

LaMnO₃超交换相互作用驱动的高效多硫化物转化助力高性能锂硫电池

陶 冶

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年1月2日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月5日

摘 要

锂硫电池作为高能量密度储能体系, 其实际应用受限于多硫化锂的穿梭效应及缓慢转化动力学。本研究通过静电纺丝技术制备了LaMnO₃ (LMO)钙钛矿纳米纤维, 并将其应用于锂硫电池正极改性。系统表征证实该材料具有连续一维纳米结构及纯相钙钛矿晶体, 其结构中存在的Mn-O-Mn超交换作用被证实是提升性能的关键。实验表明, LMO对多硫化锂表现出强化学吸附与高效电催化活性, 能显著加速其液-液转化与液-固沉积动力学。基于LMO纳米纤维构建的正极在0.1 C下表现出1364 mAh·g⁻¹的高比容量, 在1.0 C倍率下循环500次后容量衰减率低至0.055%。本研究从电子关联角度揭示了钙钛矿氧化物提升锂硫电池性能的机制, 为设计新型催化宿主材料提供了新思路。

关键词

锂硫电池, 钙钛矿, 超交换作用, 多硫化物转化

Super-Exchange Interaction-Driven Efficient Polysulfide Conversion in LaMnO₃ for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries

Ye Tao

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: January 2, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Although lithium-sulfur batteries (LSBs) are recognized as promising high-energy-density storage

systems, their practical application is severely hindered by the shuttle effect and sluggish redox kinetics of lithium polysulfides (LiPSs). Herein, LaMnO_3 (LMO) perovskite nanofibers were synthesized via electrospinning and utilized for cathode modification in LSBs. Systematic characterizations confirm the formation of continuous one-dimensional nanostructures with a pure perovskite phase. Crucially, the intrinsic Mn-O-Mn super-exchange interaction within the LMO lattice is identified as the decisive factor for the observed performance enhancement. Experimental results demonstrate that LMO exhibits strong chemisorption capability and high electrocatalytic activity toward LiPSs, significantly accelerating the kinetics of both liquid-liquid conversion and liquid-solid deposition. Consequently, the LMO-based cathode delivers a high specific capacity of $1364 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ at 0.1 C and exhibits exceptional cycling stability, with a low capacity decay rate of 0.055% per cycle over 500 cycles at 1.0 C. This work elucidates the mechanism of perovskite oxides in enhancing LSB performance from the perspective of electron correlation, providing new insights for the rational design of advanced catalytic host materials.

Keywords

Lithium-Sulfur Batteries, Perovskite, Super-Exchange Interaction, Polysulfide Conversion

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

随着对高能量密度储能技术的迫切需求, 锂硫电池凭借其高达 $2600 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的理论能量密度和 $1675 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的理论比容量, 被视为极具发展潜力的下一代电化学体系[1][2]。然而, 其产业化进程仍受限于两大固有挑战: 一是单质硫及其放电产物($\text{Li}_2\text{S}/\text{Li}_2\text{S}_2$)的本征电子绝缘性, 严重制约了活性物质的利用率与反应动力学[3]-[6]; 二是在充放电过程中生成的可溶性多硫化锂易在正负极间迁移, 引发严重的“穿梭效应”[7][8], 导致活性物质不可逆损失、容量快速衰减及锂负极腐蚀等问题。为应对这些挑战, 研究重点集中于开发兼具高导电性、强多硫化锂锚定能力和高效电催化活性的多功能宿主材料。

在众多候选材料中, 钙钛矿型过渡金属氧化物(通式 ABO_3)展现出独特的优势[9]。其晶体结构以共顶角连接的 $[\text{BO}_6]$ 八面体为框架, 具有组成灵活、结构稳定及电子结构可调的特点[10]。其中, 通过桥氧离子(O^{2-})传递的超交换作用, 作为一种典型的电子关联机制, 对调控钙钛矿氧化物的导电与催化性能具有关键影响[11]-[14]。该作用源于金属 d 轨道与氧 p 轨道的有效杂化, 不仅能够显著提升材料的本征电子电导率, 为电荷快速传输提供“高速公路”, 还可通过调控表面过渡金属位点的电子态, 赋予其优异的电催化活性。这一特性使得钙钛矿材料在理论上能够同时解决锂硫电池中硫物种导电性差和多硫化物转化动力学缓慢两大核心难题。

基于上述背景, 本研究选择具有典型超交换作用的钙钛矿材料 LaMnO_3 (LMO)作为研究对象。通过静电纺丝技术, 将其制备成连续的一维纳米纤维。该三维交织的纤维网络不仅能构建贯穿的电子/离子快速传输通道, 其高比表面积与丰富的表面活性位点也有利于多硫化物的捕获与转化。更重要的是, LMO 中固有的 Mn-O-Mn 超交换作用可借由此纳米结构得到充分发挥, 同步增强材料的体相电荷传输能力与表面催化活性, 从而实现多硫化锂的强效锚定与高效电催化转化。本文系统探究了 LMO 纳米纤维对多硫化物的吸附行为、催化转化动力学及其对锂硫电池整体电化学性能的增强作用, 旨在阐明超交换作用与电池性能之间的构效关系, 为基于电子关联机制设计高性能锂硫电池催化材料提供新思路。

