



低空飞行器锂电池阻燃电解液的设计与调控策略

陈俊权¹, 邓娇娇^{1*}, 莫金汉^{1,2,3}

(¹深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; ²亚热带建筑与城市科学全国重点实验室 深圳大学, 广东 深圳 518060; ³极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室 深圳大学, 广东 深圳 518060)

摘要: 电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 产业快速发展, 对动力电池能量密度、倍率性能与安全性提出严苛要求, 传统碳酸酯电解液的高可燃性成为“零热失控”目标的根本瓶颈。本文综述面向低空航空应用的阻燃电解液设计策略。系统梳理四类技术路径: 阻燃添加剂修饰, 分析含磷/含氟及PFPN复合体系在自由基捕获、界面成膜与锂盐稳定方面的作用及界面兼容性局限; 本征不燃共溶剂重构, 比较磷酸酯、氟代溶剂及离子液体三类体系在消除可燃组分与宽温域适配中的优势及各自在负极兼容性、成本与动力学方面的不足; 溶剂化结构调控, 阐明HCE/LHCE/WSE通过诱导阴离子聚集体主导的配位结构改善热稳定性并构筑富无机界面膜的机制, 指出高去溶剂化能垒在大倍率下的极化制约; 宏观相态与主动防御, 分析凝胶/固态电解质的物理锁液与热屏障功能、热响应智能电解质的触发式防护及微胶囊封装策略, 指出各体系在界面阻抗、响应精度与工程一致性方面的关键挑战。结合eVTOL宽温域波动、高倍率脉冲及振动工况, 剖析各技术体系的性能短板与产业化难点。最后展望宽温域快充电解液、无氟体系、AI辅助设计及系统级协同防护等方向, 为高安全航空电池电解液开发提供参考。

关键词: 电动垂直起降飞行器; 锂电池; 阻燃电解液; 热失控; 本征安全; 溶剂化调控

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0571

中图分类号: U 8; O 64

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-19

Design and regulation strategies of flame-retardant electrolytes for lithium batteries in low-altitude aircraft

CHEN Junquan¹, DENG Jiaojiao^{1*}, MO Jinhan^{1,2,3}

(¹College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060 Guangdong China; ²State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060 Guangdong China; ³State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060 Guangdong China)

Abstract: The rapid advancement of the electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft industry imposes stringent requirements on the energy density, rate capability, and safety of power batteries. The high flammability of conventional carbonate-based electrolytes represents a fundamental bottleneck to achieving the goal of zero thermal runaway. This review examines flame-retardant electrolyte design strategies for low-altitude aviation

收稿日期: 2026-07-03; 修改稿日期: 2026-07-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (52325801), 国家自然科学基金 (52402052)。

第一作者: 陈俊权 (2003—), 男, 硕士研究生 (在读), 主要从事储能锂电池热安全防护, E-mail: 2500211021@mails.szu.edu.cn; 通信作者: 邓娇娇, 副教授, 电化学储能及其热安全防护, E-mail: deng.jiaojiao@szu.edu.cn。

引用本文: 陈俊权, 邓娇娇, 莫金汉. 低空飞行器锂电池阻燃电解液的设计与调控策略[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-19.

Citation: CHEN Junquan, DENG Jiaojiao, MO Jinhan. Design and regulation strategies of flame-retardant electrolytes for lithium batteries in low-altitude aircraft[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-19.

applications. Four categories of technical approaches are systematically evaluated: flame-retardant additives, with a focus on the roles of phosphorus- and fluorine-based additives and PFPN composite systems in radical scavenging, interphase formation, and lithium salt stabilization, as well as their interfacial compatibility limitations; intrinsically non-flammable co-solvents, comparing phosphates, fluorinated solvents, and ionic liquids in terms of their ability to eliminate combustible components and provide wide-temperature adaptability, alongside their respective drawbacks in anode compatibility, cost, and kinetics; solvation structure regulation, elucidating the mechanisms by which highly concentrated electrolytes (HCE), localized highly concentrated electrolytes (LHCE), and water-in-salt electrolytes (WSE) enhance thermal stability and construct inorganic-rich interphases through anion-aggregate-dominated coordination, while highlighting the polarization constraints imposed by high desolvation barriers during high-rate operation; and macroscopic phase-state regulation and active protection, analyzing the physical confinement and thermal barrier functions of gel and solid-state electrolytes, the triggered protection mechanisms of thermo-responsive smart electrolytes, and microencapsulation strategies, while identifying critical challenges in interfacial impedance, response precision, and engineering consistency for each system. The performance limitations and industrialization challenges of each technology are assessed in the context of eVTOL operating conditions, including wide-temperature fluctuations, high-rate pulses, and mechanical vibration. Future directions are proposed in the development of wide-temperature fast-charging electrolytes, fluorine-free systems, AI-assisted design, and system-level cooperative protection, providing references for the rational design of high-safety aviation battery electrolytes.

Key words: electric vertical takeoff and landing (eVTOL) aircraft; lithium batteries; flame retardant electrolyte; thermal runaway; intrinsic safety; solvation regulation

低空经济作为国家战略性新兴产业，正推动以电动垂直起降飞行器（eVTOL）为代表的新型航空器步入规模化发展新阶段^[1-3]。动力电池是决定飞行器续航、载荷与运行安全的核心部件。与新能源汽车不同，eVTOL垂直起降所需动力约为地面行驶的10-15倍，对电池的能量密度、功率输出和安全性能提出了严苛要求。行业已明确eVTOL动力电池须满足“三高一快一长”的标准要求^[4]：能量密度突破400 Wh/kg（远期500 Wh/kg）^[5]；常规放电 ≥ 4 C、起降时瞬态脉冲可达10-12 C；工作温域覆盖 -35°C 至 80°C ；循环寿命大于2000次^[6-11]。

电解液的性能是决定锂离子电池性能边界的关键组分。传统碳酸酯类电解液闪点低、易挥发，在各种滥用条件下不仅充当热失控的“初级燃料”，其分解产气还加速压力积聚与链式反应^[12]。低空飞行器在起降和巡航中持续承受振动、温变与高倍率脉冲冲击，显著加剧极化产热^[13, 14]。一旦空中热失

控，既无地面消防介入，又易引发链式燃烧甚至爆炸。高比能与高倍率的严苛工况叠加电解液的本征易燃缺陷，已成为低空动力电池安全应用的核心瓶颈。

尽管全固态电池被视为解决上述安全隐患的终极路径，但因固固界面阻抗高、倍率性能差及成本高昂，短期内难以满足eVTOL高功率需求^[15, 16]。因此，在液态体系下开发兼具高电导率、良好界面相容性与本征不燃的阻燃电解液，成为当前破解安全瓶颈、协同提升电化学性能的核心路径。本文立足低空极端工况，系统分析电解液燃烧机理，综述从添加剂、不可燃溶剂、局域高浓度体系到智能响应型的阻燃电解液设计策略，为高安全航空动力电池的研发提供理论基础。

1 锂电池热失控机制与阻燃原理

1.1 低空工况下的热失控演变机制

eVTOL 在高频大倍率充放电、强振动及极端温差等苛刻工况下运行，其电池更易触发热失控^[17]：即内部产热速率远超散热能力时，所引发的一系列自加速放热反应，最终导致温度骤升、结构解体乃至起火爆炸^[18, 19]。锂电池热失控通常经历三个典型阶段（图1（a））。第一阶段（70~120℃）：石墨负极表面SEI膜分解，暴露的嵌锂负极催化电解液还原，释放大量热量与气体。第二阶段（~140℃）：聚烯烃隔膜热收缩熔融，正负极直接接触引发大面积内短路，瞬间释放巨量焦耳热^[12]。第三

阶段（~180℃）：高镍三元正极相变分解释放活性氧，与碳酸酯溶剂（如碳酸甲乙酯（EMC）、碳酸二甲酯（DMC））形成“燃烧三角”（图1（b））^[20]；高温加速溶剂产气，内压超限时泄压阀开启，喷射的高温可燃气体与电解液雾滴遇空气形成爆炸性云团。温度超过230℃时，聚偏二氟乙烯（PVDF）粘结剂分解释放剧毒氟化氢（HF），加剧二次灾害。微观上（图1（c）），燃烧依赖自由基链式传递有机溶剂蒸汽裂解产生氢自由基（H·），H·与活性氧反应生成具有强氧化性的氢氧自由基（HO·与HOO·）等活性物种，这些自由基维持链式燃烧反应^[21]。

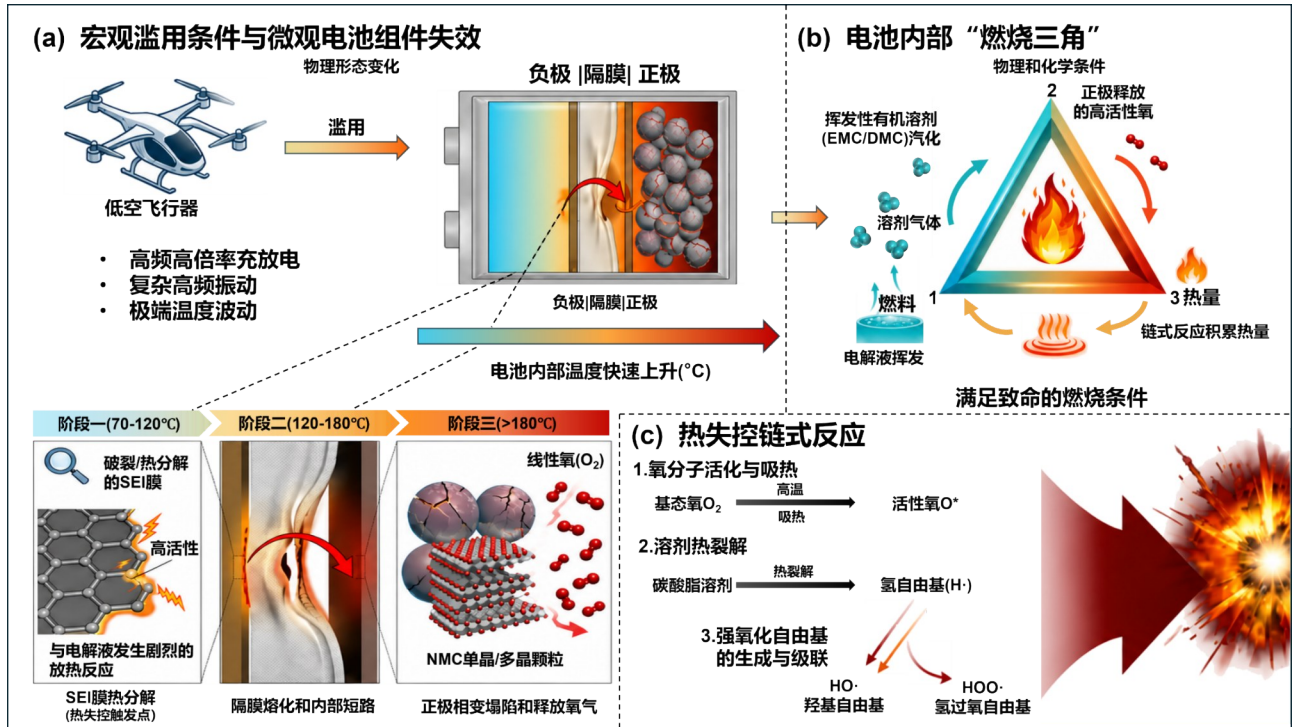


图1 锂电池热失控机理图 (a) 宏观滥用条件与微观电池组件失效；(b) 电池内部“燃烧三角”；(c) 热失控链式反应
Fig. 1 Mechanism diagram of lithium battery thermal runaway. (a) Macroscopic abuse conditions and microscopic failure of battery components. (b) Combustion Triangle within the battery. (c) Chain reaction of thermal runaway

1.2 阻燃电解液的核心工作机理

阻燃电解液通过破坏“燃烧三角”并中断自由基链式反应实现安全防护，其机制涵盖气相阻燃、凝聚相阻燃与本征物理防线三个协同维度^[22]。

气相阻燃中，含磷（如磷酸三甲酯（TMP）、磷酸三乙酯（TEP））或含卤素（如氟）的阻燃分子优先挥发至气相^[23]，高温裂解释放富含磷（如

PO·）或卤素的活性自由基，以含磷体系为例，PO·通过 $\text{PO}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{HPO}$ 和 $\text{PO}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HPO}_2$ 路径捕获并淬灭维持链式反应的H·和OH·，直接阻断链式燃烧进程^[24, 25]。

