科学通报 2026 年 第 71 卷 第 17 期: 3828 ~ 3831
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

平面锂沉积与溶解实现长循环500 Wh kg^{-1}无负极软包电池

刘磊[1,3,4], 王建辉[1,2,3,4*]

1. 西湖大学工学院电子信息工程系, 浙江省3D微纳加工和表征研究重点实验室, 杭州 310030
2. 西湖大学太阳能转化与催化中心, 浙江白马湖实验室, 杭州 310000
3. 西湖大学未来产业研究中心, 杭州 310030
4. 西湖高等研究院前沿技术研究所, 杭州 310024
* 联系人, E-mail: wangjianhui@westlake.edu.cn

Planar Li deposition and dissolution enable practical long-cycling 500 Wh kg^{-1} anode-free pouch cells

Lei Liu[1,3,4] & Jianhui Wang[1,2,3,4*]

[1] *Zhejiang Key Laboratory of 3D Micro/Nano Fabrication and Characterization, Department of Electronic and Information Engineering, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310030, China*
[2] *Zhejiang Baima Lake Laboratory Co. Ltd., Division of Solar Energy Conversion and Catalysis at Westlake University, Hangzhou 310000, China*
[3] *Research Center for Industries of the Future (RCIF), Westlake University, Hangzhou 310030, China*
[4] *Institute of Advanced Technology, Westlake Institute for Advanced Study, Hangzhou 310024, China*
* Corresponding author, E-mail: wangjianhui@westlake.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0617

锂离子电池(LIBs)现已主导电动汽车、消费电子和规模化储能等主要市场, 是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要技术支撑. 然而, 受限于插层化学限制, 传统锂离子电池的能量密度已接近280 Wh kg^{-1}理论极限(图1(a)), 难以满足电动垂直起降飞行器(eVTOL)、AI智能终端、机器人等新兴产业对高能量密度电池的迫切需求[1,2]. 采用硅/碳(Si/C)复合材料, 或以金属锂取代石墨负极(即锂金属电池, LMBs), 有望突破传统锂电池能量密度的理论上限. 然而, 这两种技术路线均依赖复杂的材料工程(如纳米复合、预锂化, 或超薄锂)才可能达到实用性能, 制造难度大导致产品一致性难以把控, 严重制约规模化生产[3,4]. 此外, 无论是硅基锂离子电池还是锂金属电池, 其生产成本还会随能量密度的提高而成倍增长, 这进一步增加了高能量密度电池的量产难度(图1(b)).

无负极锂金属电池(AFLMBs), 特指在电池制造过程中不使用负极活性材料, 仅保留铜箔作为负极集流体的“零过量锂”锂金属电池. 凭借极简构型, AFLMBs在制造成本、能量密度、安全以及电池回收等方面均展现出突出优势, 被视为锂电池的“圣杯”(图1(a)). 具体表现为: (1) 极简制造工艺. 一方面, 直接省去了负极活性材料成本, 免除了常规负极必不可少的匀浆、涂布、干燥、辊压、分切、制片等繁琐制备工序, 大幅削减了制造成本; 另一方面, AFLMBs组装过程无需进行正负极容量的冗余匹配, 且生产工艺完全兼容成熟的锂离子电池制造产线, 易于量产. (2) 极高能量密度. AFLMBs的极简结构将电池内部重量和体积压缩至最小程度, 从而在电池层面实现质量能量密度与体积能量密度的双重最大化(图1(c)), 是迈向>500 Wh kg^{-1}、>1000 Wh L^{-1}高比能目标的最有效途径; (3) 优异安全性与储存稳定性. 制造全过程不涉及活泼锂金属使用, 规避了超薄锂箔的高安全风险与苛刻环境要求. 同时, 电池由正极与铜箔在“完全放电状态”组装而成, 从根本上杜绝了化成前锂金属与电解液的自发副反应; (4) 高度可回收性. 极简结构大幅降低退役电池拆解的难度与安全风险, 铜箔易被高效分离和重复使用, 免去

