了由分散在连续碳酸盐电解质中的超细不溶液滴 ($50\sim 120\text{ nm}$) 组成的微乳液电解质,能够同时调节 SEI 和 CEI,增强负极和正极界面的稳定性。Li||NCM811 扣式电池在 4.5 V 截止电压下循环 850 次容量保持率达 84.6%, 4.7 V 高压下循环 400 次容量保持率达 94.4%。

在界面保护策略层面, Son 等^[10]报道了一种突破性的氟化物固体电解质 $\text{LiCl-4Li}_2\text{TiF}_6$, 其具备 30°C 下 $1.7\times 10^{-5}\text{ S/cm}$ 高离子电导率与超高电压稳定性 ($>5\text{ V}$)。通过将其作为保护层应用于高压尖晶石正极 (如 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$), 团队成功构建了能在大于 5 V 电压窗口下稳定运行的全固态电池,并实现了 $35.3\text{ mA}\cdot\text{h/cm}^2$ 的超高面积容量。

2 锂电池循环寿命延长

锂电池的循环寿命是决定其全周期成本与可靠性的关键。锂电池寿命衰减主要涉及 2 大机制:一是 LLI, 如 SEI 膜生长、不均匀沉积产生死锂、材料结构变化导致锂滞留等,均会导致可循环锂离子的不可逆减少;二是正负极材料结构的劣化 (loss of active material, LAM), 如高镍正极的相变与氧释放、尖晶石锰酸锂的 Jahn-Teller 畸变、LFP 的过极化退化,以及石墨或硅负极因体积膨胀导致的微裂纹等。这些机制交织形成容量持续衰退的复杂演化过程,理解并应对这些机制是寿命提升工程研究的关键。

2.1 结构赋能:材料设计实现根源性抗衰

材料结构的精准设计成为从根源上提升稳定性的首要突破方向。在正极材料方面,单晶结构与高熵构型是提升循环稳定性的重要途径。Zeng 等^[11]提出了一种通过梯度微观结构设计提升单晶高镍层状氧化物 ($\text{LiNi}_{0.83}\text{Co}_{0.11}\text{Mn}_{0.06}\text{O}_2$) 在锂电池中机械化学稳定性的策略。该材料采用 Ti、Nb、Zr 共掺杂,构建了从表面岩盐相到亚表面准超晶格结构的梯度分布。这种结构有效抑制了高电压下 $\text{O } 2\text{p}$ 与 $\text{Ni } 3\text{d}$ 能带重叠,减少了晶格氧析出,增强了阴离子骨架稳定性。同

时,梯度结构缓解了 H2-H3 相变过程中的晶格收缩和应力积累,显著抑制了晶内裂纹和界面副反应。改性材料与石墨组装的安时级软包电池在 450 次循环后仍保持 89.8% 的容量,展现出优异的循环稳定性。

Zhang 等^[12]则通过 B 和 Nb 的协同掺杂在单晶超高镍 $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.03}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ 正极中构建晶格内键合相 (IBP), 将一个单晶颗粒划分成一个个小的 Li^+ 传输空间, 成功解决了单晶材料中锂离子扩散路径长、反应不均匀和晶格应变累积的问题, 该结构不仅作为“铆钉”增强了晶格机械稳定性, 还显著提升了离子迁移速率, 并有效抑制了 H2-H3 相变过程中的晶格畸变与氧流失, 实现了高度均匀的电化学反应(图 2)^[12]。最终, 材料在半电池中 100 次循环容量无衰减, 全电池 1000 次循环后容量保持率高达 94.5%。

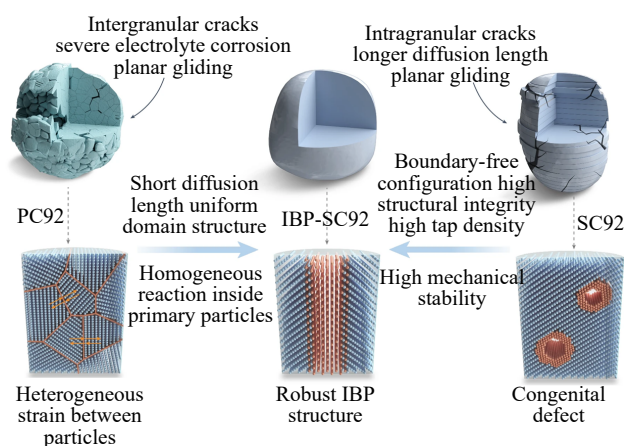


图 2 单晶正极材料晶格内键合相结构设计

富锂锰基正极存在晶格氧易析出、R-3m 与 C2/m 两相间应力导致的颗粒开裂等固有缺陷, 使其难以兼顾长循环稳定性, 仅靠表面修饰难以根治这些深层问题。对此, Hu 等^[13]提出“内部晶格构型+微观结构”的协同优化策略, 通过 Nb_2O_5 处理, 在 $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$ 正极的 C2/m 相 TM 层 Li 位点构建了强 $\text{Nb}_{4d}-\text{O}_{2p}-\text{Li}_{2s}$ 构型, 并设计了一次颗粒径向排列的微观结构。该构型有效抑制了高电压下晶格氧的不可逆析出, 同时径向结构缓解了 R-3m 与 C2/m 两相间的晶胞体积差异应力, 改性后材料在 300 次循环后容量保持率达 81%。

这种“结构适配性能”的设计思路进一步延伸至全固态电池领域, 即针对固态体系中电极与电解质界面接触易失效、应力累积明显的痛点, Park 等^[14]构建

了兼具表面 B 包覆与 Nb 掺杂诱导柱状结构的系列高镍正极材料。Nb 的掺杂促使一次颗粒沿径向排列为细长柱状, 此形貌能有效疏导充放电过程中的各向异性应力, 抑制微裂纹产生; 同时表面含 B 包覆层抑制了正极与硫化物电解质的界面副反应。改性材料组成软包全固态电池后, 在 $7.10 \text{ mA} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 面密度下循环 300 次, 容量保持率为 80.2%。

正极材料的结构优化为寿命提升奠定了基础, 而负极尤其是锂金属负极的枝晶生长与死锂问题, 仍是制约长循环的关键瓶颈, 针对这一痛点, 欧阳明高院士团队^[15]提出了电场弛豫的锂枝晶调控策略: 在 3 C 快充引发锂沉积后, 进行 1 h 短时静置。该过程中, 电场弛豫驱动锂离子从枝晶尖端向侧面局部迁移, 使枝晶形态变得平滑, 同时形成富含无机物、更稳固的 SEI 膜, 从源头上减少了死锂的形成和有害 SEI 的生长。该策略在商用电池中实现了 100 次快充循环后容量保持率从 80% 提升至 95%, 且调控时间比现行方法缩短 80%。

