

锂硫电池中碳基正极材料的研究进展

邹晓婉

温州大学化学与材料工程学院, 浙江 温州

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年6月18日

摘要

锂硫(Li-S)电池凭借高达 $2600 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的理论能量密度与 $1675 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的理论容量,且硫资源储量丰富、成本低廉等优势,被视为下一代高性能储能系统的关键体系。然而,其商业化应用受制于硫正极导电性差、充放电过程中体积膨胀,以及多硫化物穿梭效应严重等问题。碳材料凭借优异的导电性、高比表面积和良好的化学稳定性,被广泛研究用于正极结构设计。本文系统梳理了Li-S电池碳基正极材料的研究进展,重点介绍了多孔碳、碳纳米管、石墨烯、碳纳米纤维、杂原子掺杂碳、生物质炭及碳基电催化材料等硫载体的性能表现。最后指出了当前碳基正极材料面临的挑战并展望了未来的发展方向。

关键词

锂硫电池, 穿梭效应, 硫正极, 碳材料

Research Progress on Carbon-Based Cathode Materials for Lithium-Sulfur Batteries

Xiaowan Zou

College of Chemistry and Materials Engineering, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: May 9, 2026; accepted: June 3, 2026; published: June 18, 2026

Abstract

Lithium-sulfur (Li-S) batteries are considered key systems for next-generation high-performance energy storage. They offer a theoretical energy density of up to $2600 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ and a theoretical capacity of $1675 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. Additionally, sulfur resources are abundant and cost-effective. However, their commercial application is limited by several issues. These include poor conductivity of the sulfur cathode, volume expansion during charge and discharge, and the severe polysulfide shuttle effect. Carbon materials have been widely studied for their potential in cathode structure design. This is due to their excellent conductivity, high specific surface area, and good chemical stability.

文章引用: 邹晓婉. 锂硫电池中碳基正极材料的研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 65-78.

DOI: [10.12677/ms.2026.166139](https://doi.org/10.12677/ms.2026.166139)

This paper systematically reviews the research progress of carbon-based cathode materials for Li-S batteries. It highlights the performance of porous carbon, carbon nanotubes, graphene, carbon nanofibers, heteroatom-doped carbon, biomass-derived carbon, and carbon-based electrocatalytic materials as sulfur hosts. Finally, the challenges currently faced by carbon-based cathode materials are discussed, and future development directions are proposed.

Keywords

Lithium-Sulfur Battery, Shuttle Effect, Sulfur Cathode, Carbon Materials

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

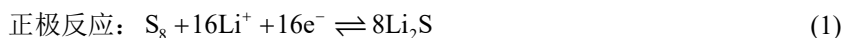
面对新能源技术的飞速发展，特别是电动汽车和智能电子设备对高能量密度储能的迫切需求，开发先进的可充电电池体系成为研究重点。Li-S 电池具有能量密度高、自放电低、环境污染小等优点。其中，硫作为正极活性材料，资源丰富、价格低廉[1][2]，通过两电子氧化还原反应可提供高达 $1675 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的理论容量[3]。而锂负极的理论容量高达 $3860 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，被认为是理想的负极材料。

尽管如此，Li-S 电池的大规模商业应用长期受制于正极侧由于硫及其产物带来的三个核心问题，即多硫化物穿梭效应、硫正极的导电性差以及充放电过程中的体积膨胀问题[4][5]。首先，多硫化物穿梭效应是最棘手的问题。可溶性多硫化物在正负极之间扩散迁移，形成“穿梭循环”，导致充电效率差和容量衰减快，同时造成内阻增加和反应动力学缓慢等附加问题。其次，硫正极的电导率极低($5 \times 10^{-30} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$)，导致活化困难、活性物质利用率低[6]。第三，硫在放电转化为 Li_2S 的过程中经历 80% 的体积膨胀，导致电极结构逐渐瓦解、活性物质流失，进而造成电池容量衰减[7]。

为了克服 Li-S 电池正极材料的这些缺陷，最有效策略之一是将硫活性材料分散在其他导电基质中来物理限制或化学键合硫及锂多硫化物。在众多固硫材料中，碳基材料因其优异的导电性[8]、独特的孔隙结构[9]和良好的机械/化学稳定性、制备成本低等特点，在 Li-S 电池中被广泛用于硫载体研究[10]。目前有关碳基正极材料在 Li-S 电池中的应用研究主要是多孔碳、碳纳米管、石墨烯、碳纳米纤维、杂原子掺杂碳、生物质碳及碳基电催化材料。本文分类综述了近年来这些碳材料在 Li-S 电池正极中的应用进展及其对电池性能的改善作用，并分析了当前碳基正极材料面临的挑战，展望了未来的发展方向。

2. Li-S 电池的工作原理

Li-S 电池的储能过程本质上依赖于硫元素在电化学反应中的氧化还原反应。放电时，Li 负极发生氧化反应，失去电子转化为 Li^+ 。这些阳离子在电场力驱动下经外部电路传导至正极，从而产生电流。在正极侧，经由外电路传递的电子与活性物质硫发生还原反应，依次生成可溶性多硫化物中间体，并最终转化为完全放电态产物 Li_2S 。充电过程则为上述反应的逆向进行， Li_2S 被可逆地氧化为硫单质。在整个充放电循环中，金属负极同步进行着可逆的金属沉积与溶解过程。放电过程的反应方程式如下[11]：





Li-S 电池的实际电化学过程涉及一系列复杂的反应, 这些反应在不同的电解液系统中可能会有很大的不同。通常 Li-S 电池在醚类电解液中放电电压曲线中有两个平台, 分别位于 2.3 V 和 2.1 V, 对应着 S_8 到 Li_2S_4 的转换和 Li_2S_4 到 Li_2S 的转换。从图 1(b)中可以看出, 放电的最终产物为 Li_2S 。在充电过程中, Li_2S 再经过多硫化物中间产物最终转变成 S_8 , 由此形成电池的可逆循环。然而, 在充电过程中的两个充电平台通常区分不明显。放电过程可对应四个阶段:

阶段 1: 固态环状结构的 S_8 溶解于电解质中, 形成液态 S_8 [14]。随后 S_8 分子键断裂与 Li^+ 结合形成液态的可溶性的长链 Li_2S_8 , 对应着放电电压为 2.3 V 的第一个放电平台。



阶段 2: Li_2S_8 参与还原反应, 最终转化成可溶性的短链 Li_2S_6 和 Li_2S_4 。



阶段 3: 液态的 Li_2S_4 被还原成固态不可溶性短链 Li_2S_2 , 对应着放电电压为 2.1 V 的第二个放电平台。



阶段 4: 固态的不可溶短链 Li_2S_2 进一步被还原成 Li_2S 。

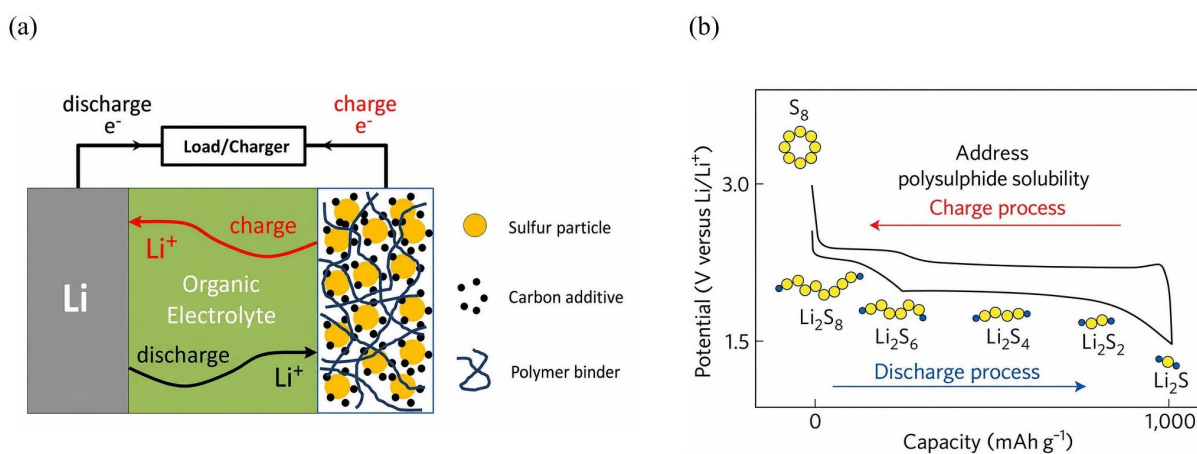


Figure 1. (a) Schematic illustration of the working principle of Li-S batteries [12]; (b) Schematic illustration of the charge-discharge curves of Li-S batteries [13]