引用格式: 刘磊, 王建辉. 平面锂沉积与溶解实现长循环500 Wh kg^{-1}无负极软包电池. 科学通报, 2026, 71: 3828–3831
Liu L, Wang J. Planar Li deposition and dissolution enable practical long-cycling 500 Wh kg^{-1} anode-free pouch cells (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3828–3831, doi: 10.1360/CSB-2026-0617

© 2026《中国科学》杂志社

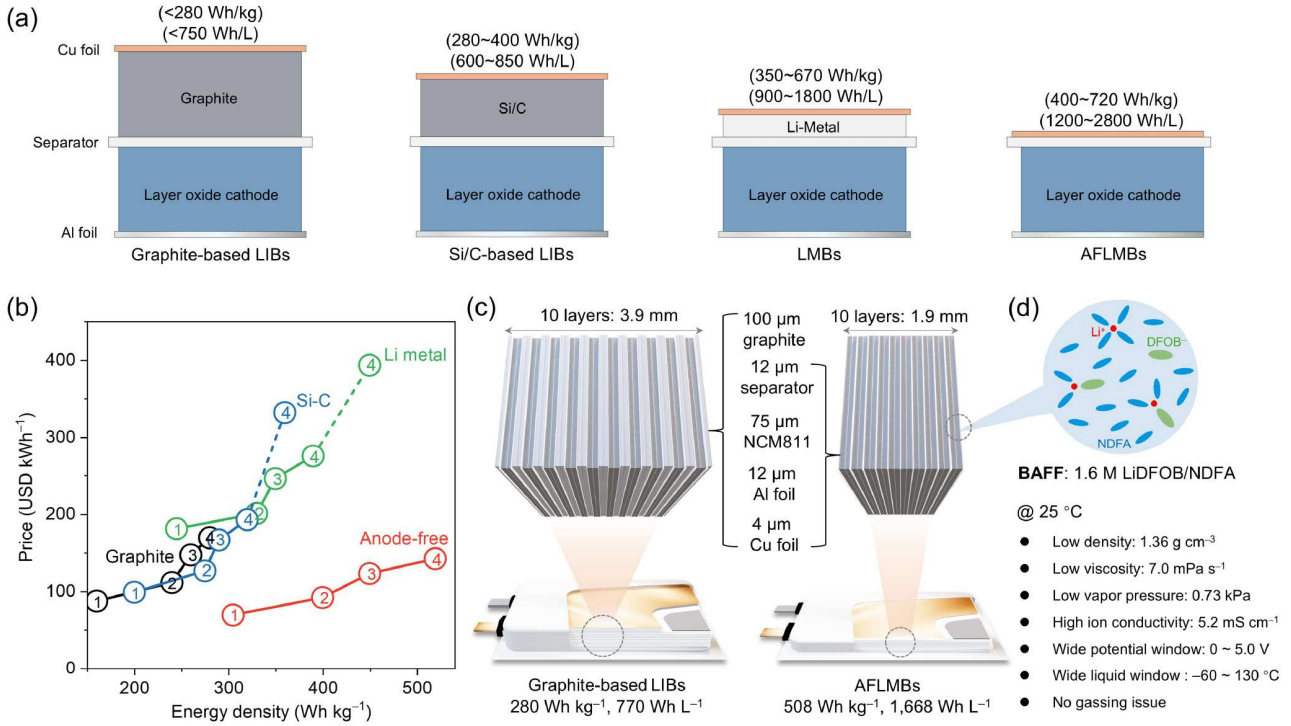


图 1 (网络版彩色)无负极电池路线与主流技术路线的对比[8]. (a) 从石墨负极到无负极的电池技术推进. (b) 石墨锂离子电池(LIBs)、硅碳锂离子电池、锂金属电池(LMBs)和无负极锂电池(AFLMBs)的价格随能量密度变化的趋势. (c) 基于相同组件的石墨锂离子电池与无负极锂电池的重量和体积能量密度对比. (d) BAFF电解液的物化特性