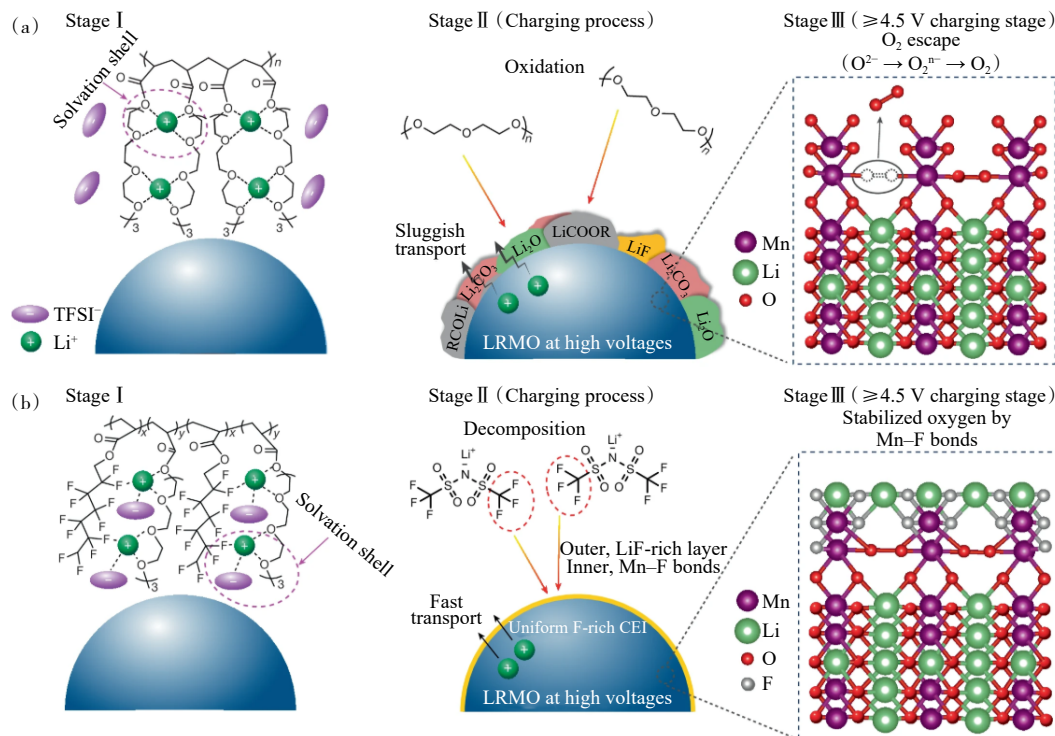
2.2 界面适配: 创新电解质体系支撑长循环稳定性

材料本征稳定性的提升需要界面环境的协同适配, 电解质作为离子传输的媒介, 其化学设计直接影响界面反应与 SEI/CEI 膜的稳定性。

Sun 等^[16]提出一种“溶剂中继”电解质策略, 通过使用弱配位、温度敏感的 1-甲氧基丁烷(MOB)作为“传递溶剂”在室温下促进离子缔合, 形成稳固的无机 SEI 膜以提升循环寿命; 同时, 利用强配位、温度不敏感的 G2 作为“接收溶剂”, 在高温下诱导离子解离, 从而显著地提升了热稳定性。该设计使 4.5 V 石墨-NCM811 软包电池在 0.45 C 倍率下循环 1000 周(约 4100 h)后容量保持率高达 81.9%。欧阳明高团队提出无碳酸乙烯酯(EC)电解质体系, 采用基于 DMC/EMC/TTE 的混合溶剂与 FSI/ PF_6^- 双盐共同构建“富阴离子型锂离子溶剂化结构”, 使锂离子优先与阴离子配位, 通过提高最低黏分子轨道(lowest unoccupied molecular orbital, LUMO)能级, 降低溶剂还原副反应, 在 NCM811||石墨软包电池中实现 700 次循环后容量保持率为 89.5%^[17]。Huang 等设计了一种由强溶剂化聚醚和弱溶剂化氟烃悬浮物组成的含氟聚醚基聚合物电解质, 形成富含阴离子的溶剂化结构, 从而在正极和负极上形成阴离子衍生的富氟

界面层,以抵抗界面问题(图3)^[18]。这种含有30%(质量分数)磷酸三甲酯的准固态聚合物电解质使富锂锰

基正极在软包电池中具有超过 $8 \text{ mA} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 的可逆高面容量,室温下可稳定循环500圈以上。



(a) 聚醚电解质导致界面 CEI 过度生长及正极表面氧不稳定; (b) 氟聚醚电解质通过阴离子衍生 CEI 稳定正极表面氧

图3 含氟聚醚基聚合物电解质提升电极界面稳定性

2.3 添加剂调控与补锂技术

电解质体系的整体优化为长循环提供了基础保障,而添加剂的精准调控与活性锂的主动补充则成为进一步提升寿命上限的关键手段。

复旦大学彭慧胜/高悦团队结合有机电化学与AI预测,提出一种突破性的“外部锂补充”策略^[19]。其关键机理是将有机锂盐 LiSO_2CF_3 作为添加剂融入电解液,在电池充电时,该盐在约 3.8 V 电位下发生不可逆的氧化分解,释放出活性锂离子并储存于负极,同时其阴离子转化为 SO_2 和 $\text{C}_2\text{F}_6/\text{CHF}_3$ 气体,可在电池化成阶段被完全排出而无残留。此方法不仅成功解决 Cr_8O_{21} 等先天缺锂电极材料无法工作的难题,更能反复再生使用后的商用电池。通过对 $1 \text{ A} \cdot \text{h}$ LFP||石墨电芯进行多次 LiSO_2CF_3 补充,实现了11818次循环后容量保持率96%的超长寿命。

除了活性锂补充,添加剂的界面调控也取得重要进展。Lu等^[20]利用TM 3d与氧2p轨道能隙和化学键强度作为关键描述符,指导筛选出一种新型含氟有机添加剂N-氟代双(苯磺酰)胺。该分子通过优先阳极氧

化,在 LiCoO_2 表面形成 $\text{Co}-\text{N}$ 键,在 $\text{LiNiO}_2/\text{NMC811}$ 界面处形成 $\text{O}-\text{Li}-\text{F}$ 键,差异化地构建稳定阴极电解质界面,有效抑制了电解液氧化和正极结构退化。使用该添加剂的 NCM811||石墨全电池实现了 0.5 C 倍率、 4.6 V 高电压下400次循环80%的高容量保持率。

同时,有效利用电化学过程产生的死锂也是很重要的手段。Gu等^[21]提出一种石墨析锂调控策略,通过向石墨负极中引入仅1%(质量分数)的单原子锰作为锂枝晶抑制剂,将不可逆的“死锂”转化为可逆的活性锂沉积,而非单纯抑制锂枝晶的产生。该策略以单原子锰为关键调控描述符,在苛刻的高倍率、低温充电条件下,可使石墨负极上的死锂量减少90%,从而显著提升电池循环稳定性与安全性。基于Gr-SAMn||NCM811的软包电池在 2 C 倍率下循环1500次后容量保持率达86.2%,且可实现 5 C 充电,在 -20°C 下的平均库仑效率也从97.95%提升至99.94%。

2.4 智能预判:AI模型预测电池寿命

材料、电解质与添加剂的创新为寿命提升提供了

工程方案,而精准的寿命预测与健康状态评估则是实现全生命周期管理的关键支撑。

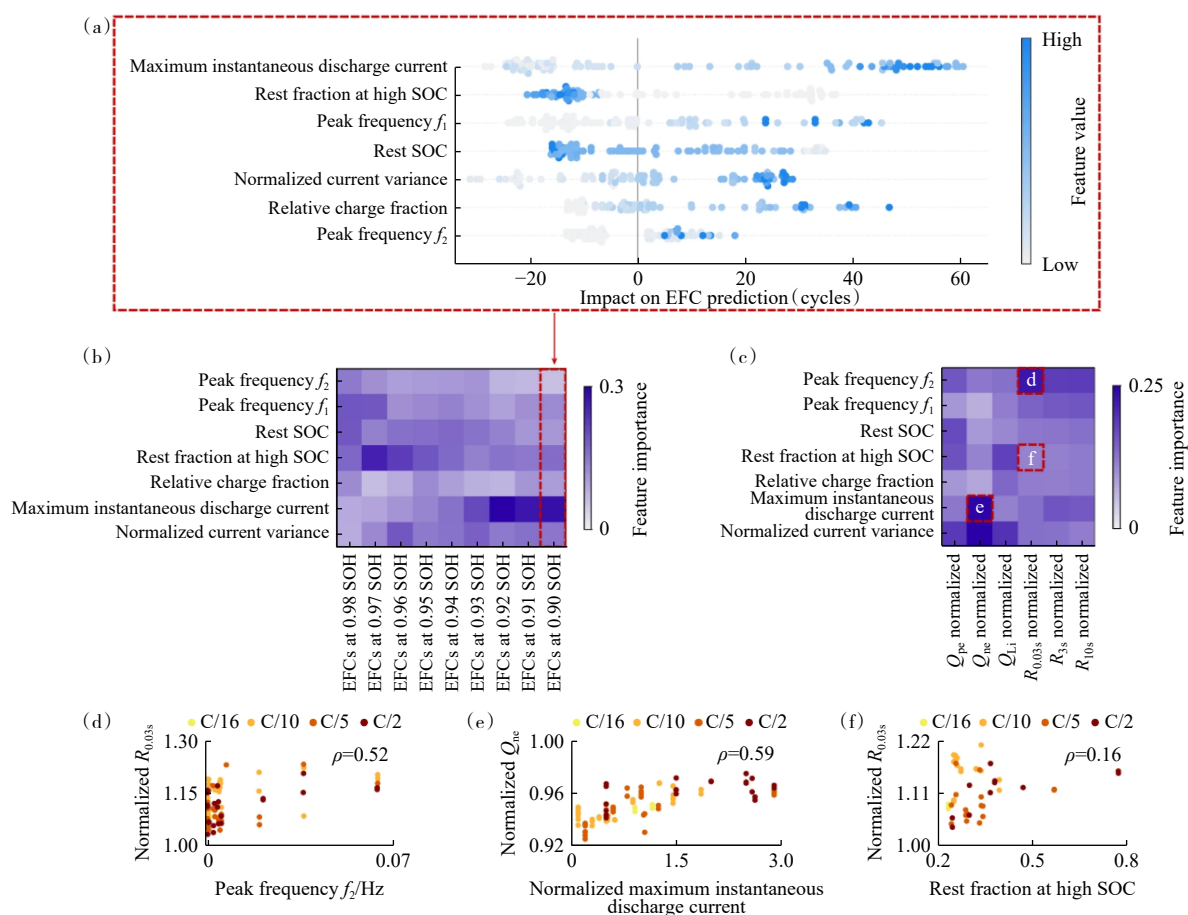
Cai 等^[22]揭示了锂电池中库伦损耗与容量衰减的非等价物理机理。传统观点将库伦效率损失直接等同于不可逆容量损失,但该研究发现,反应消耗的电荷一部分通过局部电荷中性机制引发自放电,仅另一部分(由有害比 ρ 描述)生成有害副产物直接导致容量衰减。同时,在全电池层面存在全局电荷库存补偿机制,即正极的锂库存增益可补偿负极的损失,当正负极寄生反应速率平衡(描述为 $ip/in \approx 1$)时,可极大缓解净锂库存损失。基于此,研究提出了以 ρ 和 ip/in 为关键参数的模型,实现了通过短期漏电测试对长期容量衰减的准确预测。

