XXXX

高能量密度锂硫电池多级协同设计：参数调控、材料改性与实用化进展

吴康为[1,2]，程时杰[1]，谢 佳[1*]
（[1]华中科技大学电气与电子工程学院；[2]华中科技大学化学与化工学院，湖北 武汉 430000）

摘 要：锂硫电池理论能量密度高达2600 Wh/kg，兼具硫资源储量丰富、原料成本低廉等优势，已成为下一代超高比能电化学储能器件的研究热点。实现高能量密度与长循环寿命兼顾，是锂硫电池走向规模化实用化的关键。本文基于电池能量密度理论计算公式，系统归纳高能量密度锂硫电池的整体构筑思路；从器件层面剖析关键参数的定量调控规律，明确电池组分改性策略的优化优先级；针对多硫化物穿梭、硫导电性差、锂负极界面失稳等固有瓶颈，建立“器件参数边界—材料与电解液调控—循环失效机制分析”的多级协同设计框架，分别阐述改性方案与最新软包电池验证成果。系统归纳近年突破500~700 Wh/kg超高能量密度体系的循环性能现状，以及提升电池循环稳定性的有效手段；并揭示实现高能量密度锂硫电池体系的关键参数目标。最后本文深入分析高能量密度与长循环寿命之间的制衡关系，展望锂硫电池产业化发展方向，为高性能实用化锂硫电池的后续研发提供理论参考。

关键词：锂硫电池；高能量密度；循环寿命；参数调控
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0702
中图分类号：TM 911　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-16

Multi-level Collaborative Design of High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries: Parameter Regulation, Material Modification and Practical Progress

WU Kangwei[1,2], CHENG ShiJie[1], XIE Jia[1*]
([1]School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology; [2]School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, Hubei China)

Abstract: Lithium-sulfur (Li-S) batteries, with an ultrahigh theoretical energy density of 2600 Wh/kg, abundant sulfur reserves, and low material cost, have emerged as a prominent research focus for next-generation high-energy-density energy storage systems. High energy density and long cycle life represent two core metrics enabling the large-scale practical deployment of Li-S batteries. In this review, we systematically summarize construction strategies for high-energy-density Li-S batteries derived from the theoretical energy density formula. At the full battery system level, we outline methodologies for key parameter

收稿日期：2026-08-11；修改稿日期：2026-09-08。
基金项目：国家杰出青年基金（52425706）
第一作者：吴康为（2002—），男，硕士研究生，研究方向为锂硫电池材料，E-mail：1525835971@qq.com；**通信作者：**谢佳，教授，研究方向为电化学储能材料与器件、新型二次电池储能体系，E-mail：xiejia@hust.edu.cn。
引用本文：吴康为, 程时杰, 谢佳. 高能量密度锂硫电池多级协同设计:参数调控、材料改性与实用化进展[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-16.
Citation：WU Kangwei, CHENG ShiJie, XIE Jia. Multi-level Collaborative Design of High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries: Parameter Regulation, Material Modification and Practical Progress[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-16.

regulation and clarify the optimization priority of battery component modification strategies. Targeting inherent bottlenecks such as the polysulfide shuttle effect, poor electrical conductivity of sulfur and interfacial instability of lithium anodes, we establish a multi-level collaborative design framework of "Cell-level parameter constraints—materials and electrolyte engineering—analysis of cycling failure mechanisms", and elaborate on modification schemes and the latest pouch cell verification results respectively. Meanwhile, we systematically summarize the current cycling performance of ultra-high-energy-density systems reaching 500~700 Wh/kg in recent years, as well as effective approaches to enhance battery cycling stability. Furthermore, we conduct an in-depth analysis of the inherent trade-off between high-energy-density and long cycle life, present an outlook on the industrialization trajectory of Li–S batteries, and provide theoretical insights to guide future development of high-performance, practically viable Li-S batteries.

Keywords: lithium-sulfur battery; high-energy-density; cycle life; parameter regulation

化石燃料支撑现代工业与全球经济发展，但长期过度开采引发温室效应、环境污染等生态问题，加之不可再生属性，全球能源枯竭风险日益加剧。在此背景下，开发清洁、可持续的新型电化学储能体系，构建低碳可再生能源，已成为能源领域核心研究方向。商用锂离子电池凭借优异的电化学性能，自上世纪90年代实现产业化，广泛应用于消费电子、新能源汽车、电网储能等场景[1, 2]；但经过数十年技术迭代，传统三元/磷酸铁锂体系能量密度已逼近400 Wh/kg的理论上限[3]，难以满足长续航车辆、高端便携储能设备对超高比能电池的需求，高比能二次电池的研发与落地迫在眉睫。

锂硫电池凭借2600 Wh/kg的超高理论能量密度、硫原料储量丰富、低成本、环境友好等优势，被公认为最具产业化潜力的下一代储能体系[4]。区别于依赖稀缺过渡金属的传统锂电正极，锂硫电池以单质硫为活性材料，原料易得且无重金属污染，产业化前景广阔。硫正极充放电遵循“固-液-固”的多相转化路径[5-7]，单质硫（S_8）先还原为可溶性长链多硫化锂（Li_2S_x，$4\leqslant x\leqslant 8$），再进一步转化为难溶短链硫化锂。复杂多相反应带来两大固有缺陷[8]：其一是多硫化物溶解扩散引发的穿梭效应，造成活性物质持续流失、电池容量快速衰减；二是单质硫电子导电性极差，电化学反应动力学迟缓、电极极化严重，二者共同制约锂硫电池实用化进程[9]。

国内外科研团队已针对上述难题开展大量研究并取得阶段性进展，但兼顾高能量密度与长循环寿命的锂硫电池体系仍未成熟，距离规模化应用仍存在多重技术短板，亟需多维度、系统性协调优化。

近十年锂硫电池领域科研热度持续攀升，Web of Science数据库检索结果显示，相关论文总量保持逐年增长，截至2025年全球发文量突破4000篇；结合领域发展趋势预测，2026年末发文量将突破4500篇，其中聚焦高能量密度体系的研究仅占30%，超高能量密度核心技术仍处于探索攻坚阶段。近五年，依托材料改性、电解液工程、电极结构设计等技术突破，锂硫软包电池实际能量密度实现跨越式提升。如图1a所示，2021年主流体系能量密度接近400 Wh/kg[10]；同年Suo等[11]针对电解液质量占比过高的痛点，开发密度仅0.83 g/mL的低密度MPE（Methyl n-propyl Ether）弱配位电解液，在E/S=3 μL/mg贫电解液条件下将软包电池能量密度由329.9 Wh/kg提升至393.4 Wh/kg，提升19%，为电解液设计提供通用思路。2022到2024年，能量密度突破450 Wh/kg的报道数量较少；近两年多项研究实现500~600 Wh/kg级超高能量密度。2026年，Zhou团队[12]创新性提出预介导分子骨架编程策略，以2-氯嘧啶为前驱调节剂，结合量子化学与机器学习构建含196种嘧啶衍生物的分子库，提取电荷密度、几何构型、取代位点等可解释描述符，明确环上5号位调控活化能、4/6号位调控电荷转移效率的构效关系；筛选最优2-氯-4-三氟甲基嘧啶氧化还原调节剂，装配14.2 Ah软包电池实现549 Wh/kg能量密度，为人工智能赋能硫氧化还原分子设计提供典型范例。

锂硫软包电池的能量密度不断提高，Huang课

题组[13]已制备出695 Wh/kg软包电池，突破高比能锂硫电池能量密度上限，但其循环寿命仍较短。由此可见，单纯提高初始能量密度而牺牲循环稳定性，难以满足锂硫电池的实际应用需求。如何在高硫面容量、低电解液/硫比（E/S）和低负/正极面容量比（N/P）条件下，同时维持硫正极反应动力学、锂负极可逆性和整电池循环稳定性，是当前高比能锂硫电池研究亟待解决的核心问题。高能量密度锂硫电池并非单一材料优化的结果，而是器件参数、组分质量、反应动力学和界面稳定性协同调控的系统工程。基于此，本文以“器件参数边界—材料与电解液调控—循环失效机制分析”为主线，首先分析E/S、N/P和硫正极面容量等关键器件参数的定量关系，随后梳理硫正极、电解液调控策略，最后分析循环衰减机制及锂负极界面优化方法。

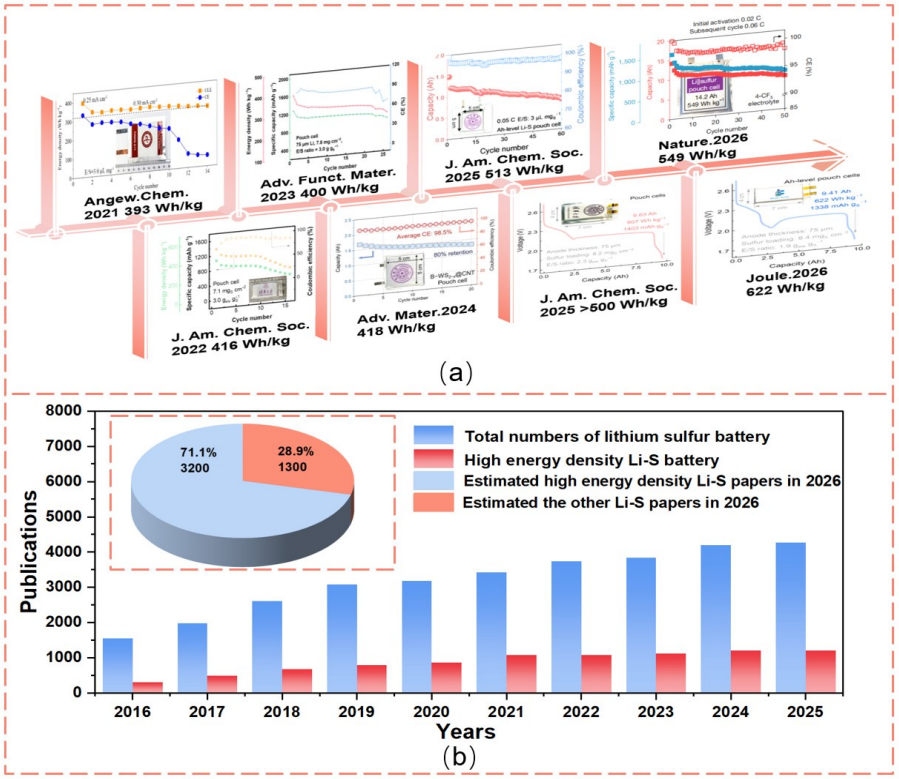


图1　锂硫电池能量密度发展趋势 (a) 近6年来代表性的高能量密度锂硫电池研究工作[11, 12, 14-19]；(b) 近十年锂硫电池发文数量趋势（在Web of Science中以Lithium Sulfur Battery作为关键词搜索），以及高能量密度锂硫电池文章数量（在上述搜索条件中补充High Energy Density作为关键词）。饼状图为2026年锂硫电池文章的数量预估。

Fig. 1　Development Trends of Lithium-Sulfur Batteries: (a) Representative Studies of High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries over the Past Six Years; (b) Annual publication trends of lithium-sulfur batteries and high-energy-density lithium-sulfur batteries in the past decade based on Web of Science database. Pie chart predicts the proportion of Lithium-Sulfur battery publications in 2026.