Figure 1 (Color online) Comparison between anode-free battery and mainstream technology routes[8]. (a) Battery technology progresses from graphite anodes to anode-free configurations. (b) The trend of battery price dependent on energy density for graphite-based and Si/C-based lithium-ion batteries (LIBs), lithium metal batteries (LMBs) and AFLMBs. (c) Schematic comparison of gravimetric and volumetric energy densities of 2.7 Ah AFLMB and LIB using the same cell components. (d) Physicochemical properties of the BAFF electrolyte

了高耗能冶炼环节, 显著降低回收成本与碳排放. 然而, 由于实用高比能AFLMBs的循环寿命极短, 看似理想的无负极技术路线一直未受到电池行业的重视[5].

AFLMBs循环寿命短暂的根源在于其负极侧缺乏稳定的宿主结构. 在充放电条件下, 锂在铜箔表面极易发生不均匀沉积与溶解, 锂金属表面的保护膜(SEI)反复破裂与增殖, 以及"死锂"不断累积. 该过程不断消耗有限的电解液和活性锂, 从而造成循环寿命骤降, 特别是在高能量密度工况下尤为凸显. 迄今为止, 大多数AFLMBs在相对较低的能量密度(50~300 Wh kg^{-1})下仅能提供50~200次循环, 与传统锂离子电池(160~280 Wh kg^{-1}, >800 次循环)相比不具竞争优势[5~7]. 仅少数研究尝试400 Wh kg^{-1}级AFLMBs, 但循环寿命缩短至不足80次[6,7]. 因此, 在不影响能量密度、制造成本和规模化生产要求的前提下, 如何抑制金属锂在集流体表面沉积溶解过程引起的不可逆消耗, 延长AFLMBs的循环寿命是当前亟待攻克的关键挑战[6,7].

最近, 我们团队创制了一种"穿梭耦合"电解液(简称BAFF), 能够实现高度同步的平面锂沉积溶解, 克服了无宿主锂金属电极结构不稳定的本征缺陷, 在没有任何集流体修饰和外源补锂条件下实现508 Wh kg^{-1}、1668 Wh L^{-1}无负极软包锂电池超过350次循环寿命. 该研究成果发表于*Nature*[8].

BAFF电解液由二氟草酸硼酸锂(LiDFOB)与*N*,*N*-二甲基三氟乙酰胺(NDFA)溶剂以1:5摩尔比配制而成, 具备宽液程、耐高电压、高离子电导率与低黏度等多重优点(图1(d)). 区别于常规单一电极的界面反应机理, BAFF表现为跨电极的"穿梭耦合"界面反应机制. NDFA溶剂在负极侧还原产生的自由基中间体跨越到正极侧, 清除$DFOB^-$氧化开环反应的中间产物, 抑制正极侧的产气行为(CO_2); 同时, 正极侧产生的•BF_2自由基会跨越到负极侧, 引发自旋中心转移(SCS)反应, 促使含氟酰胺的C=C物种发生自由基加成和交联反应, 形成富含硼氟的交联聚合物SEI(图2(a)). 这一"穿梭耦合界面化学"新范式, 突破了传统电解液界面化学理论, 为未来多功能电解液设计开辟了全新的思路.

更有趣的是, 该SEI为一层8 nm厚、亚纳米均匀的非晶聚合物膜, 显著区别于以往报道的有机-无机复合SEI或无机组分为主的SEI. 后者由大小不一、导锂能力不同的无机、