凝聚相阻燃机制则诱导原位构筑致密物理屏障，含磷、含硼或含氮组分可促进碳化、交联或无机盐沉积，阻隔氧气和可燃挥发物迁移交换^[26, 27]；

另一方面,含氟或富阴离子溶剂化结构可诱导生成富 LiF 、 Li_3N 或硼酸盐等无机组分的 SEI/CEI 膜,抑制电极与电解液的持续放热副反应^[28]。

溶剂化结构调控通过减少自由溶剂、增强阴离子配位或引入弱溶剂化溶剂,降低易燃组分活度并调控界面成膜,在热安全、高压稳定性与离子传输之间寻求平衡^[29, 30]。

1.3 阻燃电解液的热安全与界面表征技术

阻燃电解液的安全效能与作用机制需从宏观燃烧行为、热力学演变及界面化学三个层面进行系统表征。

在宏观可燃性评估方面,自熄时间 (Self-Extinguishing Time, SET)、极限氧指数 (Limited Oxygen Index, LOI) 和闪点 (Flash Point) 是评判电解液安全等级的核心参数。SET 指单位质量的电解液在点燃后维持燃烧的时间。通常 $\text{SET} < 6 \text{ s/g}$ 为完全不燃, $6 \sim 20 \text{ s/g}$ 为阻燃, $> 20 \text{ s/g}$ 为易燃^[21]。LOI 则反映了维持材料燃烧所需的最低氧气浓度,一般认为 $\text{LOI} > 28\%$ 即具备良好抗燃性。闪点则反映电解液蒸气遇火即燃的最低温度,是评估其使用与贮存安全的重要参数。

在热力学与电池级热失控行为表征方面,差示扫描量热法 (DSC) 和加速量热仪 (ARC) 是界定热失控边界、解析电解液热稳定性的重要实验方法。DSC 可在材料层面捕捉充电态电极的放热峰位与焓值,表征电解液的本征热稳定性。而 ARC 测试则模拟绝热环境下拟电池的热失控全过程。ARC 曲线能够识别三个关键温度节点:自加热起始温度 T_1 (SEI 膜分解)、热失控触发温度 T_2 (通常对应温升速率 dT/dt 急剧超过 1°C/s) 以及最高热失控温度 T_3 ^[12],为评估电解液在电池层级的热稳定性提供了定量依据。

在界面化学分析方面,X 射线光电子能谱 (XPS) 与飞行时间二次离子质谱 (ToF-SIMS) 用于深度剖析 SEI 与 CEI 的化学组分与空间分布,验证阻燃对富无机成分界面重构的贡献。在溶剂化结构研究方面,核磁共振 (NMR)、拉曼光谱 (Raman) 及傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 用于揭示阻燃电解液中离子-溶剂的配位环境变,从分子层面阐释阻燃添加剂如何通过调控溶剂化结构,同时兼顾本征安全与离子传输动力学^[31, 32]。

2 阻燃添加剂的组分设计与性能评估

在各类安全策略中,阻燃添加剂因兼具经济性和工程兼容性而备受关注。向传统碳酸酯电解液中引入少量 (通常 $< 10 \text{ wt}\%$) 阻燃组分,即可在沿用现有产线的基础上显著提升热安全性能。根据核心阻燃元素的不同,阻燃添加剂可分为含磷、含氟及复合添加剂三类,其发展经历了从单一元素到多元素协同、从单纯气相阻燃到界面功能集成调控的演进。

2.1 含磷与含氟添加剂:从单一功能到复合协同

以磷酸酯为代表的含磷添加剂 (TEP、TMP、甲基磷酸二甲酯 (DMMP)) 等是最早研究的阻燃剂^[33]。其气相阻燃机制明确:热解释放 $\text{PO}\cdot$ 、 $\text{P}\cdot$ 等自由基,通过 $\text{PO}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{HPO}$ 、 $\text{F}\cdot + \text{H}\cdot \rightarrow \text{HF}$ 等反应路径捕获并淬灭维持链式反应的 $\text{H}\cdot$ 和 $\text{OH}\cdot$,直接阻断链式燃烧进程^[22]。然而,TMP/TEP 需添加超过 40% 方能使电解液不燃 ($\text{SET} < 6 \text{ s/g}$)^[12]。但过量添加会显著增加电解液粘度、降低电导率,并引发严重的界面失效:磷酸酯分子与 Li^+ 形成大尺寸溶剂化络合物,共嵌入石墨层间,还原产物难以形成稳定 SEI,层间膨胀应力导致石墨剥离粉化,容量快速衰减^[12, 22, 34]。含氟添加剂通过多重物理化学机制提升安全性。该体系主要包括氟代碳酸酯 (如氟代碳酸乙烯酯 (FEC)、甲基三氟乙基碳酸酯 (FEMC)) 以及氢氟醚类 (如 1,1,2,2-四氟乙基-2,2,3,3-四氟丙基醚 (TTE)) 溶剂等。氟原子具有强吸电子效应,可降低溶剂分子的最高占据分子轨道 (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) 能级,同步提升电解液的抗氧化性与闪点^[35]。热失控时,含氟溶剂一方面凭借较高挥发焓实现物理降温;另一方面热解产生活性含氟自由基 ($\text{F}\cdot$),可有效淬灭链式反应^[36]。Arai 与 Naoi 等证实,氟代碳酸酯与氢氟醚溶剂既可有效抑制电解液燃烧,还可协同构筑富含无机 LiF 的稳定 SEI 膜^[37, 38]。但过度氟化会减低溶剂极性与介电常数,削弱锂盐解离能力。单纯提高氟化比例易导致电解液相分离、电导率骤降及隔膜浸润能性变差^[39]。这一固有矛盾促使近期的研究从单一元素添加剂转而探索多元素协同复合体系。

2.2 复合添加剂的多元素协同突破

复合添加剂通过在同一分子或复配体系中集成

阻燃、成膜与界面调控, 利用多组分协同改善阻燃效率、界面兼容性与电化学稳定性。以乙氧基五氟环三磷腈 (PFPN) 为代表, 其富电子 P-N 杂环与多氟取代结构赋予多重功能^[20]: P-N 杂环区域电子云密度极高, 通过强分子间相互作用锚定 PF_6^- , 抑制其向 PF_5 和 HF 的转化。Li 等^[30]发现, 60°C 老化 48h 后, 含 PFPN 的电解液保持澄清, 而基础电解液已变黑降解 (图 2 (a)); 核磁共振谱图 (图 2 (b)) 进一步证实, 老化后的 PFPN 体系无酸性副产物峰。分子动力学模拟表明: PFPN 引入后, PF_6^- 在 Li^+ 第一溶剂化壳层中的配位数从 0.46 增至 0.89, 表明更多阴离子进入内壳层参与溶剂化。电化学测试表明, 采用该复合电解液的 Li || NCM811 电池在 60°C 、4.5 V 下循环 200 圈后, 容量保持率仍可达 63.1% (图 2 (c)), 验证了其高温高压稳定性。

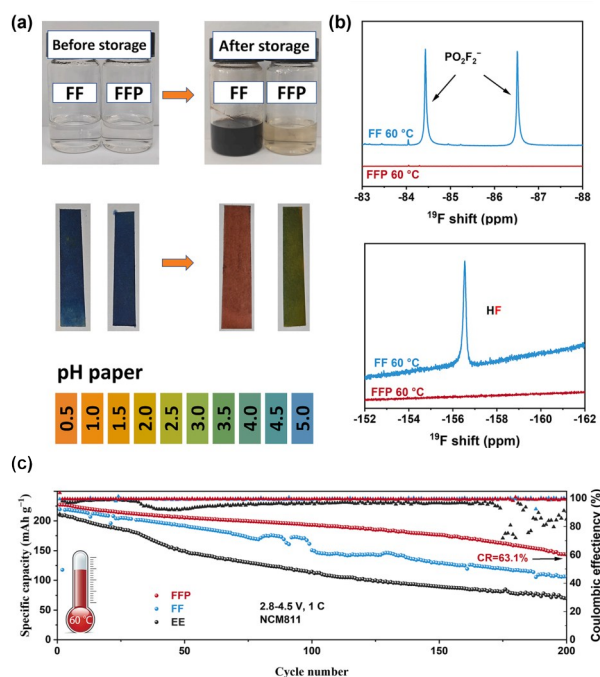


图2 (a) 在 60°C 下储存 48 小时前后的 FF 和 FFP 的照片以及 pH 值; (b) 在 60°C 下储存 48 小时后的 FF 和 FFP 的 ^{19}F 核磁共振谱; (c) 60°C 下不同电解液体系的 Li||NCM811 电池在截止电压为 4.5 V 时的循环性能^[30]
Fig. 2 (a) Visual appearance and pH of FF and FFP before and after storage at 60°C for 48 hours. (b) ^{19}F nuclear magnetic resonance spectra of FF and FFP after storage at 60°C for 48 hours. (c) Cycling performance of Li||NCM811 batteries under different electrolyte systems at 60°C when the cut-off voltage is 4.5 V^[30]

利用添加剂还原电位差异可设计空间分布可控的分层 SEI, 以改善含磷基团与负极的兼容性。Gao 等^[28]将 PFPN 与微量三聚甲醛 (Trioxane, 1 wt%) 复配, 诱导生成双层 SEI (图 3 (a))。ToF-SIMS 深度剖析证实, SEI 外层为三聚甲醛原位开环聚合衍生的柔性有机层 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}^-$ 信号); 内层为 PFPN 与 FSI 优先还原生成的致密无机钝化层 (富集 LiF 与 Li_3N 信号)。该分层结构使 1.1 Ah 软包电池在 250°C 加热测试中未发生热失控, 而传统电解液组在 120°C 即起火 (图 3 (b))。其协同机制源于界面组分的时序自组装: 具有较低最低未占据分子轨道 (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) 能级的 PFPN 优先还原生成 $\text{LiF}/\text{Li}_3\text{N}$ 致密无机相; 随后三聚甲醛在其外侧发生原位开环聚合形成高弹性聚合物网络, 以“先无机后有机”的时序实现刚性阻隔与柔性缓冲的协同, 有效破解阻燃添加剂界面兼容性难题。

空间位阻调控与高熵溶剂化设计是复合阻燃电解液突破极端温域与高电压瓶颈的两大前沿方向。Zeng 等^[40]设计的大体积五氟苯基二苯基磷酸酯 (PDP) 添加剂, 通过空间位阻重塑 Li^+ 溶剂化鞘层, 抑制电解液高温分解的同时赋予体系 $-50\sim 50^\circ\text{C}$ 宽温域稳定性, 为 eVTOL 跨越对流层时面临的极端热管理需求提供了支撑。Ni 等^[41]则将“高熵”概念引入多元氟化阻燃体系, 通过构建无序的溶剂化结构, 降低去溶剂化能垒, 在保持不燃的同时实现 4.8 V 高压与 -20°C 低温兼容。两种策略表明: 分子空间构型精准调控与溶剂化熵增可有效解耦阻燃性能与极端环境适应性的矛盾, 为阻燃电解液的工程化提供了从分子尺度与体系尺度双向设计路径。

3 本征不燃溶剂与共溶剂体系

3.1 从添加剂到共溶剂

传统添加剂策略虽在工艺兼容性与成本控制上具备优势, 但受限于微量添加难达本征不燃、界面兼容性差及组分耗散等问题, 长周期可靠性不足^[12]。这推动电解液设计从“被动阻燃”向“本征安全”转变, 即以不可燃溶剂部分或完全替代传统碳酸酯 (体积分数通常 $>20\%$), 从热力学源头消除可燃组分, 同时重构 Li^+ 溶剂化环境以拓宽电化学窗口并提升热稳定性^[42, 43]。目前, 本征不燃共溶剂