1　高能量密度锂硫电池关键参数与设计优先级

在电池的设计过程中，首先需要从全局视角明晰各组分的功能与作用，为实现高能量密度锂硫电池的可控构筑，有必要厘清电池各组成部分对能量密度的贡献机制。下文将从能量密度计算公式[3]进行分析阐述。

$$E = \frac{qmcmcU}{mc0 + ma + me + m0} \quad (1)$$

式（1）中q_{mc}代表正极比容量，U是电池的放电电压；m_c、m_{c0}、m_a、m_e、m_0分别代表：正极活性物质质量，正极材料总质量（活性物质、粘结剂、导电剂以及集流体）、负极材料质量、电解液的质量以及非活性物质的质量。

电池能量密度主要受放电比容量、放电电压、

活性物质负载量、电解液用量及非活性物质组分质量共同调控。因此，在保证其他性能参数稳定的前提下，提升正极放电比容量、提高放电电压并降低非活性物质占比，是提升电池能量密度的直接有效方式。

$$E = \frac{q_{mc}U}{\eta + \frac{q_{mc}}{q_{ma}}*N/P + \rho*E/S + \frac{m_0}{m_c}} \quad (2)$$

将式（1）进行简单的数学变换可得到式（2），以此进一步探究能量密度与电池关键参数之间的内在关联。其中，η为活性物质含量的倒数，N/P比为锂金属负极与硫正极面容量的比值，E/S是电解液用量体积与硫质量的比值，ρ为电解液的密度[10, 20]。

式（2）将影响电池能量密度的复杂组分因素转化为可定量调控的关键参数，能够从理论层面揭示不同能量密度下各核心参数的变化规律。

1.1 关键器件参数及其定量关系

本节重点探究电解液用量与硫质量比值（E/S比）、锂金属负极与硫正极面容量比值（N/P比）、硫正极面容量三大关键参数对锂硫电池能量密度的影响规律，并阐明三者之间的理论数学耦合关系。

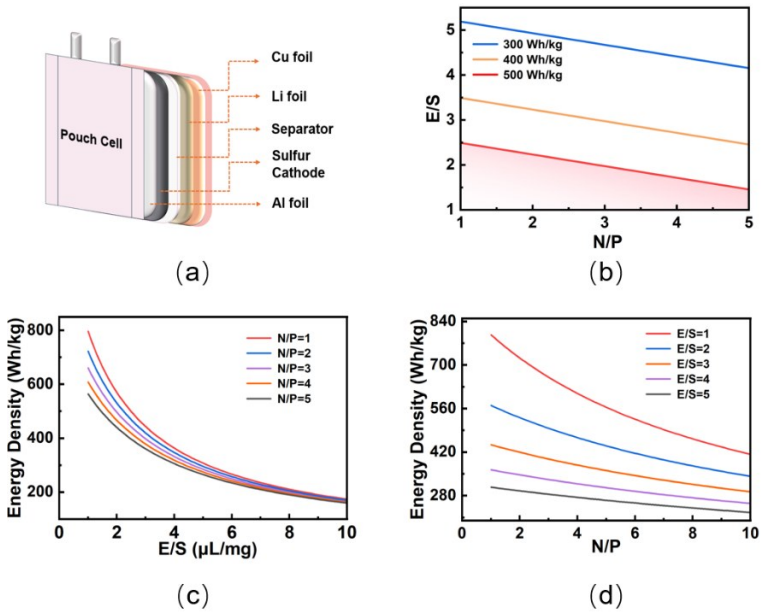


图 2　软包电池组成与调控能量密度的参数规律：(a) 软包电池示意图；(b) 不同能量密度下的E/S与N/P之间的关系；(c) 不同N/P下能量密度与E/S之间的关系；(d) 不同E/S下能量密度与N/P之间的关系

Fig. 2　Composition of pouch cells and parametric rules for energy density regulation: (a) Schematic diagram of pouch cell; (b) Relationship between E/S ratio and N/P ratio under different energy densities; (c) Energy density and E/S ratio at various N/P ratios; (d) Energy density and N/P ratio at various E/S ratios.

图2a是软包电池内部组分示意图，高能量密度锂硫电池依赖电池中多项参数协同作用。为厘清关键参数与能量密度的内在联系，在忽略式（2）中非活性物质质量的前提下，构建E/S比、N/P比与能量密度之间的理论计算模型。本模型设定参数如下：硫正极实际比容量1000 mAh/g，锂金属负极比容量为3860 mAh/g，工作电压2 V，正极活性物质含量为80%（对应参数η=1.25），电解液密度为1 g/mL。

图2b揭示了不同能量密度下E/S比与N/P比的协同变化规律。理论分析表明，降低E/S比与N/P比能够提升活性物质占比、减少电解液用量并缩减负极容量冗余，进而提高电池能量密度。图中红色区域下方为能量密度高于500 Wh/kg的参数区间，由此可知，要实现500 Wh/kg的高能量密度锂硫电池，将E/S比与N/P比均控制在2.5以内为合理的参数调控标准。

由图2c可知，降低E/S比可显著提升电池能量密度，根本原因在于电解液量在电池总质量中占比较高。电解液用量对电池循环稳定性同样具有显著作用。常规扣式电池通常采用过量电解液仅适用于材料本征性能研究，无法真实反映电池实际能量密

度。而贴近实用化条件的软包电池需严格调控E/S比值[20]。贫电解液体系会影响硫正极的固-液-固转化过程。在常规醚系电解液中，有限的电解液用量不仅限制电极浸润，还会改变多硫化物的溶解与传输行为。Huang等[21]发现，贫电解液条件下溶解的长链多硫化物会降低电解液的润湿性和离子电导率，增大界面阻抗与放电极化。Manthiram进一步指出，多硫化物聚集会降低其扩散能力，并与Li_2S成核和生长动力学的减缓相关[22]。因此，低E/S条件下的性能限制不仅来自电解液不足，还受到多硫化物传输与固相产物形成过程的共同制约，进而影响硫利用率和容量释放。E/S比的优化应兼顾电解液减重与硫转化动力学，并与正极孔隙结构及催化调控相匹配。

图2d表明，在高E/S比工况下，减少N/P比对能量密度的提升幅度有限。该现象归因于金属锂极低的密度（0.534 g/cm^3），比电解液密度更小。商用锂离子电池通常将N/P比设定为略大于1。既可以减少锂金属过量使用，又能最大化利用正负极容量，是实现高能量密度的优选方案。锂硫电池也可以在保障电池循环寿命的条件下使用更接近于1的N/P[23]。

除E/S比与N/P比外，正极面容量也是高能量密度锂硫电池设计的核心参数，提高正极面载量是提升电极面容量最直接的手段。但过高的面载量易引起正极内部电荷传输受阻、物质扩散困难，造成比容量显著降低，不利于电池能量密度的提升。因此，仅依靠简单提升正极面载量，无法实现电池能量密度的高效提升。需从面容量的角度来考量，商用的锂离子电池的面容量为4 mAh/cm^2。锂硫电池平均放电电压仅约2 V，低于锂离子电池电压（3.7 V）,要凸显出锂硫电池的高能量密度，面容量需要在8 mAh/cm^{2}以上。

参数调控属于电池体系层面的宏观优化策略，落实到具体方面，则需从材料角度进行改进，核心在于研发高性能的正负极、电解液。内在机制为：提升电极电子传导动力学与离子输运速率、加快电解液中锂离子迁移速率，同时减轻电池质量，以此实现高能量密度目标。

1.2 电池各组分调控策略优先级

为突破锂硫电池能量密度瓶颈，国内外研究人员已开发诸多改性与调控策略。然而，不同优化手段对能量密度的提升效果存在显著差异，因此明确各电池组分优化策略的优先级，对高效构筑高能量密度锂硫电池具有重要指导意义。电池的有效放电容量主要由电极材料特性决定。在常规锂硫电池体系中，N/P比普遍大于1，负极锂容量处于过量状态，电池整体放电容量受限于硫正极的可逆容量。由此可知，构筑高能量密度锂硫电池的首要前提是开发高比容量硫正极。

电解液优化也是提升电池性能的重要手段。对反应机制分析，电解液改性可有效改善正极界面环境、加快氧化还原动力学，进而提高正极容量利用率。同时，电解液在电池总质量中占比极高，通过降低电解液用量[11, 24]、优化电解液体系密度，可直接实现能量密度的提升。但单一电解液调控对能量密度的提升效果有限，仍需与正极结构改性协同优化，才能推动体系性能大幅提升。