图 1. (a) Li-S 电池工作原理示意图[12]; (b) Li-S 电池充放电曲线示意图[13]

3. 碳基正极材料

碳材料因其优异的导电性、高比表面积以及丰富的资源存储, 成为 Li-S 电池正极理想的硫宿主材料 [15]。其丰富的多级孔结构既可以缓解硫的体积膨胀, 又能通过物理限域作用抑制多硫化物的穿梭效应 [16]。基于此, 碳基正极材料为突破 Li-S 电池的性能瓶颈提供了切实可行的发展路径。

3.1. 硫/多孔碳复合材料

多孔碳材料导电性好,孔隙数量和孔径大小易于调节,在锂硫电池正极中应用广泛。根据孔径大小,可将其分为微孔(孔径 < 2 nm)、介孔(孔径 $2\sim 50$ nm)和大孔(孔径 > 50 nm)碳材料,其中微孔吸附活性物质硫,介孔提供离子传输通道,大孔储存电解液。

Liu 等人用软模板法结合湿法刻蚀制备了兼具微孔和介孔的双孔碳球(MMPC),该材料在约 77.2% 的硫载量下,初始放电容量为 $921 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,且在 $100 \text{ mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 下倍率性能高达 $1086 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ [17]。Carter 等人以电化学刻蚀的多孔硅为牺牲模板制备了介孔碳材料,该碳材料结合了介孔存储硫和表面含氧官能团吸附多硫化物的双重作用[18]。含硫 60 wt% 的复合正极在 0.1 C 下初始容量为 $1350 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,0.2 C 下循环 100 次后容量保持率达 81%。Park 等人通过蚀刻自组装氧化铁/碳杂化纳米片(IO-CNS),合成了如图 2(b)具有规整立方介孔的蜂窝状有序介孔碳纳米片(OMCNS) [19]。负载 70 wt% 硫的 OMCNS-S 正极在 0.5 C 下循环 500 次后比容量保持 $505.7 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,单次循环衰减率仅 0.081%,且 2 C 高倍率下容量达 $580.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。2009 年 Ji 等人首次将介孔碳 CMK-3 用于 Li-S 电池硫载体[20]。如图 2(e)通过熔融扩散法将硫负载于 CMK-3 孔道中,利用介孔纳米限域效应有效抑制了多硫化物的溶解与扩散,该 CMK-3/S 复合正极在 0.1 C 下实现了约 $1320 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的初始比容量且循环稳定性良好。Zhang 等人将硫封装于碳球的微孔之中,42 wt% 的硫-碳球复合材料借碳球微孔强吸附限域电化学反应,可稳定循环 500 次,证明微孔碳材料在抑制穿梭效应方面的独特优势[21]。Schuster 等人通过两步铸造法合成了具有超高孔隙率(孔容 $2.32 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$,比表面积 $2445 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)的球形有序介孔碳纳米颗粒[22]。将其用作 Li-S 电池正极材料时,实现了高达 $1200 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的可逆容量和优异的循环稳定性。Li 等人设计了如图 2(f)的有序介孔-微孔碳材料(MMCS),S/MMCS 复合材料在 0.5 C 下循环 200 次仍保有 $837 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 容量、容量保持率达 80%,可显著抑制多硫化物扩散[23]。

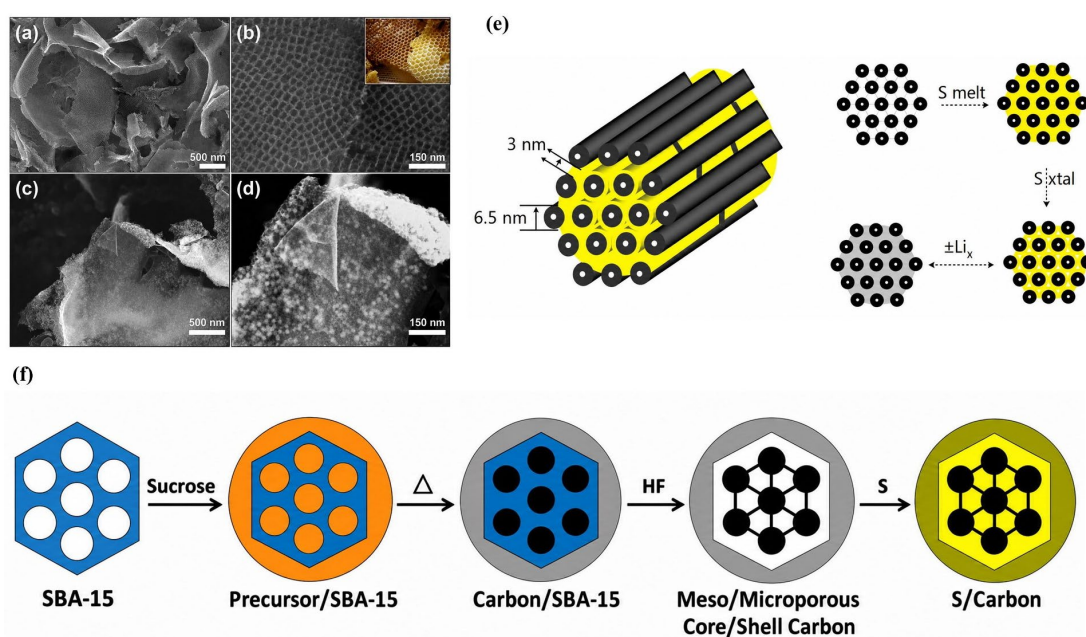


Figure 2. (a), (b) SEM images of OMCNS and (c), (d) OMCNS-S composites [19]; (e) Schematic structure of the CMK-3/S composite [20]; (f) Schematic illustration of the preparation process of MMCS carbon and S/C composites [23]

图 2. (a), (b) OMCNS 和 (c), (d) OMCNS-S 复合材料的 SEM 图像[19]; (e) CMK-3/S 复合材料结构示意图[20]; (f) MMCS 碳和 S/C 复合材料的制备流程图[23]

3.2. 硫/碳纳米管复合材料

碳纳米管(CNT)是一维中空管状材料,碳原子以 sp^2 杂化为主、管壁弯曲处辅以少量 sp^3 杂化,使其能适应形变而不失结构完整性[24]。凭借大的长径比、丰富的表面孔隙及交织的导电网络,CNT 可有效限域硫及多硫化物,并赋予电极优异的柔韧性和力学性能。CNT 可分为单壁碳纳米管(SWCNT)和多壁碳纳米管(MWCNT),其中 MWCNT 因制备成本较低而应用更广。

Yuan 等采用自下而上的策略构建了分层独立 CNT,硫载量达 $6.3 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ [25]。该电极以短 MWCNT 为导电骨架、超长 VACNT 为导电网络和机械性支撑(图 3(a)),在 0.05 C 下初始面积比容量为 $6.2 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$,三层堆叠后面积比容量可达 $15.1 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。Jin 等人制备了多壁碳纳米管-硫(MWCNTs-S)复合材料,利用氢氧化钾(KOH)蚀刻形成的间隙结构提升离子传输与电解液渗透,并增强导电性,初始放电能力为 $741 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,50 个周期后容量保持率为纯硫的 80% [26]。Sun 等人通过空气氧化法获得多孔碳纳米管(PCNT)材料,其兼具优异导电性、机械强度及柔性自支撑特性,丰富介孔与吸附位点可实现高硫负载并有效抑制多硫化物穿梭[27] (图 3(b))。所制备 S-PCNT 复合材料在 60 wt%、70 wt%高载硫条件下均具有优异性能。Wang 等人通过简单混合 MWCNT、硫粉与封端剂,原位合成了 MWCNT 包裹的双锥形硫颗粒,MWCNT 在硫颗粒内外自发形成三维导电网络,颗粒边缘预留约 35 vol%的无硫缓冲区域[28]。以此制备无粘结剂正极,在 0.05 C 下初始放电容量约为 $1600 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,并表现出优异的倍率稳定性与库仑效率。如图 3(c)所示,Zhao 等人受自然界藤树结构启发,利用层状双氢氧化物(LDHs)衍生的双尺寸催化剂,通过原位化学气相沉积自组装了藤蔓形碳纳米管(VT-CNT) [29]。其中单壁碳纳米管(藤)缠绕于多壁碳纳米管(树)周围,形成三维导电网络,用作锂硫电池正极骨架时可同时提供高效电子传输和丰富的离子吸附界面。该 VT-CNT/S 正极在 0.1 C 和 4 C 下比容量分别为 $1120 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $570 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Chen 等人先用硝酸处理碳纳米管,再将硫包覆于其表面形成核壳结构,最后球磨制成大孔纳米球结构[30]。该材料在 $0.3 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下循环 100 次后容量为 $1000 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,在 $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下循环 200 次后仍保持 $650 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