Xi 等^[23]提出一种整合参数敏感性分析(probabilistic sensitivity analysis, PSA)与多目标优化(multi-objective optimization, MOO)的逆向设计优化流程

(inverse design optimization process, IDOP)。建模过程中,采用负极与电解液的可直接设计参数,以及负极/电解液界面的间接推导界面特性,PSA 结果表明,面密度、颗粒半径与界面特性对电池寿命具有显著影响。研究以商业 NCM622||石墨软包电池为参照,验证了该框架的有效性:在 25℃ 和 45℃ 下,优化直接参数可分别提升寿命 26.63% 和 32.76%,而优化界面特性能分别实现 70.97% 和 138.41% 的显著提升。

2.5 机理锚定:理论深化驱动寿命优化

数据驱动模型预测为寿命管控提供了工具,而基础理论的深化则揭示了寿命演化的内在规律。Geslin 等揭示了一个关键发现:与传统恒流放电相比,在 EV 中模拟真实驾驶的动态放电方式可以显著延长锂电池寿命(图 4)^[24]。其机理在于:动态放电中低频电流脉冲(8.2 mHz)能减少极化与应力集中,降低正极在高电压下静置引发的副反应;同时,高瞬时



(a) 关键特征对预测 90% 剩余容量(SOH)时初始放电容量(EFC)的影响(每个数据点对应一个电池单元); (b) 电池老化过程中 EFC 特征重要性演变的预测; (c) 90% SOH 时其他寿命终点指标对放电曲线特征的依赖性更为复杂; (d)~(f) 图(c) 中 d~f 各区块的原始值

图 4 动态放电特征对电池容量衰减的影响示意

放电电流与电流波动影响负极活性区域的激活与放电深度。通过机器学习模型分析,还发现不同放电特征对锂存量、正极容量和内阻增长具有决定性影响,进一步解释了循环寿命变化的内在原因。

3 锂电池工作温域拓展

随着应用场景向航空航天、极地科考等更加极端的环境拓展,锂电池的宽温域适应性已成为衡量其可靠性的关键指标。

3.1 低温区拓展

锂电池的低温运行正从“能否启动”向“能效可控”转变,这一转变的关键在于电化学体系对低温条件的耐受性。在液态锂电池体系中,低温时电解液黏度升高、离子迁移与脱溶剂化速率下降、界面阻抗增大以及锂枝晶生成是性能下降的主要原因。Su 等^[25]设计了一种以紧凑离子对聚集体(compact ion-pair aggregate, CIPA)为主导的低温锂电池电解质,通过弱锂-溶剂相互作用优化 Li⁺溶剂化结构,提高离子迁移数并形成稳定 SEI 在-40℃ 下循环 200 周仍保持良好容量。针对低温条件下石墨负极锂离子插层动力学过程减慢和枝晶生长这一问题,Gu 等^[21]通过在石墨负极引入单原子锰作为锂枝晶生长抑制剂,通过利用锰的高亲锂性调控锂沉积和锂剥落过程,实现了-20℃ 条件下锂电池的高库伦效率。

相比于液态电解质,固态电解质具有更高的理论能量密度,且不易挥发、耐高温、机械强度高,具有更高的安全性。Li 等^[26]合成了一系列不含醚单元的丙烯酸酯聚合物,这些聚合物包含对 Li⁺有配位作用的配体,对高电压正极具有良好兼容性。在-50℃ 下对聚合物基体进行结晶处理,可释放被限制的液体成分,重新润湿负极/聚合物界面,从而恢复容量并延长电池寿命。

氯化物固态电解质在低温下兼具导电性与循环稳定性,Hong 等^[27]设计了一种面向极低温环境的全固态锂电池,采用无定形 Li₃N-TaCl₅ 固态电解质体系,实现了在-60℃ 下仍能维持 51.9 mA·h/g 的初始放电容量,并在-30℃ 下循环 100 周后容量保持 137.6 mA·h/g。该体系通过优化离子导电性与界面稳定性,显著拓展了全固态电池的低温适应性。

3.2 高温区拓展

高温性能的提升关键在于电化学体系对高温环境中化学与结构稳定性的适应能力。王猛等^[28]评估了高温浮充条件下锂电池鼓胀带来的安全风险,结果表明,高温浮充会加速电池容量衰减和产气鼓胀,气体主要为 CO₂ 和少量可燃烃类,因此电解质体系的热稳定性设计成为实现高温可靠运行的关键。Song 等^[29]报道了一种基于 Li-键的深共晶电解质(Li-DEE),由四乙基铵硝酸盐与 LiFSI 组成,可在 100℃ 高温下保持 6.5×10^{-3} S/cm 的离子电导率。该体系在界面形成富含 Li₃N 和 LiF 的稳定层,在 100℃ 下,0.5 C 循环 635 次仍保持 80% 容量,2 C 循环 1500 次容量为 84.4 mA·h/g,展示了深共晶结构与界面工程在实现准固态电解质高温运行方面的巨大潜力。Yang 等^[30]提出了一种基于部分氟化酯(DFEA)的高压宽温域电解液(HWE)设计策略,该体系采用氟代碳酸乙烯酯(FEC)/DFEA/TTE 作为混合溶剂,并协同 LiFSI 与 LiDFOB 双盐在电极表面原位构建富含 LiF 及 B 物种的无机主导型 CEI/SEI 膜(图 5(a))^[30]。这种高热稳定性的界面膜不仅大幅降低了 Li⁺脱溶剂化能垒,有

