

具有TiO₂同质结的中空碳纳米纤维实现高性能锂硫电池

杨迎强, 李新宇*, 王 恒, 安纪华, 程泓瑞

桂林理工大学物理与电子信息工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年5月28日

摘 要

通过界面工程和结构调控协同优化锂硫电池正极的设计策略, 本工作将良好晶格匹配的锐钛矿/金红石相二氧化钛同质结(A/R-TiO₂)嵌入中空管状纳米纤维(HCNF)中, 形成一维复合结构(A/R-TiO₂-HCNF), 作为锂硫电池正极。其中, A/R-TiO₂-HCNF形成的内建电场有效增强多硫化物中间体的化学吸附, 同时进一步促进电荷转移, 有效降低从液相多硫化物向最终固态产物(Li₂S)转化的反应能垒。此外, 一维中空管状纳米纤维为离子和电传输提供连续的通道, 确保了电荷长程有效传输。得益于此, 所制备的正极材料具有高比放电容量(0.2 C, 1186.79 mAh·g⁻¹)和有优异的倍率能力(1 C, 897.83 mAh·g⁻¹)。本研究通过多级结构与界面工程的协同设计, 为优化锂硫电池多相反应动力学与传质过程提供了一定的参考。

关键词

锂硫电池, 限域催化, 二氧化钛同质结, 同轴静电纺丝

High-Performance Li-S Batteries Enabled by Hollow Carbon Nanofibers Hosts with TiO₂ Homojunctions

Yingqiang Yang, Xinyu Li*, Heng Wang, Jihua An, Hongrui Chen

College of Physics and Electronic Information Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: April 13, 2026; accepted: May 20, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

To optimize the cathode design of lithium-sulfur batteries through the synergistic integration of

*通讯作者。

文章引用: 杨迎强, 李新宇, 王恒, 安纪华, 程泓瑞. 具有 TiO₂ 同质结的中空碳纳米纤维实现高性能锂硫电池[J]. 物理化学进展, 2026, 15(2): 102-109. DOI: 10.12677/japc.2026.152011

interfacial engineering and structural regulation, this work embeds an anatase/rutile TiO_2 homojunction (A/R- TiO_2) with favorable lattice matching into hollow tubular nanofibers (HCNF) to construct a one-dimensional composite structure (A/R- TiO_2 -HCNF) as the cathode for lithium-sulfur batteries. The built-in electric field formed in A/R- TiO_2 -HCNF effectively enhances the chemisorption of polysulfide intermediates and further promotes charge transfer, thereby significantly reducing the reaction energy barrier for the conversion of liquid-phase polysulfides to the final solid product (Li_2S). In addition, the one-dimensional hollow tubular nanofibers provide continuous pathways for ion and electron transport, ensuring efficient long-range charge transfer. Benefiting from these merits, the as-prepared cathode material delivers a high specific discharge capacity of $1186.79 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ at 0.2 C and excellent rate capability of $897.83 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ at 1 C. This synergistic design of hierarchical structure and interfacial engineering provides a valuable reference for optimizing the multiphase reaction kinetics and mass transfer processes in lithium-sulfur batteries.

Keywords

Lithium-Sulfur Batteries, Confinement Catalysis, TiO_2 Homojunction, Coaxial Electrospinning

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

为满足日益增长的高性能储能系统需求, 开发兼具高能量密度、低成本和优异安全性的二次电池至关重要[1] [2]。锂硫电池因其极高的理论能量密度($2600 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$)、硫资源丰富且低成本以及环境友好等优势, 已成为下一代储能的主要候选者[3] [4]。然而, 锂硫电池的实际性能受到缓慢的硫氧化/还原动力学以及可溶性多硫化物在电解液中溶解导致的硫损失、严重穿梭效应的限制[5] [6], 且硫和硫化锂本征导电性较差以及显著的体积膨胀导致结构塌陷进一步破坏其循环稳定性[7] [8]。因此, 亟须开发具有优异限域能力和高效催化的正极材料, 以应对上述挑战, 推动锂硫电池在实际应用中的发展。