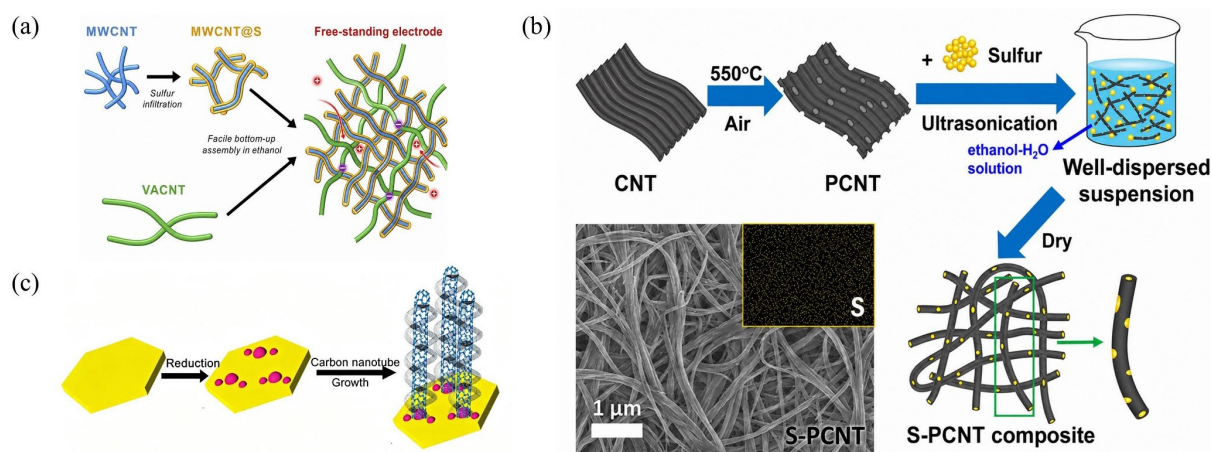


Figure 3. (a) Schematic illustration of the preparation process of the self-supporting carbon nanotube cathode [25]; (b) Schematic illustration of the synthesis of the S-PCNT composite [27]; (c) Schematic illustration of the synthesis of VT-CNTs [29]
图 3. (a) 自支撑碳纳米管正极制备流程图[25]; (b) S-PCNT 复合材料合成示意图[27]; (c) VT-CNTs 合成示意图[29]

3.3. 硫/石墨烯复合材料

石墨烯是由碳原子通过 sp^2 杂化构成的二维材料,具有极高的理论比表面积($2630 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) [31]。碳原子在平面内以三个强共价键相连接,并形成平面外 π 键的垂直轨道,赋予结构出色的稳定性[32]。作为硫

载体, 石墨烯的二维层状结构既可缓冲体积膨胀, 又能提升复合正极材料的导电性, 因此在储能领域备受关注[33]。

2011年, Wang 等人首次通过加热石墨烯纳米片与单质硫的混合物, 合成了硫均匀包覆于石墨烯纳米片表面的 S-GNS 复合材料[34]。电化学测试表明, 该复合正极在导电性、容量及循环稳定性方面均显著优于纯硫正极。Zhou 等人采用石墨烯泡沫作为硫载体, 硫载量为 $10.1 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 面积比容量高达 $13.4 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ [35]。在 $6 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 大电流密度下可逆容量仍高于 $450 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 且 1000 次循环中每次循环容量衰减率仅约 0.07%。Wang 等人用聚乙二醇(PEG)包裹的亚微米硫颗粒和炭黑纳米颗粒修饰的氧化石墨烯片层合成了石墨烯-硫复合材料(图 4(a)), 该复合材料在 100 余次循环中保持约 600 mAh/g 的稳定比容量[36]。如图 4(b), Duan 等人以超声波色散法制备超薄石墨片(UGS)替代传统炭黑作为导电剂[37]。UGS 可在无表面活性剂下自发包裹硫颗粒, 形成高效三维导电网络, 使正极在 1 C 以上倍率的性能优于纳米级炭黑/硫正极。Shang 等人制备了由还原石墨烯氧化物(rGO)与硫组成的柔性自支撑薄膜(图 4(c)), rGO 与均匀分散的硫分子之间存在强相互作用, rGO/S 薄膜在 2 C 倍率下仍具有 $485 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高倍率容量和优异的循环稳定性[38]。2014 年, Zhao 等人研发了一种非堆叠双层石墨烯材料(图 4(d)), 以介孔凸起阻隔片层堆叠, 用于 Li-S 电池后具备优异高倍率性能, 在 5 C、10 C 倍率下循环 1000 次仍分别保持 530 、 $380 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 容量[39]。Ji 等人合成了氧化石墨烯-硫(GO-S)纳米复合正极, 利用 GO 表面官能团与多硫化物之间的强相互作用显著抑制穿梭效应, 该正极在 0.1 C 下循环 50 次稳定保持约 $950\sim 1400 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 高可逆容量[40]。

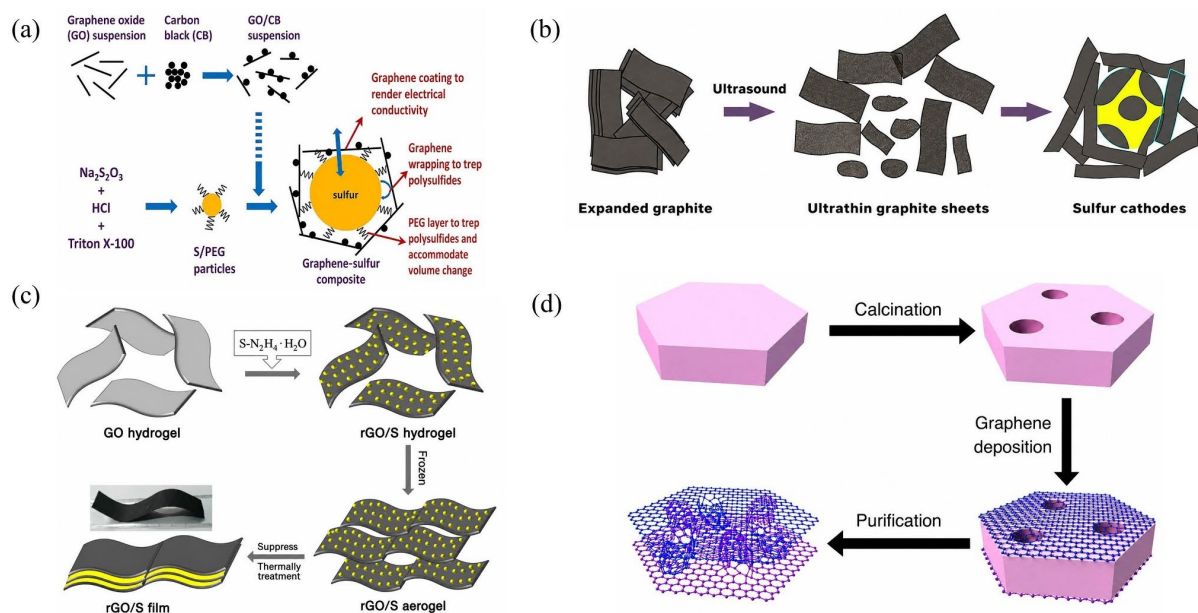


Figure 4. (a) Schematic illustration of the preparation process of the novel graphene/sulfur composite [36]; (b) Schematic illustration of the synthesis of UGS materials [37]; (c) Schematic illustration of the synthesis of flexible self-supporting rGO/S films [38]; (d) Schematic illustration of the synthesis of double-layer graphene materials [39]

图 4. (a) 新型石墨烯/硫复合材料制备流程图[36]; (b) UGS 材料合成示意图[37]; (c) 柔性自支撑薄膜 rGO/S 合成示意图[38]; (d) 双层石墨烯材料合成示意图[39]