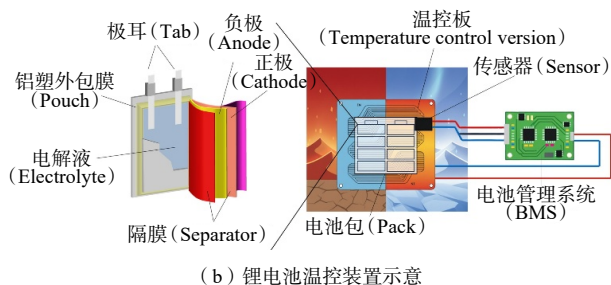
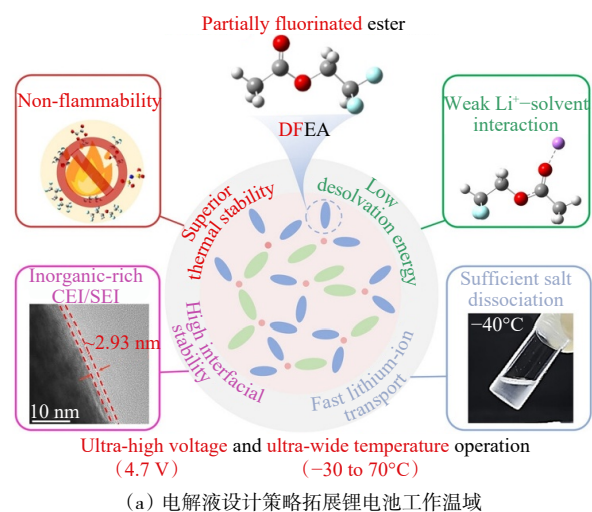


图 5 实现锂电池宽温域工作的材料设计与系统管理策略

效抑制了高脱锂态正极在高温下的 Co 溶解与晶格氧释放,使体系的热滥用放热量较常规电解液降低了约 60%,在 70℃ 高温、4.55 V 高压条件下实现了循环 100 周后容量保持率达 80.5% 的优异性能。Jiang 等^[31]设计了一种由咖啡酸改性壳聚糖(CC)与 Ga-Sn 液态金属复合构成的电场驱动黏结剂,突破了传统将黏结剂视为惰性结构组分的认知,利用其自适应的力学与界面修复能力,实现了 Li-S 电池-40~60℃ 的宽温域稳定运行。

在固态电解质方面,Fu 等^[32]开发了一种“多合一”卤化物固态电解质 $\text{Li}_{1.3}\text{Fe}_{1.2}\text{Cl}_4$,展现出卓越热适应性,能在 60℃ 的温度下保持超过 90% 的容量保持率。Chen 等^[33]报道了一种“拼图式”聚合物固态电解质,通过分子组装实现高电压与非易燃特性。该电解质在室温下具有 0.432 mS/cm 离子电导率和 0.70 的 Li^+ 迁移数,同时可耐受 5.15 V 氧化电压。在 100℃ 条件下, $\text{Li}|\text{LiFePO}_4$ 电池循环 120 次仍保持稳定。

3.3 材料与电池管理协同优化

除了材料层面的本征改性,电池管理系统(battery management system, BMS)与热管理策略的协同是保障电池在宽温域下安全运行的另一道防线。Wang 等^[34]提出“材料创新+热调控”协同思路的宽温域电池发展策略。仅依靠电解液或电极材料改性难以兼顾低温活性与高温稳定性,而通过内嵌式热调控(thermal actuation, TA)可实现电芯快速自加热、提升低温性能;再结合耐热电解质与稳态界面层,可在 70~85℃ 下保持高循环稳定性。该“材料-热管理协同”模式显著拓宽了电池安全工作温域,并有望简化传统液冷系统。

4 锂电池安全强化

随着锂电池能量密度的持续提升,电池热失控、锂枝晶生长、有害气体释放等安全隐患愈发凸显,严重制约高能量密度锂电池的商业化落地,便携锂电池、动力电池等自燃事故屡有发生,进一步引发公众对锂电池安全性的担忧。提升锂电池安全性是保障其规模化应用的前提,也是破解“能量密度-安全性”矛盾的关键命题。

4.1 本征安全强化

提升锂电池安全性的最有效手段是在材料层面进

行改性,提升电池材料的本征安全性。传统的商业电解液是液态体系,由有机溶剂和锂盐组成,在高温下分解产生易燃气体,可能导致热失控,研究人员对电解液组分进行调控优化,提高其耐高温能力。Sun 等^[16]提出的溶剂中继策略使 4.5 V 石墨-NCM811 软包电池(1.1 A·h)表现出增强的热稳定性,在针刺测试中温度升高不到 3.5℃,显著优于使用商用电解质的电池(温升 555.2℃)。Nagarajan 等^[35]设计了一种基于磷离子液体的不易燃电池化学体系,该体系的组成基于三丁基甲磷双(三氟甲磺酰)亚胺($\text{Ph}_{1444}\text{TFSI}$)的电解质,含有成膜添加剂 0.5 mol/L 的双三氟甲烷磺酰亚胺锂(LiTFSI)和 0.5% (质量分数)的二氟草酸硼酸锂(LiDFOB),这样的组成提供了稳定的电极-电解质界面,使电池能够在 125℃ 的高温下稳定工作。

Huang 等^[18]提出了一种阴离子溶剂化结构构建策略,制备了内置的含氟聚醚基准固态聚合物电解质(FPE-SPE),通过强溶剂化聚醚单体和弱溶剂化氟烃单体原位聚合得到具有富阴离子溶剂化结构的 FPE-SPE,由此制备的准固态电池在针刺测试和热测试中保持了高安全性。Wang 等^[36]通过协同静电纺丝和原位固化策略制造了一种具有双重阻燃功能的局部高浓度凝胶聚合物电解质(LHCE-GPE),其中耐高温共聚酯酮联苯醚砜 3D 纳米纤维膜作为骨架,而乙氧基(五氟)环三磷腈(PFPN)既可以作为阻燃稀释剂,也可以作为溶剂化结构调节剂。3D 纳米纤维和 PFPN 之间的协调相互作用不仅抑制了燃烧,而且促进了阴离子主导的分解,从而在负极上形成了富含无机物、机械稳定的 SEI,有效抑制锂枝晶的生长,提高电池的循环寿命和安全性能。

正极材料(尤其是层状氧化物正极材料),在温度升高到临界值时会发生分解并释放大量 O_2 ,加速电解液氧化裂解,释放可燃气体并进一步加剧放热,引发链式反应,进而导致电池热失控。Cui 等^[37]通过差示扫描量热仪(DSC)和结构表征手段对 15 种不同高镍层状正极材料的热稳定性进行了全面分析,包括纯 LiNiO_2 (LNO)、含有 95% 和 90% 镍的单元素掺杂 LNO 正极、含有 90% 和 80% 镍的多元素掺杂 LNO 正极以及具有不同颗粒形态的 $\text{LiNi}_{0.90}\text{Mn}_{0.05}\text{Co}_{0.05}\text{O}_2$ 正极(图 6)^[37]。研究发现,每种高镍正极都有一个临界荷电状态(SOC),该 SOC 定义了其安全工作极限,这可

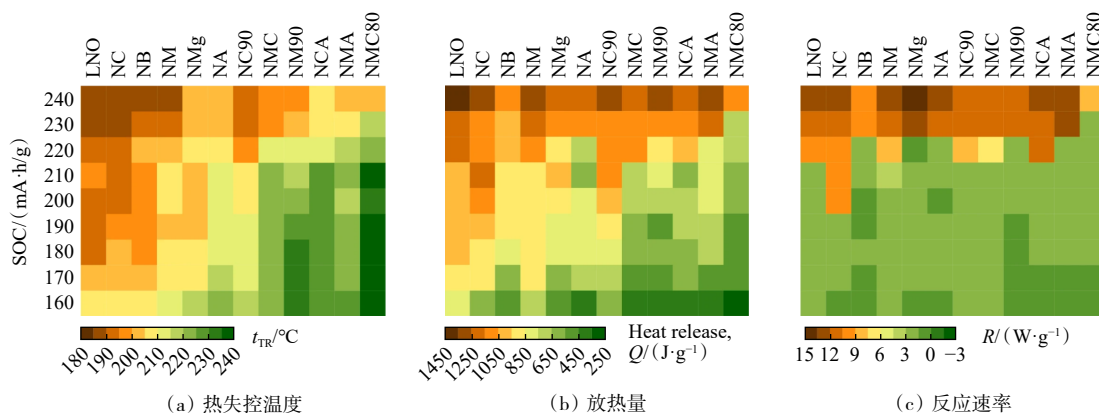


图6 不同组成层状正极的热失控温度、放热量、反应速率与充电程度关系

能受到 M-O 键强度和表面化学的影响。基于对 DSC 数据中热指标的综合分析,该研究提出了一种热稳定性指数来量化正极的整体热稳定性,为开发更安全的高镍正极材料提供重要参考。