为了解决上述问题, 将硫封装在具有中空结构的碳基材料中, 利用其物理限域效应, 可在一定程度上抑制活性物质的团聚、体积膨胀与结构粉化[9] [10]。然而, 这种依赖对硫空间隔离提升的电化学性能依旧有限, 难以有效解决迟缓的多硫化物氧化还原动力学[11] [12]。因此, 需在硫正极中构筑兼具高导电性与本征催化活性的催化中心以加速多硫化物转化[13] [14]。在此背景下, 界面能带工程(涵盖异质结与同质结)因其能通过内建电场定向驱动电荷转移、从而显著增强催化活性, 已成为研究前沿[15]-[17]。其中, 异质结设计已被广泛探索。然而, 其固有的材料界面问题(结合弱、能带与晶格失配)在长期循环中极易导致严重的电荷复合、界面相分离与结构退化, 制约其长期稳定性。相比之下, 同质结(由同一材料的不同晶相构成)则提供了近乎完美的晶格匹配与连贯的化学界面, 可构建稳定、高效的集成催化界面[18]。此外, 硫正极涉及的多步固-液-固相变及复杂多硫化物氧化还原反应, 会在电极局部不均匀的导电网络中形成显著界面电阻, 阻碍电荷传输, 因此, 理想电极还需构建连续且稳固的导电网络。然而, 如何精确调控同质结的相组成与界面原子结构并与导电骨架进行稳定的集成, 以构建一个既能高效限域硫、又能最大化催化界面利用率的复合结构仍面临巨大挑战。

为此, 我们通过同轴静电纺丝技术, 将良好晶格匹配的锐钛矿/金红石相二氧化钛同质结(A/R- TiO_2)嵌入中空管状纳米纤维(HCNF)中, 形成一维复合结构(A/R- TiO_2 -HCNF), 作为锂硫电池。该正极实现了“化学吸附-界面催化-导电网络”的三位一体协同, 其中, A/R- TiO_2 -HCNF形成的内建电场有效增强

多硫化物中间体的化学吸附,同时进一步促进电荷转移,有效降低从液相多硫化物向最终固态产物(Li_2S)转化的反应能垒。此外,一维中空管状纳米纤维为离子和电传输提供连续的通道,确保了电荷长程有效传输。这种协同作用有效抑制了多硫化物的穿梭,并提升了硫的转化动力学。因此,优化后的正极材料展现出更高的循环能力和更高的倍率容量。这项工作通过跨尺度结构设计来主动构筑与调控电极反应微环境,对涉及多相、多步骤复杂反应的储能与能源转换体系具有重要的启示意义。

2. 结果和讨论

2.1. 材料的合成

A/R-TiO₂-HCNF 及 CNF 的制备:将 1 g 聚丙烯腈加入 10 mL 二甲基甲酰胺(DMF)、1 mL 乙酰丙酮和 0.8 mL 钛酸四丁酯混合溶液中,充分搅拌 12 h 后将其作为同轴纺丝外层溶液,并将 1.5 g 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)加入 10 mL DMF 溶液中,充分搅拌 12 h 后作为同轴纺丝内层溶液。在针头与接收器间距 15 cm、电压 18.0 kV、流速为 1.0 mL·h⁻¹ 的条件下进行同轴静电纺丝。所得纤维在 60°C 下干燥 36 h 去除表面残留溶剂后,先在空气氛围中以 5°C min⁻¹ 的升温速度升至 250°C 预氧化 2 h,后在氮气氛围中以 5°C min⁻¹ 的升温速度升至 750°C 碳化 2 h,最终得到 A/R-TiO₂-HCNF。此外,作为对照组将 1 g 聚丙烯腈溶解在 10 mL DMF 中搅拌 12 h 后利用相同工艺制备纯碳纳米纤维(CNF)。后对 A/R-TiO₂-HCNF 进行融硫,将硫粉与 A/R-TiO₂-HCNF 按质量比 3:1 混合,置于氩气保护的管式炉中,在 155°C 下保温 12 h,使熔融硫充分浸渍并锚定于 A/R-TiO₂-HCNF,获得 S@A/R-TiO₂HCNF 复合正极材料。将材料进行涂布烘干后得到正极片,平均面硫负载量为 1.2 mg·cm⁻¹,正极电解液/硫比为 17.9~20.3 $\mu\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。