3.4. 硫/碳纳米纤维复合材料

碳纳米纤维是一类一维纤维状碳材料, 具有较大的比表面积、优异的导电性和良好的结构连续性。

与碳纳米管类似，碳纳米纤维可构建连续导电网络，并为多硫化物提供吸附和限域空间，从而减轻穿梭效应。

Yun 等人通过电纺丝制备了 CNF 基体用于硫正极，利用一维材料的高导电性和 CNF 多硫化物的吸附，实现了对多硫化物溶解的物理抑制[41]。该设计使硫载量高达 $10.5 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，并提供超过 $7 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的面积比容量。Li 等人通过将硫浸渍到氮掺杂的活性中空碳纳米纤维(ANHCNF)中，该材料 BET 比表面积达 $608 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 、孔容为 $0.8 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ [42]。含硫 50 wt% 的复合正极在 0.2 C 下初始可逆容量为 $1230 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，100 次循环后仍保持约 $920 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Hu 等人通过静电纺丝结合高温碳化，制备了碳化钨(WC)掺杂的多孔碳纳米纤维(PCNF)夹层结构自支撑正极[43]。对比不同质量比的聚丙烯腈/偏钨酸铵与多孔碳纳米纤维结合后电镜照片(图 5(a)~(f))，WC-PCNF₂ 和 WC-PCNF₃ 表面更光滑且孔洞更丰富，提供了丰富的多硫化物吸附活性位点。WC-PCNF₂ 在 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高硫载量下，0.2 C 循环 200 次后容量保持 $636.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，容量保持率达 88%。Li 等人设计了“派”结构自支撑电极，以莲藕状多通道碳纳米纤维(图 5(g))为“馅料”填充硫，以氨基功能化石墨烯为“外壳”提供导电和限域作用[44]。该电极在硫载量 $3.6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时，0.1 C 下比容量达 $1314 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，循环稳定性良好；三层堆叠后硫载量达 $10.8 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，面积比容量可提升至 $8 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上。

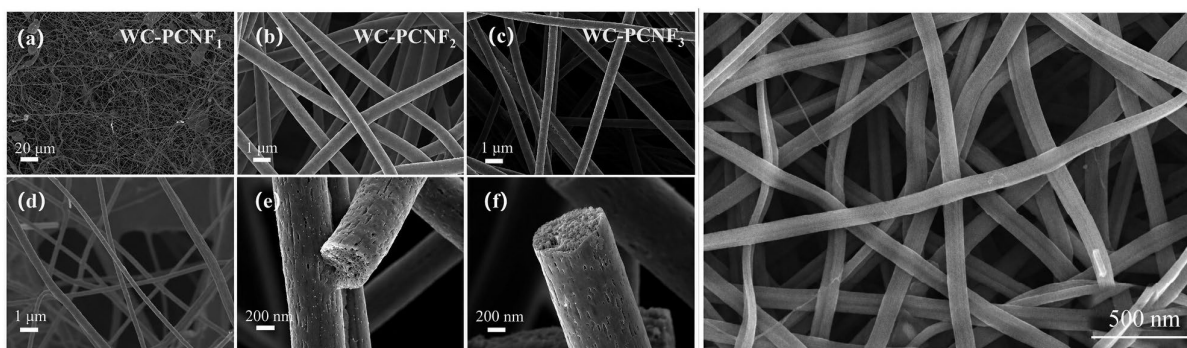


Figure 5. SEM images of (a), (d) WC-PCNF₁ film; (b), (e) WC-PCNF₂ film; (c), (f) WC-PCNF₃ film [43]; (g) SEM image of self-supporting multi-channel carbon nanofibers [44]

图 5. (a), (d) WC-PCNF₁ 膜; (b), (e) WC-PCNF₂ 膜; (c), (f) WC-PCNF₃ 膜的 SEM 照片[43]; (g) 自支撑的多通道碳纳米纤维 SEM 照片[44]

3.5. 硫/杂原子掺杂碳复合材料

传统的多孔碳/硫复合正极对多硫化物的物理限域作用较弱，难以有效抑制穿梭效应[45]-[47]。O、N、B、P、S 等杂原子与多硫化物吸附作用较强，所以碳材料的杂原子掺杂能大大改善 Li-S 电池性能[48]。

Chen 等人通过有机缩合反应，在 CNT 表面制备了由共价有机框架(COF)衍生的硼/氧共掺杂碳(BOC)材料，其中硼和氧杂原子分布均匀[49]。含硫量 68.5% 的 BOC@CNT 正极对多硫化物具有强吸附能力，并且电化学性能优异。0.2 C 下循环 200 次后可逆容量为 $1077 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，1 C 下循环 500 次后仍保持 $794 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Kim 等人通过水热合成法结合热处理，制备了氧化铈纳米晶体锚定于磷掺杂石墨烯(CeO₂/PG)的复合材料作为载硫材料[50]。S@CeO₂/PG 复合材料中硫转化过程如图 6(a)所示，含硫 72.3 wt% 的 S@CeO₂/PG 正极在 0.1 C 下比容量为 $1287 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，1 C 下循环 100 次后仍保持 $577.7 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Fan 等人以葡萄糖和三聚氰胺为前驱体，通过原位固态热有机-无机聚合和碳化方法制备氮掺杂碳纳米片(N-CNS) [51]。该含硫复合正极在 0.2 C 下首次和 200 次循环后的容量分别为 $1313 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $722 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，比未掺杂的葡萄糖衍生碳纳米片提升了 40% 以上。Song 等人制备了一种介孔氮掺杂碳-硫(MPNC-S)复

合正极，氮掺杂有效促进硫原子与氧官能团在碳上的化学吸附，该正极在 $0.7 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的高电流密度下 100 次循环容量保持率达 95%，循环稳定性优异[52]。Shi 等人合成了 N/S 共掺杂的具有高比表面积的多孔石墨烯(NSPG)材料[53]，能够保证 S/Li₂S 的均匀沉积和高利用率。如图 6(b)所示，其丰富褶皱的石墨烯骨架不仅能构建高效的通道以实现电解质离子/电子的快速转移，还能有效缓冲硫在长时间的充放电过程中的体积膨胀。