4.2 实时监测与智能预警

捕获电池内部信号实现早期故障诊断和智能预警,能提前发现电池热失控风险,将其遏制在萌芽阶段。Fan 等^[38]开发了一种小型化、低功耗的非侵入性传感系统,能够精确传感和无线传输锂电池内部的温度和应变信号,可用于快速识别早期热故障(如内部短路和过热)和机械故障,提前预警并进行故障定位(图 7(a))^[38]。

随着 AI 与机器学习技术快速发展,研究人员也开发出精准智能的预测模型。蒋建杰等^[39]提出了一种基于注意力机制-残差结构-长短时记忆网络(SE-Res-LSTM)的电池膨胀压力回归预测算法,通过计算预测误差并设定合理的阈值,实现了对电池过充热失控的实时检测,该方法在电池发生过充 12 s 后即可检出早期过充热失控风险,相比传统基于电池表面温度

的方法提前了 233 s,提高了预警的时效性和准确性。

4.3 主动防控体系

高效的冷却方案能延长电池使用寿命,提高电池安全性能。Qi 等^[40]利用圆柱形电池模块的温度分布特性,提出了一种新型的圆柱形锂电池缠绕式冷却带结构,将低温冷却剂从冷却带上游引导到电池模块的高温区,以抑制峰值温度,同时将高温冷却剂从下游部分引导到低温区,提高了散热效率。

添加新型阻燃物质,阻止放热反应的发生,能够从源头阻断热失控链式反应,显著增强电池的热稳定性。Guo 等^[41]通过在正极中加入基于磷酸酯的阻燃聚合物(FRP)来构建连续的阻燃界面(FRI),FRI 首先通过抑制氧气释放来增强正极热稳定性并减少电解质的化学氧化;同时,FRI 会自发释放阻燃自由基,这些自由基会扩散到电解质中,中断热分解产生的活性自由基的反应,进而抑制可燃气体的生成(图 7(b))^[41]。Zhang 等^[42]开发了一种新型的自淬灭电池,其中的高效阻燃剂在电池正常工作时不发生反应,在电池发生热故障温度升高时才被激活,迅速与负极的 Li_xC_6 反

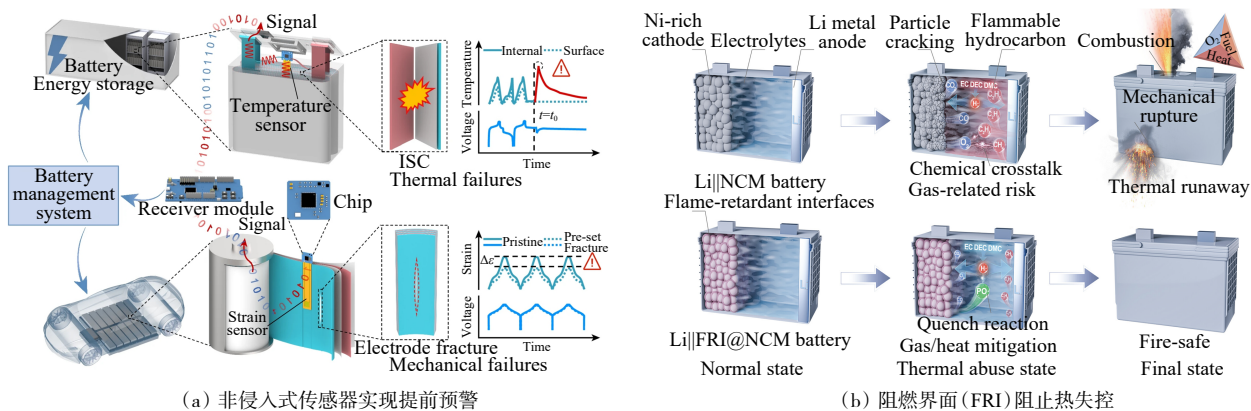


图7 智能预警与阻燃防控

应,提前消除负极,阻止了大规模链式放热反应($\text{O}_2 + \text{Li}_x\text{C}_6$)的发生。相比于商用电池,自淬灭电池的热失控起始温度提高了 15.5°C ,热失控最高温度降低了 123.7°C ,显著提高了电池的安全性。

5 锂电池回收再利用

随着锂电池在 EV、储能电站和便携式电子设备等领域的广泛应用,全球电池需求量持续激增,预计 2030 年 EV 将达到 4700 万辆,随之而来的是废旧电池的大量涌现。因此,开发高效、环保、经济的电池回收技术已成为全球能源领域的研究热点。

5.1 传统回收技术

传统回收技术主要包括火法冶金和湿法冶金。火法冶金技术又称高温冶金,通过高温熔炼实现资源回收,其熔炼温度通常在 1400°C 以上,能耗较高、废气排放较大且回收率低,被认为可开发程度较低。湿法冶金技术金属回收率高,对钴、镍等贵金属的回收率可达 90% 以上,且分离纯度高,是当前应用最广泛的电池回收方法之一。当前对于湿法回收的研究重点在于如何进一步提高元素的浸出率和设计绿色环保可重复利用的浸出液体系。Liu 等^[43]提出一种针对 LFP 正极材料的碘介导湿法回收体系,通过 I^3/I^- 氧化还原对实现 Fe^{2+} 到 Fe^{3+} 的氧化,锂浸出率高达 93%,同时通过电沉积生成金属锌,可直接用于锌空气电池或制氢。

5.2 直接修复技术

直接修复技术是近年来兴起的绿色回收技术,关键思路是在保留电池材料原有晶体结构的基础上,通过补锂、消除缺陷、修复表面结构等方式,恢复其电化学性能。该方法无需将材料分解为单一金属元素,具有流程短、能耗低、环保性好等优势。

固相法直接修复通过高温烧结或热处理,结合锂盐补充和元素掺杂,实现正极材料的结构修复与性能恢复。该方法可以在高温修复的同时对材料进行元素掺杂和表面包覆,从而实现材料性能的升级修复策略。Liu 等^[44]揭示了 NCM622 材料的结构降解与热固相法修复机制:降解关键是 Ni 向 Li 八面体位点迁移,伴随 Li/O 损失与岩盐相域形成;修复过程通过再锂化、氧捕获、TM 氧化及从 Li 层迁回 TM 层实现,其中温度和 Li/TM 摩尔比是关键调控因素,该工作为

锂电池三元材料直接回收提供原子级理论支撑。Jia 等^[45]开发了 Mo 掺杂结合低频声子散射稳定晶格结构策略(图 8(a))^[45]。通过在修复过程中 Mo 原子的掺杂引入了局部晶格应力。由此产生的应力梯度导致声子模式的集中,降低正极材料中 TM—O 共价键的弯曲和伸展振动频率,并抑制 TM 原子的迁移和缺陷结构的形成。

液相体系的修复技术具备修复产品均匀性更佳、反应条件更温和的优势,该类方法通过溶液中的锂离子扩散和化学反应,补充锂空位、修复表面缺陷。常见的液相修复体系包括水热法、电化学法、化学还原法等。Hao 等^[46]提出酒石酸(tartaric acid, TA)基水热处理+短时退火的一体化方案。其中 TA 既作为还原剂也作为锂源载体修复 LFP 结构,又通过与 Al 箔表面反应实现非破坏性正极剥离(图 8(b))^[46];修复过程中,水热阶段初步缓解 Fe—Li 反位缺陷并部分恢复 Li^+ 传输的 O1—O2—O3—O3 四面体,退火阶段彻底消除缺陷且扩大四面体体积,最终实现失效 LFP 的性能恢复。Zhao 等^[47]利用茶多酚作为天然电子供体,在水热条件下将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,同时补充锂离子,消除 Li—Fe 反位缺陷,再通过退火处理引入 $\text{AlPO}_4/\text{Li}_3\text{PO}_4$ 复合涂层,修复破损的碳涂层。