2.2. 结构表征及性能分析

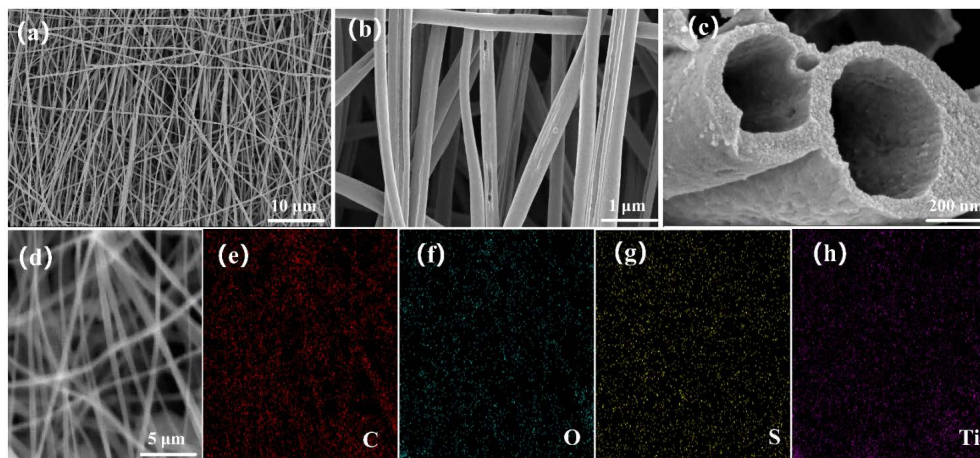


Figure 1. Morphology and structural characterization: (a) (b) SEM images of A/R-TiO₂-HCNF; (c) Cross-sectional SEM image of A/R-TiO₂-HCNF; (d)~(h) EDS elemental mapping images of C, O, S and Ti elements in S@A/R-TiO₂-HCNF

图 1. 形态与结构表征: (a) (b) A/R-TiO₂-HCNF 的 SEM 图像; (c) A/R-TiO₂-HCNF 的 SEM 截面图像; (d)~(h) S@A/R-TiO₂-HCNF 中 C、O、S 和 Ti 元素的能量色散 X 射线光谱元素分布图像

图 1(a)~(c) 的 SEM 图像呈现了 A/R-TiO₂-HCNF 的微观形貌与结构特征。如图 1(a) 所示,通过静电纺丝合成的纳米纤维相互交织,这种连续的导电网络为电极提供了快速的长程电子传输通道,并能有效渗透电解液,保障离子传输的畅通。放大后的 SEM 图像(图 1(b))及截面图(图 1(c))进一步证实了纤维具有规则的中空结构,内径均匀,尺寸约为 300~500 nm。该结构中空腔体提供了充裕的限域反应空间,能有效

缓冲充放电过程中巨大的体积变化, 维持电极结构稳定性。超薄的纤维壁确保了电子由外部导电碳骨架向内部催化活性中心的极短传输距离, 加快电荷传输。如图 1(d)~(h)所示, 能量色散 X 射线光谱(EDS)元素分布图像清楚地显示了 C、O、S、Ti 元素在整个结构中均匀且连续地分布, 进一步证实 S@A/R-TiO₂-HCNF 的成功制备。