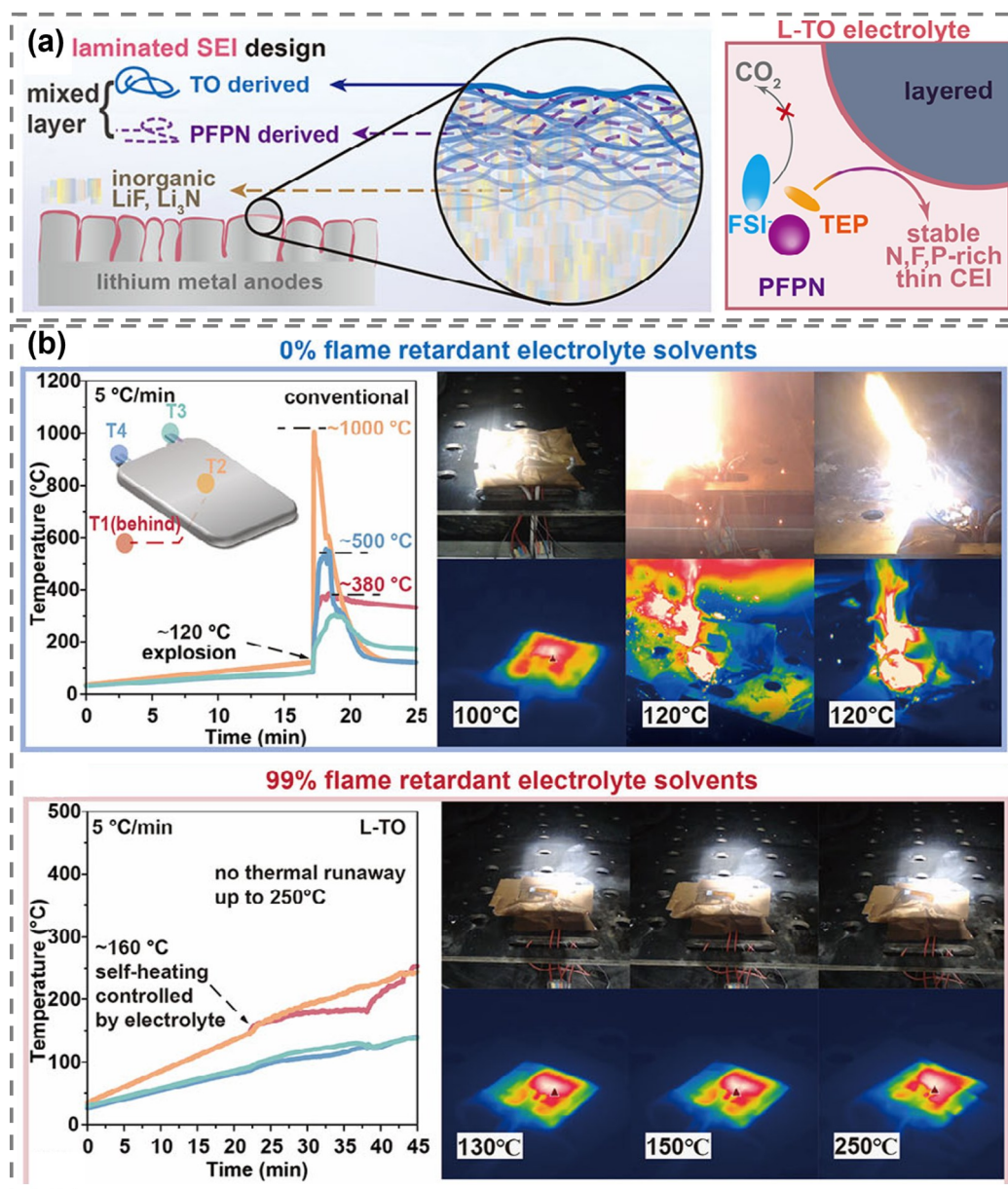


图3 (a) 低浓度电解液(L-TO)中层状的SEI结构膜以及CEI示意图; (b) 常规电解液和低浓度电解液(L-TO) Li||NCM811软包电池的时间-温度曲线、数码照片以及红外热成像图^[28]

Fig. 3 (a) Schematic illustration of the layered SEI structure and CEI in L-TO. (b) Time-temperature profiles, digital photographs, and infrared thermal images of Li||NCM811 pouch cells using conventional electrolyte and L-TO^[28]

的研究主要围绕磷酸酯、氟代溶剂（氟代碳酸酯与氟代醚）以及离子液体等关键技术路径展开。

3.2 磷酸酯基本征不燃溶剂

磷酸酯基溶剂因本征阻燃、宽液程及低成本优势成为共溶剂体系的核心方向之一，但其与石墨负极界面不兼容，极易引发溶剂共嵌入、电极结构破损，成为航空应用关键瓶颈。精准调控电解液溶剂化结构是破解该难题的核心策略^[44]。Ma等^[45]在1 M

LiTFSI/TEP体系中引入LiNO₃，利用NO₃⁻与TEP间的强范德华作用，将NO₃⁻挤入Li⁺第一溶剂化壳层，使TEP配位数从2.576降至1.937，根源上抑制共嵌入失效。改性电解液SET趋近于零（图4(a)），熔点低至-91.5 °C（图4(b)），实现-91.5~100 °C超宽温域稳定工作。电化学测试表明（图4(c)），Li||LFP电池在-30 °C下仍可维持约120 mAh/g的放电容量，在100 °C下循环50圈后，

容量保持率超 80.2% 为 eVTOL 跨空域飞剧烈温差 工况提供了潜在的电解液解决方案。

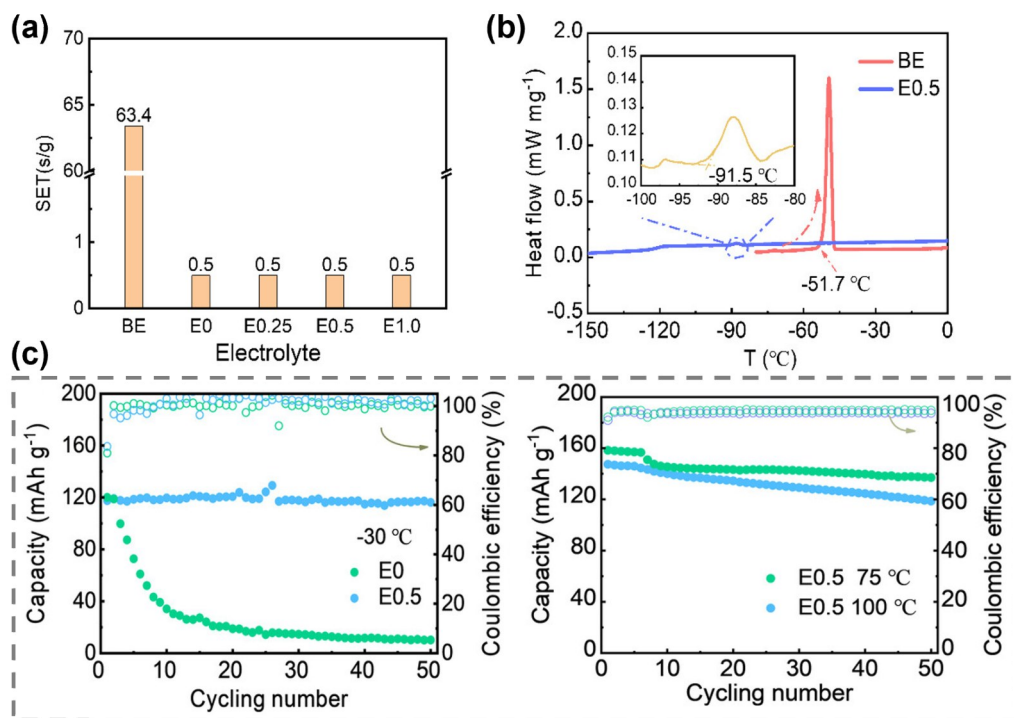


图4 (a) 不同电解液浸润隔膜是自熄灭时间测试；(b) 基本电解液以及 E0.5 电解液的差示扫描量热图；(c) 不同电解液的 Li||LFP 电池在 -30 °C、75 °C 和 100 °C 下的循环性能^[45]

Fig. 4 (a) Self-extinguishing time test of separators wetted with different electrolytes. (b) Differential scanning calorimetry (DSC) thermograms of the base electrolyte (BE) and E0.5 electrolyte. (c) Cycling performance of Li||LFP cells using different electrolytes at -30 °C, 75 °C, and 100 °C^[45]

弱化阴离子-溶剂相互作用以降低去溶剂化能垒，是优化磷酸酯电解液界面稳定性与热安全性的另一有效策略。Zhang 等^[32]设计了 0.7 M LiDFOB/TMP 低浓度电解液，利用 DFOB⁻与 TMP 的弱相互作用，使 DFOB⁻富集于 Li⁺溶剂化壳层，形成聚集体 (AGG) 主导的溶剂化结构。ARC 测试显示，该体系的自放热起始温度 T_1 和热失控触发温度 T_2 相较于对比样分别提升 20 °C 和 18 °C，显著延缓热失控进程。基于该电解液组装的 20 Ah 软包电池能量密度高达 533.8 Wh/kg，实现了安全与高比能的兼顾。另一策略为引入高配位能力共溶剂以调控磷酸酯配位数。汪书萃等^[44]通过引入高配位能力的碳酸乙烯酯 (EC) 和氟代碳酸甲乙酯 (FEMC)，将乙基磷酸二乙酯 (DEEP) 在 Li⁺第一溶剂化壳层中的配位数由 4.57 降至 1.44，根源上阻断 DEEP 溶剂在负极界面的持续分解。改性电解液在 -60 °C 下仍维持液态，且本征不燃 (SET=0 s/g)，且在 -20 °C 下表现出优异的循环稳定性拓宽了低温操作边界。

3.3 氟代碳酸酯与氟代醚共溶剂

与磷酸酯的气相自由基捕获机制不同，氟代溶剂体系主要通过热力学与电化学双重途径提升安全性：以高 F/H 比的氟代溶剂 (FEC、FEMC、双 (2, 2, 2-三氟乙基) 碳酸酯 DFDEC 等) 部分或完全替代传统碳酸酯，从热力学上降低电解液燃烧活性，赋予体系本征阻燃特性；同时利用氟原子强吸电子效应，诱导溶剂在负极优先还原，原位构筑富含 LiF 的致密 SEI 膜，从动力学上切断热失控链式副反应。王岩等^[23]在高比能 (280 Wh/kg) 高镍三元/硅碳复合负极软包电池中验证了全氟电解液 (FEC/FEMC/PFPN) 的工程可行性。在 180 °C 热滥用下，使用该全氟电解液的电池未出现燃烧、爆炸等剧烈热失控现象，热安全性能优异。此外，该体系在室温动态工况下循环 350 次后，容量保持率可达 93% 以上，有效解决了电池高能量密度与安全性难以兼顾的行业难题。类似地，Tran 等^[42]利用碳酸丙烯酯 (PC) /FEMC/DFDEC 构建了本征不

燃电解液。如图5(a-b) ARC测试所示, 该非燃体系将 T_1 提升了5℃, 且整个温升曲线中并未出现明显的 T_2 和 T_3 特征峰, 表明其能抑制电池由自加热向剧烈热失控的转变。电化学性能测试表明, 使用