考虑到高温高压的条件在大规模生产中难以实现,如何在常温常压下实现液相体系的均匀补锂成为研究人员的关注重点。Tang 等^[48]基于机器学习的回收体系筛选技术,通过数据驱动的方式快速筛选最优修复溶液和工艺参数,最终确定溶液有机还原剂的低氧化还原电位是实现自发补锂的关键条件,且通过机器学习筛选出抗坏血酸—LiOH 的体系,最终修复后的 LFP 在 5 C 倍率下循环 500 次容量保持率达 96%(图 8(c)、图 8(d))。Lü 等^[49]提出光催化修复技术,利用紫外光激发产生高能电荷载体多巴胺,降低 Fe 原子的迁移能垒,促进错位 Fe 原子回归晶格位点,同时实现锂离子的重新嵌入。

5.3 新型回收技术

随着材料科学和工程技术的发展,一系列新型电池回收技术应运而生,这些技术突破了传统技术和直接修复技术的局限,具有高效、环保、低成本、规模化等优势,主要包括电池注液修复技术、脉冲焦耳热技术等。

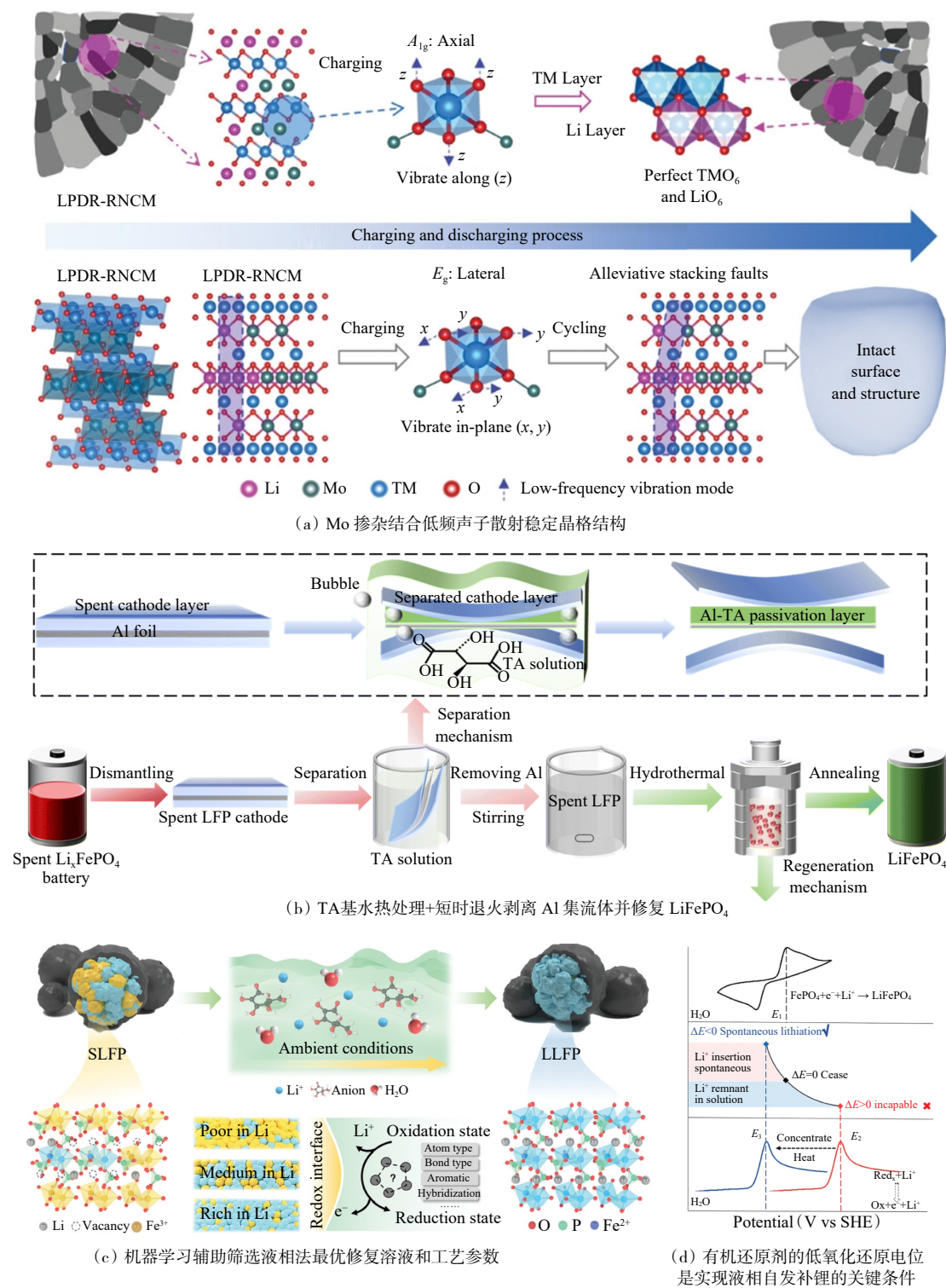


图 8 锂电池正极材料直接修复技术典型策略

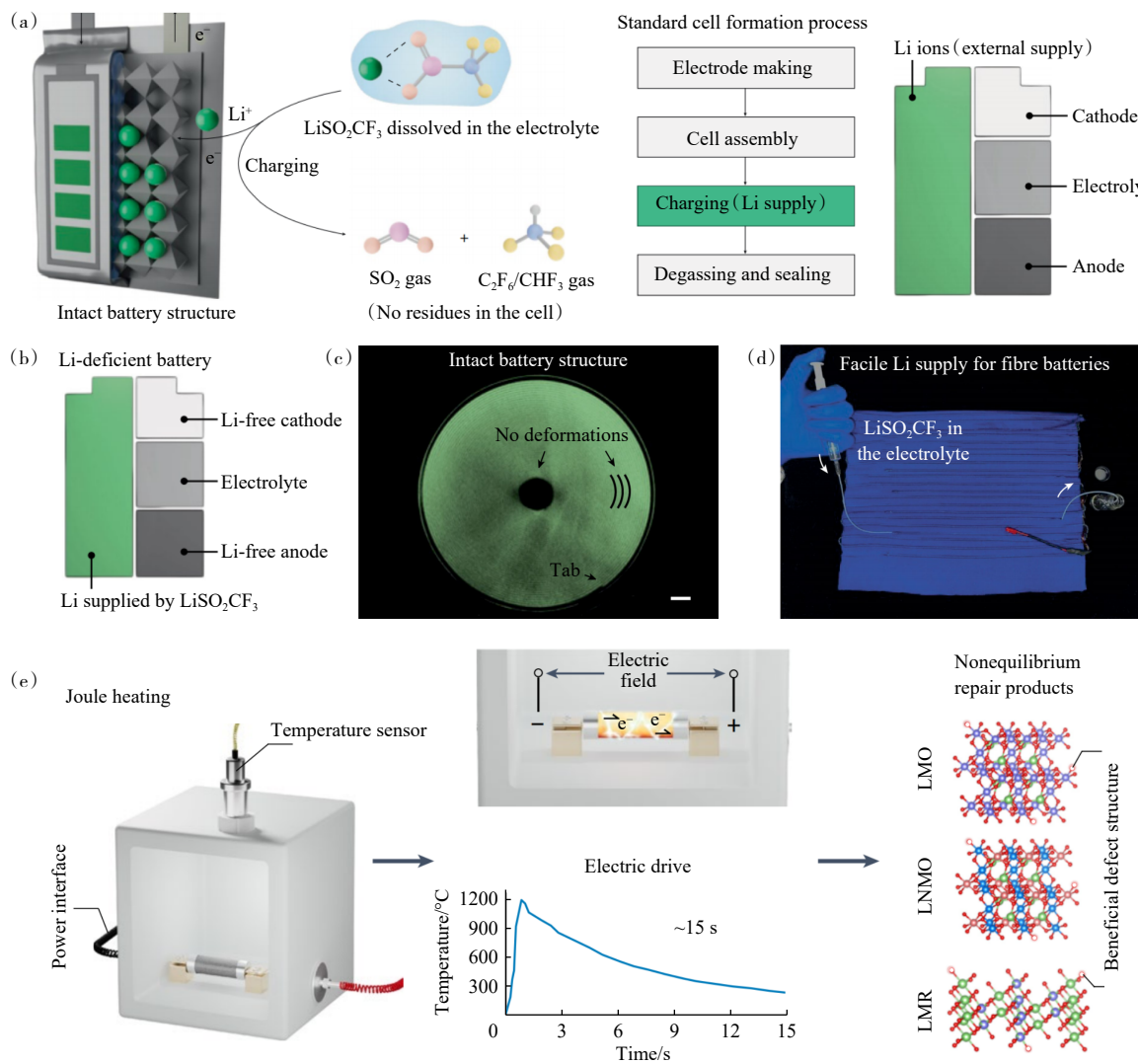
电池注液修复技术是一种无损回收技术，关键原理是向容量衰减的电池中注入特定的修复电解液，通过电解液中的活性成分与电池内部缺陷发生反应，补充锂源、修复 SEI 膜、消除结构缺陷，从而恢复电池的容量和循环性能。该技术无需拆解电池，