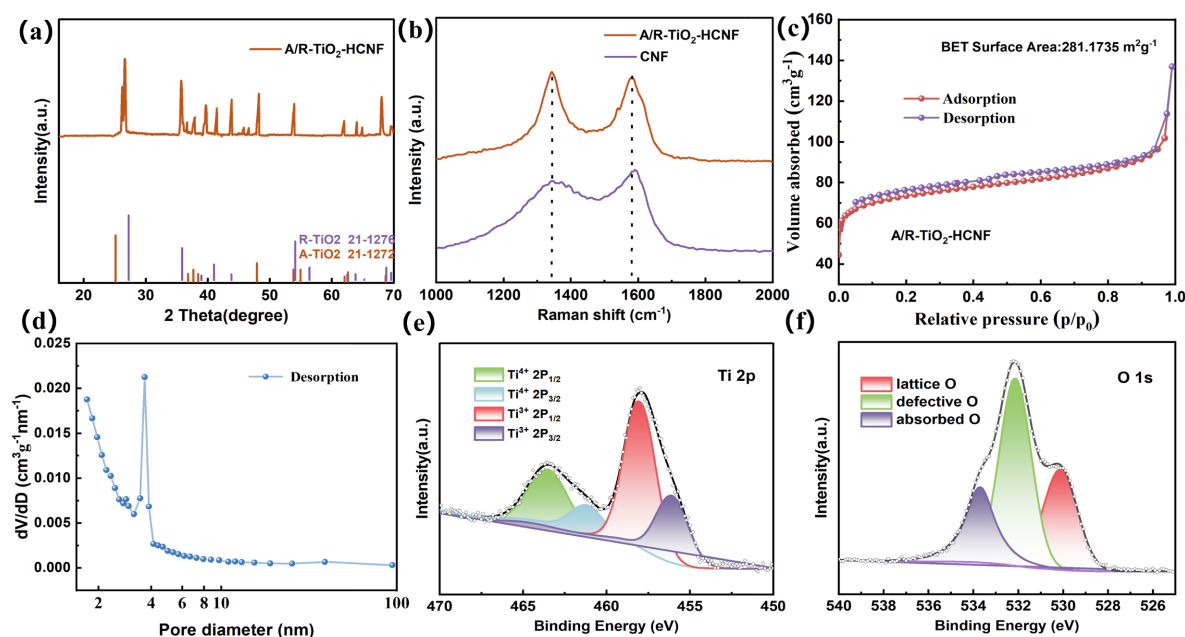


Figure 2. Characterization and analysis of the chemical state and coordination structure of A/R-TiO₂-HCNF. (a) XRD pattern; (b) Raman spectrum; (c) N₂ adsorption/desorption isotherm of A/R-TiO₂-HCNF; (d) Pore size distribution of A/R-TiO₂-HCNF. High-resolution XPS spectra of (e) Ti 2p and (f) O 1s for A/R-TiO₂-HCNF

图 2. A/R-TiO₂-HCNF 的化学状态及配位结构表征和分析。(a) XRD 图谱; (b) 拉曼光谱; (c) A/R-TiO₂-HCNF 的 N₂ 吸附/脱附等温线; (d) A/R-TiO₂-HCNF 的孔径分布图。A/R-TiO₂-HCNF 的高分辨率(e) Ti 2p 和 (f) O1s XPS 光谱

如图 2(a)所示的 XRD 图揭示了 A/R-TiO₂-HCNF 中的锐钛矿(A-TiO₂, JCPDS #21-1272)与金红石(R-TiO₂, JCPDS #21-1276)双相共存[19]。从图 2(b)中可以观察到在 1350 cm⁻¹ 和 1580 cm⁻¹ 附近出现碳的特征峰, 分别对应 D 波段(石墨化碳的缺陷)和 G 波段(sp² 杂化碳原子的振动拉伸杂化)峰值, 且 A/R-TiO₂-HCNF 的 ID/IG (峰值强度比)的值更大, 表明碳骨架的石墨化缺陷程度更高, 这些缺陷作为强 Lewis 酸中心, 可增强碳基质对多硫化锂的化学亲和力, 提升硫负载与锚定能力。如图 2(c), 图 2(d)所示, A/R-TiO₂-HCNF 是 H4 型, 具有丰富的介孔结构, 其比表面积为 281.17 m²·g⁻¹, 这种分级孔道结构不仅为硫负载和离子传输提供了充裕空间, 其纳米尺度的限域效应还能有效抑制多硫化物的长程扩散。通过 X 射线光电电子能谱(XPS)研究了表面元素的价态。Ti2p 谱图如图 2(e)所示, 揭示了 Ti⁴⁺和 Ti³⁺共存, 且分峰定量计算表明 Ti³⁺/Ti⁴⁺原子比明显提高, 直接证明在合成过程中产生了氧空位, 导致部分钛的氧化态还原。此外, 图 2(f)的 O1s 图谱中位于 531.96 eV 处的缺陷氧峰进一步佐证了氧空位的富集。

为深入探究反应动力学, 我们对 S@A/R-TiO₂-HCNF 和 S@CNF 电极在 0.1~0.5 mV·s⁻¹ 的扫描速率下进行了 CV 测试(图 3(a))。相比于 S@CNF, S@A/R-TiO₂-HCNF 具有更高的还原电位、更低的氧化电位、更强的峰值电流响应以及更低的电压间隙, 表明 S@A/R-TiO₂-HCNF 具有更低的电化学极化和更快的反应动力学。这可归因于富含氧空位的 TiO₂ 同质结所提供的高效电催化界面, 有效降低了多步反应的能量势垒。此外, 如图 3(b)~(d)所示, 阴极和阳极峰电流与扫描速率的平方根呈线性关系, 确认了反应受 Li⁺ 扩散控制, 且 S@A/R-TiO₂-HCNF 的直线斜率显著高于 S@CNF (图 3(e)), 这表明其独特的导电网络与催

化界面共同促进了更快的 Li^+ 传输。相反, S@CNF 较低的斜率意味着其在循环中界面恶化更严重, 导致 Li^+ 扩散受阻。同时, 如图 3(f) 所示, $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 显示出更低的极化电压(ΔE), 进一步通过量化多步放电过程, 将容量分为 Q_1 (S8 到 Li_2S_4) 和 Q_2 (Li_2S_4 到 Li_2S), 如图 3(g) 所示, $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 的比值高达 2.59, 更接近理论比值 3, 表明其具备卓越的选择催化能力。这一优势在低电位平台(<2.05 V)得到了进一步的体现(图 3(h)), $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 贡献了 $322.85 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的放电比容量高于 S@CNF 贡献的 $211.69 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的放电比容量, 有力证明了其高效催化作用。