在高能量密度锂硫电池体系中，锂金属负极凭借3860 mAh/g的超高理论比容量与0.534 g/mL的极低密度，成为高比能体系的首选负极材料。前文分析表明，负极侧的核心优化思路为缩减金属锂的用量，将N/P比趋近于1[25]，充分发挥正负极容量匹配优势。除锂金属外，预锂化石墨及合金负极等替代方案也受到关注。其中，预锂化石墨负极可有效减少金属锂过量使用，但石墨仅具有372 mAh/g的理论比容量[26-28]，只为金属锂的1/10，且其密度（2.26 g/cm^3）约为金属锂的4倍。在相同容量需求下，石墨较低的比容量会增加负极质量，使其实现高比能更具挑战。但高循环稳定性使其仍具备着显著研究价值。

合金负极兼具高比容量与低密度[29]，相较于传统碳基负极更适配高能量密度体系，但其比容量仍低于纯锂金属负极。硫正极具有1675 mAh/g的高理论比容量，更高的负极比容量能够在更低负载条件下实现正负极容量匹配，更契合高能量密度电池设计。结合不同合金负极的比容量、密度等关键参数对比结果可知，锂镁合金负极综合性能较优，可适配高能量密度锂硫电池。

因此，高能量密度锂硫电池的设计应以硫正极实际容量为基础，协同优化电解液用量、密度及与正极的匹配关系。同时，应结合锂负极确定合理的N/P比，实现各组分协同匹配。

表 1 不同电极材料的比容量与密度对比[26]

Table 1 Capacity and Density Comparison of Various Electrode Materials

电极材料	S	Li	Li_9Mg	LiAl	$Li_{4.4}Si$	$Li_{15}Ge_4$	$Li_{4.4}Sn$
实际放电产物	Li_2S	Li	$LiMg_2$	Al	Si	Ge	Sn
实际比容量,q [mAh/g]	1450	3860	2626	790	1800	900	650
材料密度,ρ [g/cm^3]	2.1	0.53	0.61	1.73	1.15	2.02	2.55

2 硫正极材料与电解液调控

2.1 实用化条件下硫正极材料改进

锂硫电池正极材料主要采用单质硫与高导电性物质复合材料或使用有机硫材料[23, 30]，现阶段正极改性与调控手段主要有：材料复合、催化剂修饰、结构调控等[9]。上述策略主要是通过提升硫正极导电性、改善离子传输能力、加速硫氧化还原反应动力学[31]，实现高载量、贫电解液等实用化条件下更高的容量发挥。

2.1.1 碳基材料作为载硫基体

正极材料与高导电材料复合能够有效改善电极性能，该方法可克服单质硫导电性差的问题，改善电子传输速率并促进容量充分发挥。目前主流复合材料为碳基材料[32]及过渡金属化合物。

2009 年 Nazar 课题组[33]首次使用 CMK-3 作为基体构建高性能硫正极，建立相互连通的介孔骨架，依靠物理限域作用约束多硫化物。碳材料自身具备优异的导电性，其作为主体解决了单质硫正极绝缘的难题。同时借助 PEG（Polyethylene glycol）的表面修饰，实现高效捕获多硫化物，抑制穿梭效应，以及抑制正极表面硫化锂的沉积，提升循环寿命。最终实现 1320 mAh/g 的超高容量发挥，引领了锂硫电池研究热潮。此后，碳基主体的硫正极在单质硫正极研究中成为主流。

Lee 等[34]结合多壁、单壁碳纳米管构筑复合硫正极，并与碳纤维隔膜一体化自组装，摆脱了传统金属箔集流体的依赖。其制备方法如图 3a 所示，该方案通过多壁碳纳米管与硫粉均匀混合，再联合单壁碳纳米管与隔膜抽滤处理后构建出一体化电极结构。图 3b 中展示了碳纳米管硫正极电池与对照组的质量组成分析，该一体化设计可显著降低电池整体质量，适配高能量密度体系构建。不同面载量循环测试结果显示（图 3c），碳硫正极在 9.28 mg/cm^2 面载量下发挥出 8 mAh/cm^2 的高面容量并稳定循环 100 圈；并且基于该电极组装的软包锂硫电池能量密度可达 457 Wh/kg，为高比能锂硫电池设计提供了指引。

Liu 团队[35]以静电纺丝法制备的碳纤维为载硫基底，搭建多孔渗透型纤维电极结构，并引入含硼碳量子点掺杂策略以催化电极氧化还原反应（图 3d）。机理分析表明，边缘的硼氧键可有效吸附锂离子与多硫化物，显著优化电化学反应动力学。同时，该团队成功制备出 2 Ah 大容量软包电池（图 3e、3f），在 E/S=2 μL/mg、N/P=2 的严苛实用化工况下，电池仍可保持约 1200 mAh/g 的高比容量，实现 502 Wh/kg 的超高整体能量密度。

Wei 课题组[36]使用还原氧化石墨烯作为载硫主体，构筑 NiS_2、GeS_2 异质结结构，借助类电子三极管的电流放大效应显著加快电池反应动力学（图 3g）。如图 3h 和 3i 所示，面载量为 6.2 mg/cm^2 的 S@NiS_2-GeS_2/rGO 硫正极匹配锂金属负极组装的锂硫软包电池，在贫电解液（4 μL/mg）和低 N/P=1.6 条件下，释放出高达 1000 mAh/g 的放电比容量，基于软包电池整体质量计算其能量密度可达 405 Wh/kg，并且稳定循环 200 圈后，仍能释放 816.6 mAh/g 的高比容量。兼具高能量密度与良好的循环稳定性。

向正极体系引入导电碳材料，有利于电极活性物质被充分利用，但该方法仅局限于材料微观导电网络的构筑，仍难以对硫物种充放电过程中多步电化学反应过程实施有效调控，亦难以从本质上优化硫物种氧化还原动力学。基于此难题，正极改性研究可聚焦硫物种多阶转化反应路径，通过多策略协同调控的方式实现针对反应全过程的深入改进与性能优化。

2.1.2 硫物种氧化还原催化调控

单一复合导电碳材料对电池性能的提升作用存在明显局限性，前述研究均引入功能性催化组分辅助改性；借助催化剂加速反应动力学，现已成为锂硫电池正极改性的主流优化思路[37-39]。单质硫正极经历一个固-液-固[5, 40, 41]三相转化过程。由多硫化物（Li_2S_4）向不溶的硫化锂的液固转化过程缓慢[2]，引入催化活性物质可有效提升该决速步反应速率[42]，推动硫基物种充分转化。目前最为广泛的催化材料以各类过渡金属基化合物为主[43-45]。与此同时，高熵合金[46, 47]、单原子催化剂等新型催化剂也逐步在

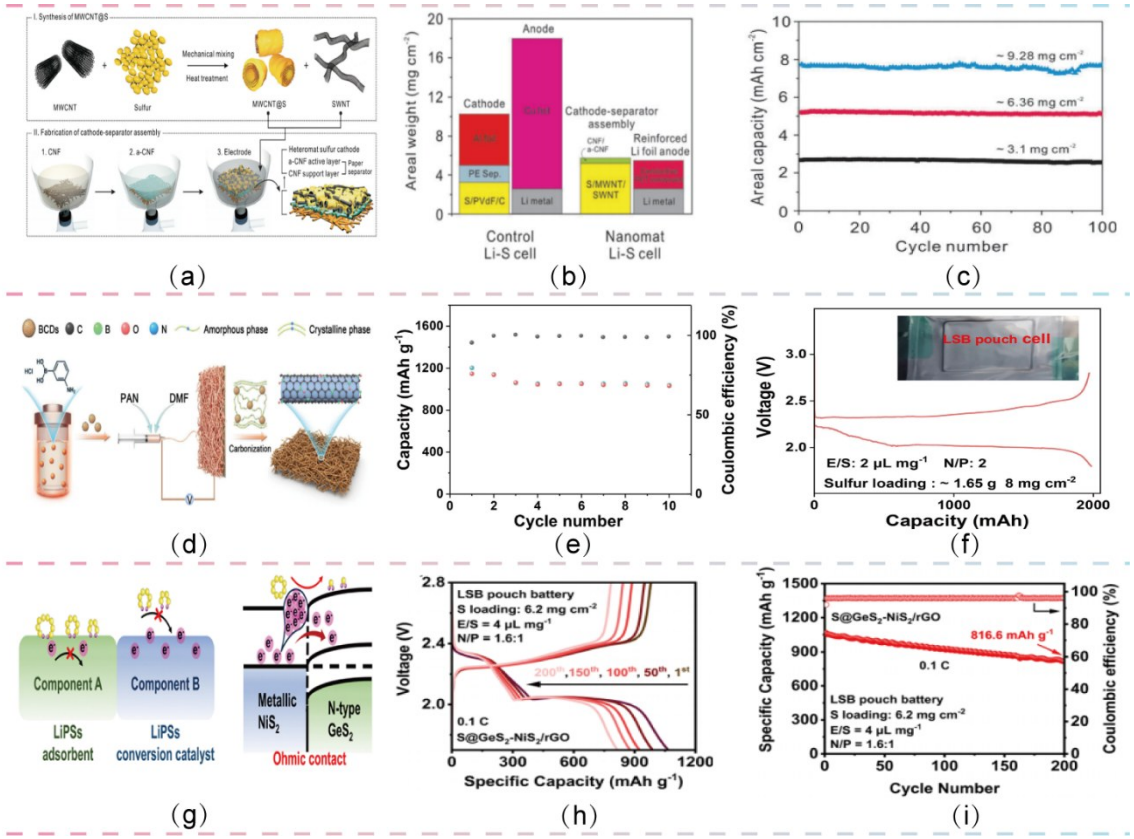


图 3　(a) 材料制备与隔膜组装示意图；(b) 纳米片设计锂硫电池与常规锂硫电池密度对比；(c) 不同载量下扣式电池循环[34]；(d) 静电纺丝纤维正极结构设计示意图；(e) 软包电池循环性能；(f) 软包电池充放电曲线[35]；(g) NiS_2-GeS_2异质结构示意图；(h) 软包电池充放电曲线；(i) 软包电池循环性能数据[36]

Fig. 3　(a) Schematic illustration of material preparation and separator assembly. (b) Energy density comparison between nanosheet-engineered and conventional Li-S batteries. (c) Cycling performance of coin cells with various sulfur loadings. (d) Schematic diagram of structural design for electrospun fiber cathodes. (e) Cycling curve of pouch cells. (f) Charge/discharge profiles of pouch cells. (g) Schematic illustration of NiS_2-GeS_2 heterostructure. (h) Charge/discharge profiles of pouch cells. (i) Cycling performance data of pouch cells.

