



超快热响应电解液设计提升锂金属电池安全性

杨超¹, 陆俊^{2*}, 尤雅^{1*}

1. 武汉理工大学材料复合新技术全国重点实验室, 武汉 430070

2. 浙江大学化学与生物工程学院, 杭州 310058

* 联系人, E-mail: junzoelu@zju.edu.cn; youya@whut.edu.cn

Ultrafast thermo-responsive electrolyte for enhanced safety in lithium metal batteries

Chao Yang¹, Jun Lu^{2*} & Ya You^{1*}

¹ State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

² College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

* Corresponding authors, E-mail: junzoelu@zju.edu.cn; youya@whut.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2025-5997

在“双碳”目标与全球能源格局调整的宏观背景下, 研发兼具高能量密度与高安全性的电化学储能技术, 已成为我国能源体系变革与产业升级的关键任务。锂金属电池(lithium metal batteries, LMBs)凭借其负极高达3860 mAh g⁻¹的理论容量, 被认为是突破现有锂离子电池能量密度限制的核心技术路径。近年来, 我国相继出台《“十四五”能源领域科技创新规划》《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》等政策, 均将高安全、高比能储能电池技术列为重点攻关方向, 并视其为战略性新兴产业与前沿科技领域。由此可见, 实现LMBs从实验室向产业化跨越, 不仅对提升新能源汽车产业竞争力至关重要, 也是维护国家能源安全、促进绿色低碳转型的重要基石。

然而, LMBs的商业化进程长期受制于严峻的安全隐患。其安全挑战主要源于两方面^[1-4]: 一是金属锂负极的高化学活性, 易与有机电解质发生副反应, 产热严重; 二是目前广泛使用的碳酸酯类液态电解质易燃、易挥发, 且在高温下化学稳定性差。特别是当电池因内部故障或外部热冲击导致温度异常升高时, 电池内部的聚烯烃隔膜(如聚乙烯PE、聚丙烯PP)会率先熔融(熔点通常位于130~160°C)^[5]。隔膜的失效使得正负极直接接触, 引发剧烈的内部短路, 瞬间释放大热量, 并触发电解质分解、正负极材料放热等一系列连锁放热反应, 最终导致热失控, 表现为温度急剧飙升、起火甚至

爆炸^[6]。

为了防止热失控, 学术界和工业界一直在探索多种安全策略。其中, 智能温度响应材料被视为一种极具前景的解决方案。其核心思想是电池温度升高至危险阈值时, 材料发生物理或化学变化, 阻断离子传输和短路电流, 抑制热量进一步累积与传播。然而, 开发出满足实际应用需求的智能电解质体系仍面临三大关键挑战: 第一, 响应速度太慢。很多情况下, 从隔膜开始软化到完全失效引发短路的时间窗口极短^[7]。现有许多热响应体系需要数分钟甚至更长时间, 无法有效拦截初始阶段的热失控。第二, 响应温度不可调。材料的响应温度既不能太低, 影响电池工作温区, 又不能高于隔膜熔融温度而失去阻隔效果。因此, 响应温度最好控制在接近隔膜熔融温度之前, 同时还可以和多种不同熔融温度的隔膜匹配。第三, 电化学性能与热安全性能无法兼顾。多数具备热响应(如相变阻隔、电导率突变)的智能材料, 其本征离子/电子电导率偏低, 引入后易牺牲电池倍率性能与能量密度^[8]。

最近, 我们团队提出了一种超快热响应的电解液^[9], 就像给锂电池装上了一把“智能安全锁”, 既能保证电池的高性能, 又能从根本上解决高温安全隐患(图1(a))。这种智能电解液, 是通过溶解2 mol/L双三氟甲烷磺酰亚胺锂(LiTFSI)、0.5 mol/L硝酸锂和10 mmol/L LiPF₆的锂盐于三乙二醇二烯基醚(TEGDVE)、1,2-二氟苯和三甘醇二甲醚的混合溶剂

引用格式: 杨超, 陆俊, 尤雅. 超快热响应电解液设计提升锂金属电池安全性. 科学通报, 2026, 71: 2334–2336

Yang C, Lu J, You Y. Ultrafast thermo-responsive electrolyte for enhanced safety in lithium metal batteries (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2334–2336, doi: 10.1360/CSB-2025-5997