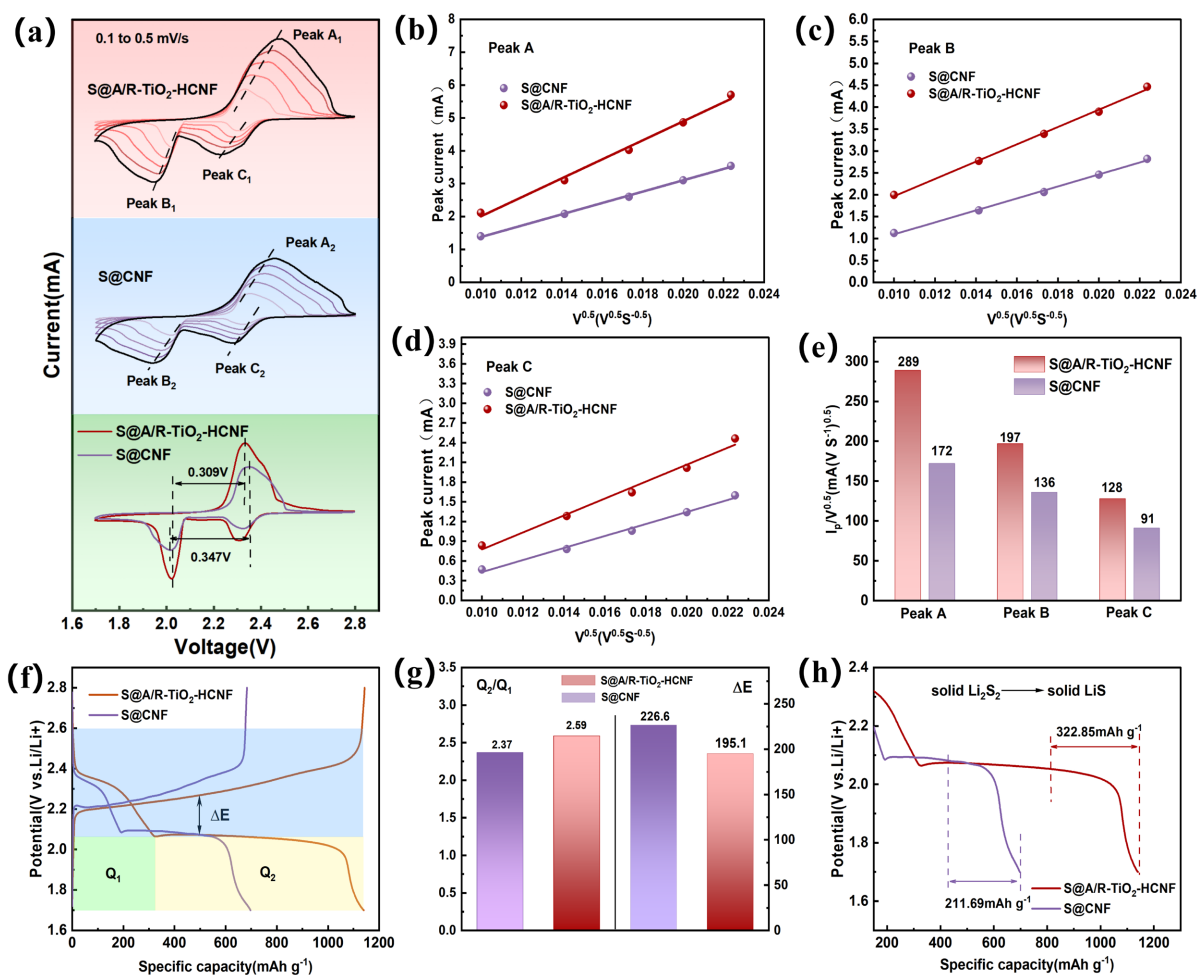


Figure 3. (a) Curves of $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ and S@CNF at scan rates ranging from 0.1 to $0.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ and at $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Plots of peak current (I_p) versus the square root of scan rate ($v^{0.5}$) for peak A (b), peak B (c), and peak C (d) of $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ and S@CNF electrodes, and the corresponding fitting slopes (e). (f) Charge-discharge profiles at 0.1 C. (g) The values of Q_2/Q_1 and ΔE derived from the charge-discharge curves. (h) Magnified view of the discharge curve at 0.1 C

图 3. (a) $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 和 S@CNF 在 $0.1\sim 0.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速率下及 $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的曲线。 $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 和 S@CNF 电极在峰 A (b)、峰 B (c)、峰 C (d) 处的峰值电流(I_p)与扫描速率的平方根($v^{0.5}$)的曲线图, 以及相应的拟合斜率图(e)。 (f) 0.1 C 的充放电曲线图。 (g) 由充放电曲线图得到的 Q_2/Q_1 和 ΔE 值。 (h) 0.1C 放电曲线的放大图