锂硫电池领域应用。

Wei 团队[48]通过将 MOF（Metal organic framework）热解得到钴的氮化物作为反应的催化剂，并使用导电的碳化钛作为基底，构建高性能硫正极。图 4a 展示了软包电池各部分质量组成。如图 4b 所示，硫正极匹配锂金属负极组装的软包电池，在 E/S=3 μL/mg 的实用化条件下首圈释放出约 900 mAh/g 的容量，整体能量密度为 400 Wh/kg，能稳定循环 250 圈后容量保持率处于 90% 以上。Yan 团队[47]开发 s-d 区高熵合金 CoNiMnMg@C 催化剂来反向调控碳界面电子密度，将电子泵入并富集在碳表面，显著增强其对锂离子与多硫化物的吸附作用（图 4c）。此设计有效避免了多硫化物对合金的毒化作用，加快了锂离子扩散与多硫化物转化动力学。由图 4d 可知，高熵合金催化剂的添加显著提升了电池的容量释放。同时，Mg 金属进一步提升了高熵合金的性能，核心原因在于 Mg 向其他过渡金属给出了电子，有利于催化剂与多硫化物的相互作用。3.9 mg/cm² 的正极匹配锂金属的软包电池稳定循环了 50 圈，释放了 800 mAh/g 的可逆比容量（图 4e）。Zhang 团队[49]设计并制备了 B、N 共配位的 N_2-Fe-B_2 单原子催化剂（图 4f），可有效解决高载量、贫电解液体系下的多硫化物穿梭与动力学迟滞问题。同时铁的单原子级分散最大化提升了催化利用效率。如图 4g 所示，扣式电池均超过了商业的锂离子电池的面容量（4 mAh/cm²），并且能够稳定循环 100 圈。0.3 Ah 软包电池在 E/S=3 μL/mg，N/P=1.5 的严苛条件下电池也能够稳定循环 40 圈并释放出 359 Wh/kg 的能量密度（图 4 h）。为改善高比能锂硫电池动力学提供高效策略。

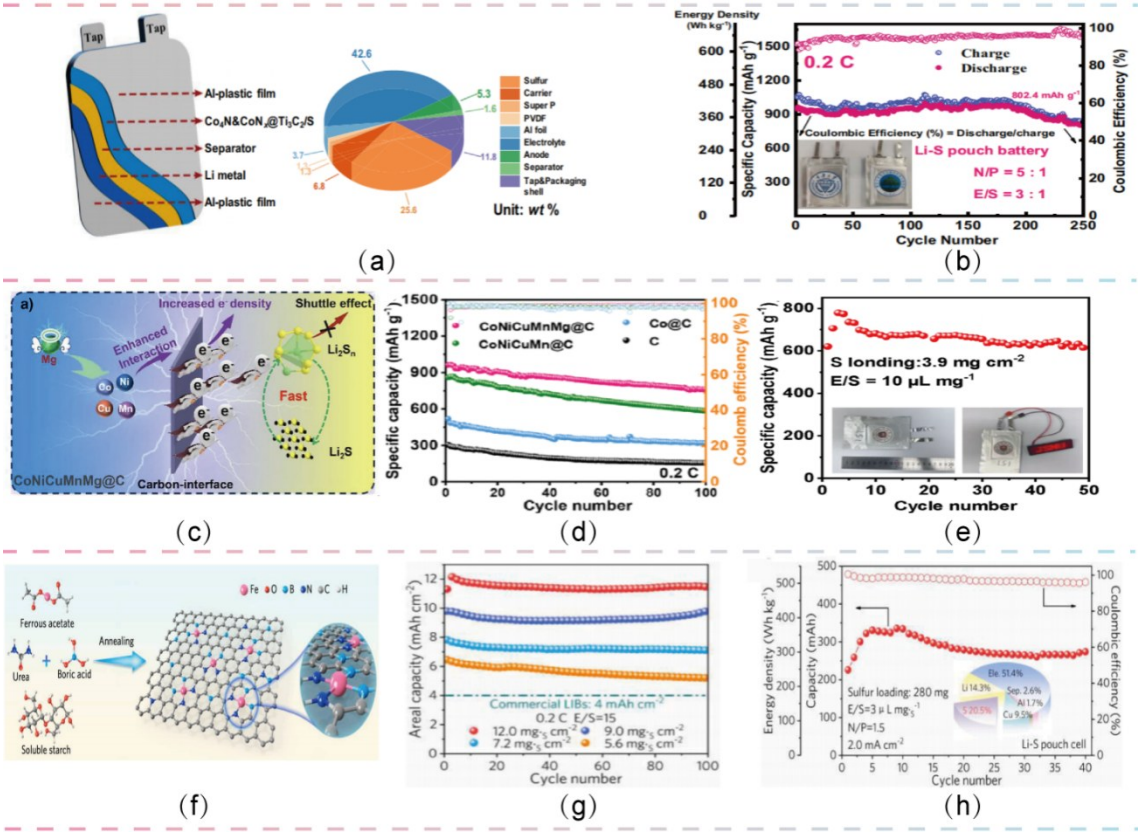


图 4　(a) 软包电池组成成分示意图；(b) 实用化条件下软包电池的循环性能[48]；(c) 高熵合金催化剂作用机制图；(d) 添加不同数量合金的循环性能对比；(e)E/S=10 μL/mg 软包电池循环数据[47]；(f) 铁单原子催化剂结构示意图；(g) 不同面载量下的循环数据；(h) 0.3 Ah 软包电池的循环数据[49]

Fig. 4　(a) Schematic configuration of pouch cell; (b) Cycling performance of pouch cells under practical working conditions; (c) Catalytic mechanism of high-entropy alloy catalyst; (d) Cycling performance comparison with different alloy dosages; (e) Cycling data of pouch cells at E/S = 10 μL/mg; (f) Structure schematic of Fe single-atom catalyst; (g) Cycling performance under different areal sulfur loadings; (h) Cycling performance of 0.3 Ah pouch cells

引入催化剂可促进高硫面载量、贫电解液条件下的硫转化，减轻极化并促进容量释放。对于实用化高比能电池体系，应结合 E/S 比、N/P 比和硫面载量，评价催化剂对面容量、放电电压及循环性能的影响，来综合判断催化剂的具体优势。

2.1.3　共价键合型有机硫正极

相较于传统硫正极，有机硫正极以其独特的共价键合硫的机制得到了广泛研究。共价碳硫键能实现可逆储锂[50, 51]。同时，硫链主要以短链硫的形式存在，从而阻止了多硫化物的产生，避免了穿梭效应[52-55]。因此，有机硫正极都展现出更优异的循环性能。其中 SPAN（Sulfurized polyacrylonitrile）正极以其独特的化学结构展现了实现高比能锂硫电池的巨大潜力。2002 年 Wang[56]首次报道了 SPAN 这种材料，首圈放电比容量超过 800 mAh/g，引起了许多研究团队的关注。但当时尚未明确硫的负载形式。随着表征技术不断更新发展，以及各种理论模型提出，其共价键合硫的机制也被普遍认同。Liu 团队[57]采用原位 X 射线吸收光谱追踪 SPAN 制备过程中的结构演化，证实高温环境可促进短链硫与吡啶环生成，为未来 SPAN 材料优化提供有力指导。

硫族元素[58-60]、碘[61]都被报道过作为 SPAN 掺杂元素，能显著提高材料的电导率以及硫物种转化速率。Xie 团队[62]通过对 SPAN 进行硒掺杂以及水合肼交联得到高性能正极材料。匹配锂金属的软包电池，在 N/P=1.7 E/S=2 μL/mg 的实用化工况下实现 500 Wh/kg 的整体高能量密度。是 SPAN 应用于高比能锂硫电池典型范例。

虽然 SPAN 正极无穿梭效应，但受限于分子结

构，整个高分子链上硫元素的质量占比不足50%[63]。尽管稠合吡啶的骨架具备一定储锂能力[54]，但是大量非活性骨架组分仍严重制约电池能量密度的提升。因此，可以进行材料改性以提升SPAN硫含量来实现高比能锂硫电池。有机硫正极[51]与SPAN有着类似的电化学反应机制，比如聚吡咯、聚苯胺[64]、聚噻吩等材料。但许多物理性质：电导率，离子电导率，比表面积等有所不同。有机正极材料已得到广泛关注[65]，SPAN是研究较为充分的代表性体系。未来可以继续发掘新的有机硫正极材料，向实用化高比能锂硫电池的目标迈进。

2.2 电解液体系质量与溶剂化能力优化

2.2.1 低密度电解液设计

高比能锂硫电池的构建，仅从正极优化改进是不足够的，需要多方面协同优化。低密度电解液体系有利于实现高能量密度，在不显著牺牲电化学性能的前提下，可减少非活性物质的质量，进而实现高能量密度。