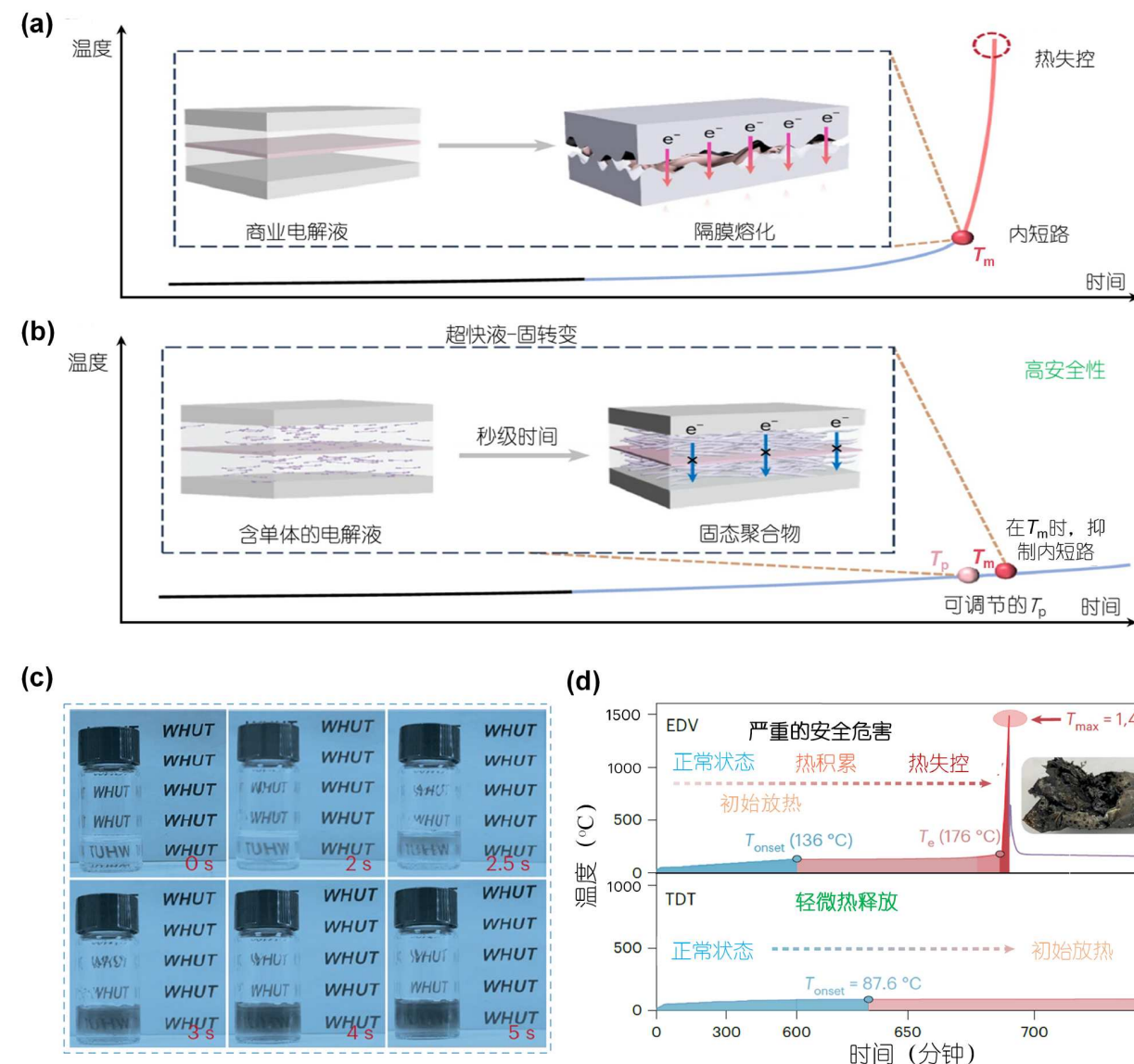


图1 (网络版彩色)(a, b) 高安全锂金属电池的设计策略。(a) 碳酸酯电解液在热滥用条件下的热失控过程以及(b) 用于防止热失控的锂金属电池中温度响应电解液的设计。在滥用条件下, 使用传统碳酸酯电解液的电池会从正常状态(黑线)、缓慢产热(蓝线)转变为热失控(红线)。(c) 高速摄像机记录了在140°C下TDT电解液的状态变化情况。(d) LFP||Li软包电池在满充态下进行的ARC测试获得的温度-时间($T-t$)曲线, 从50°C温度开始升高至300°C, 以5°C min^{-1} 的升温速率进行测试, 并在每个温度步骤上保持30 min^[9]

Figure 1 (Color online) (a, b) The design strategy for highly safe LMBs. Schematic illustration showing the thermal runaway process in carbonate electrolytes under thermal abuse conditions (a) and the design of a thermalresponsive electrolyte in LMBs for preventing thermal runaway (b). Under abusive conditions, batteries using traditional carbonate electrolytes would undergo a transition from a state of normal (black line), heat generation (blue line) into thermal runaway (red line). (c) The highspeed camera images showing the TDT electrolyte state change at 140°C. (d) Temperature-time ($T-t$) curves of ARC tests for LFP||Li pouch cells at a fully charged state, increasing from 50°C to 300°C at 5°C min⁻¹ and held at each step for 30 min^[9]