该电解液的石墨||NCM811全电池在45℃、1 C下循环600次后, 容量保持率达81% (图5(c)), 兼具优异热稳定性与长循环性能。

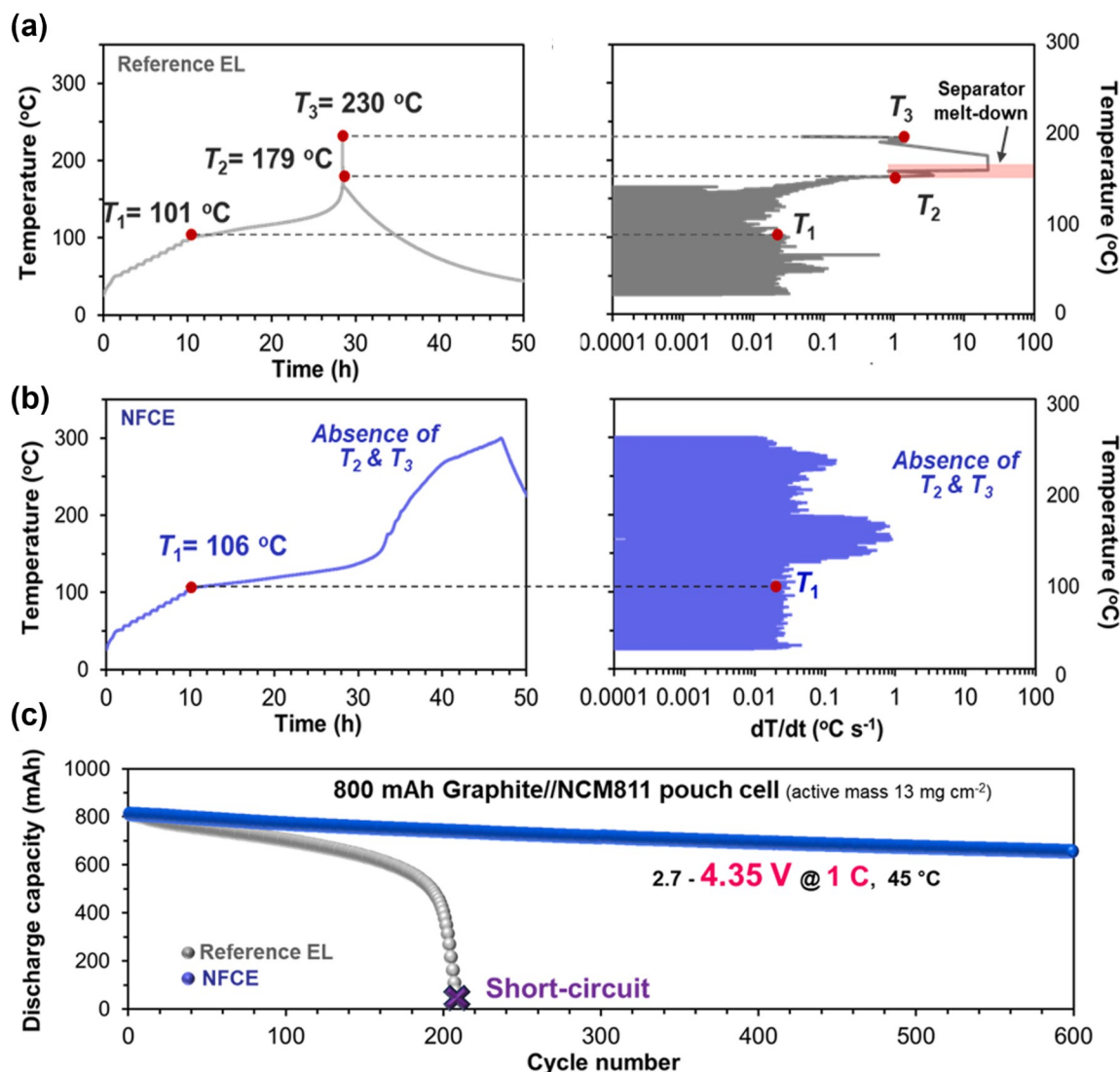


图5 充电状态下800 mAh石墨||NCM811软包电池的ARC测试 (a) 对比样EL电解液 (b) 实验样NFCE电解液; (c) 45℃下800 mAh石墨||NCM811软包电池在1 C下的循环性能^[42]

Fig. 5 ARC test results of 800 mAh graphite||NCM811 pouch cells under charged state: (a) control sample with EL electrolyte; (b) experimental sample with NFCE electrolyte; (c) cycling performance of 800 mAh graphite||NCM811 pouch cells cycled at 1 C rate within a voltage range of 2.7 to 4.35 V at 45 °C^[42]

然而, 全氟代体系不仅成本高昂, 还面临低温或大倍率工况下的动力学受限问题。为此, 研究者提出了局部氟化优化策略, 在本征不燃临界点附近, 通过相图筛选精确控制氟代共溶剂含量, 以平衡安全性与电化学性能。Kang等^[46]利用SET三角相图确定FEMC体积分数>20%即可实现零自熄

时间, 在安全阈值边界精确截断。该优化促使FEMC分解产物与负极反应生成富含LiF的坚固SEI、有效抑制了活性颗粒的裂纹粉化, 还使得1.2 Ah软包电池在45℃、1 C下循环500圈后容量保持率达82%, 并将热滥用下热失控延迟约1.5小时, 实现了阻燃界面效应最大化与动力学代价最小

化的双重提升。

3.4 离子液体基阻燃电解液

离子液体凭借其极低挥发性和高热稳定性，是构建本征不燃电解液的重要方向，但其熔点偏高、低温电导率受限。为突破这一限制，Ren 等^[47]将“高熵”概念引入碱金属熔盐体系，设计了三元碱金属高熵熔盐体系 $\text{LS}_{45}\text{KT}_{15}\text{KS}_{40}$ 。通过多尺寸阴/阳离子混合引发熵增效应，将单一锂盐 130℃ 熔点大幅降至 55℃，形成无自由溶剂分子的纯离子传输结构，彻底消除有机溶剂燃烧风险。该电解液电化学窗口高达 6 V， $\text{Li}||\text{NCM811}$ 全电池在 50℃ 下循环 200 圈容量保持率 80.8%；60℃ 下循环 120 圈，容量保持率仍高达 92.2%。该策略表明，熵驱动晶格无序化可有效突破离子液体基电解液的低温动力学壁垒，为无溶剂阻燃体系设计提供了热力学新思路。

3.5 共溶剂策略的优势与挑战

共溶剂策略以本征不燃溶剂部分或彻底取代传统碳酸酯，从热力学源头消除可燃组分，实现从“添加剂修饰”到“主溶剂重构”的跨越。通过精准调控溶剂化结构或高熵设计，该策略同步突破宽温域适配瓶颈，诱导富 LiF 等致密无机界面生成，有效解耦安全性与电化学性能之间的矛盾。然而，面向 eVTOL 应用仍面临三重挑战：（1）磷酸酯与石墨/硅碳负极的长期动态兼容性，需在长寿命飞行周期中严苛验证；（2）全氟代溶剂高昂的制造成本与潜在的环境负担构成产业化痛点；（3）离子液体体系在大倍率（ $\geq 4\text{ C}$ 持续、10~12 C 脉冲）下存在离子传输动力学限制。尽管如此，共溶剂电解液的本征不燃、宽温域适配与高压稳定性，高度契合低空飞行器跨空域温差波动、高功率输出、零热失控的核心刚需，仍是平衡高能量密度与高安全性的核心技术路径之一。

4 高浓度与局域高浓度阻燃电解液

4.1 高浓度电解液：自由溶剂消除与阴离子界面

高浓度电解液（High-Concentration Electrolytes, HCE，盐浓度通常 $>3\text{ M}$ ）通过减少游离溶剂分子，使溶剂化结构由溶剂分离离子对向接触离子对和聚集体主导转变，大幅降低体系挥发性与可燃性；同时大量阴离子进入 Li^+ 第一配位壳层，在负极优先还原生成富含 LiF 等无机组分的致密

SEI，构筑本征安全与界面稳定的双重防线。何孟雪等^[24]系统研究了 TEP 与 TFP 基磷酸酯 HCE 在锂硫电池中的适配行为。点火测试显示，TEP 基 HCE 的自熄时间为 0 s/g，具备本征不燃特性。XPS 分析揭示了 TEP 与 TFP 在界面行为上的本质差异：TFP 基电解液因生成过量 C-F/S-F 有机组分，导致界面阻抗增加；而 TEP/TFP 混合体系（2:1 摩尔比）则构筑了更为稳定的无机富集界面，硫利用率达 99.6%，0.1 C 下循环 80 圈后比容量保持 1666 mAh/g，验证了磷酸酯基 HCE 在抑制多硫化物穿梭与提升安全性方面的双重优势。

4.2 局部高浓度稀释策略与界面创新

尽管高浓度电解液在抑制溶剂挥发与改善界面稳定性方面具备突出优势，但其高粘度、浸润性差及成本高昂限制了应用。局部高浓度电解液（Localized High-Concentration Electrolytes, LHCE）通过引入不与 Li^+ 配位的惰性稀释剂，在保留电解液 AGG 溶剂化结构的同时改善了体系的理化性质。可降低反应热流^[48]、提升氧化电位^[49]或优化去溶剂化动力学^[31]（如 Wang 等^[29]引入微量 1,3-二氧戊环以促进 AGG 形成）。

稀释剂的功能化设计与界面重塑机制是 LHCE 研究的核心难点。Man 等^[50]突破稀释剂“仅稀释不参与”的传统认识，引入低还原电位的苯甲醚衍生物（pMA），实现 SEI 膜精准重构。LUMO 分析表明 pMA 优先于基础溶剂还原分解（图 6（a））。冷冻电镜（Cryo-TEM）与选区电子衍射（SAED）揭示其双层 SEI 结构：外层为非晶态柔性聚合物层，缓冲循环应力；内层为富含结晶态 Li_2O 的致密无机相（图 6（b）），有效阻断阻燃溶剂对电极的侵蚀。这一“外柔内刚”的设计使 $\text{Li}||\text{LFP}$ 电池在长周期循环后的容量保持率提升至 95.4%（图 6（c）），验证了功能化稀释剂在 LHCE 界面改性中的关键作用。

然而，LHCE 体系仍存在典型的相容性缺陷，高氟稀释剂与极性基础溶剂之间极性差异较大，极易引发相分离，制约体系电化学性能发挥。针对该瓶颈，Chen 等^[51]提出“分子桥梁”策略，引入两亲性阴离子 BETI^- ，通过其磺酰亚胺头端与醚类溶剂的氢键作用，以及长氟烷基链与氟化稀释剂（TMMP）的氟亲和作用，实现分子级相容（图 7（a））。该策略不仅消除了相分离，还诱导界面原

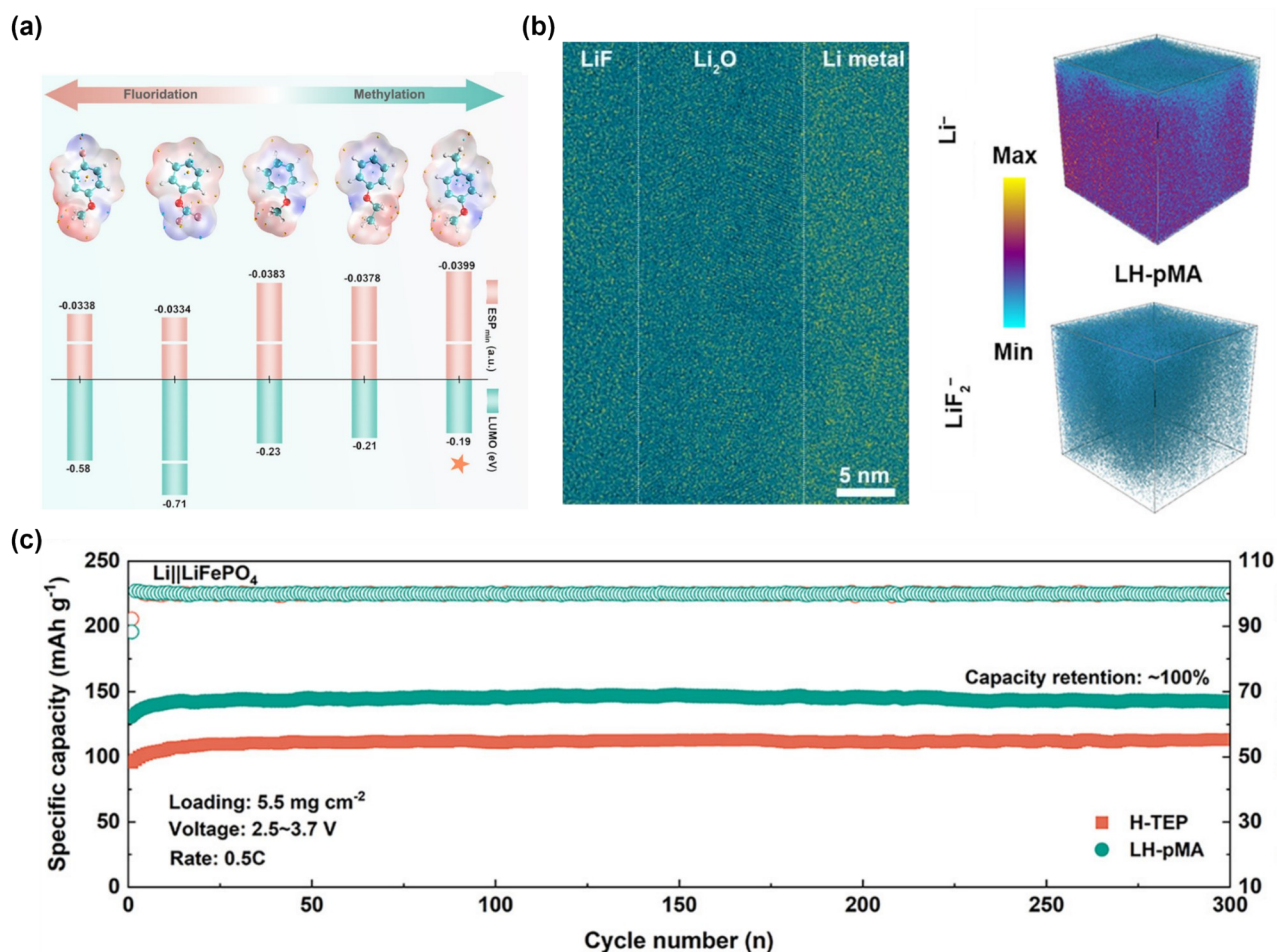


图6 (a) 稀释剂分子的ESP图谱、ESP最小值以及LUMO能级; (b) 在LH-pMA中形成的SEI高分辨冷冻电子显微镜图像和锂金属在LH-pMA中的沉积产物三维分布; (c) Li||LFP电池在H-TEP和LH-pMA中的循环性能^[50]