流程简单，操作便捷，能最大程度保留电池的结构完整性。Chen 等^[19]设计了一种有机锂盐类补锂剂，该补锂剂能缓慢释放锂离子，补充电池循环过程中损失的锂源，同时与电解液中的杂质发生反应，减少活性物质的消耗；添加特定的添加剂可调控 SEI 膜的

成分与结构,降低界面阻抗,提升离子传输效率(图9(a)~图9(d))^[19]。

脉冲焦耳热技术利用脉冲电流产生的焦耳热,实现废旧电池材料的快速分离与修复,其关键原理是通过瞬时高电流使电池中的黏结剂快速碳化或气化,同时使活性材料与集流体快速分离,且由于加热时间极短(通常为毫秒级),不会破坏活性材料的晶体结构,便于后续修复或直接利用。Ji 等^[50]采用脉冲焦耳热技术处理废旧 NCM 极片,活性材料与铝箔的分离效率

可达 99% 以上,分离后的 NCM 材料晶体结构完整,经补锂处理后,初始放电容量达 165 mA·h/g,循环稳定性与商业材料相当(图9(e))^[50]。脉冲焦耳热技术的突出优势是处理速度快、效率高,单批次处理时间仅需数秒,且能耗低,较传统热处理能耗降低 50% 以上;同时,该技术无需使用化学试剂,无废水、废气产生,环保性好;此外,分离后的集流体(铜箔、铝箔)完好无损,可直接回收利用,进一步提升资源利用率。



(a)~(d) 电池注液修复技术有机锂盐类补锂剂设计; (e) 脉冲焦耳热技术修复失效正极材料

图9 新型电池回收与修复技术

6 结论与展望

2025 年,锂电池研究在关键性能提升与可持续发展 2 大主线中取得了进展,形成了多维度协同、跨学科融合的技术革新格局。在能量密度提升方面,正负

极材料通过晶格结构精准设计、界面工程优化、电解质体系适配,实现了高容量与长循环的协同;循环寿命研究构建了“多尺度协同-AI 预测-主动修复”的全生命周期治理新范式,从根源上缓解了活性锂损失与材料结构劣化的关键矛盾;温域拓展通过液态、固态

电解质体系创新与热管理策略协同,成功覆盖 -60°C 极寒至 100°C 高温的极端环境,拓宽了电池应用边界;安全性提升形成“本征强化-智能预警-主动防控”三维防护体系,通过电解质阻燃改性、电极材料热稳定性优化、多参量智能预警等技术,有效破解了高能量密度带来的热失控风险;回收技术则实现从传统火法、湿法冶金向直接修复、脉冲焦耳热等绿色再生路线的转型,为资源循环利用提供了多元化解决方案。

展望未来,锂电池技术的发展将更加注重全链条系统集成,逐步从性能突破走向产业落地。在材料体系层面,超高镍三元、富锂锰基、硅碳等高比能正负极材料的改性研发仍是热点方向,高比能电极材料的成熟应用是破解续航里程焦虑的关键,搭配固态电解质是发挥高比能优势、提高安全性的重要途径。因此,固态电池将是研发焦点,但其商业化进程仍面临电解质-电极界面阻抗、规模化制备一致性、成本控制等现实挑战,未来3~5年,或将看到固态电池在高端EV领域的应用。在系统层面,AI与数字孪生技术将深度赋能电池研发与管理,通过高通量计算与机器学习辅助新材料发现,结合实时传感与寿命预测模型,实现从材料设计到终端应用的一体化进程。在可持续发展方面,绿色设计与低碳制造将成为下一代电池的关键指标,电池结构与材料的可拆解性、可修复性将成为新的研究方向。同时,随着电动汽车普及率提升与储能场景多元化,电池系统与电网、车辆的深度融合也将成为重点课题。

未来,锂电池技术将不再局限于单一指标的突破,而是在高能量密度、长寿命、高安全、宽温域、低成本、绿色可持续的多维目标中寻求最优解,实现从研发到应用的协同创新,推动锂电池技术成为碳中和目标与全球能源转型的坚实支撑。

参考文献(References)

- [1] Yu H F, Cheng J, Zhu H W, et al. Reversible configurations of 3-coordinate and 4-coordinate boron stabilize ultrahigh-Ni cathodes with superior cycling stability for practical Li-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(1): 2412360.
- [2] Sun Y S, Li C C, Chen J, et al. *In situ* crystal structure growth and control for enhancing comprehensive performance in ultra-high nickel-layered lithium cathodes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(1): e13466.
- [3] Kang M, Oh S, Ahn K, et al. Unlocking the potential of internal Li-ion transfer in Ni-rich cathodes blended with LiFePO_4 to address first cycle irreversible capacity loss and degradation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(16): 7950–7966.
- [4] Liu W Z, Zhou Z Y, Meng X H, et al. Accomplishing reversible storage of Li-ion beyond stoichiometric 1.1 in Li-rich cathodes via regulating cation migration kinetics[J]. *eScience Energy*, 2025, doi: 10.1016/j.esen.2025.100002.
- [5] Li Y J, Sun T, Yang C X, et al. Li-rich oxide micro-bricks with exposed {010} planes to construct ultrahigh-compaction hierarchical cathodes for Li-ion batteries[J]. *eScience*, 2025, 5(5): 100405.
- [6] Yang P K, Shang L, Wang H M, et al. Layered-spinel heterogeneous structure and oxygen vacancies enable superior electrochemical performance for Li-rich cathodes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(30): e202501539.
- [7] Park G T, Park N Y, Ryu J H, et al. Zero-strain Mn-rich layered cathode for sustainable and high-energy next-generation batteries[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(10): 1215–1225.
- [8] Han Z, Chen L K, Zheng G R, et al. Ionic liquid reinforcing ether coordination of localized high concentration electrolyte enables high-voltage lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): 2416668.
- [9] Ji H J, Xiang J W, Li Y, et al. Liquid-liquid interfacial tension stabilized Li-metal batteries[J]. *Nature*, 2025, 643(8074): 1255–1262.
- [10] Son J P, Park J, Kim H Y, et al. Five-volt-class high-capacity all-solid-state lithium batteries[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(11): 1334–1346.
- [11] Zeng C R, Zheng R X, Cao Y Q, et al. Gradient micro-structure design enabling mechanochemically durable single-crystalline Ni-rich layered oxides for advanced lithium-ion batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, doi: 10.1002/adfm.202519504.
- [12] Zhang Q M, Wang J, Chu Y Q, et al. Intralattice-bonded phase-engineered ultrahigh-Ni single-crystalline cathodes suppress strain evolution[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(8): 1001–1012.
- [13] Hu K H, Tang H Q, Zheng B P, et al. Constructing targeted strong Nb4d-O2p-Li2s configurations to obtain excellent energy density and long life for Li-rich cathodes[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(1): e202413563.
- [14] Park N Y, Lee H U, Yu T Y, et al. High-energy, long-life Ni-rich cathode materials with columnar structures for all-solid-state batteries[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(4): 479–489.