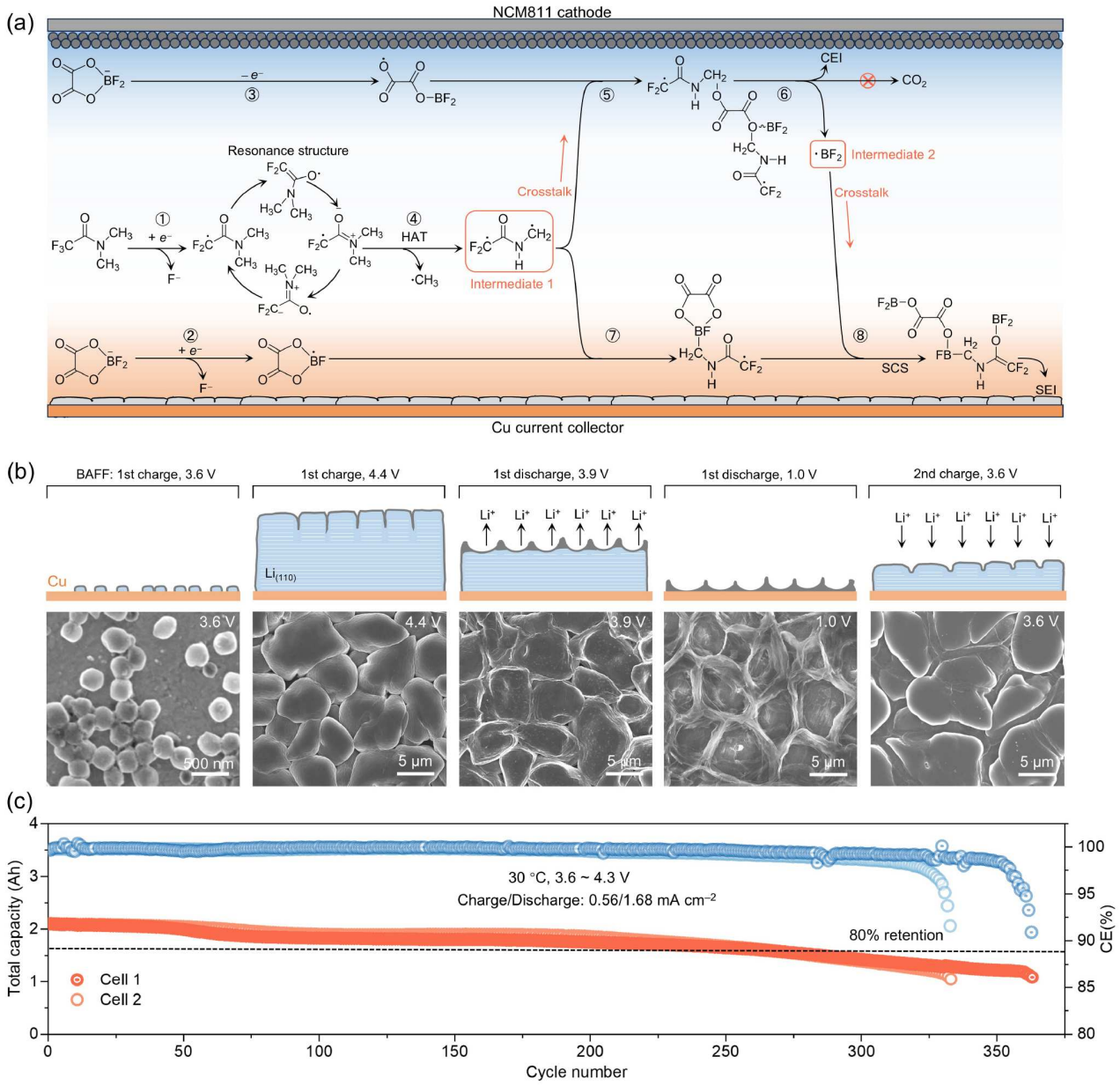


图 2 (网络版彩色)“穿梭耦合”电解液(BAFF)的衍生界面及其对锂沉积溶解行为和AFLMBs性能影响[8]. (a) BAFF的界面反应机理. (b) BAFF中铜箔表面的平面锂沉积溶解行为. (c) 使用BAFF的2.7 Ah, 508 Wh kg^{-1}无负极软包锂金属电池在3.6~4.3 V的循环性能