Fig. 6 (a) ESP maps, ESP minimum values, and LUMO energy levels of the diluent molecules; (b) high-resolution cryo-electron microscopy image of the SEI formed in LH-pMA and three-dimensional distribution of lithium deposition products in LH-pMA; (c) cycling performance of Li||LFP cells with electrolytes of H-TEP and LH-pMA^[50]

位生成富含LiF的致密钝化层,使锂沉积/剥离过程库仑效率(CE)高达99.53%,Li||NCM811电池循环200圈容量保持率89.31%(图7(b)),并推迟热失控的起始温度、降低热失控峰值温度(图7(c)),实现电化学与热安全性的协同提升。此外,该策略与螯合溶剂(如DGDE)竞争配位排挤阻燃分子思路互补,共同完善了LHCE电解液界面调控与动力学优化的理论体系,为高性能阻燃LHCE的结构设计提供了多元化指导。

随着对溶剂化机理认识的深化,LHCE的设计思路进一步迭代为“无稀释剂”的弱溶剂化电解液(Weakly Solvating Electrolyte, WSE),从根本上规避稀释剂相容性问题。Zhou等^[43]提出一种基于

单一氟代溶剂FEMC的弱配位体系,密度泛函理论(DFT)计算显示,FEMC与Li⁺的结合能仅为-1.74 eV,其弱溶剂化特性显著削弱溶剂竞争配位,使大量阴离子在常规锂盐浓度下即可进入Li⁺的第一溶剂化壳层,形成阴离子聚集体(AGG)主导的溶剂化结构。该结构具备双重优势:降低去溶剂化能垒以优化界面离子传输动力学;诱导生成富含LiF的致密CEI膜以稳固高压正极界面。在线电化学质谱(DEMS)测试证实,该CEI膜有效抑制了高压下电解液的氧化分解,减少O₂与CO₂副产物。锂金属电池的高压循环稳定性因而大幅提升。上述系列研究表明:无论引入功能化稀释剂,还是采用单一弱配位溶剂,精准调控微观配位环境均可

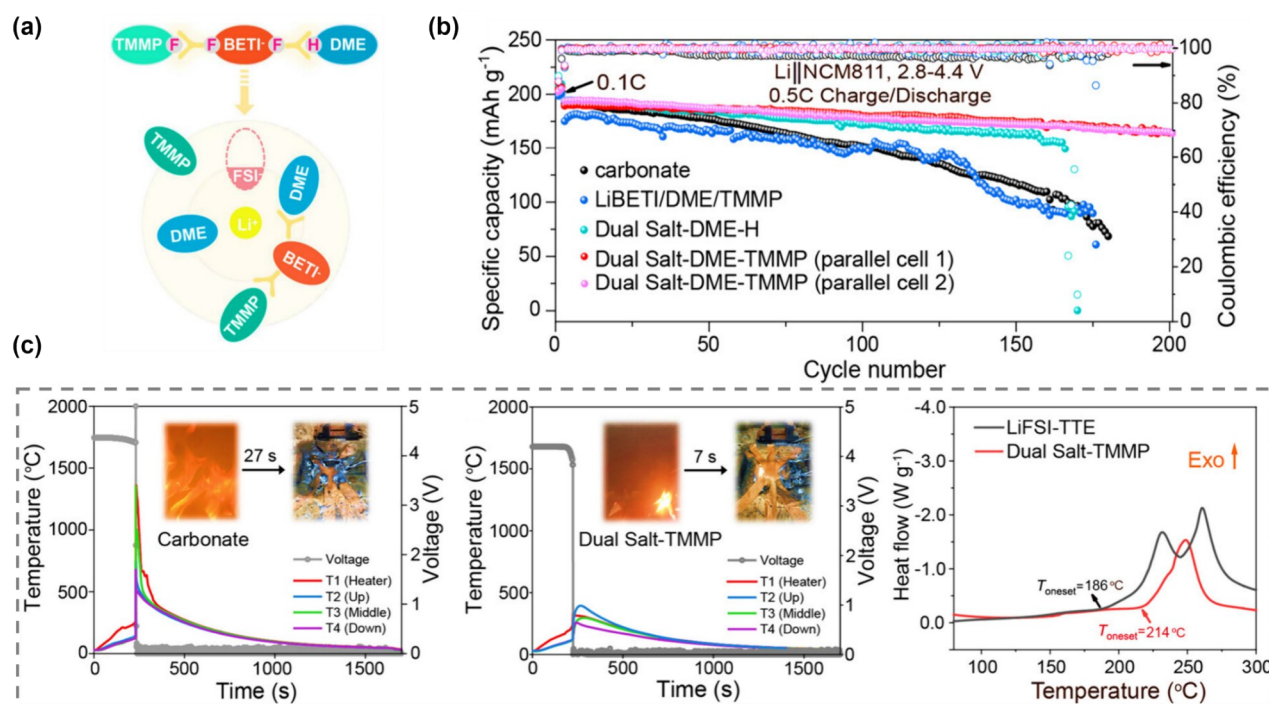


图7 (a) 双盐-TMMP电解液的溶剂化结构；(b) 30 °C时，4.4 V高截止电压下的Li||NCM811电池的循环性能；(c) 使用不同电解液的Li||NCM811软包电池在热失控过程中的温度和电压曲线和不同电解液体系中未充电的NCM811的DSC热谱图^[51]

Fig. 7 (a) Solvation structure of the dual-salt TMMP electrolyte. (b) Cycling performance of Li||NCM811 cells with a high cutoff voltage of 4.4 V at 30 °C. (c) Temperature and voltage profiles of Li||NCM811 pouch cells during thermal runaway using different electrolytes, and DSC thermograms of uncharged NCM811 with different electrolytes^[51]

突破阻燃体系在热安全、离子传输动力学与高压界面稳定性之间的固有限制，实现多维性能协同优化。

4.3 浓度调控策略的优势与挑战

综上，浓度与配位调控策略通过精准重构Li⁺溶剂化结构，为突破阻燃电解液热稳定性不足、界面动力学迟滞提供了新思路。从HCE消除自由溶剂、LHCE引入惰性稀释剂到WSE摒弃稀释剂，其核心共性在于诱导阴离子聚集体(AGG)主导的配位结构，其功能收益具有两面性：一方面原位构筑富无机界面膜，从热力学上抑制燃烧分解并推迟热失控；另一方面，高去溶剂化能垒在大倍率瞬态脉冲(>10 C)下引发严重界面极化，且氟化组分成本高昂、长周期产气积聚等问题，制约了其在eVTOL场景的实际应用。因此，未来方向应聚焦于兼具低粘度与低成本的极弱配位溶剂设计，在确保本征热安全的前提下，最大限度降低去溶剂化能垒，提升大倍率下界面离子传输与电化学可逆性，以满足航空动力电池的严苛标准。

5 宏观相态调控与主动安全防御策略

液态电解液的化学改性(添加剂、共溶剂、溶剂化调控)虽能提升本征安全，却无法消除体系固有的流动性、易泄漏及高温产气等物理缺陷，难以满足eVTOL在极端温差、高倍率放电、机械振动乃至碰撞坠毁等复杂工况下的安全需求。因此，须从电解质宏观形态与刺激响应行为出发，构筑更高层级的物理安全防护体系。

5.1 凝胶聚合物电解质:物理锁液与界面稳定化的协同效应

凝胶聚合物电解质(Gel Polymer Electrolyte, GPE)通过三维聚合物骨架锁住液态阻燃溶剂，消除泄漏风险，并结合物理屏蔽与化学重塑提升安全性。当前的研究重心已从液相阻燃剂的物理负载，转向骨架本征阻燃设计与仿生调控。在骨架分子工程方面，引入阻燃功能单体构筑本征安全的交联网络，是提升GPE热稳定性的底层策略。王晨蕾等^[26]以磷酸酯结构的交联剂(PDMA)替代含醚交联

剂,利用磷元素的催化成炭作用,在 500°C 下热解生成含 LiPO_3 与 $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 的致密无机残炭层,有效阻隔热质传递。SET测试结果表明(图8(a-b)),相较于遇火即燃的传统凝胶电解质体系,该本征阻燃凝胶具备优异的抗燃特性。电化学测试表明(图8(c-d)),改性凝胶体系将 $\text{Li}||\text{NCM811}$ 电池 0.5 C 首圈放电比容量由 134.3 mAh/g 提升至 165.7

mAh/g ,且在 $\text{Li}||\text{LFP}$ 体系中循环了280圈后,容量保持率仍可达91.2%,展现出优异的循环稳定性。此外,张结雨等^[27]在凝胶前驱体中引入高体积分数的氟代醚(HFE),通过氟醚与骨架协同实现自熄阻燃并抑制多硫化物穿梭。基于环状磷腈衍生物(PAL)的原位聚合阻燃凝胶网络^[52]则表明,低添加量阻燃骨架即可显著拓宽体系的电化学稳定窗口。

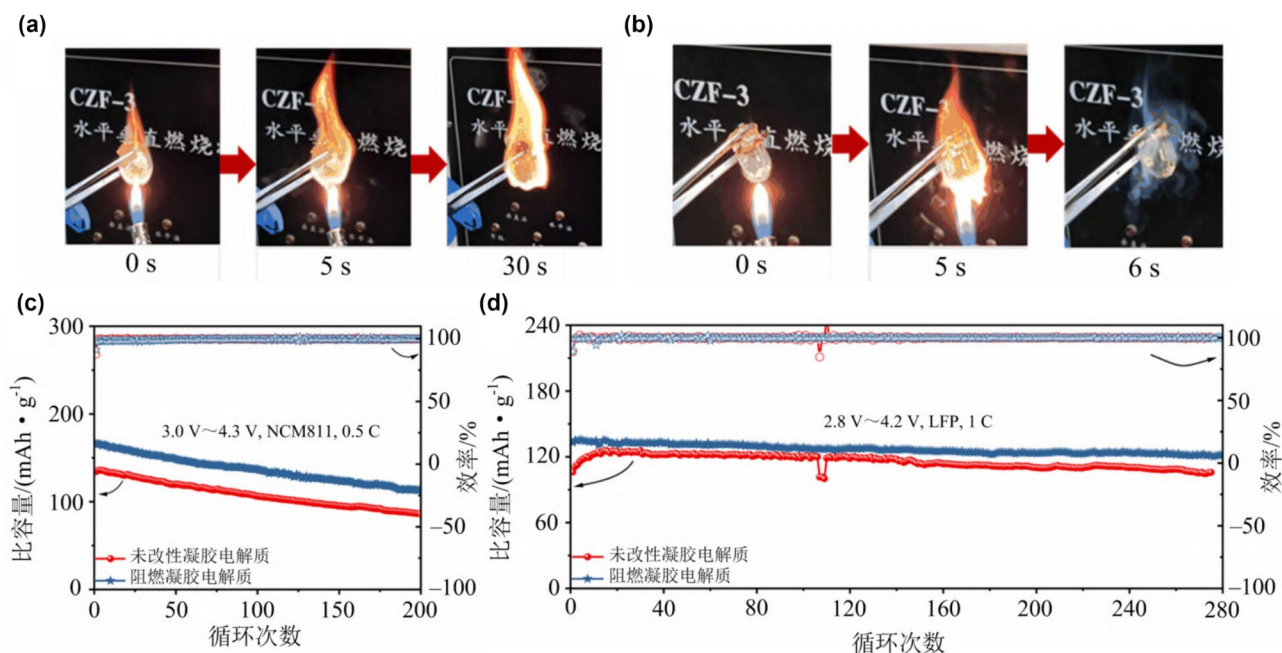


图8 (a)未改性凝胶电解质和(b)阻燃凝胶电解质的燃烧测试照片;(c)不同电解质的 $\text{Li}||\text{NCM811}$ 半电池的循环性能;(d)不同电解质的 $\text{Li}||\text{LFP}$ 半电池的循环性能^[26]