通过热重分析(图 4(a)), 测得 $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 中活性物质 S 的含量为 68.48 wt%。图 4(b) 中为 $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 与 S@CNF 电极的 EIS 谱及其等效电路。 R_1 为欧姆电阻, R_2 与 CPE_1 分别对应电荷转移电阻与界面双电层行为, W_1 代表锂离子扩散阻抗。 $\text{S@A/R-TiO}_2\text{-HCNF}$ 的中高频半圆更小, 表明其电荷转移阻力更低, 这源于氧空位富集的 TiO_2 同质结所诱导的内建电场, 该电场能有效驱动界面电荷分离

与转移,大幅优化反应动力学。通过紫外-可见光谱(UV)验证了材料的固硫能力(图 4(c)),将材料加入 Li_2S_6 溶液中静置 6 小时,观察到 A/R-TiO₂-HCNF 悬浮液颜色变为无色透明,且其在 400~500 nm 区间的特征吸收峰几乎消失。这表明材料对多硫化物具有极强的化学吸附作用,可有效抑制其溶解与穿梭。如图 4(d)所示, S@A/R-TiO₂-HCNF 在 0.2 C 至 1 C 的不同倍率下均展现出更高的可比逆容量,材料在大倍率下存在一定的容量衰减与损失,这是高电流极化、界面副反应加剧共同导致的结果。当电流密度恢复至 0.2 C 并经过 15 次循环后,比容量仍可回升至 1031.29 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,充分说明 S@A/R-TiO₂-HCNF 电极具备优异的倍率适应性与结构可逆稳定性。而 S@CNF 的容量恢复性较差(500.87 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$),这说明贯通的中空导电网络在快速循环中有效维持了电极的结构完整性与反应活性。此外,在 0.2 C 电流密度下(图 4(e)), S@A/R-TiO₂-HCNF 的放电比容量高达 1186.79 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,明显高于 S@CNF,并展现出更平缓的容量衰减曲线。为了进一步评估其循环稳定性,我们在 1 C 的电流密度下进行了长循环测试(图 4(f)), S@A/R-TiO₂-HCNF 在 800 次循环后仍可以保留 548.71 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高可逆容量,循环容量衰减率低至 0.048%,库伦效率仍然接近 100%,展现出良好的循环稳定性。