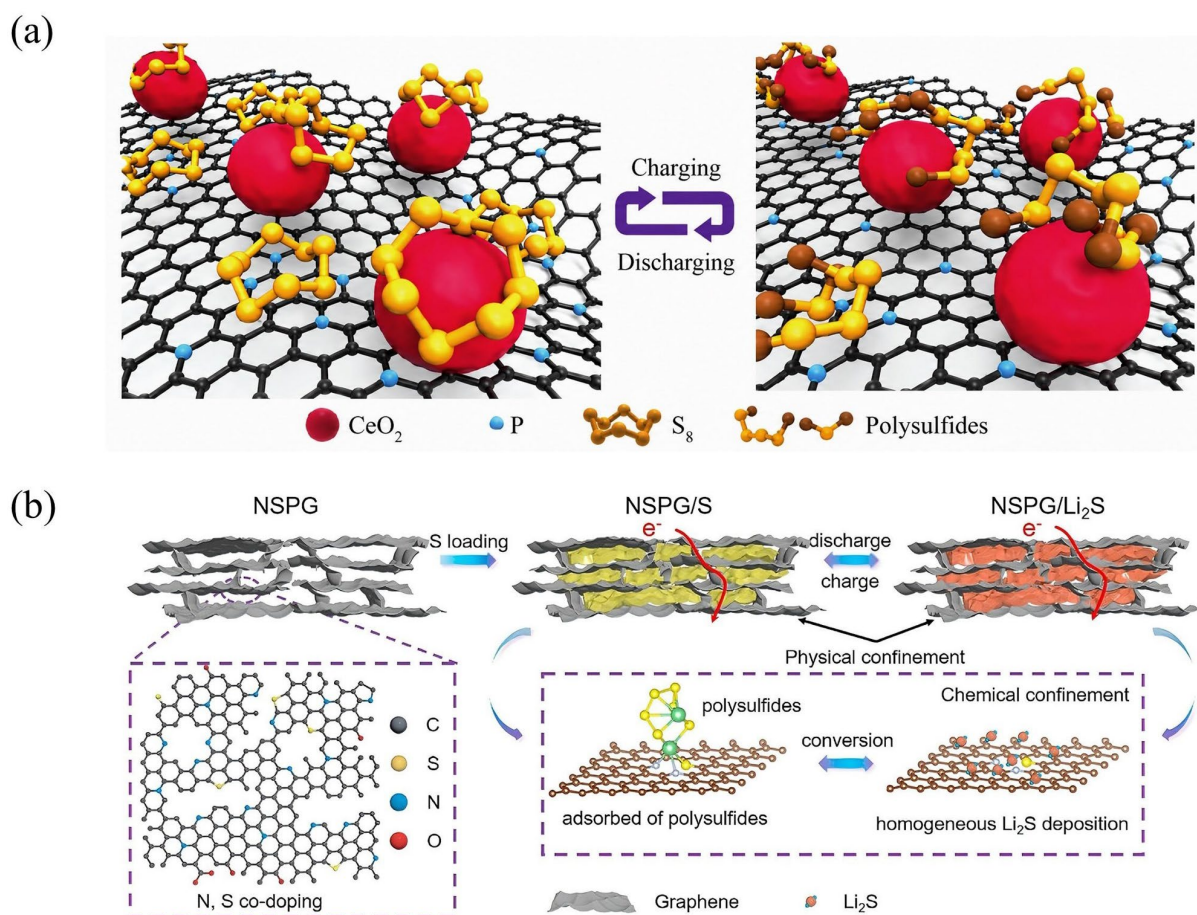


Figure 6. (a) Schematic illustration of the sulfur conversion process in the S@CeO₂/PG composite [50]; (b) Schematic illustration of S/Li₂S preparation and its interaction with polysulfides [53]

图 6. (a) S@CeO₂/PG 复合材料中硫转化过程示意图[50]; (b) S/Li₂S 制备及其与多硫化物的相互作用图[53]

3.6. 硫/生物碳复合材料

生物碳复合材料是指以生物质为前驱体，经碳化、活化或直接热解处理后得到的多孔碳材料，再与硫或其他功能组分复合而成[54]。这类材料兼具可持续性、来源广泛、成本低廉以及天然遗传结构多样性等优势。

Zhong 等人受爆米花制备过程启发，在高温高压(1.0 MPa, 200°C)下碳化大米使其体积膨胀约 20 倍，制备了纳米/微米薄片交联的多孔大孔碳(PRC) [55]。嵌入 Ni 纳米颗粒后，PRC/Ni 复合材料具有高电导率 ($\sim 7.2 \times 10^4 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$)、高孔隙率(85.1%)和高比表面积(1492.2 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)。用作锂硫电池硫载体时，PRC/Ni/S 电极在 0.2 C 下可逆容量达 $1257.2 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ，500 次循环后仍保持 $821 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Xia 等人利用苏铁叶制备多孔生物碳(FCB)，并用乙酸(HAc)清洗其空腔中的灰分、解决孔道堵塞问题[56]。经 HAc 处理后，FCB 的

比表面积提高 44.7% (达 2954 m²/g), 孔容提高 67.5% (达 1.39 cm³/g)。FCB/S 复合正极首次放电容量高达 1317 mAh/g, 200 次循环后仍保持 790 mAh/g, 每次衰减率仅为 0.068%。Yu 等人以商业木质素为前驱体, 通过一步碳化法制备了宏观/微孔结构的生物质衍生碳, 并且发现延长载硫时间会降低复合材料的总硫含量, 但提高微孔中硫的占比[57]。Xiao 等人以柚子皮为原料, 制备了氮掺杂的多孔碳作为硫宿主[58]。该材料在 0.1 C 下首次放电容量高达 1534.6 mAh·g⁻¹, 300 次循环中库仑效率保持在 98% 以上。Han 等人通过碳化根霉菌丝球(Rhizopus Hyphae Balls)制备了自支撑菌丝碳纳米带(HCNB), 并通过离子束溅射沉积引入微量铂(Pt)纳米颗粒(PtHCNB) [59]。该复合材料在 4.6 mg·cm⁻² 硫载量下, 0.5 C 循环 500 次后容量保持率达 77%。

3.7. 碳基电催化正极材料

在导电碳骨架中引入具有催化活性的金属位点、缺陷位点、金属化合物或多金属协同结构, 已成为提升 Li-S 电池性能的重要策略。碳基电催化材料的核心作用并不只是“吸附”锂多硫化物(Lithium Polysulfides, LiPSs), 而是加速 S₈ 与 Li₂S 之间的多步氧化还原转化过程。放电过程中, 催化位点可以促进长链 LiPSs 向短链 LiPSs 以及最终 Li₂S₂/Li₂S 的转化, 降低 Li₂S 成核能垒。充电过程中, 催化位点又可以促进 Li₂S 的分解和重新氧化, 从而减小极化并提高活性物质利用率。

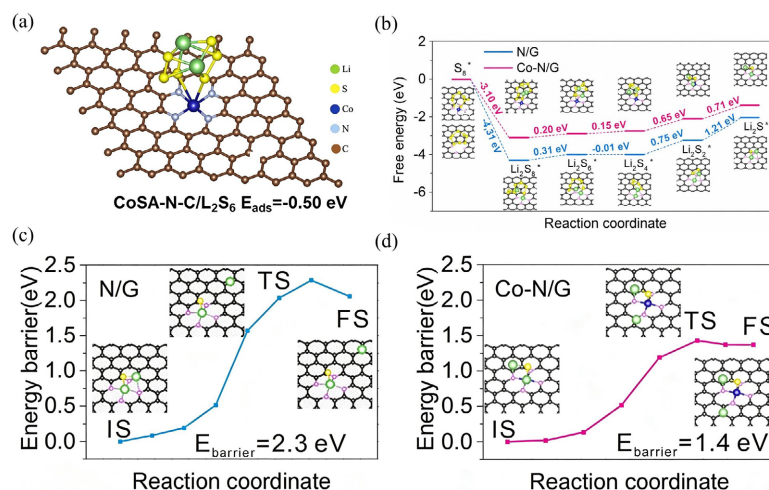


Figure 7. (a) DFT-calculated configuration and binding energy of Li₂S₆ on CoSA-N-C [60]; (b) Energy profiles for the reduction of LiPSs on N/G and Co-N/G substrates [61]; (c), (d) Energy profiles for the decomposition of Li₂S clusters on N/G and Co-N/G, respectively [61]

图 7. (a) 基于 DFT 计算的 Li₂S₆ 在 CoSA-N-C 的构型图和结合能[60]; (b) LiPSs 在 N/G 和 Co-N/G 基底上的还原过程能量变化曲线[61]; (c), (d) 分别为 Li₂S 团簇在 N/G 和 Co-N/G 上分解过程的能量变化曲线[61]

单原子催化剂负载碳材料是近年来 Li-S 电池碳基电催化正极的研究热点, 其原子利用率高、活性位点明确且配位环境不饱和, 可有效促进多硫化物的吸附与转化。Li 等制备了钴单原子修饰的氮掺杂碳材料(CoSA-N-C), 其中 Co-N₄ 位点可增强 LiPSs 吸附并促进其转化[60]。DFT 计算表明, Li₂S₆ 可稳定吸附在 CoSA-N-C 表面, 吸附能为 -0.50 eV, 如图 7(a) 所示。同时, 该材料还能调控 Li₂S 沉积, 避免绝缘 Li₂S 连续覆盖导电骨架。CoSA-N-C@S 正极硫含量达 74.2 wt%, 在 0.05 C 下初始放电比容量为 1574 mAh·g⁻¹, 并在 1 C 下循环 1000 次后表现出平均每圈 0.035% 的容量衰减率。Du 等构建了单原子 Co 嵌入氮掺杂石墨烯的 Co-N/G 催化材料[61]。如图 7(b)~(d) 所示, DFT 计算表明 Co-N/G 比普通 N/G 更有利于 LiPSs 还原, 并可降低 Li₂S 分解能垒由 2.3 eV 降低至 1.4 eV, 说明 Co-N-C 配位中心可作为双功能电催化位点, 分