Suo[24]等延续了早期的低密度电解液工作，采用甲基叔丁基醚设计一种超轻电解质（0.837 g/mL），基于此电解液的软包电池整体能量密度高达661 Wh/kg。该工作从有机溶剂骨架（环状/链状）、分子含氧数量等维度，以密度为核心指标开展溶剂筛选。图5a对比了各类有机物的密度；图5b揭示分子中氧原子个数，以及分子的环状与链状结构的密度差异。最终在对比不同的醚类电解液之后选择了甲基叔丁基醚作为稀释剂。软包电池测试结果如图5c所示，除开氟化碳的容量，硫正极容量发挥达到1156 mAh/g，释放出0.3 Ah的容量。Lu等[66]通过使用正己烷作为稀释剂构筑低密度的电解液体系（图5d），密度仅有0.79 g/mL，显著降低了电解液在电池中占有的质量。由图5e可知，相较低浓度的四氢呋喃电解液（LCE），引入正己烷稀释剂的电解液（LCDE）具备更优异的倍率性能。兼具低密度与良好倍率特性的电解液为高比能锂硫电池提供重要保障。如图5f所示，采用该稀释剂的电解液可以实现6 mAh/cm²的高面容量，并达到400 Wh/kg的能量密度，显著优于未添加稀释剂与传统醚类电解液体系。

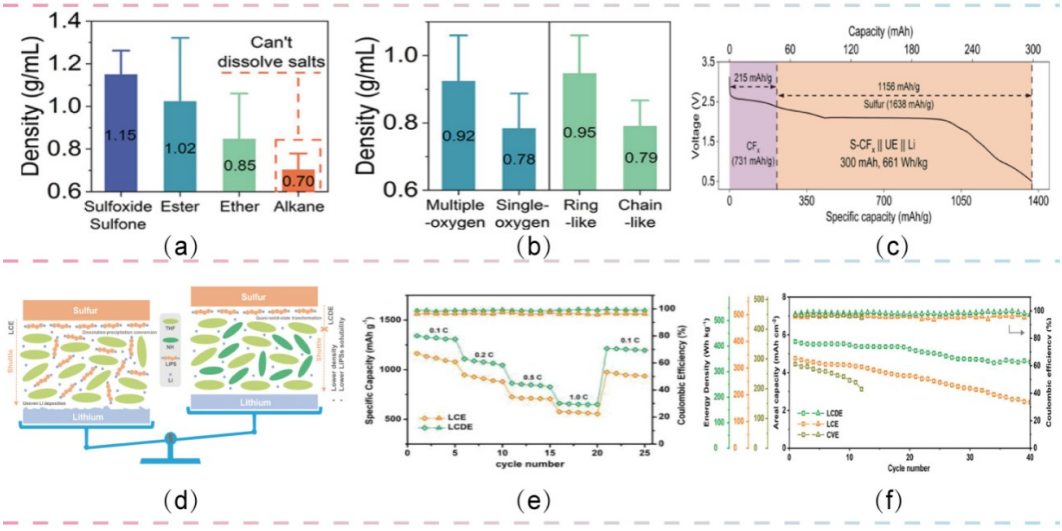


图5 (a) 不同种类溶剂的密度对比；(b) 不同分子结构有机物的密度对比；(c) 低密度电解液体系软包电池放电比容量数据图[24]；(d) 低密度稀释剂电解液体系示意图；(e) 添加正己烷稀释剂的电解液（LCDE）与未添加的电解液（LCE）倍率性能对比；(f) LCDE、LCE、CVE（普通电解液体系）的软包电池循环性能[66]

Fig. 5 (a) Density comparison of different solvents. (b) Density comparison of organic substances with various molecular structures. (c) Discharge specific capacity of pouch cells employing low-density electrolyte systems. (d) Schematic illustration of low-density diluent-containing electrolyte system. (e) Rate performance comparison between the electrolyte with n-hexane diluent (LCDE) and the pristine electrolyte (LCE). (f) Cycling performance of pouch cells with LCDE, LCE and conventional electrolyte (CVE).

2.2.2 弱溶剂化电解液

电解液体系的调控对电池的反应动力学有着巨大的影响[67]。溶剂对于锂离子以及多硫化物的溶剂化能力可显著改变电极表面的电荷转移动力学，引

起强烈的极化；使得多硫化物在电池表面需要额外的去溶剂化能。2025年Zhang等[18]揭示了锂硫电池两阶段溶剂化的转变过程，将WSS（Weakly Solvating Solvents）弱溶剂化溶剂含量增加带来的影响分为两个阶段。第一阶段，WSS含量提升仅增加外溶剂化壳层的游离溶剂分子，不参与锂离子配位，对电池活化极化影响较小；而到第二阶段，过量WSS分子进入内溶剂化壳层并直接与锂离子配位，显著提升多硫化锂电子转移难度，加剧电池极化。因此，Zhang团队采用弱溶剂化分子含量与电催化剂的双重调控，构建了10 Ah级，整体能量密度为607 Wh/kg的软包电池。为高比能锂硫电池设计提供了高效的解决方案，现阶段大量研究聚焦电解液溶剂化特性，Cui课题组[68]深入探究了溶剂化能力与电池性能之间的关系；以溶剂化自由能指示溶剂化能力建立了与多硫化物溶解度常数之间的定量数学关系，为今后溶剂化能力调控研究提供了理论指导。

3 高能量密度锂硫电池循环衰减机制与负极优化策略

锂硫电池理论能量密度优异，实验室规模的研究已达成700 Wh/kg的极高能量密度[13]，但高能量密度体系普遍存在循环稳定性差的短板，难以满足实际应用需求。如表中高能量密度软包电池循环数据所示：能量密度超400 Wh/kg的软包电池多数循环寿命不足100圈，甚至50圈的循环寿命便衰减至初始容量的80%，能量密度600 Wh/kg少有50圈以上的研究报道。

综上可知，现有高能量密度锂硫电池在性能与工况适配性上仍存在明显短板，距离规模化实际应用仍有较大差距。在当前的电池设计体系中，高能量密度的构筑往往依赖高硫载量、低电解液用量及低负极过量等极限参数调控策略，而此类严苛参数条件通常会加剧电极极化、多硫化物穿梭及界面稳定性恶化等问题，阻碍固-液-固转化以及有机正极的准固相转化[69]，不可避免地牺牲电池循环寿命。能量密度与循环寿命之间存在显著的制衡关系，二者难以同步达到最优。因此，深入剖析高能量密度体系下电池循环衰减的内在机制，厘清能量密度与循环稳定性的耦合制衡规律，是推动实用化锂硫电池发展的关键前提。

3.1 实用化工况下电池循环衰减原因

现有高性能锂硫电池体系的E/S比普遍低于5 μL/mg，以电解液密度1 g/mL进行粗略换算，电解液与单质硫的质量比可控制在5倍以内。因此在高能量密度锂硫电池的设计过程中会不断压缩电解液用量，对电池的循环寿命有着显著影响。贫电解液条件下，电池更易受到副反应消耗的影响。不均匀的锂沉积与剥离可导致SEI破裂，使新鲜锂暴露，并在SEI反复形成过程中持续消耗电解液和活性锂。电解液减少又会限制电极浸润和离子传输，加剧极化，降低锂沉积与剥离的可逆性。Chen等[85]发现，向失效的400 Wh/kg锂硫软包电池补充电解液后，放电极化减弱、容量恢复，表明电解液耗尽是该体系失效的关键因素。

除电解液用量外，锂负极过量也影响电池能量密度与循环寿命的平衡。降低N/P比能够减少锂的质量，但同时削弱了电池补偿不可逆锂损失的能力[86]。循环中的副反应和死锂形成会持续消耗活性锂，低N/P比下有限的锂储量难以补偿这些不可逆损失，从而加速容量衰减。

3.2 SEI调控实现更高循环稳定性

在电池首圈充电过程中，负极表面会形成一层SEI（Solid electrolyte interphase），这是由负极接触电解液后形成并在循环中演化[87, 88]。SEI具有离子可导，电子绝缘的性质[89]，有效抑制了负极上的副反应，同时也有利于锂离子在负极上的均匀沉积。但不稳定的SEI会在电池循环过程中不断的破损与修复[90]，会导致活性锂不断消耗，极大地降低了电池工作过程中的库仑效率，使得电池的循环寿命下降[91]。许多研究人员都开始对SEI的成分进行研究，以此希望能够获得坚固稳定的SEI膜。

Cui团队[92]采用LiFPB（全氟频哪醇硼酸锂）与LiTFSI（双三氟甲基磺酰亚胺锂）作为锂盐，设计了新型的电解液体系，构筑了富含氟化锂以及硼酸锂的SEI。混合的锂盐体系在面载量为1.2 mg/cm^{2}的扣式电池中循环200圈的容量保持率为75.7%，显著高于LiTFSI电解液体系的50.9%。同时，408 Wh/kg的软包电池在E/S=2.75 μL/mg的条件下稳定循环了75圈。现有研究多聚焦于SEI膜无机组分的改性优化，尤以构筑富氟化锂SEI膜最为典型[93]，有机组分对负极界面的保护作用同样至关重要，是完善负极界面稳定性的重要研究

表 2 近5年来实用化参数条件下的锂硫电池研究进展总结

Table 2 Summarized Research Progress of Lithium-Sulfur Batteries under Practical Conditions in the Past Five Years