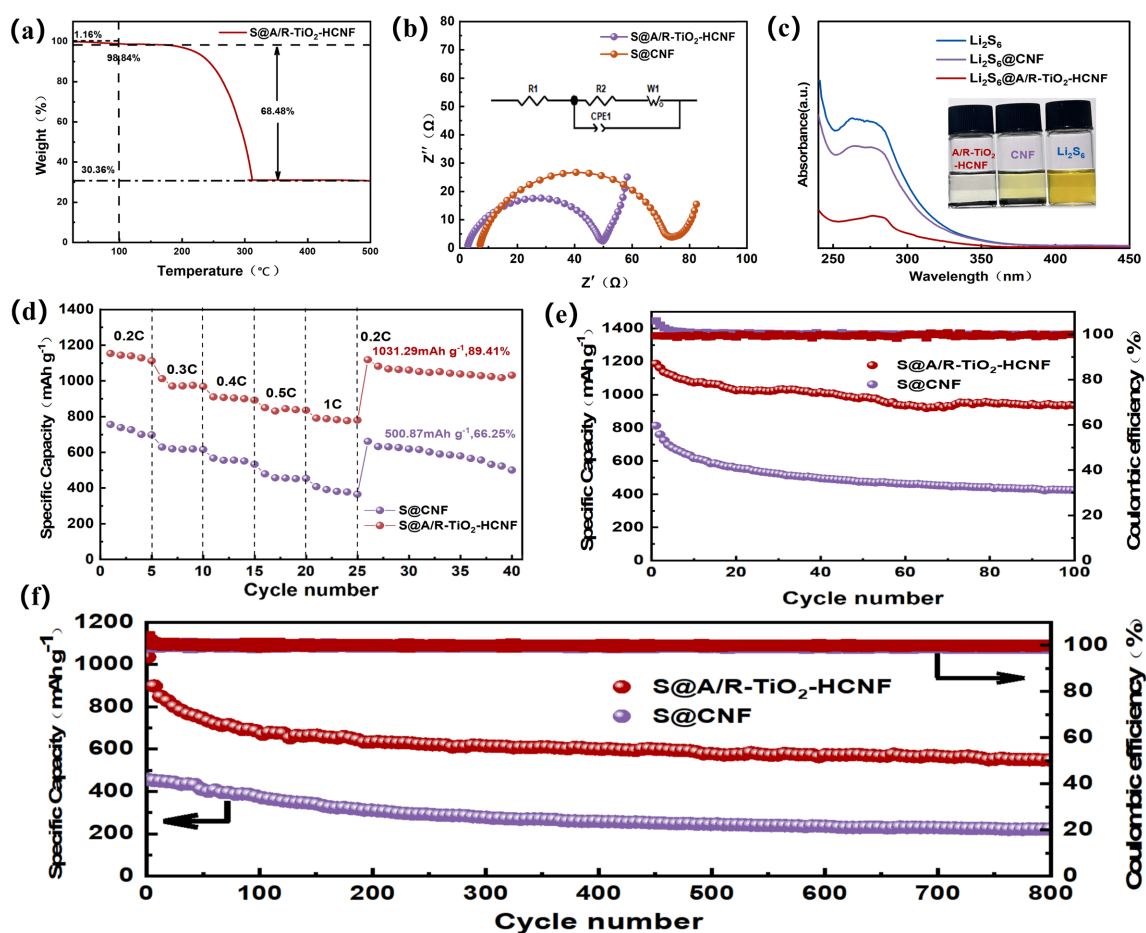


Figure 4. (a) Thermogravimetric curve of S@A/R-TiO₂-HCNF. (b) EIS spectra of various electrodes (Inset: equivalent circuit diagram); (c) UV-Vis absorption spectra of different electrode samples after adsorbing Li_2S_6 solution for 6 h (Inset: corresponding digital photographs). (d) Rate performance of each electrode from 0.2 C to 1 C. (e) Cycling performance of each electrode at 0.2 C; (f) Long-term cycling performance of each electrode at 1 C

图 4. (a) S@A/R-TiO₂-HCNF 的热重曲线。(b) 各电极的 EIS 谱(插图: 等效电路图)。(c) 吸附 Li_2S_6 溶液 6 h 后不同样品的 UV 可见光吸收光谱(插图: 对应的数码照片)。(d) 各电极从 0.2 C 至 1 C 的倍率性能。(e) 各电极在 0.2 C 下的循环性能。(f) 各电极在 1 C 下的长循环性能

3. 结论

在本研究中, 我们基于界面工程和结构调控协同优化锂硫电池正极的设计策略, 通过同轴静电纺丝技术将良好晶格匹配的锐钛矿/金红石相二氧化钛同质结(A/R-TiO₂)嵌入中空管状纳米纤维(HCNF)中, 形成一维复合结构(A/R-TiO₂-HCNF)。其中, A/R-TiO₂-HCNF形成的内建电场有效增强多硫化物中间体的化学吸附, 且进一步促进电荷转移显著降低了多硫化物转化的反应能垒, 而贯通的中空碳骨架则同时充当快速电子通道和物理限域空间。基于此, 所制备的 S@A/R-TiO₂-HCNF 复合正极表现出良好的循环稳定性优异的倍率性能。本工作所展示的通过跨尺度结构设计来精准调控多相反应路径的策略, 为开发下一代涉及多电子转移与复杂相变的高能量密度储能体系提供了新思路。