别促进放电和充电过程中 Li_2S 的生成和分解。S@Co-N/G 复合正极的硫质量分数高达 90 wt%，质量比容量可达 $1210 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在硫面载量为 $6.0 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、0.2 C 循环 100 次的条件下，其面积容量达到 $5.1 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，平均每圈容量衰减率仅为 0.029%。除单原子催化剂外，高熵合金、高熵氧化物和高熵 MXene 等多金属协同催化材料也受到关注。其多元素组成和可调电子结构可提供丰富活性位点，促进 LiPSs 吸附与转化。Han 等人报道了高熵合金电催化剂用于促进 LiPSs 双向转化，证明高熵合金可以通过多金属协同效应改善 Li-S 电池的循环寿命和倍率性能[62]。Xu 等人进一步提出高熵 TiVNbMoC_3 MXene 的“原子主导接力催化”策略，用于促进 LiPSs 级联转化，证明高熵 MXene 类二维过渡金属碳化物在调控多步硫氧化还原反应方面具有潜力[63]。此外，Zhao 等人构建了二维高熵氧化物催化剂，通过稳定表面氧空位提高 LiPSs 吸附和催化转化能力，使 Li-S 电池在 0.2 C 下获得 $1301 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比容量，并在 1 C 下循环 2000 次后每圈容量衰减率低至 0.032% [64]。

3.8. 碳基正极材料性能参数对比与综合分析

Table 1. Comparison of key performance parameters of different carbon-based sulfur cathodes
表 1. 不同碳基硫正极材料的关键性能参数对比

材料类型	正极材料	硫含量 (wt%)	硫面载量 ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	E/S ($\mu\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)	循环圈数@循环后容量 ($\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$) @测试条件	倍率(C) @倍率容量($\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)
多孔碳	表面氧化介孔碳/S [18]	60	0.5	—	100@830@0.2C	—
	OMCNS-S [19]	70	—	—	500@505.7@0.5C	2C@580
碳纳米管	分层自支撑 CNT/S [25]	—	6.3	—	150@700@0.05C	—
	VT-CNT/S [29]	60	1.0~1.5	—	450@530@1C	4C@570
石墨烯	石墨烯泡沫/S [35]	70	10.1	—	1000@448@1500 $\text{mA}\cdot\text{g}^{-1}$	—
	非堆叠双层石墨烯/S [39]	64	—	—	1000@530@5C, 1000@380@10C	10C@734
碳纳米纤维	CNF/S [41]	78.99	10.5	—	100@680@0.1C	—
	WC-PCNF/S [43]	63	4.0	—	200@636.6@0.2C	3C@794.1
杂原子掺杂碳	BOC@CNT/S [49]	68.5	5.5	15.0	100@886@0.2C, 500@794@1C	5C@636
	S@CeO ₂ /PG [50]	72.3	—	—	100@577.7@1C	5C@380
生物质碳	PRC/Ni/S [55]	76.1	2.0	—	500@821@0.2C	2C@687.9
	PtHCNB/S [59]	49.3	4.6	5.0	500@670@0.5C, 50@593.4@0.1C	2C@635
碳基电催化剂	S@Co-N/G [61]	90	2.0	20	500@681@1C	4C@618
	TiVNbMoC ₃ HE-MXene/S [63]	58.6	1.5	9.2	100@810.3@0.2C	5C@545.2

由表 1 可以看出，不同碳基正极策略的优势和局限并不相同。多孔碳主要依靠孔结构实现硫分散和物理限域，适合作为基础载硫骨架。碳纳米管、石墨烯和碳纳米纤维更适合构建连续导电网络和高载硫电极，能够在较高硫面载量下维持较好循环性能。相比之下，杂原子掺杂碳、生物质碳负载金属位点以及碳基电催化剂进一步增强了 LiPSs 吸附和转化动力学。然而，这类材料也面临金属/催化组分增加非活

性质量、活性位点稳定性和制备复杂度较高等问题。因此，碳基正极材料不能只比较容量高低，还应综合考虑硫含量、硫面载量、E/S 比、循环寿命和高倍率性能。

4. 结论与展望

本文系统梳理了多孔碳、碳纳米管、石墨烯、碳纳米纤维、杂原子掺杂碳、生物质碳及碳基电催化材料在 Li-S 电池正极中的研究进展。碳材料凭借优异的导电性、可调的孔结构和良好的化学稳定性，在解决硫正极导电性差、体积膨胀及多硫化物穿梭效应三大核心问题方面发挥了关键作用。与此同时，单原子催化剂、高熵合金和高熵化合物等碳基电催化材料的引入，使碳材料的作用由传统的导电载体和物理限域平台，进一步拓展为兼具吸附和催化转化功能的反应调控体系。但当前碳基正极材料仍面临高硫负载下结构稳定性不足、长循环中穿梭效应难以根除以及规模化制备工艺复杂等挑战。

面向未来，碳基正极材料的研究应聚焦以下方向：一是开发兼具导电、吸附与催化功能的多功能碳基复合体系。二是设计能适应体积膨胀的碳结构以实现高硫负载稳定循环。三是加强原位/工况表征技术和理论计算的结合，深入分析碳材料在实际充放电过程中的作用机制。例如，原位拉曼、原位 XRD、原位 XAS 及工况显微表征等技术可用于追踪 LiPSs 演变，Li₂S 沉积/分解以及电极结构变化。密度泛函理论计算可从吸附能、差分电荷密度、态密度和反应能垒等角度，揭示不同孔结构、杂原子、缺陷位点和金属催化中心对多硫化物吸附及转化动力学的影响。此外，绿色合成工艺和生物质碳的标准化开发也是重要趋势。总体来看，碳基正极材料仍是推动 Li-S 电池实用化发展的关键体系，未来需要在材料设计、机理认识和工程化评价等方面协同优化。

参考文献

- [1] Armand, M. and Tarascon, J.M. (2008) Building Better Batteries. *Nature*, **451**, 652-657. <https://doi.org/10.1038/451652a>
- [2] Choi, N., Chen, Z., Freunberger, S.A., Ji, X., Sun, Y., Amine, K., *et al.* (2012) Challenges Facing Lithium Batteries and Electrical Double-Layer Capacitors. *Angewandte Chemie International Edition*, **51**, 9994-10024. <https://doi.org/10.1002/anie.201201429>
- [3] He J., Chen Y. and Manthiram A. (2018) Vertical Co₉S₈ Hollow Nanowall Arrays Grown on a Celgard Separator as a Multifunctional Polysulfide Barrier for High-Performance Li-S Batteries. *Energy & Environmental Science*, **11**, 2560-2568. <https://doi.org/10.1039/c8ee00893k>
- [4] Fu, Y., Zu, C. and Manthiram, A. (2013) *In Situ*-Formed Li₂S in Lithiated Graphite Electrodes for Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of the American Chemical Society*, **135**, 18044-18047. <https://doi.org/10.1021/ja409705u>
- [5] Chen, X., Peng, L., Yuan, L., Zeng, R., Xiang, J., Chen, W., *et al.* (2019) Facile Synthesis of Li₂S@C Composites as Cathode for Li-S Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **37**, 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.12.008>
- [6] Feng, W., Yang, H., Pu, Z. and Zhang, L. (2022) Study of CNTs-MoS₂/CeO₂ Composites for Lithium-Sulfur Battery Performance. *Ionics*, **28**, 2781-2791. <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04535-1>
- [7] Luo, C., Yan, Y., Wan, Y., Hao, J., Liu, X. and Yang, H. (2019) GO Wrapping Yolk-Shell S/MnO₂ Nanocomposites as High Performance Cathode for Lithium/Sulfur Cells. *Energy Technology*, **7**, 201-208. <https://doi.org/10.1002/ente.201800113>
- [8] Fawaz, W., Wang, Z. and Ng, K.Y.S. (2024) Sulfur Encapsulation into Carbon Nanospheres as an Effective Technique to Limit Sulfide Dissolution and Extend the Cycle Life of Lithium-Sulfur Batteries. *Energies*, **17**, Article 2168. <https://doi.org/10.3390/en17092168>
- [9] Zhu, J., Cao, J., Cai, G., Zhang, J., Zhang, W., Xie, S., *et al.* (2023) Non-Trivial Contribution of Carbon Hybridization in Carbon-catalytic Substrates to Electrocatalytic Activities in Li-S Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **62**, e202214351. <https://doi.org/10.1002/anie.202214351>
- [10] Xiao, Y., Guo, S., Xiang, Y., Li, D., Zheng, C., Ouyang, Y., *et al.* (2023) Engineering Configuration Compatibility and Electronic Structure in Axially Assembled Metal-Organic Framework Nanowires for High-Performance Lithium Sulfur Batteries. *ACS Energy Letters*, **8**, 5107-5115. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.3c01698>
- [11] Chen, Z., Yu, Q., Wang, W. and Zhang, J. (2026) Interface Engineering Strategies for Shuttle Mitigation in Alkali Metal-Sulfur Batteries: A Comparative Review from Li-S to Na-S and K-S Systems. *Nano-Micro Letters*, **18**, Article No. 167. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-02004-8>