Fig. 8 (a) Combustion test photographs of unmodified gel electrolyte and (b) flame-retardant gel electrolyte. (c) Cycling performance of $\text{Li}||\text{NCM811}$ half-cells with different electrolytes. (d) Cycling performance of $\text{Li}||\text{LFP}$ half-cells with different electrolytes^[26]

除化学改性外,微观物理构型的仿生调控是提升GPE机械韧性与本征安全性的关键路径。 Li 等^[53]通过反溶剂诱导自组装构筑“仿生皮肤”双连续网络,在微观尺度限域封装液态阻燃组分,赋予电解质高断裂韧性与动态自愈合能力,有效缓冲机械振动与形变冲击。针对准固态体系界面兼容性问题, Xu 等^[54]结合F/N界面工程,在电极表面诱导生成致密无机钝化层。这种“宏观仿生架构-微观界面定制”的协同策略,不仅实现了高比能电池宽温域热稳定性,更强化了界面力学支撑,凸显了多功能一体化GPE在下一代航空动力电池中的应用潜力。

5.2 复合固态电解质:高安全的本征防线

相较于含部分液态塑化剂的凝胶体系,固态电解质(Solid-State Electrolyte, SSE)通过彻底移

除可燃组分,构筑了本征热屏障。但其室温离子电导率低、高温易流变,制约了eVTOL应用。当前研究主要通过功能填料引入与分子链段工程协同改性实现性能突破。针对聚环氧乙烷(PEO)基固态体系的热失效问题,徐宇等^[55]开发了由改性埃洛石纳米管(AM-HNTs)调控的含氟阻燃复合固态电解质。AM-HNTs的中空管状结构可锚定阴离子并促进锂盐解离,同时发挥F-Al-Si多元素协效阻燃作用,使复合材料热释放速率峰值(PHRR)与总热释放量(THR)较纯PEO分别降低分别降低71.51%和27.73%,为eVTOL满充态热失控提供可靠的热阻隔。在分子设计层面,一种新型非燃聚合物电解质(F-HV)展现出优异的综合电化学性能^[56]。该设计利用氟化主链赋予体系极高的耐氧化

电位 ($4.9 \text{ V vs. Li}^+/\text{Li}$) (图 9 (a)), 同时通过接枝碳酸酯柔性侧链加速离子的链段跃迁传输, 使其室温离子电导率跃升至 1.97 mS/cm (图 9 (b)), 且在 200°C 下保持结构稳定 (图 9 (c))。使用该改性电解质的电池经受弯折、针刺、切割后仍然能够正常工作, 表现出优异的安全性能 (图 9 (d))。进一步地, Liu 等^[57]受植物细胞壁启发, 利

用生物基大分子的交联纤维网络构筑仿生 SSE, 兼具机械刚性与连续离子通道, 改善固-固界面接触, 同时利用生物基组分高热分解阈值维持高镍三元正极在热滥用下的结构完整性。上述研究表明, 分子链段改性与微观仿生架构的耦合, 可实现 SSE 离子传导、力学性能与本征热安全的多维协同优化。

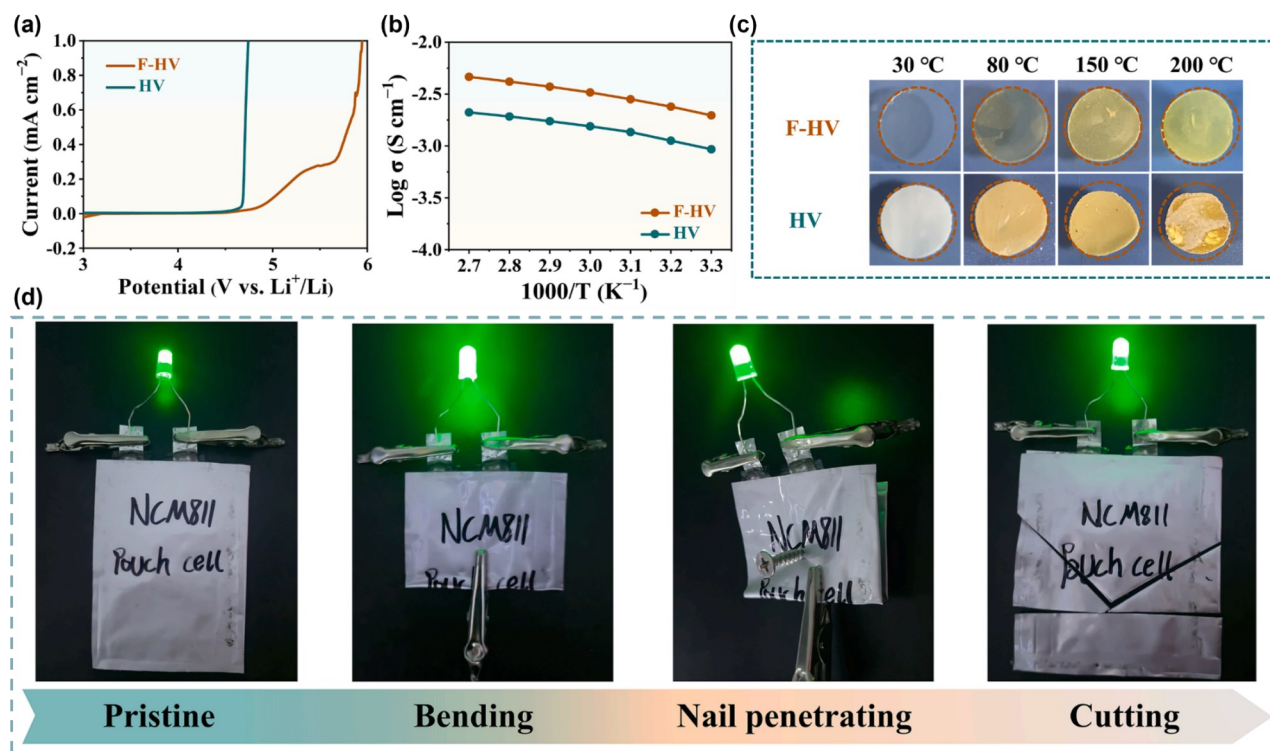


图 9 (a) F-HV 和 HV 的 LSV 曲线; (b) F-HV 和 HV 在不同温度下的离子电导率; (c) F-HV 和 HV 在不同温度下的稳定性测试; (d) 使用 F-HV 电解质的 Li||NCM811 软包电池在弯折、针刺和切割前后点亮绿色 LED 灯的照片^[56]

Fig. 9 (a) LSV curves of F-HV and HV. (b) Ionic conductivities of F-HV and HV at different temperatures. (c) Stability tests of F-HV and HV at different temperatures. (d) Photographs of a Li||NCM811 pouch cell using F-HV electrolyte lighting a green LED lamp before and after bending, nail penetration, and cutting^[56]

5.3 智能响应型电解质：从“被动阻燃”到“主动防御”

针对低空飞行器极低容错率要求, 凝胶与固态电解质的静态防御难以应对突发机械/热滥用, 亟需引入智能响应机制以构建主动安全防御体系。热刺激瞬态响应技术是代表性方案之一。Yang 等^[58]提出极速热响应固化电解液策略, 利用电解液中本征的路易斯酸 (如 LiPF_6 热分解产生的 PF_5) 作为引发剂, 当电池内部异常升温至接近隔膜熔点 (约 $100\sim 150^\circ\text{C}$) 时, 瞬间触发单体 (TEGDVE) 的阳离子聚合 (图 10 (a))。该“液-固”相变在数秒内即可完成, 将易燃组分原位锁入交联网络,

并在正负极间构筑绝缘聚合物屏障。针刺与加热滥用测试的温度-时间曲线 (图 10(b)) 及温升速率曲线 (图 10(c)) 显示, 该策略有效阻断热失控链式反应, 将电池温度限制在安全阈值内。

相较于上述不可逆热固化体系的单次防御局限, 可逆热开关 (Temperature-switchable) 机制通过自适应相变实现了电池的闭环热管理。Sang 等^[59]利用聚甲基丙烯酸苯基乙酯在离子液体中的低临界溶液温度效应, 构建智能电解质体系。在常规服役温度下, 该聚合物处于完全溶解状态, 体系呈均相液态确保离子传输; 当温度超过 85°C 阈值时, 聚合物因亲/疏水性突变发生相分离并在电极表面

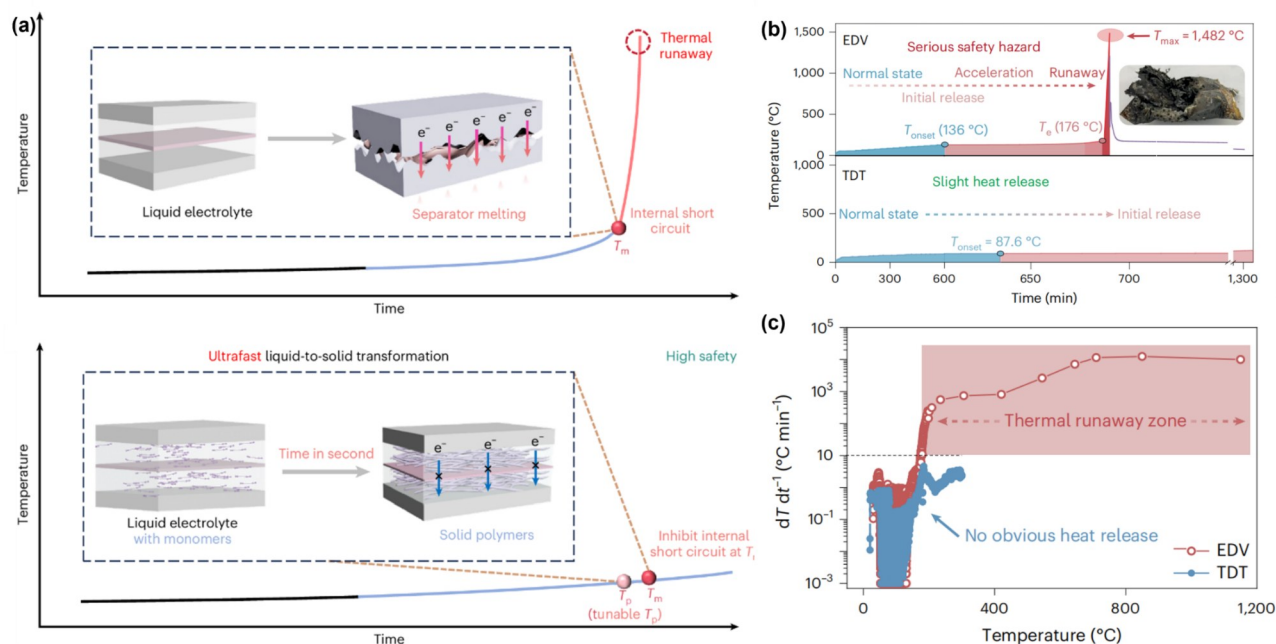


图10 (a) 在热滥用条件下传统碳酸盐电解液和智能电解液的超快速热响应转变示意图；不同电解液的LFP||Li软包电池在完全充电状态下的ARC测试的(b)温度时间曲线(c)自放热后的 dT/dt - T 曲线^[58]