参考文献

- [1] Huang, Z., Lyu, H., Greenburg, L.C., Cui, Y. and Bao, Z. (2025) Stabilizing Lithium-Metal Electrodes with Polymer Coatings. *Nature Energy*, **10**, 811-823. <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01767-z>
- [2] Raza, H., Bai, S., Cheng, J., Majumder, S., Zhu, H., Liu, Q., *et al.* (2023) Li-S Batteries: Challenges, Achievements and Opportunities. *Electrochemical Energy Reviews*, **6**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1007/s41918-023-00188-4>
- [3] Cao, G., Duan, R. and Li, X. (2023) Controllable Catalysis Behavior for High Performance Lithium Sulfur Batteries: From Kinetics to Strategies. *EnergyChem*, **5**, Article ID: 100096. <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2022.100096>
- [4] Ma, C., Zhang, Y., Feng, Y., Wang, N., Zhou, L., Liang, C., *et al.* (2021) Engineering Fe-N Coordination Structures for Fast Redox Conversion in Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2100171. <https://doi.org/10.1002/adma.202100171>
- [5] Zhu, X., Wang, L., Bai, Z., Lu, J. and Wu, T. (2023) Sulfide-Based All-Solid-State Lithium-Sulfur Batteries: Challenges and Perspectives. *Nano-Micro Letters*, **15**, Article No. 75. <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01053-1>
- [6] Shao, Q., Zhu, S. and Chen, J. (2023) A Review on Lithium-Sulfur Batteries: Challenge, Development, and Perspective. *Nano Research*, **16**, 8097-8138. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-5227-0>
- [7] Chen, H., Wu, Z., Zheng, M., Liu, T., Yan, C., Lu, J., *et al.* (2022) Catalytic Materials for Lithium-Sulfur Batteries: Mechanisms, Design Strategies and Future Perspective. *Materials Today*, **52**, 364-388. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.10.026>
- [8] Yu, Z., Liu, M., Guo, D., Wang, J., Chen, X., Li, J., *et al.* (2020) Radially Inwardly Aligned Hierarchical Porous Carbon for Ultra-Long-Life Lithium-Sulfur Batteries. *Angewandte Chemie*, **132**, 6468-6473. <https://doi.org/10.1002/ange.201914972>
- [9] Fang, Y., Luan, D., Gao, S. and Lou, X.W. (2021) Rational Design and Engineering of One-Dimensional Hollow Nanostructures for Efficient Electrochemical Energy Storage. *Angewandte Chemie International Edition*, **60**, 20102-20118. <https://doi.org/10.1002/anie.202104401>
- [10] Lan, Y., Wang, Y., Wang, Y., Lu, G., Liu, L., Tang, T., *et al.* (2024) Chip-Inspired Design of High-Performance Lithium-sulfur Batteries by Integrating Monodisperse Sulfur Nanoreactors on Graphene. *ACS Nano*, **18**, 15638-15650. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c01264>
- [11] Wang, B., Wang, Y., Lan, Y., Lu, G., Liu, L., Tang, T., *et al.* (2024) Integrated Design for Discrete Sulfur@polymer Nanoreactor with Tandem Connection as Lithium-Sulfur Battery Cathodes. *Angewandte Chemie International Edition*, **63**, e202406693. <https://doi.org/10.1002/anie.202406693>
- [12] Guo, P., Li, X., Tang, T., Cheng, Y., Wang, Y., Yang, Y., *et al.* (2025) Modularized Cathode with Neural Network Topology for High Rate and Fault-Tolerant Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2504908. <https://doi.org/10.1002/adma.202504908>
- [13] Zeng, P., Su, B., Wang, X., Li, X., Yuan, C., Liu, G., *et al.* (2023) *In Situ* Reconstruction of Electrocatalysts for Lithium-Sulfur Batteries: Progress and Prospects. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2301743. <https://doi.org/10.1002/adfm.202301743>
- [14] Zuo, X., Qiu, Y., Zhen, M., Liu, D. and Zhang, Y. (2025) Review on Mxenes-Based Electrocatalysts for High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries. *Nano-Micro Letters*, **17**, Article No. 209. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01726-z>
- [15] Meng, T., Geng, Z., Ma, F., Wang, X., Zhang, H. and Guan, C. (2023) Direct Ink Writing of Metal-Based Electrocatalysts for Li-S Batteries with Efficient Polysulfide Conversion. *Interdisciplinary Materials*, **2**, 589-608. <https://doi.org/10.1002/idm2.12110>

-
- [16] Duan, R., Cao, G., Li, J., Jiang, Q., Hou, C., Yang, H., *et al.* (2026) Heterostructure-Driven D-Band of MoS₂ Engineering Catalytic Polysulfide Conversion in Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Functional Materials*, **36**, e12936. <https://doi.org/10.1002/adfm.202512936>
- [17] Liu, W., Lei, M., Zhou, X. and Li, C. (2023) Heterojunction Interlocked Catalysis-Conduction Network in Monolithic Porous-Pipe Scaffold for Endurable Li-S Batteries. *Energy Storage Materials*, **58**, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.03.004>
- [18] Sakanoue, T., Li, J., Tanaka, H., Ito, R., Ono, S., Kuroda, S., *et al.* (2017) High Current Injection into Dynamic p-n Homojunction in Polymer Light-Emitting Electrochemical Cells. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1606392. <https://doi.org/10.1002/adma.201606392>
- [19] Jiang, X., Wang, Y., Li, W., Lam, Y., Zhang, J., Bao, X., *et al.* (2025) High-Performance Zn-I₂ Batteries Enabled by Porous Hetero-Carbon Nanofiber Hosts with TiO₂ Homojunctions. *Advanced Fiber Materials*, **8**, 87-98. <https://doi.org/10.1007/s42765-025-00595-w>