Figure 2 (Color online) BAFF-derived interphase and its influence on Li deposition/dissolution behavior and AFLMB performance[8]. (a) Interphase reaction mechanism for BAFF. (b) Planar Li deposition/dissolution on bare Cu foil in BAFF. (c) Cycling performances of 2.7 Ah, 508 Wh kg^{-1} anode-free Li pouch cells using BAFF at 3.6–4.3 V

有机颗粒构成, 难以保证锂离子流穿过SEI时的微观均匀性, 因此锂金属沉积溶解过程通常呈现出三维无序行为. 得益于这层高度均匀、导锂、柔性的自适应聚合物SEI膜, 锂在铜箔表面实现沿(110)晶面致密织构生长, 并且在完全溶解时, SEI收缩形成特有的“网格膜”形态, 有效调控再沉积过程锂金属的成核与生长, 从而支持高度可逆的平面锂沉积溶解(图2(b)). 该二维同步过程显著区别于常规的无序三维锂沉积溶解行为, 克服了无宿主锂金属电极结构不稳定的本征缺陷.

在性能验证方面, 我们建立了实用软包电池的数学模型, 并基于此设计制备出能量密度达508 Wh kg^{-1}、1668 Wh L^{-1}的2.7 Ah无负极软包锂金属电池. 在80%放电深度条件下, 使

用BAFF的AFLMBs循环250和350次时容量保持率分别达80%和60%(图2(c)), 获得了迄今报道的无负极软包电池中最稳定循环性能. 质谱滴定分析证实, BAFF电池长循环后的20%容量损失中, “死锂”仅占3.5%, 远低于全氟电解液、双盐电解液、局域高浓度电解液等先进电解液体系的水平(7.2%~13.2%), 反映出不均匀锂沉积已不再是容量衰退的主导因素. 此外, BAFF电池还表现出惊人的倍率性能和宽温域工作能力: 室温下可实现2650 W kg^{-1}超高功率持续放电130 s, –40℃低温条件下仍可释放出室温容量的66%, 而单位瓦时的成本相比商用锂离子电池可降低15%~25%. 综合指标已满足高端无人机的应用需求.

综上所述, 该研究创新研制了一种“穿梭耦合”电解液, 打破以往基于单一电极界面反应的传统电解液设计原理, 建立正负极跨空间协同反应的新界面化学; 获得了具有亚纳米均匀性的自适应富硼氟聚合物SEI, 在无任何表面修饰的裸铜基底上实现了锂金属的致密织构生长和平面锂沉积溶解, 克服了无宿主电极结构不稳定的本征缺陷. 这项研究不仅为研发超越“嵌入化学”机制的高性能金属电极提供了一条解决途径, 更意味着向着极高能量密度电池的规模化量产迈出了坚实一步.

推荐阅读文献

1 Goodenough J B, Kim Y. Challenges for rechargeable Li batteries. Chem Mater, 2009, 22: 587–603
2 Meng Y S, Srinivasan V, Xu K. Designing better electrolytes. Science, 2022, 378: eabq3750
3 Kim N, Kim Y, Sung J, et al. Issues impeding the commercialization of laboratory innovations for energy-dense Si-containing lithium-ion batteries. Nat Energy, 2023, 8: 921–933
4 Xiao J, Shi F, Glossmann T, et al. From laboratory innovations to materials manufacturing for lithium-based batteries. Nat Energy, 2023, 8: 329–339
5 Xu P, Huang F, Sun Y, et al. Anode-free alkali metal batteries: from laboratory to practicability. Adv Funct Mater, 2024, 34: 2406080
6 Liu L, Wang J. Overcoming copper substrate thermodynamic limitations in anode-free lithium pouch cells via *in situ* seed implantation. Nano Lett, 2023, 23: 10251–10258
7 Liu L, Xiang Y, Wang J. From cell to atomic level: understanding the degradation in 99% Coulombic efficiency and 450 Wh kg^{-1} anode-free pouch cells. J Am Chem Soc, 2025, 147: 41342–41354
8 Liu L, Xiang Y, Lu X, et al. Planar Li deposition and dissolution enable practical anode-free pouch cells. Nature, 2026, 652: 1211–1218