- [12] Manthiram, A., Fu, Y., Chung, S., Zu, C. and Su, Y. (2014) Rechargeable Lithium-Sulfur Batteries. *Chemical Reviews*, **114**, 11751-11787. <https://doi.org/10.1021/cr500062v>
- [13] Bruce, P.G., Freunberger, S.A., Hardwick, L.J. and Tarascon, J. (2012) Li-O₂ and Li-S Batteries with High Energy Storage. *Nature Materials*, **11**, 19-29. <https://doi.org/10.1038/nmat3191>
- [14] Zhang, P., Yue, L., Liang, Q., Gao, H., Yan, Q. and Wang, L. (2023) A Review of Transition Metal Compounds as Functional Separators for Lithium-Sulfur Batteries. *Chemistry Select*, **8**, e202203352. <https://doi.org/10.1002/slct.202203352>
- [15] Xiao, Q., Yang, J., Wang, X., Deng, Y., Han, P., Yuan, N., *et al.* (2021) Carbon-Based Flexible Self-Supporting Cathode for Lithium-Sulfur Batteries: Progress and Perspective. *Carbon Energy*, **3**, 271-302. <https://doi.org/10.1002/cey2.96>
- [16] Chen, R., Zhou, Y. and Li, X. (2024) Nanocarbon-Enabled Mitigation of Sulfur Expansion in Lithium-Sulfur Batteries. *Energy Storage Materials*, **68**, Article 103353. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103353>
- [17] Liu, Y., Cheng, M., Guo, X., Wu, Z., Chen, Y., Xiang, W., *et al.* (2017) Synthesis and Electrochemical Performance of Micro-Mesoporous Carbon-Sulfur Composite Cathode for Li-S Batteries. *Ionics*, **23**, 2951-2960. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2125-7>
- [18] Carter, R., Ejorh, D., Share, K., Cohn, A.P., Douglas, A., Muralidharan, N., *et al.* (2016) Surface Oxidized Mesoporous Carbons Derived from Porous Silicon as Dual Polysulfide Confinement and Anchoring Cathodes in Lithium Sulfur Batteries. *Journal of Power Sources*, **330**, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.128>
- [19] Park, S.K., Lee, J., Hwang, T., *et al.* (2017) Scalable Synthesis of Honeycomb-Like Ordered Mesoporous Carbon Nanosheets and Their Application in Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 2430-2438. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13370>
- [20] Ji, X.D., Lee, K.T. and Nazar, L.F. (2009) A Highly Ordered Nanostructured Carbon-Sulphur Cathode for Lithium-Sulphur Batteries. *Nature Materials*, **8**, 500-506. <https://doi.org/10.1038/nmat2460>
- [21] Zhang, B., Qin, X., Li, G.R. and Gao, X.P. (2010) Enhancement of Long Stability of Sulfur Cathode by Encapsulating Sulfur into Micropores of Carbon Spheres. *Energy & Environmental Science*, **3**, 1531-1537. <https://doi.org/10.1039/c002639e>
- [22] Schuster, J., He, G., Mandlmeier, B., Yim, T., Lee, K.T., Bein, T., *et al.* (2012) Spherical Ordered Mesoporous Carbon Nanoparticles with High Porosity for Lithium-Sulfur Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **51**, 3591-3595. <https://doi.org/10.1002/anie.201107817>
- [23] Li, Z., Jiang, Y., Yuan, L., Yi, Z., Wu, C., Liu, Y., *et al.* (2014) A Highly Ordered Meso@Microporous Carbon-Supported Sulfur@Smaller Sulfur Core-Shell Structured Cathode for Li-S Batteries. *ACS Nano*, **8**, 9295-9303. <https://doi.org/10.1021/nn503220h>
- [24] Fang, R., Li, G., Zhao, S., Yin, L., Du, K., Hou, P., *et al.* (2017) Single-Wall Carbon Nanotube Network Enabled Ultrahigh Sulfur-Content Electrodes for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *Nano Energy*, **42**, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.10.053>
- [25] Yuan, Z., Peng, H., Huang, J., Liu, X., Wang, D., Cheng, X., *et al.* (2014) Hierarchical Free-Standing Carbon-Nanotube Paper Electrodes with Ultrahigh Sulfur-Loading for Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Functional Materials*, **24**, 6105-6112. <https://doi.org/10.1002/adfm.201401501>
- [26] Ma, X.Z., Jin, B., Xin, P.M. and Wang, H.H. (2014) Multiwalled Carbon Nanotubes-Sulfur Composites with Enhanced Electrochemical Performance for Lithium/Sulfur Batteries. *Applied Surface Science*, **307**, 346-350. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.036>
- [27] Sun, L., Wang, D., Luo, Y., Wang, K., Kong, W., Wu, Y., *et al.* (2015) Sulfur Embedded in a Mesoporous Carbon Nanotube Network as a Binder-Free Electrode for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Nano*, **10**, 1300-1308. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b06675>
- [28] Wang, L., Zhao, Y., Thomas, M.L. and Byon, H.R. (2014) *In Situ* Synthesis of Bipyramidal Sulfur with 3D Carbon Nanotube Framework for Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Functional Materials*, **24**, 2248-2252. <https://doi.org/10.1002/adfm.201302915>
- [29] Zhao, M.Q., Peng, H.J., Tian, G.L., *et al.* (2014) Hierarchical Vine-Tree-Like Carbon Nanotube Architectures: In-Situ CVD Self-Assembly and Their Use as Robust Scaffolds for Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **26**, 7051-7058. <https://doi.org/10.1002/adma.201402488>
- [30] Chen, J.J., Zhang, Q., Shi, Y.N., *et al.* (2012) A Hierarchical Architecture S/MWCNT Nanomicrosphere with Large Pores for Lithium Sulfur Batteries. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **14**, 5376-5382. <https://doi.org/10.1039/c2cp40141j>
- [31] Zhou, G., Pei, S., Li, L., *et al.* (2014) A Graphene-Pure-Sulfur Sandwich Structure for Ultrafast, Long-Life Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **26**, 625-631. <https://doi.org/10.1002/adma.201302877>