改进方式	能量密度 Wh/kg	E/S 比 μL/mg	N/P 比	循环次数	倍率 C	容量保持率%	活性物质面载量 mg/cm^2	参考文献
正极	435	3	2.32	70	0.1	60	8	[46]
正极	502	2	2	10	/	/	8	[35]
正极	516	2	/	50	0.05	/	/	[70]
正极	405	4	1.6	200	0.1	80	6.2	[36]
正极	430.6	3	3.27	50	0.05	90	18.7	[71]
正极	555.2	2	1.7	50	1 mA/cm^2	75	24	[62]
正极	457	/	1.1	/	/	/	9.28	[34]
隔膜	417	2.6	2	100	0.2	80	10	[72]
隔膜	531.25	3.5	/	200	0.1	92.73	11.12	[73]
电解液	384	3	/	20	0.025	/	6.1	[74]
电解液	470	2.8	1.47	40	0.025	80	8.2	[75]
电解液	661	2.5	1.87	/	/	/	6.42	[24]
电解液	416.4	3	/	16	/	80	7.1	[14]
电解液	523	2.5	1.15	20	/	90	8	[76]
电解液	427	3.5	/	10	0.05	/	10.5	[77]
电解液	412.7	2.6	2.4	30	167.5 mA/g	75	4	[78]
电解液	417.6	3.6	1.2	20	50 mA	80	/	[16]
电解液	400	3	1.5	26	/	73	7.8	[15]
电解液	502	2.7	1.6	16	/	/	7.2	[79]
电解液	607	2.3	1.34	25	/	/	8.2	[18]
电解液	441	2	2.5	50	/	80	20	[80]
电解液	417	2.5	/	40	0.05	90	5.8	[66]
电解液	405	3	1	27	/	80	7.9	[81]
电解液	622	1.9	/	15	0.35	/	8.4	[19]
催化剂	475	2	/	80	0.02	80	/	[82]
催化剂	513	1.6	/	18	0.025	90	13	[17]
催化剂	396	3	5	250	0.2	84.7	8	[48]
催化剂	520	2.5	/	100	/	80	9	[83]
催化剂	507	2.4	1.5	20	/	83.6	3.4	[43]
催化剂	550	2	/	50	/	/	/	[84]
/	695	1.7	1	3	/	90	7.4	[13]

注：倍率一栏中的数字是电池参数的倍率，部分参数用电流（mA）、单位质量电流（mA/g）和电流密度（mA/cm^2）表示施加的电流大小。

方向。

Zhang 课题组[15]使用 TXA（1,3,5-trioxane）替换 DOL（1,3-Dioxolane）对 SEI 进行成分调控。TXA 可在负极表面优先分解，为 SEI 提供更多有机成分。图 6a 揭示了普通 SEI 与富含有机成分的 SEI 对于锂沉积的作用。富含有机组分的 O-SEI 相较 R-SEI 能减少锂沉积得到的松散结构，有效抑制锂金属负极与多硫化物的寄生反应，诱导均匀致密的锂沉积。高载量电池循环测试结果表明（图 6b），在正极面载量 6.2 mg/cm^2 的条件下，有机组分优化的 SEI 膜可显著延长电池循环寿命，提升体系稳定性。Wu 等[76]通过碘化锂的添加构建了兼顾高性能与热响应的 SEI。一方面，热失控时，高温使碘化锂、硫化锂、氧化锂原位形成高热稳定的 SEI，阻断了放热反应，提升电池的安全性；另一方面，LiI 的添加显著提升了电池的性能。如图 6c 所示，面载量 4 mg/cm^2 半电池在 0.1C 循环条件下，热响应型 SEI 膜可大幅提升电池容量保持率。基于该策略组装的软包电池首圈能量密度接近 500 Wh/kg，证实了 SEI 调控对实现高比能锂硫电池的有效性（图 6d）。

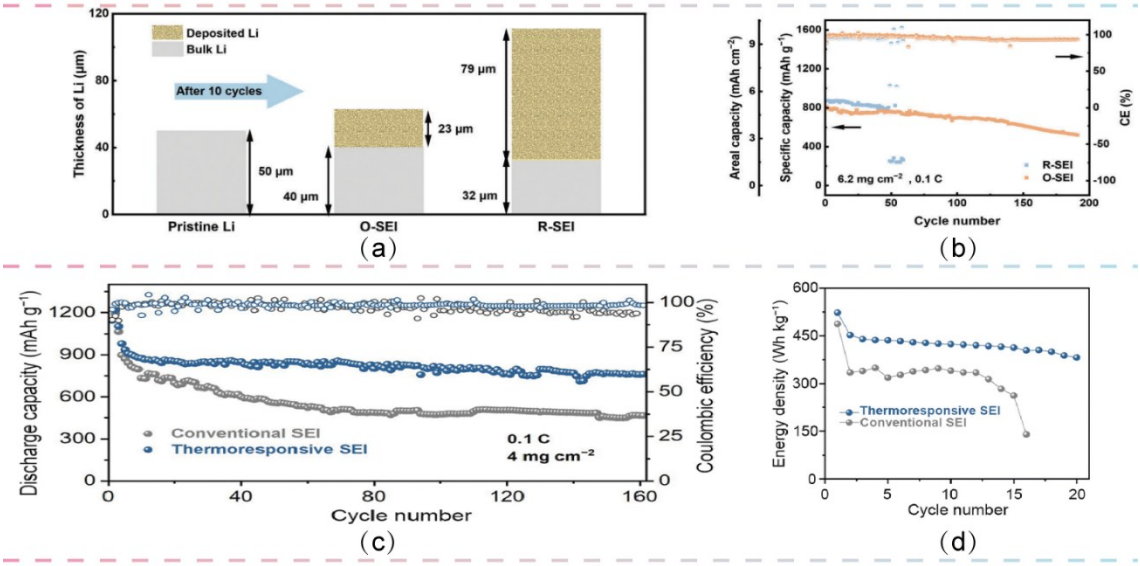


图 6 （a）SEI 组成成分示意图；（b）有机 O-SEI 与普通 R-SEI 电池的循环性能示意图[15]；（c）热响应 SEI 与常规 SEI 扣式电池循环性能对比；（d）响应 SEI 与常规 SEI 软包电池循环性能对比[76]

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the SEI composition. (b) Cycling curve of batteries with organic O-SEI and conventional R-SEI. (c) Cycling data comparison of coin cells with thermally responsive SEI and conventional SEI. (d) Cycling performance comparison of pouch cells with thermally responsive SEI and conventional SEI.

4 总结与展望

高能量密度与长循环稳定性是锂硫电池迈向实用化的核心追求目标。高比能锂硫电池的合理设计需立足于体系全局视角，在兼顾正极、电解液等单一组分性能优化的基础上（图 7），通过对 E/S 比、N/P 比等关键体系参数进行宏观协同调控，最大化激活活性物质利用率，最终实现电池整体能量密度的提升。结合前述理论分析与实验研究结果可知，当电池体系参数满足 E/S 比＜2.5、N/P 比＜2.5、正极面容量＞8 mAh/cm^2 时，锂硫电池有望突破 500 Wh/kg 的高能量密度，为高比能电池体系的构筑提供了明确的参数设计依据。

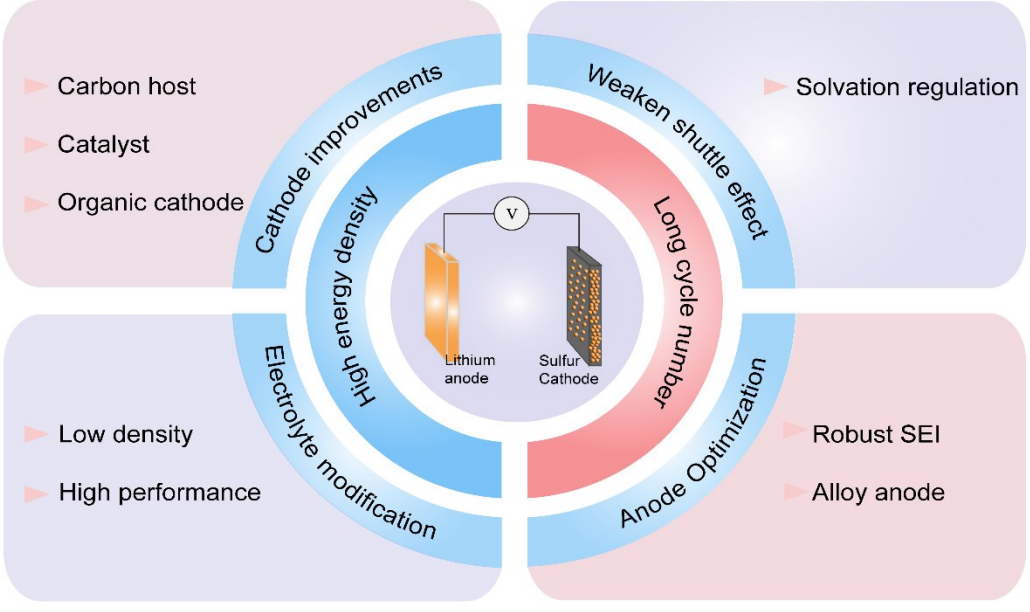


图 7 实现高能量密度锂硫电池的改进方法

Fig. 7 Strategies to Achieve High-Energy-Density Lithium–Sulfur Batteries

现阶段锂硫电池的实用化进程仍面临诸多瓶颈。尽管其具备优异的理论能量密度优势，但循环寿命不足的短板严重制约了规模化应用，高能量密度软包电池普遍难以突破300次稳定循环。

实用化的高能量密度锂硫电池还面临着许多严峻挑战，未来的研究可重点关注以下方向：

(1)高能量密度软包电池正极材料及电解液设计

在实用化的低E/S条件下，贫电解液使得正极材料更难以被浸润，同时高面载量增加了正极充分构建导电网络的难度，导致多硫化物转化动力学缓慢，使得比容量下降。因此，未来可针对此问题，开发高性能正极材料，设计催化剂以及新型电极结构，实现高能量密度硫正极。

低密度电解液对于实现高能量密度有着显著优势；另一方面，溶剂化能力的平衡对于实现电池更高的容量发挥有着重要作用。结合机器学习技术，可实现对电解液关键物理性质的提取、对比、筛选，建立起系统的评价体系，达成高效精准的电解液设计目标。

(2)低N/P条件下的负极设计

金属锂负极过量使用是制约着高比能锂硫电池研发的重要因素，低N/P比下锂金属的不均匀沉积以及枝晶生长会导致循环寿命快速衰减。负极调控可从自身的界面稳定性出发，同时也可开发新型负极材料，比如合金负极以及石墨负极等。

(3)深入探究实用化条件电池失效机制

尽管已有研究关注锂硫软包电池的失效行为，但在低E/S比、低N/P比和高硫面载量等实用化条件下，正极反应受限、电解液消耗与锂负极失稳等过程相互耦合，其循环衰减机制尚缺乏系统认识。一方面，可采用原位表征技术（原位X射线衍射、原位拉曼光谱等）对于硫物种的相变、多硫化物的演化进行检测，另一方面也可使用仿真模拟技术对于电池反应过程进行推演，从而为厘清软包电池失效机制提供依据。

参考文献

[1] CHOI J W, AURBACH D. Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(4).