- [15] Han X B, Mao S Y, Wang Y, et al. Manipulation of lithium dendrites based on electric field relaxation enabling safe and long-life lithium-ion batteries[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3699.
- [16] Sun Y, Zuo C J, Wang H W, et al. Designing safe and long-life lithium-ion batteries *via* a solvent-relay strategy[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(12): 1450–1457.
- [17] He Y P, Chen T L, Zhang Y L, et al. EC-less electrolytes for high-safety and long-life nickel-rich lithium-ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, doi: 10.1002/adfm.202517363.
- [18] Huang X Y, Zhao C Z, Kong W J, et al. Tailoring polymer electrolyte solvation for 600 Wh kg⁻¹ lithium batteries[J]. *Nature*, 2025, 646(8084): 343–350.
- [19] Chen S, Wu G B, Jiang H B, et al. External Li supply reshapes Li deficiency and lifetime limit of batteries[J]. *Nature*, 2025, 638(8051): 676–683.
- [20] Lu D, Li R H, Lv L, et al. Tailoring cathode interphase chemistry for high-voltage Li-ion batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2026, 65(2): e18546.
- [21] Gu X K, Zhang Q N, Chen Q, et al. A lithium dendrite inhibitor in graphite anodes enabling fast-charging and low-temperature lithium-ion pouch cells[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(21): 2501448.
- [22] Cai J Y, Trask S E, Yang Z Z, et al. Deciphering coulombic loss in lithium-ion batteries and beyond[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 5785.
- [23] Xi R Y, Peng Y Y, Li J H, et al. Failure-mechanism-driven inverse design and optimization procedure for battery lifetime extension[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(49): e202518502.
- [24] Geslin A, Xu L, Ganapathi D, et al. Dynamic cycling enhances battery lifetime[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(2): 172–180.
- [25] Su F, Lin Y T, Dou X, et al. Compact ion-pair aggregates dominated electrolytes enable high-performance low-temperature lithium-ion batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(38): e202510647.
- [26] Li P Y, Hao J J, He S, et al. Li⁺-migration influencing factors and non-destructive life extension of quasi-solid-state polymer electrolytes[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 3727.
- [27] Hong B L, Gao L, Li C P, et al. All-solid-state batteries designed for operation under extreme cold conditions[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 143.
- [28] 王猛, 吴森明, 王胜楠, 等. 高温浮充鼓胀锂离子电池的安全风险研究[J]. *电源技术*, 2025, 49(1): 114–122.
- [29] Song X S, Zhang Y, Guo Z J, et al. Lithium-bond-based deep eutectic electrolyte solutions for high-temperature lithium metal batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(39): e202511772.
- [30] Yang W M, Chen W, Zou H Q, et al. Electrolyte chemistry towards ultra-high voltage (4.7 V) and ultra-wide temperature (–30 to 70 °C) LiCoO₂ batteries[J]. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2025, 64(13): e202424353.
- [31] Jiang W Y, Jin X, Li B R, et al. Wide temperature range adaptable electric field driven binder for advanced lithium-sulfur batteries[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 7860.
- [32] Fu J M, Wang C H, Wang S, et al. A cost-effective all-in-one halide material for all-solid-state batteries[J]. *Nature*, 2025, 643(8070): 111–118.
- [33] Chen J J, He C X, Peng X D, et al. Puzzle-like molecular assembly of non-flammable solid-state polymer electrolytes for safe and high-voltage lithium metal batteries[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8494.
- [34] Wang C Y, Qin K Q, Gupta N. All-climate battery energy storage[J]. *Joule*, 2025, 9(12): 102178.
- [35] Nagarajan S, Hwang S, Jaye C, et al. Investigation of electrode-electrolyte interfaces to enable non-flammable Li-ion batteries operating up to 125°C with liquid electrolyte[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2025, 6(5): 102597.
- [36] Wang L, Qu Y P, Su C, et al. Interfacial engineering of Li anode and Ni-rich cathode *via* anion-regulated SEI/CEI layers in flame-retardant nanofiber-reinforced polymer electrolyte for lithium metal batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(35): 2501185.
- [37] Cui Z H, Liu C, Wang F, et al. Navigating thermal stability intricacies of high-nickel cathodes for high-energy lithium batteries[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(4): 490–501.
- [38] Fan J B, Liu C C, Li N, et al. Wireless transmission of internal hazard signals in Li-ion batteries[J]. *Nature*, 2025, 641(8063): 639–645.
- [39] 蒋建杰, 楼平, 徐国华, 等. 基于预测误差的锂离子电池热失控预警方法研究[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(11): 4187–4197.
- [40] Qi W J, Yang J X, Zhang Z G, et al. Investigation on thermal management of cylindrical lithium-ion batteries based on interwound cooling belt structure[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 340: 119962.
- [41] Guo J C, Chai C Z, Wang Y H, et al. A fire-safe Li metal battery *via* smart gas management[J]. *PNAS*, 2025, 122(29): e2501549122.
- [42] Zhang W F, Feng X N, Lu L G, et al. Anode failure hunter with a self-quenched function boosting lithium-ion battery safety[J]. *ACS Energy Letters*, 2025, 10(10): 4933–4940.
- [43] Liu J C, Liu Z X, Xiao Z Q, et al. Iodine-mediated redox strategy for sustainable lithium extraction from spent

- LiFePO₄ cathodes[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(26): e2503450.
- [44] Liu S W, Liu H, Bokov A, et al. Insights into the mechanisms behind structural repair of spent layered cathode materials for lithium-ion batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(32): e202504382.
- [45] Jia K, He Y J, Piao Z H, et al. Low-frequency phonon dispersion relation enabling stable cathode from spent lithium-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(6): 2413753.
- [46] Hao S P, Lv Y L, Zhang Y, et al. Restoration of Li⁺ pathways in the [010] direction during direct regeneration for spent LiFePO₄[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(8): 3750–3760.
- [47] Liu Y Y, Bai J, Shi R Y, et al. Direct recycling of degraded LiFePO₄ cathode material *via* natural electron donors healing and targeted surface reconstruction[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(1): e11246.
- [48] Tang J, Qu H T, Sun C B, et al. A universal solution for direct regeneration of spent lithium iron phosphate[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(14): 2420238.
- [49] Lü X W, Lin J, Sun X, et al. Direct recycling of spent LiFePO₄ cathodes through photocatalytic correction of anti-site defects[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(26): e2503398.
- [50] Ji H C, Wang J X, Qiu X, et al. A universal protocol for ultrafast direct regeneration and upcycling of spent lithium-ion battery cathode materials[J]. *Nature Protocols*, 2025, doi: 10.1038/s41596-025-01234-9.

Review of technological hotspots of lithium-ion battery in 2025

ZHOU Haoran¹, CHEN Biao², ZHAO Zhikun³, JIANG Cao², PENG Yiyang¹, LIANG Mingyuan¹, GONG Yongji^{3*}, CHENG Fangyi^{1*}

1. College of Chemistry, Efficient Storage Engineering Research Center (Ministry of Education), State Key Laboratory of Advanced Chemical Power Sources, Nankai University, Tianjin 300071, China
2. School of Materials Science and Engineering, National Industry-Education Platform for Energy Storage, Tianjin University, Tianjin 300354, China
3. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The relentless pursuit of enhanced lithium-ion battery (LIB) performance is crucial for enabling the widespread adoption of new-energy vehicles, smart grids, and robust equipment for extreme environments. This review comprehensively surveys the key research advances from 2024 to 2025, focusing on five pivotal frontiers: boosting energy density, extending cycle life, expanding operational temperature windows, fortifying safety, and enabling efficient recycling. A notable paradigm shift is observed at the material level—spanning cathodes, electrolytes, anodes, and interfaces—where strategies have evolved from post hoc defect mitigation toward proactive, mechanism-driven design, and from single-property optimization to holistic multi-objective engineering. At the system level, the convergence of AI-assisted prediction, embedded smart sensing, and adaptive thermal management is revolutionizing the paradigm for full-lifecycle battery management and control. By critically examining the scientific principles and engineering approaches underpinning recent breakthroughs, this work offers a timely perspective and forward-looking analysis to guide the development of next-generation high-performance LIBs.

Keywords lithium-ion batteries; energy density; cycle life; wide temperature range; battery safety; recycling and regeneration; interface engineering; AI-prediction ●



(责任编辑 魏来)