Fig. 10 (a) Schematic illustration of ultra-fast thermal-responsive transition of conventional carbonate electrolyte and smart electrolyte under thermal abuse conditions. (b) Temperature-time profiles from ARC tests of LFP||Li pouch cells with different electrolytes at fully charged state; (c) dT/dt - T curves after self-heating onset^[58]

析出，形成高阻抗阻隔层以切断法拉第反应。随着电池温度回落，沉积的聚合物可逆向重新溶解，体系电化学活性得以无损恢复。这种可逆的热反馈机制，为应对eVTOL高倍率瞬态脉冲发热提供了精准的动态防护策略。

5.4 微胶囊封装与触发释放型阻燃体系

微胶囊封装技术为阻燃电解液的主动安全设计提供了补充路径：将高活性阻燃剂封装于热/力学响应性聚合物壳层内，常态下隔离其与电极/电解液界面，避免损害离子传输及SEI/CEI稳定性；异常升温或机械破坏时，壳层熔融/破裂释放阻燃剂，通过自由基捕获、稀释可燃组分或抑制电解液分解，实现触发式防护。

Yim等^[60]将温度响应型灭火微胶囊引入锂离子电池内部，在热滥用或针刺条件下可降低电池温升并延缓热失控。Baginska等^[61]将磷酸酯类阻燃剂三(2-氯乙基)磷酸酯封装于聚脲甲醛核壳微胶囊中，验证了其在电解液环境中的稳定性及高温释放特性。Chen等^[62]对比了无机/有机阻燃剂微胶囊化效果，表明该策略可缓解阻燃剂对电化学性能的不利影响，同时增强热安全性。综上，微胶囊技术借助

核壳空间限域减少常态下阻燃剂对电化学窗口及界面稳定性的干扰，在热/机械滥用时释放有效组分，提供额外安全裕度。但其规模化应用仍面临工程瓶颈：壳层材料长期化学兼容性及其界面副反应尚待阐明；囊壁破裂阈值与热失控触发温度的精确匹配存在困难；微胶囊粒径均一性及在大容量电芯中分散稳定性直接影响防护一致性。未来研究需超越“封装-释放”单一路径，探索与本征不燃电解液、凝胶锁液介质及BMS预警算法的多尺度协同，构建涵盖“预防-响应-阻隔”全链条的低空飞行安全冗余体系。

6 总结与展望

6.1 总结

面向低空经济的eVTOL动力电池要求“零热失控”安全底线，传统易燃电解液成为关键技术瓶颈。本文系统梳理了阻燃电解液的发展脉络，其演进趋势呈现从阻燃剂微量修饰向本征阻燃体系重构、从被动延缓热失控向主动切断热失控的转变。如图11所示，当前研究可归纳为四类路径：阻燃

添加剂借助自由基捕获、界面成膜及锂盐稳定提升热安全性，兼容性强但阻燃效率受限于添加量，过量引入则损害离子传输与界面稳定性；本征不燃共溶剂通过提高磷酸酯、氟代溶剂或离子液体比例降低可燃性，有利于高压正极体系，却面临粘度上升、成本增加及负极兼容性不足等挑战；溶剂化结构调控（HCE/LHCE/WSE）从 Li^+ 配位环境入手，减少自由溶剂并诱导阴离子参与成膜，改善热稳定性和SEI/CEI韧性，其中LHCE与WSE进一步缓解高浓度体系的动力学瓶颈，但配方窗口、浸润性及规模化成本仍需突破；凝胶/固态电解质及智能响应体系则面向振动、冲击与异常升温等复杂工况，通过固态化界面阻隔或热/力触发释放阻燃剂

提供安全冗余，然而界面阻抗、响应阈值精准匹配及长期循环一致性仍是工程化关键制约。从短期产业化角度看，阻燃添加剂（特别是复合添加剂体系）因与现有产线兼容性最强、成本最低，是最易快速落地的方案；从中期看，本征不燃共溶剂（特别是氟代碳酸酯体系）和LHCE体系在安全性与电化学性能的平衡上最具潜力，但需解决成本与动力学瓶颈；从长期看，凝胶/固态电解质与智能响应体系代表了“主动防御”的方向，潜力最大但工程化挑战也最为严峻（表1）。四类路径各有适用场景与局限，未来需在材料兼容性、触发灵敏度与系统集成层面深化协同，方能支撑低空飞行器对电池安全的全链条需求。



图11 面向低空飞行器动力电池的阻燃电解液设计策略、作用机制、性能优势及现阶段局限^[29, 31, 50, 58]

Fig. 11 Design strategies, mechanisms, performance advantages, and current limitations of flame-retardant electrolytes for power batteries in low-altitude aircraft^[28, 30, 49, 57]

6.2 未来发展展望

尽管阻燃电解液技术已取得长足进展，但面向eVTOL载具全天候、全工况、零热失控的航空级安全标准，现有体系在动力学适配性、环保性及系统级协同防护方面仍存在显著短板，亟待从以下维度突破。

1) 突破“宽温域-极快充”动力学瓶颈。现有体系低温粘度高、去溶剂化能垒大，亟需开发低熔

点、高闪点的新型弱溶剂化溶剂，从分子层面优化 Li^+ 溶剂化/去溶剂化行为，拓宽温度适配区间与功率输出上限，实现极致安全与超高动力性能的统一。

2) 探索无氟化绿色可持续体系。当前主流方案高度依赖含氟组分，环境持久性与生态毒性难以满足低碳产业要求。应着力研发低氟乃至无氟阻燃电解液，并挖掘纤维素等生物基大分子潜力，构筑

表 1 面向低空飞行器应用的阻燃电解液设计策略横向比较

Table 1 A Comparative Analysis of Design Strategies for Flame-Retardant Electrolytes in Low-Altitude Aircraft Applications

设计策略	阻燃效果-离子传输、界面兼容	工艺成本	低空飞行器适用性
阻燃添加剂	阻燃效率与添加量正相关，高添加量劣化传输与界面	改动小，易导入现有液态电解液体系，成本相对可控	可作为基础安全方案，但难以单独满足航空级高需求
本征不燃共溶剂	阻燃效果显著，但粘度升高、低温性能下降、负极兼容性存忧	配方变化较大，部分氟代溶剂和离子液体成本较高	适合高安全软包电池，但需兼顾宽温域和大倍率输出
HCE/LHCE/WSE 溶剂化调控	阻燃性与高压稳定性提升，浸润性与倍率性能仍受限	盐和特种稀释剂成本较高，规模化配方窗口窄	适合高比能和高压体系，是兼顾安全与动力学的重要方向
GPE/SSE 相态调控	安全冗余高，但室温电导率低、界面阻抗大、接触不良	制备工艺复杂，对规模化一致性和界面工程要求高	适合振动、冲击和碰撞风险较高的低空服役场景
智能响应与封装释放	主动防御，触发阈值、长期稳定性与分散均匀性待验证	体系设计复杂，工程可靠性和成本控制仍待突破	适合作为冗余安全层，与BMS、隔膜和热管理系统协同使用

绿色本征安全的凝胶/固态骨架，推动体系向低碳化、可持续转型。

3) AI赋能高通量分子设计。传统试错法效率低下，亟需引入机器学习与分子动力学模拟，通过高通量筛选与反向精准设计，开发兼具阻燃、界面兼容及宽温动力学协同的多功能分子，提升研发效率与适配精度。

4) 构建跨尺度全局协同防御体系。单点材料改性难以应对复合失效场景，须推动阻燃电解液与SEI自修复、热响应隔膜、BMS预警算法的深度联动，形成电池系统级主动安全防御网络，全面适配低空载具极端服役工况。

参 考 文 献

[1] 郝金星, 董琳, 王楚男, et al. 中国低空经济研究的进展、热点与发展趋势——基于大语言模型和可视化文献计量法的分析 [J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2026, 39(01): 83-97.
HAO Jinxing, DONG Lin, WANG Chunan, et al. Progress, Hotspots, and Development Trends of Low-altitude Economy Research in China: An Analysis Based on Large Language Models and Visual Bibliometric Methods [J]. Journal of Beihang University (Social Science Edition), 2026, 39(01): 83-97. (in Chinese)

[2] 张晓兰, 黄伟熔. 低空经济安全监管的国际经验及启示 [J]. 北京行政学院学报: 1-10.
ZHANG Xiaolan, HUANG Weirong. International Experience and Enlightenment of Low-altitude Economic Security Regulation [J]. Journal of Beijing Administrative College: 1-10. (in Chinese)

[3] 王姣娥, 杜德林, 陈卓, et al. 中国低空经济发展指数评估与未来展望 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(10): 1867-77.
WANG Jiao'e, DU Delin, CHEN Zhuo, et al. Evaluation and Future Outlook of China's Low-altitude Economic Development Index [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2025, 40 (10): 1867-77.(in Chinese)

[4] 梁小婧. · 比克电池:三高一快一长 开启 eVTOL 动力"芯"时代[EB/OL]. (2024-05-30) [2026-04-18]. <https://www.inewenergy.com/newsn/gongsi/42397.html>.
LIANG Xiaoqing. "BAK Battery: Three Highs, One Fast, and One Long, Ushering in the 'Core' Era of eVTOL Propulsion" [EB/OL]. (2024-05-30) [2026-04-18]. <https://www.inewenergy.com/newsn/gongsi/42397.html>.(in Chinese)

[5] 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年) [J]. 中国军转民, 2024, (22): 6-8
Implementation Plan for Innovative Application of General Aviation Equipment (2024-2030) [J]. China Military to Civilian, 2024, (22): 6-8.(in Chinese).

[6] 工业和信息化部装备工业发展中心. 低空航空器动力电池技术路线图(2025版)[R]. 鄂尔多斯:2025低空装备产业创新发展大会, 2025.
Equipment Industry Development Center, Ministry of Industry and Information Technology. Low-altitude Aircraft Power Battery Technology Roadmap (2025 Edition) [R]. Ordos: 2025 Conference on Innovation and Development of Low-altitude Equipment Industry, 2025. (in Chinese)

[7] Wide-Temperature Range Battery: Applications for Extreme Environments[EB/OL]. (2025-02-13) [2026-04-18]. <https://www.neware.net/news/wide-temperature-range-battery-applications-for-extreme-environments/230/117.html>.

[8] BELHAROUAK I, DIXIT M, BISHT A, et al. (Invited) Assessment of Extreme High-Power Demand for Evtol Li-Ion Batteries [J]. ECS Meeting Abstracts, 2024, MA2024-02(1): 29.

[9] AYYASWAMY A, VISHNUGOPI B S, MUKHERJEE P P. Revealing hidden predicaments to lithium-ion battery dynamics for electric vertical take-off and landing aircraft [J]. Joule, 2023, 7 (9): 2016-34.

[10] YANG X-G, LIU T, GE S, et al. Challenges and key requirements of batteries for electric vertical takeoff and landing aircraft [J]. Joule, 2021, 5(7): 1644-59.

[11] SHA Z, GAO Z, SHENG Y, et al. A Phenoplast-based Structural Electrolyte with High Ionic Conductivity for Fire-Resistant Energy Storage Composites [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(38): 53972-87.