[2] MANTHIRAM A, FU Y, CHUNG S H, et al. Rechargeable lithium-sulfur batteries [J]. Chem Rev, 2014, 114(23): 11751-87.

[3] ZHOU G, CHEN H, CUI Y. Formulating energy density for designing practical lithium-sulfur batteries [J]. Nature Energy, 2022, 7(4): 312-9.

[4] FENG X-X, TAN S-J, XIN S. Critical material and device parameters for building a beyond-500-Wh/kg lithium-sulfur battery [J]. Next Materials, 2025, 6.

[5] ZHOU S, SHI J, LIU S, et al. Visualizing interfacial collective reaction behaviour of Li-S batteries [J]. Nature, 2023, 621(7977): 75-81.

[6] ZHOU S, PEI F, ZHENG Q, et al. Revealing competitive interfacial reactions in high-energy Li-S batteries [J]. Nature, 2026.

[7] LI C, ZHANG Q, SHENG J, et al. A quasi-intercalation reaction for fast sulfur redox kinetics in solid-state lithium–sulfur batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(10): 4289-300.

[8] LIU R, WEI Z, PENG L, et al. Establishing reaction networks in the 16-electron sulfur reduction reaction [J]. Nature, 2024, 626 (7997): 98-104.

[9] YAO W, LIAO K, LAI T, et al. Rechargeable Metal-Sulfur Batteries: Key Materials to Mechanisms [J]. Chem Rev, 2024, 124 (8): 4935-5118.

[10] BHARGAV A, HE J, GUPTA A, et al. Lithium-Sulfur Batteries: Attaining the Critical Metrics [J]. Joule, 2020, 4(2): 285-91.

[11] LIU T, LI H, YUE J, et al. Ultralight Electrolyte for High-Energy Lithium-Sulfur Pouch Cells [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2021, 60(32): 17547-55.

[12] GAO R, ZHU Y, TAO S, et al. Molecular skeleton programming of premediators in sulfur electrochemistry [J]. Nature, 2026, 653 (8114): 404-10.

[13] CHENG Q, CHEN Z-X, LI X-Y, et al. Constructing a 700 Wh kg−1-level rechargeable lithium-sulfur pouch cell [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 76: 181-6.

[14] LI X Y, FENG S, ZHAO C X, et al. Regulating Lithium Salt to Inhibit Surface Gelation on an Electrocatalyst for High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries [J]. J Am Chem Soc, 2022, 144 (32): 14638-46.

[15] LI Z, LI Y, BI C X, et al. Construction of Organic - Rich Solid Electrolyte Interphase for Long-Cycling Lithium–Sulfur Batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 34(5).

[16] LAO Z, HAN Z, MA J, et al. Band Structure Engineering and Orbital Orientation Control Constructing Dual Active Sites for Efficient Sulfur Redox Reaction [J]. Adv Mater, 2024, 36(2): e2309024.

[17] HU Z, GENG C, SHI J, et al. Breaking Li(+) Diffusion Limits in Practical Li-S Batteries via Electrolyte-Dispersible Li(+)-Reservoir Catalysts [J]. J Am Chem Soc, 2025, 147(45): 41924-33.

[18] LI X Y, LI B Q, FENG S, et al. Two-Stage Solvation of Lithium Polysulfides in Working Lithium-Sulfur Batteries [J]. J Am Chem Soc, 2025, 147(18): 15435-47.

[19] LI X-Y, LI B-Q, JIN T, et al. Competitive anion coordination overcomes charge-transfer barriers for lithium–sulfur batteries [J]. Joule, 2026.

[20] DöRFLER S, ALTHUES H, HäRTEL P, et al. Challenges and Key Parameters of Lithium-Sulfur Batteries on Pouch Cell Level [J]. Joule, 2020, 4(3): 539-54.

[21] JIN Q, QI X, YANG F, et al. The Failure Mechanism of Lithium-Sulfur Batteries under Lean-Ether-Electrolyte Conditions [J]. Energy Storage Materials, 2021, 38: 255-61.

[22] GUPTA A, MANTHIRAM A. Unifying the Clustering Kinetics of Lithium Polysulfides with the Nucleation Behavior of Li(2)S in Lithium-Sulfur Batteries [J]. J Mater Chem A Mater, 2021, 9(22): 13242-51.

[23] FEI Y, LI G. Unveiling the Pivotal Parameters for Advancing High Energy Density in Lithium - Sulfur Batteries: A Comprehensive Review [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(21).

[24] FENG J, LIU T, LI H, et al. Ultralight Electrolyte with Protective Encapsulation Solvation Structure Enables Hybrid Sulfur-Based Primary Batteries Exceeding 660 Wh/kg [J]. J Am Chem Soc, 2024, 146(6): 3755-63.

[25] ZHANG H, CHEN Y, GE X, et al. Anion-mediated electrolyte engineering unlocks high-energy-density and long-cycling sulfur-based batteries at ultra-low N/P ratio [J]. Science Bulletin, 2025.

[26] BI C X, ZHAO M, HOU L P, et al. Anode Material Options Toward 500 Wh kg(-1) Lithium-Sulfur Batteries [J]. Adv Sci (Weinh), 2022, 9(2): e2103910.

[27] JIA A, GAO W, WANG J, et al. Suppressed lithium plating in graphite anodes enabled by tailoring the interfacial lithium concentration [J]. Joule, 2026.

[28] ABDOLLAHIFAR M, MOLAIYAN P, LASSI U, et al. Multifunctional behaviour of graphite in lithium-sulfur batteries [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 169.

[29] YAN W, YANG J L, XIONG X, et al. Versatile Asymmetric Separator with Dendrite-Free Alloy Anode Enables High-Performance Li-S Batteries [J]. Adv Sci (Weinh), 2022, 9(25): e2202204.

[30] SANG P, CHEN Q, WANG D-Y, et al. Organosulfur Materials for Rechargeable Batteries: Structure, Mechanism, and Application [J]. Chemical Reviews, 2023, 123(4): 1262-326.

[31] WU Q, WU Y, QIN M, et al. Sulfurized polyacrylonitrile cathode for advanced alkali metal-sulfur batteries: Synthesis, structure, mechanism, and application [J]. Materials Today, 2025, 91: 65-83.

[32] SUNG J H, LEE S, YU J H, et al. Engineering Hollow-Structured Carbon Framework to Facilitate High-Sulfur-Content Encapsulation for Lithium-Sulfur Batteries [J]. Small, 2025, 21(49): e08609.

[33] JI X, LEE K T, NAZAR L F. A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries [J]. Nat Mater, 2009, 8(6): 500-6.

[34] KIM J-H, LEE Y-H, CHO S-J, et al. Nanomat Li-S batteries based on all-fibrous cathode/separator assemblies and reinforced Li metal anodes: towards ultrahigh energy density and flexibility [J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(1): 177-86.

[35] GUO J, LIANG H, YANG Q, et al. Steric-Hindrance Effect Induced Fabrication of Lightweight, Bi-Functional, and Easy-to-Infiltrate Hosts for 502 Wh kg(-1) Lithium-Sulfur Batteries [J]. Adv Mater, 2025: e18154.

[36] JIAO X, TAN L, TANG X, et al. A 405 W h kg−1 Ah-level lithium-sulfur pouch battery stabilized over 200 cycles by an electron-triode-like GeS2-NiS2 heterostructure [J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(9): 4053-67.

[37] ZUO X, QIU Y, ZHEN M, et al. Review on MXenes-Based Electrocatalysts for High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries [J]. Nanomicro Lett, 2025, 17(1): 209.

[38] SON D, PARK C Y, KIM J, et al. Design Strategies Based on Electronic Interactions for Effective Catalysts in Lithium-Sulfur Batteries [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2025, 64(28): e202425037.

[39] CHO H, JUNG J, KIM I, et al. Interconvertible and rejuvenated Lewis acidic electrolyte additive for lean electrolyte lithium sulfur batteries [J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 6805.

[40] LI X, YUAN L, LIU D, et al. Solid/Quasi-Solid Phase Conversion of Sulfur in Lithium-Sulfur Battery [J]. Small, 2022, 18(43): e2106970.

[41] LIU Y, AN Y, FANG C, et al. Surface-localized phase mediation accelerates quasi-solid-state reaction kinetics in sulfur batteries [J]. Nat Chem, 2025, 17(4): 614-23.

[42] BI R, WANG J, WAN J, et al. Spatially coupled adsorption and catalysis for sustainable lithium–sulfur batteries [J]. Nature Sustainability, 2026.

[43] KIM S, LIM W G, JUNG H, et al. Protective catalytic layer powering activity and stability of electrocatalyst for high-energy lithium-sulfur pouch cell [J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 1649.

[44] LI H, MENG R, YE C, et al. Developing high-power Li||S batteries via transition metal/carbon nanocomposite electrocatalyst engineering [J]. Nat Nanotechnol, 2024, 19(6): 792-9.

[45] YU T, XIAO R, TANG P, et al. Breaking insulating barriers in solid-phase conversion reactions with dual-atom catalysts for high-energy lithium batteries [J]. Nature Catalysis, 2026, 9(4): 460-70.

[46] WANG W, YU Z, YUE L, et al. Regulating Electronic Structure and Coordination Environment of Transition Metal Selenides through the High-Entropy Strategy for Expedited Lithium-Sulfur Chemistry [J]. ACS Nano, 2025, 19(30): 27440-54.