中配制而成(体积比为3:2:5, 称为TDT). 其中, 引入一种富含双键的醚类溶剂TEGDVE作为聚合单体, 通过商业的锂盐作为引发剂以及硝酸锂作为稳定剂, 在不影响电池电化学性能的情况下, 当电池温度升高到特定数值时, 这种单体就会被快速激活, 发生基于线性单体的阳离子聚合反应, 让电解液

在极短时间(5 s)内从液体变成固体(图1(b)). 由于阳离子聚合具有低活化能, 同时TEGDVE单体分子结构具有低空间位阻、高官能度(多反应位点), 这使得聚合过程具有动力学优势. 重要的是, 整个液体到固体转变过程体积收缩率只有约0.8%, 几乎可以忽略不计, 这最大限度避免了因体积变化导

致的电池内部短路风险。此外,通过电解液组分调节可以让电解液转变为固态的温度控制在略低于隔膜熔点的区间内,一方面可以实现电解液固化从而阻止由于隔膜熔化造成内短路而引起的安全性问题,另一方面可以尽可能保证电池宽的工作温区。这种可调控的转变温度(100~150°C)使得这类电解液可以匹配不同熔化点的商业隔膜,在隔膜熔化前就形成固体的隔热屏障,从根源上阻止电池热失控。基于这种温度响应材料的设计,这种电解液赋予了锂金属电池优异的电化学性能与安全性能,打破了“安全和性能不可兼得”的魔咒。用这种电解液装配了磷酸铁锂(LFP)-锂扣式电池,室温下稳定循环,充放电300次后电量还能保持86.5%;即使在55、90°C的高温环境下,循环300次的电量保持率也能达到93.9%和91.5%,远超普通商业电解液。它和锂金属负极也有很好的兼容性,使得1 Ah的软包电池能稳定循环150圈。在安全性方

面,这种电解液自带阻燃效果,不容易被点燃;此外,还能显著抑制电池内部的放热反应,和充电状态下的磷酸铁锂正极、锂负极发生反应时释放的热量远低于传统商业电解液。同时经历155°C的高温热处理、钢针穿刺等严苛测试,电池也不会发生热失控,为高能量密度锂金属电池的安全实用提供了可行方案(图1(c))。

该研究提出的超快热响应电解液,不仅突破性解决了锂金属电池高温下隔膜失效引发的热安全核心痛点,更构建了“热诱导超快相变”的主动式防护设计范式,符合我国政策中对储能系统“主动安全防护”和“智能预警与阻断”的技术发展导向,为高能量密度电池的安全化发展提供了全新路径。同时,该电解液的设计理念可延伸至钠、钾等其他碱金属电池体系,为各类高活性电极电池的安全防护提供借鉴,有望推动下一代安全储能器件的技术革新与产业升级。

致谢 感谢国家自然科学基金(92572106)资助,感谢所有参与该研究成员的帮助。

推荐阅读文献

- 1 Sun H, Zhu G, Zhu Y, et al. High-safety and high-energy-density lithium metal batteries in a novel ionic-liquid electrolyte. *Adv Mater*, 2020, 32: 2001741
- 2 Zou P, Wang Y, Chiang S W, et al. Directing lateral growth of lithium dendrites in micro-compartmented anode arrays for safe lithium metal batteries. *Nat Commun*, 2018, 9: 464
- 3 Xu J, Zhang J, Pollard T P, et al. Electrolyte design for Li-ion batteries under extreme operating conditions. *Nature*, 2023, 614: 694–700
- 4 Meng Y, Zhou D, Liu R, et al. Designing phosphazene-derivative electrolyte matrices to enable high-voltage lithium metal batteries for extreme working conditions. *Nat Energy*, 2023, 8: 1023–1033
- 5 Wu H, Zhuo D, Kong D, et al. Improving battery safety by early detection of internal shorting with a bifunctional separator. *Nat Commun*, 2014, 5: 5193
- 6 Liu K, Liu Y, Lin D, et al. Materials for lithium-ion battery safety. *Sci Adv*, 2018, 4: eaas9820
- 7 Xu J, Lan C, Qiao Y, et al. Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Appl Therm Eng*, 2017, 110: 883–890
- 8 Wen L, Liang J, Chen J, et al. Smart materials and design toward safe and durable lithium ion batteries. *Small Methods*, 2019, 3: 1900323
- 9 Yang C, Hu W, Zheng M, et al. Ultrafast thermo-responsive electrolyte for enhanced safety in lithium metal batteries. *Nat Energy*, 2025, 10: 1493–1502