- [12] 许高洁, 王晓, 陆迪, et al. 锂离子电池高安全性阻燃电解液研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2018, 7(06): 1040-59.
XU Gaojie, WANG Xiao, LU Di, et al. Research progress on high-safety flame-retardant electrolytes for lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(06): 1040-59. (in Chinese)
- [13] BISHT A, AMIN R, DIXIT M, et al. Impact of cycling conditions on lithium-ion battery performance for electric vertical takeoff and landing applications [J]. Journal of Power Sources, 2024, 602.
- [14] SABEEL K, AL-GREER M, BASHIR I. Advancements in Vibration Testing: Effects on Thermal Performance and Degradation of Modern Batteries [J]. Batteries, 2025, 11(2).
- [15] LIU M, SONG A, ZHANG X, et al. Interfacial lithium-ion transportation in solid-state batteries: Challenges and prospects [J]. Nano Energy, 2025, 136: 110749.
- [16] KAUSTHUBHARAM K, AYYASWAMY A, VISHNUGOPI B S, et al. Stripping Behavior of Solid-State Batteries Under Dynamic Discharge Loads for Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft [J]. ECS Meeting Abstracts, 2025, MA2025-02(3): 574.
- [17] DIXIT M, BISHT A, WITHERSPOON B, et al. Battery Electrolyte Design for Electric Vertical Takeoff and Landing (eVTOL) Platforms [J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(29): 2400772.
- [18] 胡科翔, 张鸿飞, 谭志雄. eVTOL 典型场景应用的研究进展和演变态势——基于 Meta 分析与 LDA 主题建模的双重验证 [J]. 资源科学, 2025, 47(08): 1702-17.
Hu Kexiang, Zhang Hongfei, and Tan Zhixiong. Research progress and evolution trend of eVTOL typical scenario applications: based on dual verification of Meta-analysis and LDA topic modeling [J]. Resources Science, 2025, 47(08): 1702-17. (in Chinese)
- [19] 牟思宇, 尤帅, 谢宇斌, et al. 低空经济驱动锂离子电池产业链发展的现状与前景展望 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2025, (07): 182-93.
MOU Siyu, YOU Shuai, XIE Yubin, et al. Current Status and Prospects of the Development of the Lithium-Ion Battery Industry Chain Driven by the Low-Altitude Economy [J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2025, (07): 182-93. (in Chinese)
- [20] 张小颂, 夏永高. 锂离子电池电解液的安全性研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2018, 7(06): 1016-29.
ZHANG Xiaosong, XIA Yonggao. Research progress on the safety of lithium-ion battery electrolytes [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(06): 1016-29. (in Chinese)
- [21] 刘焕蓉, 邹稼轩, 吕源, et al. 锂离子电池阻燃电解液添加剂研究进展 [J]. 能源研究与利用, 2024, (01): 26-32.
LIU Huanrong, ZOU Jiaxuan, LYU Yuan, et al. Research progress on flame-retardant electrolyte additives for lithium-ion batteries [J]. Energy Research and Utilization, 2024, (01): 26-32. (in Chinese)
- [22] GOND R, VAN EKEREN W, MOGENSEN R, et al. Non-flammable liquid electrolytes for safe batteries [J]. Materials Horizons, 2021, 8(11): 2913-28.
- [23] 王岩, 曹峰. 氟电液提升高能量密度电池的安全性能 [J]. 电池, 2025, 55(05): 1133-7.
WANG Yan, CAO Feng. Fluorinated electrolyte improves the safety performance of high-energy-density batteries [J]. Batteries, 2025, 55(05): 1133-7. (in Chinese)
- [24] 何孟雪, 李一涛, 刘亚涛, et al. 磷酸酯基阻燃电解液用于高安全锂硫电池 [J]. 工程科学学报, 2024, 46(04): 765-74.
HE Mengxue, LI Yitao, LIU Yatao, et al. Phosphate-based flame-retardant electrolyte for high-safety lithium-sulfur batteries [J]. Journal of Engineering Science, 2024, 46(04): 765-74. (in Chinese)
- [25] 曾子琪, 艾新平, 杨汉西, et al. 有机磷酸酯阻燃电解液的研究进展 [J]. 电化学, 2020, 26(05): 683-93.
ZENG Ziqi, AI Xinping, YANG Hanxi, et al. Research progress on organic phosphate flame-retardant electrolytes [J]. Electrochemistry, 2020, 26(05): 683-93. (in Chinese)
- [26] 王晨蕾, 阙永春, 桂宙. 本征型阻燃凝胶聚合物电解质的设计及其锂离子电池性能研究 [J]. 火灾科学(中英文), 2024, 33(04): 233-42.
WANG Chenlei, KAN Yongchun, GUI Zhou. Design of Intrinsic Flame-Retardant Gel Polymer Electrolyte and Its Lithium-Ion Battery Performance Research [J]. Fire Science (Chinese and English), 2024, 33(04): 233-42. (in Chinese)
- [27] 张结雨, 张顺, 李宁, et al. 阻燃凝胶聚合物电解质的制备及其性能研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(08): 2529-40.
ZHANG Jieyu, ZHANG Shun, LI Ning, et al. Preparation and properties of flame-retardant gel polymer electrolyte [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(08): 2529-40. (in Chinese)
- [28] GAO Z, TAN Q, ZHU L, et al. A Fully Flame-Retardant Electrolyte with Laminated SEI for Exceptionally Safe, Long-Life, and High-Voltage Lithium Metal Batteries [J]. Small, 2025, 21(22): 2500971.
- [29] WANG C, XIAO Y, CHEN G, et al. Nonflammable localized high-concentration electrolytes with 1, 3-dioxolane coordination regulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 525: 170477.
- [30] LI M, XU L, HE A, et al. Self-cleaning all-fluorinated nonflammable electrolyte for high-voltage and high-temperature Li||NCM811 batteries [J]. Energy Storage Materials, 2025, 77: 104208.
- [31] LIU M, LIU W, ZENG Z, et al. Chelating Solvent Mediated Solvation Structure Enables High-Rate Operation of Ah-Level Li-Ion Batteries in Nonflammable Phosphate Electrolyte [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(28): 2500864.
- [32] ZHANG Y, YUAN Z, XIE B, et al. Tailoring Anion-Enriched Solvation Structures in Phosphate-Based Electrolytes for Safety-Enhanced Lithium Metal Batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(39): 2504367.
- [33] WANG X, YASUKAWA E, KASUYA S. Nonflammable Trimethyl Phosphate Solvent-Containing Electrolytes for Lithium-Ion Batteries: I. Fundamental Properties [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2001, 148(10): A1058.
- [34] XU K, DING M S, ZHANG S, et al. An Attempt to Formulate Nonflammable Lithium Ion Electrolytes with Alkyl Phosphates and Phosphazenes [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2002, 149(5): A622.

- [35] ZHANG Z, HU L, WU H, et al. Fluorinated electrolytes for 5 V lithium-ion battery chemistry [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(6): 1806-10.
- [36] PHAM H Q, HWANG E-H, KWON Y-G, et al. Approaching the maximum capacity of nickel-rich $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathodes by charging to high-voltage in a non-flammable electrolyte of propylene carbonate and fluorinated linear carbonates [J]. *Chemical Communications*, 2019, 55(9): 1256-8.
- [37] NAOI K, IWAMA E, OGIHARA N, et al. Nonflammable Hydrofluoroether for Lithium-Ion Batteries: Enhanced Rate Capability, Cyclability, and Low-Temperature Performance [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2009, 156(4): A272.
- [38] ARAI J, KATAYAMA H, AKAHOSHI H. Binary Mixed Solvent Electrolytes Containing Trifluoropropylene Carbonate for Lithium Secondary Batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2002, 149(2): A217.
- [39] XIA L, MIAO H, ZHANG C, et al. Review—recent advances in non-aqueous liquid electrolytes containing fluorinated compounds for high energy density lithium-ion batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 38: 542-70.
- [40] ZENG H, CHEN C, XU C, et al. A bulky co-solvent enables multifunction electrolyte for batteries with layered Ni-rich cathodes: HF scavenging, flame retardant and wide-temperature operation [J]. *Nano Energy*, 2025, 141: 111121.
- [41] NI Z, LI Y, WANG Z, et al. Nonflammable F-rich high-entropy electrolytes with manipulated solvent coordination for intrinsically safe and high-energy lithium metal batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2026, 84: 104885.
- [42] TRAN Y H T, AN K, LIM G, et al. Preventing thermal runaway of high-nickel Li-ion battery through nonflammable carbonates-based electrolyte formulation [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2025, 164: 100980.
- [43] ZHOU D, WANG S, WEN J, et al. Nonflammable single-solvent electrolyte towards highly stable Li-rich Mn-based cathode materials [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(24): 18462-72.
- [44] 汪书苹, 杨献坤, 李昌豪, et al. 乙基膦酸二乙酯基阻燃宽温域电解液在锂离子电池中的应用 [J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(07): 2161-70.
WANG Shuping, YANG Xiankun, LI Changhao, et al. Application of Diethyl Ethylphosphonate-Based Flame-Retardant Electrolyte with Wide Temperature Range in Lithium-Ion Batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(07): 2161-70. (in Chinese)
- [45] MA C, FU C, CHANG S, et al. All-Climate and Nonflammable Electrolyte with a Strong Anion – Solvent Interaction for High-Performance Lithium Metal Batteries [J]. *ACS Energy Letters*, 2025, 10(4): 1700-11.
- [46] KANG D G, AN K, TRAN Y H T, et al. Tuning the electrolyte formulation from flame-retarding to nonflammable for safe and high-performance SiO_2 and high nickel-based cells [J]. *eTransportation*, 2026, 27: 100530.
- [47] REN S, ZHANG J, YU H, et al. Entropy-Driven Nonflammable Low-Temperature Alkali Metal Molten Salt Electrolytes for Lithium Metal Batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(7): e14953.
- [48] JIA H, BROEKHUIS B, XU Y, et al. Rational Electrolyte Design for Elevated-Temperature and Thermally Stable Lithium-Ion Batteries with Nickel-Rich Cathodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(4): 6260-70.
- [49] ZHAO D, CUI G, LIU W, et al. Nonflammable localized high-concentration phosphazene electrolytes for enhanced safety and interfacial stability in high-voltage lithium metal batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 537: 146884.
- [50] MAN Q, MU Y, YANG L, et al. Electron push – pull engineering enables sustainable, anti-corrosive, and nonflammable phosphate electrolytes for long-lifespan lithium – sulfur batteries [J]. *Energy & Environmental Science*, 2026, 19(3): 969-81.
- [51] CHEN L, FAN J, LUO X, et al. Molecularly Engineered Amphiphilic Anions Enable Flame-Retarding Fluorous Electrolytes for Lithium Metal Batteries [J]. *ACS Central Science*, 2026, 12(1): 63-74.
- [52] TU C-J, YANG T-C, CHEN X-H, et al. In-situ formed, nonflammable and electrochemical stable gel polymer electrolytes based on a phosphazene derivative for improving safety in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 656: 238099.
- [53] LI H, JING L, WEN G, et al. A Skin-Mimicked Polymer Gel Electrolyte for Stabilizing Lithium Metal Batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(23): 2405365.
- [54] XU L, LI M, HE A, et al. F/N interface engineering of nonflammable polymer electrolyte for wide-temperature quasi-solid-state Li metal batteries [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2026, 37(2): 111815.
- [55] 徐宇, 陈佳, 鲁珍, et al. 改性埃洛石调控的含氟阻燃 PEO 固态聚合物电解质的制备与性能 [J]. *塑料工业*, 2025, 53(07): 95-100.
XU Yu, CHEN Jia, LU Zhen, et al. Preparation and properties of fluorinated flame-retardant PEO solid polymer electrolyte regulated by modified halloysite [J]. *Plastics Industry*, 2025, 53(07): 95-100. (in Chinese)
- [56] WANG X, PAN D, XU L, et al. Fluorine and carbonate regulated nonflammable polymer electrolyte for ultrastable high-voltage Li metal batteries [J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 76: 104129.
- [57] LIU Y, YU Y, LIU Y, et al. Biobased Polymer Electrolyte with Plant Cell Wall-Inspired Architecture: Biomimetic Integration of Cellulose-Lignin for Nonflammable Cryogenic Lithium Batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(33): 2501737.
- [58] YANG C, HU W, ZHENG M, et al. Ultrafast thermo-responsive electrolyte for enhanced safety in lithium metal batteries [J]. *Nature Energy*, 2025, 10(12): 1493-502.
- [59] SANG C, LE K, CHEN K, et al. Temperature-switchable electrolyte with desirable phase transition behavior for thermal protection of lithium-ion batteries [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2025, 163: 100947.
- [60] YIM T, PARK M-S, WOO S-G, et al. Self-Extinguishing Lithium Ion Batteries Based on Internally Embedded Fire-Extinguishing

-
- Microcapsules with Temperature-Responsiveness [J]. Nano Letters, 2015, 15(8): 5059-67.
- [61] BAGINSKA M, SOTTOS N R, WHITE S R. Core-Shell Microcapsules Containing Flame Retardant Tris(2-chloroethyl phosphate) for Lithium-Ion Battery Applications [J]. ACS Omega, 2018, 3(2): 1609-13.
- [62] CHEN C-A, LI C-C. Microencapsulating inorganic and organic flame retardants for the safety improvement of lithium-ion batteries [J]. Solid State Ionics, 2018, 323: 56-63.