[47] LI Y, CHEN Q, WANG Z, et al. Reverse Modulation of Carbon-Interface Electron Density via s-d Block High-Entropy-Alloys Boosts Li-S Batteries [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2025, 64(47): e202517660.

[48] WANG T, DONG Q, WANG F, et al. Functionless cobalt toward functional cobalt nitride: Catalytic sulfur carrier for lithium-sulfur pouch batteries [J]. Matter, 2024, 7(3): 1035-53.

[49] LI S, LIN J, CHANG B, et al. Implanting single-atom N2-Fe-B2 catalytic sites in carbon hosts to stabilize high-loading and lean-electrolyte lithium-sulfur batteries [J]. Energy Storage Materials, 2023, 55: 94-104.

[50] LIAO M, XU Y, RAHMAN M M, et al. Hybrid polymer network cathode-enabled soluble-polysulfide-free lithium–sulfur batteries [J]. Nature Sustainability, 2024, 7(12): 1709-18.

[51] ZHANG X, GUO W, FU Y. Hybrid Organosulfur Cathode

Materials for Rechargeable Lithium Batteries [J]. Accounts of Materials Research, 2024, 5(3): 316-28.

[52] ZHAO X, WANG C, LI Z, et al. Sulfurized polyacrylonitrile for high-performance lithium sulfur batteries: advances and prospects [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(35): 19282-97.

[53] LIU J, LU H, KONG X, et al. Formation Mechanism and Molecular Structure of Sulfurized Polyacrylonitrile [J]. Adv Mater, 2025, 37(29): e2503534.

[54] XIE J, CHEN J, GUO L, et al. Deciphering the Sulfur-Involved Bonding Interactions in Sulfurized Polyacrylonitrile: The Formation Thermodynamics and the Roles in Electrochemical Characteristics [J]. ACS Nano, 2025, 19(3): 3931-43.

[55] PHAN A L, LE P M L, WANG C. Realizing high-energy and long-life Li/SPAN batteries [J]. Joule, 2024, 8(6): 1601-18.

[56] WANG J, YANG J, XIE J, et al. A Novel Conductive Polymer-Sulfur Composite Cathode Material for Rechargeable Lithium Batteries [J]. Advanced Materials, 2002, 14(13-14): 963-5.

[57] WANG N, WANG S, ZHENG Y, et al. Revealing key structures for reversible sulfur redox in amorphous polymeric sulfur [J]. Nat Mater, 2026.

[58] DONG P, HAN K S, LEE J I, et al. Controlled Synthesis of Sulfur-Rich Polymeric Selenium Sulfides as Promising Electrode Materials for Long-Life, High-Rate Lithium Metal Batteries [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(35): 29565-73.

[59] NANDA S, BHARGAV A, JIANG Z, et al. Implications of in situ chalcogen substitutions in polysulfides for rechargeable batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(10): 5423-32.

[60] LI S, HAN Z, HU W, et al. Manipulating kinetics of sulfurized polyacrylonitrile with tellurium as eutectic accelerator to prevent polysulfide dissolution in lithium-sulfur battery under dissolution-deposition mechanism [J]. Nano Energy, 2019, 60: 153-61.

[61] ZHOU J, HOLEKEVI CHANDRAPPA M L, TAN S, et al. Healable and conductive sulfur iodide for solid-state Li-S batteries [J]. Nature, 2024, 627(8003): 301-5.

[62] WU Q, WU Y, YAN H, et al. A cross-linked nanoflower network and Se-doping enabling sulfur-rich SPAN towards lithium–sulfur batteries beyond 600 W h kg−1 [J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(10): 4905-15.

[63] ZUO W, LI R, WU X, et al. SPAN secondary particles enabled high energy density Lithium-Sulfur battery [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 491.

[64] ZOU R, LIU W, RAN F. Selenium-doped cathode materials with polyaniline skeleton for lithium-organosulfur batteries [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 79: 148-57.

[65] LU Y, CHEN J. Prospects of organic electrode materials for practical lithium batteries [J]. Nat Rev Chem, 2020, 4(3): 127-42.

[66] CHENG H, ZHANG S, ZHANG B, et al. n-Hexane Diluted Electrolyte with Ultralow Density enables Li-S Pouch Battery Toward >400 Wh kg(-1) [J]. Small, 2023, 19(9): e2206375.

[67] MIAO Q, SOLAN N, HYUN G, et al. Electrolyte Engineering for Long-Life Li-SPAN Batteries [J]. ACS Energy Letters, 2023, 8 (11): 4818-30.

[68] KIM S C, GAO X, LIAO S L, et al. Solvation-property relationship of lithium-sulphur battery electrolytes [J]. Nat Commun, 2024, 15 (1): 1268.

[69] CAI H, CUI X, SHI Y, et al. Quasi-Solid-State Conversion with Fast Redox Kinetics Enabled by a Sulfonamide-Based Electrolyte in Li-Organic Batteries [J]. ACS Nano, 2024, 18(47): 32723-31.

[70] PENG L, GENG C, HE Y, et al. Surface Charge-Modulated Electric-Double-Layer Structure on Pt Catalyst for Efficient and Durable Sulfur Reaction in Li-S Batteries [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2025: e23287.

[71] SONG C, PAN L, CHEN L, et al. Nanofluidic-enhanced high-mass-loading electrodes for energy-dense and high-rate lithium–sulfur batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18 (17): 8244-55.

[72] HUANG Z, LIANG Y, WU Z, et al. Multifunctional Ultrathin Ti(3)C(2)T(x) MXene@CuCo(2)O(4) /PE Separator for Ultra-High-Energy-Density and Large-Capacity Lithium-Sulfur Pouch Cells [J]. Adv Mater, 2025, 37(1): e2410318.

[73] LIAO T, HUANG S, WANG L, et al. Biomimetic Ultrathin Cellulose Composite Separators for High - Performance Lithium–Sulfur Batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2025.

[74] ZHAO M, LI X-Y, CHEN X, et al. Promoting the sulfur redox kinetics by mixed organodiselenides in high-energy-density lithium–sulfur batteries [J]. eScience, 2021, 1(1): 44-52.

[75] JIN T, LI X Y, ZHAO M, et al. Promoting the Rate Performances of Weakly Solvating Electrolyte-Based Lithium–Sulfur Batteries [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2025, 64(32): e202504898.

[76] JIANG F, DU Y-F, GUO J-X, et al. Thermoresponsive solid electrolyte interphase enables safe lithium–sulfur batteries with high energy density [J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(10): 4925-33.

[77] KIM H, BANG S, MIN K J, et al. Achieving High-Performance Li-S Batteries via Polysulfide Adjoining Interface Engineering [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(33): 39435-45.

[78] MA C, NI X, ZHANG Y, et al. Implanting an ion-selective "skin" in electrolyte towards high-energy and safe lithium-sulfur battery [J]. Matter, 2022, 5(7): 2225-37.

[79] LI Z, LI B Q, CHEN L L, et al. Regulating Lithium Bond to Reduce Polysulfide Parasitic Reactivity for High-Stability Lithium Metal Anode [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2026: e22034.

[80] HAN Z, LI S, SUN M, et al. Fluorobenzene diluted low-density electrolyte for high-energy density and high-performance lithium-sulfur batteries [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 68: 752-61.

[81] LI Z, YU L, BI C X, et al. A three - way electrolyte with ternary solvents for high-energy-density and long-cycling lithium–sulfur pouch cells [J]. SusMat, 2024, 4(2).

[82] PENG L, SHANG T, HAN J, et al. Nonpoisoned metal catalysts enabled by concave carbon confinement for durable sulfur conversion in batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2026.

[83] TU S, CHEN Z, ZHANG B, et al. Realizing High Utilization of

High-Mass-Loading Sulfur Cathode via Electrode Nanopore Regulation [J]. Nano Lett, 2022, 22(14): 5982-9.

[84] PENG L, GENG C, HE Y, et al. Chemo-Electrochemical Tandem Catalysis Unlocking Sulfur Reaction in Practical Lithium-Sulfur Batteries [J]. Adv Mater, 2026, 38(11): e21611.

[85] CHEN Z-X, HOU L-P, BI C-X, et al. Failure analysis of high-energy-density lithium – sulfur pouch cells [J]. Energy Storage Materials, 2022, 53: 315-21.

[86] WANG H, YAN X, ZHANG R, et al. Application-driven design of non-aqueous electrolyte solutions through quantification of interfacial reactions in lithium metal batteries [J]. Nat Nanotechnol, 2025, 20(8): 1034-42.

[87] LIU M, HU L J, GUAN Z K, et al. Tailoring Cathode-Electrolyte Interface for High-Power and Stable Lithium-Sulfur Batteries [J]. Nanomicro Lett, 2024, 17(1): 85.

[88] LU Y, LV X, SHAO J, et al. Temperature tailored robust solid electrolyte interface for improved high-areal-capacity prelithiated silicon-carbon anode [J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 109: 76-88.

[89] YILA G, JIA P, XIA S, et al. Stable Cycling of Solid-State Lithium-Sulfur Batteries by In Situ Construction of Li(3)PO(4)/LiF-Enhanced Interface [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2025.

[90] LI A-M, WANG Z, LEE T, et al. Asymmetric electrolyte design for high-energy lithium-ion batteries with micro-sized alloying anodes [J]. Nature Energy, 2024, 9(12): 1551-60.

[91] HAJIAN FOROUSHANI M, MAROUFI S, KHAYYAM NEKOUEI R, et al. Artificial solid electrolyte interphase: The Holy Grail for Li-S batteries [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 212.

[92] QU D, LIU T, SUN Y, et al. Macromolecular Boron - Based Salt Enables Dense Interphases for Long - Cycling Lithium - Sulfur Batteries [J]. Advanced Materials, 2025, 37(41).

[93] SUN C, WANG Y, ZHOU Q, et al. The in situ electrolyte reduction induced construction of LiF-rich cathode electrolyte interphase synergizing with high sulfur loading cathode design for high cycle-stable lithium-sulfur batteries [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 525.