- [32] Kianfar, E., Azimikia, R. and Faghieh, S.M. (2020) Simple and Strong Dative Attachment of α -Diimine Nickel (II) Catalysts on Supports for Ethylene Polymerization with Controlled Morphology. *Catalysis Letters*, **150**, 2322-2330. <https://doi.org/10.1007/s10562-020-03116-z>
- [33] Wu, S., Ge, R., Lu, M., Xu, R. and Zhang, Z. (2015) Graphene-Based Nano-Materials for Lithium-Sulfur Battery and Sodium-Ion Battery. *Nano Energy*, **15**, 379-405. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.04.032>
- [34] Wang, J.Z., Lu, L., Choucair, M., et al. (2011) Sulfur-Graphene Composite for Rechargeable Lithium Batteries. *Journal of Power Sources*, **196**, 7030-7034. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.106>
- [35] Zhou, G., Li, L., Ma, C., Wang, S., Shi, Y., Koratkar, N., et al. (2015) A Graphene Foam Electrode with High Sulfur Loading for Flexible and High Energy Li-S Batteries. *Nano Energy*, **11**, 356-365. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.025>
- [36] Wang, H., Yang, Y., Liang, Y., Robinson, J.T., Li, Y., Jackson, A., et al. (2011) Graphene-Wrapped Sulfur Particles as a Rechargeable Lithium-Sulfur Battery Cathode Material with High Capacity and Cycling Stability. *Nano Letters*, **11**, 2644-2647. <https://doi.org/10.1021/nl200658a>
- [37] Duan, X., Han, Y., Huang, L., Li, Y. and Chen, Y. (2015) Improved Rate Ability of Low Cost Sulfur Cathodes by Using Ultrathin Graphite Sheets with Self-Wrapped Function as Cheap Conductive Agent. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 8015-8021. <https://doi.org/10.1039/c4ta06097k>
- [38] Shang, L., Liang, Q., Han, L., Tang, P. and Liu, Z. (2024) One-Step Fabrication of Flexible Free-Standing Graphene/Sulfur Film for Lithium-Sulfur Battery. *Ionics*, **30**, 199-206. <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05284-5>
- [39] Zhao, M.Q., Zhang, Q., Huang, J.Q., et al. (2014) Unstacked Double-Layer Templated Graphene for High-Rate Lithium-Sulphur Batteries. *Nature Communications*, **5**, Article No. 3410. <https://doi.org/10.1038/ncomms4410>
- [40] Ji, L., Rao, M., Zheng, H., Zhang, L., Li, Y., Duan, W., et al. (2011) Graphene Oxide as a Sulfur Immobilizer in High Performance Lithium/Sulfur Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 18522-18525. <https://doi.org/10.1021/ja206955k>
- [41] Yun, J.H., Kim, J.H., Kim, D.K., et al. (2018) Suppressing Polysulfide Dissolution via Cohesive Forces by Interwoven Carbon Nanofibers for High-Areal-Capacity Lithium-Sulfur Batteries. *Nano Letters*, **18**, 475-481. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04425>
- [42] Li, X., Fu, N., Zou, J., Zeng, X., Chen, Y., Zhou, L., et al. (2017) Sulfur-Impregnated N-Doped Hollow Carbon Nanofibers as Cathode for Lithium-Sulfur Batteries. *Materials Letters*, **209**, 505-508. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.083>
- [43] Hu, P., Xu, P., Chen, Y., Wang, W. and Shao, J. (2025) Tungsten Carbide Embedded in a Porous Carbon Nanofiber Sandwich Structure Electrode: A Strategy to Improve the Performance of Lithium-Sulfur Batteries. *Langmuir*, **41**, 795-803. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04102>
- [44] Li, Z., Zhang, J.T., Chen, Y.M., Li, J. and Lou, X.W. (2015) Pie-Like Electrode Design for High-Energy Density Lithium-Sulfur Batteries. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8850. <https://doi.org/10.1038/ncomms9850>
- [45] Zhao, S., Li, C., Wang, W., Zhang, H., Gao, M., Xiong, X., et al. (2013) A Novel Porous Nanocomposite of Sulfur/Carbon Obtained from Fish Scales for Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, **1**, 3334-3339. <https://doi.org/10.1039/c3ta01220d>
- [46] Liu, S., Li, J., Yan, X., Su, Q., Lu, Y., Qiu, J., et al. (2018) Superhierarchical Cobalt-Embedded Nitrogen-Doped Porous Carbon Nanosheets as Two-in-One Hosts for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **30**, Article 1706895. <https://doi.org/10.1002/adma.201706895>
- [47] Cheng, Z., Xiao, Z., Pan, H., et al. (2018) Lithium Sulfur Batteries: Elastic Sandwich-Type rGO-VS₂/S Composites with High Tap Density: Structural and Chemical Cooperativity Enabling Lithium-Sulfur Batteries with High Energy Density. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article 1870046.
- [48] Kong, L., Li, B.Q., Peng, H.J., et al. (2018) Porphyrin-Derived Graphene-Based Nanosheets Enabling Strong Polysulfide Chemisorption and Rapid Kinetics in Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article 1800849. <https://doi.org/10.1002/aenm.201800849>
- [49] Chen, X., Xu, Y., Du, F. and Wang, Y. (2019) Covalent Organic Framework Derived Boron/Oxygen Codoped Porous Carbon on Cnts as an Efficient Sulfur Host for Lithium-Sulfur Batteries. *Small Methods*, **3**, Article 1900338. <https://doi.org/10.1002/smt.201900338>
- [50] Kim, M., Lee, J., Jeon, Y. and Piao, Y. (2019) Phosphorus-Doped Graphene Nanosheets Anchored with Cerium Oxide Nanocrystals as Effective Sulfur Hosts for High Performance Lithium-Sulfur Batteries. *Nanoscale*, **11**, 13758-13766. <https://doi.org/10.1039/c9nr03278a>
- [51] Fan, X., Tan, F., Meng, F. and Liu, J. (2019) Hierarchical Porous N-Doped Carbon Nanosheets Obtained by Organic-Inorganic Bipolymeric Engineering for Improved Lithium-Sulfur Batteries. *Chemistry—A European Journal*, **25**, 4040-4046. <https://doi.org/10.1002/chem.201805803>

- [52] Song, J., Xu, T., Gordin, M.L., Zhu, P., Lv, D., Jiang, Y., *et al.* (2014) Nitrogen-Doped Mesoporous Carbon Promoted Chemical Adsorption of Sulfur and Fabrication of High-Areal-Capacity Sulfur Cathode with Exceptional Cycling Stability for Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Functional Materials*, **24**, 1243-1250. <https://doi.org/10.1002/adfm.201302631>
- [53] Shi, M., Jiang, Y., Yan, Y., Feng, J., Wei, T., Zhang, M., *et al.* (2021) Polarity-Induced Precipitation of S/Li₂S Confined into N and S Co-Doped Porous Graphene Layered Matrix for Lithium Sulfur Batteries. *Carbon*, **184**, 544-553. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.08.046>
- [54] Liu, P., Wang, Y. and Liu, J. (2019) Biomass-Derived Porous Carbon Materials for Advanced Lithium Sulfur Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **34**, 171-185. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.10.005>
- [55] Zhong, Y., Xia, X., Deng, S., Zhan, J., Fang, R., Xia, Y., *et al.* (2018) Popcorn Inspired Porous Macrocellular Carbon: Rapid Puffing Fabrication from Rice and Its Applications in Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article 1701110. <https://doi.org/10.1002/aenm.201701110>
- [56] Xia, P., Chen, F., Lei, W., Pan, Y. and Ma, Z. (2020) Long Cycle Performance Folium Cycas Biochar/S Composite Material for Lithium-Sulfur Batteries. *Ionics*, **26**, 183-189. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03169-0>
- [57] Yu, F., Li, Y., Jia, M., Nan, T., Zhang, H., Zhao, S., *et al.* (2017) Elaborate Construction and Electrochemical Properties of Lignin-Derived Macro-/Micro-Porous Carbon-Sulfur Composites for Rechargeable Lithium-Sulfur Batteries: The Effect of Sulfur-Loading Time. *Journal of Alloys and Compounds*, **709**, 677-685. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.204>
- [58] Xiao, Q., Li, G., Li, M., Liu, R., Li, H., Ren, P., *et al.* (2020) Biomass-Derived Nitrogen-Doped Hierarchical Porous Carbon as Efficient Sulfur Host for Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **44**, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.09.004>
- [59] Han, F., Fan, L., Ma, X., Lu, H., Li, L., Zhang, X., *et al.* (2024) Conversion of LiPSs Accelerated by Pt-Doped Biomass-derived Hyphae Carbon Nanobelts as Self-Supporting Hosts for Long-Lifespan Li-S Batteries. *Energy & Environmental Materials*, **7**, e12623. <https://doi.org/10.1002/eem2.12623>
- [60] Li, Y.J., Wu, J.B., Zhang, B., *et al.* (2020) Fast Conversion and Controlled Deposition of Lithium (Poly)sulfides in Lithium-Sulfur Batteries Using High-Loading Cobalt Single Atoms. *Energy Storage Materials*, **30**, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.05.022>
- [61] Du, Z., Chen, X., Hu, W., Chuang, C., Xie, S., Hu, A., *et al.* (2019) Cobalt in Nitrogen-Doped Graphene as Single-Atom Catalyst for High-Sulfur Content Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of the American Chemical Society*, **141**, 3977-3985. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b12973>
- [62] Han, F., Wang, Z., Jin, Q., Fan, L., Tao, K., Li, L., *et al.* (2024) High-Entropy Alloy Electrocatalysts Bidirectionally Promote Lithium Polysulfide Conversions for Long-Cycle-Life Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Nano*, **18**, 15167-15176. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c03031>
- [63] Xu, M., Zhu, Q., Li, Y., Gao, Y., Sun, N. and Xu, B. (2024) Atom-Dominated Relay Catalysis of High-Entropy MXene Promotes Cascade Polysulfide Conversion for Lithium-Sulfur Batteries. *Energy & Environmental Science*, **17**, 7735-7748. <https://doi.org/10.1039/d4ee03402c>
- [64] Zhao, C., Ding, F., Lu, Y., Chen, L. and Hu, Y.S. (2025) Intrinsic Stabilization of Vacancies in Catalysts via High-Entropy Strategy for Lithium-Sulfur Batteries. *National Science Review*, **12**, nwaf375.