2. 实验部分

2.1. 试剂与材料

六水合硝酸镧($\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)和四水合醋酸锰($\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)购自国药集团化学试剂有限公司,聚丙烯腈(PAN)和 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)购自 Sigma-Aldrich。所有化学试剂未经进一步纯化直接使用。

2.2. HE-LSMO 纳米纤维的合成

通过静电纺丝与烧结相结合的方法制备氧化物纳米纤维。具体步骤如下:将 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1.0 mmol)、 $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1.0 mmol)以及 PAN (1.0 g)溶解于 DMF (10 ml)中。所得溶液在流速为 $2 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 、施加电压为 20 kV 的条件下进行静电纺丝,并收集得到前驱体。随后,将此前驱体在空气中于 650°C 下煅烧 3 h,得到 LaMnO_3 纳米纤维,记为 LMO。

2.3. 硫复合正极及催化剂电极的制备

首先,将 LMO 与多壁碳纳米管(MWCNT)按质量比 7:3 进行研磨混合,制得 LMO/MWCNT 复合材料。随后,将硫粉、科琴黑与上述 LMO/MWCNT 复合材料按质量比 7:2:1 混合,充分研磨 30 min 以上。将混合均匀的粉末在氩气气氛下于 155°C 热处理 12 h,得到硫-宿主复合材料。将该复合材料与 Super P 导电剂、PVDF 按质量比 8:1:1 共同分散于 NMP 中,搅拌形成均匀浆料。将该浆料涂覆于直径 13 mm 的圆形碳布基底上,经 60°C 真空干燥 12 h 后,制得正极片,其中硫的面负载量控制在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

对于催化剂电极,将 LMO 与 MWCNT 按质量比 1:2 分散于乙醇中,经超声处理形成均匀浆料。将该浆料涂覆于相同尺寸的圆形碳布上,在 60°C 下干燥 30 min,所得电极中活性物质的质量负载约为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

2.4. Li_2S_6 的可视化吸附测试

将 S 与 Li_2S 按 5:1 的摩尔比分散于 DME/DOL (体积比 1:1)混合溶液中,在 60°C 下持续搅拌 24 h 后,制得浓度为 $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Li_2S_6 溶液。为进行可视化吸附测试,分别取 10 mg MWCNT 和 LMO/MWCNT 样品加入上述制备的 Li_2S_6 溶液(1 mL)中,静置 2 h 后拍摄最终状态照片以记录吸附效果。

2.5. 对称电池的组装与测试

以两片相同的催化剂电极分别作为工作电极和对电极,在充满氩气的手套箱中组装对称电池,电解液为 $0.2 \text{ M Li}_2\text{S}_6$ 溶液。采用循环伏安法在 -1.0 V 至 1.0 V 的电位窗口内,以 $2 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 扫描速率进行测试。

2.6. 锂硫电池组装

采用 CR2032 型扣式电池组装体系。以硫复合材料为正极,锂箔(直径 15 mm,质量 0.067 g)为负极,Celgard 2400 为隔膜,并使用标准锂硫电解液。电解液添加量为 $40 \mu\text{L}$,对应硫的面负载为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。所有组装操作均在充氩手套箱中完成,箱内 O_2 和 H_2O 浓度均低于 0.01 ppm。

2.7. 电化学测试

倍率性能与循环性能测试在 LAND 电池测试系统(CT 2001A)上进行,电压窗口为 $1.7 \sim 2.8 \text{ V}$ (vs. Li/Li^+)。循环伏安测试在 $1.7 \sim 2.8 \text{ V}$ 电压范围内以 $0.1 \sim 0.5 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 的扫描速率进行。其他电化学测试在 Bio-Logic 电化学工作站(VMP3)上完成。

2.8. Li_2S 成核测试

将 Li_2S 与 S 粉末按 1:7 的摩尔比溶于四甘醇二甲醚溶剂中, 在 60°C 下持续搅拌 48 h, 制备得到 $0.25\text{ M Li}_2\text{S}_8$ 电解液。采用催化剂工作电极、锂箔对电极和 Celgard 2400 隔膜组装电池。首先向催化剂电极滴加 $20\text{ }\mu\text{L}$ 上述 $0.25\text{ M Li}_2\text{S}_8$ 溶液, 再在负极侧引入 $20\text{ }\mu\text{L}$ 标准锂硫电解液。电池首先在 0.112 mA 电流下恒流放电至 2.06 V , 随后在 2.05 V 电位下进行恒电位放电, 以促进 Li_2S 的成核与生长, 直至电流降至 0.01 mA 以下。

3. 结果与讨论

3.1. LMO 的形貌表征

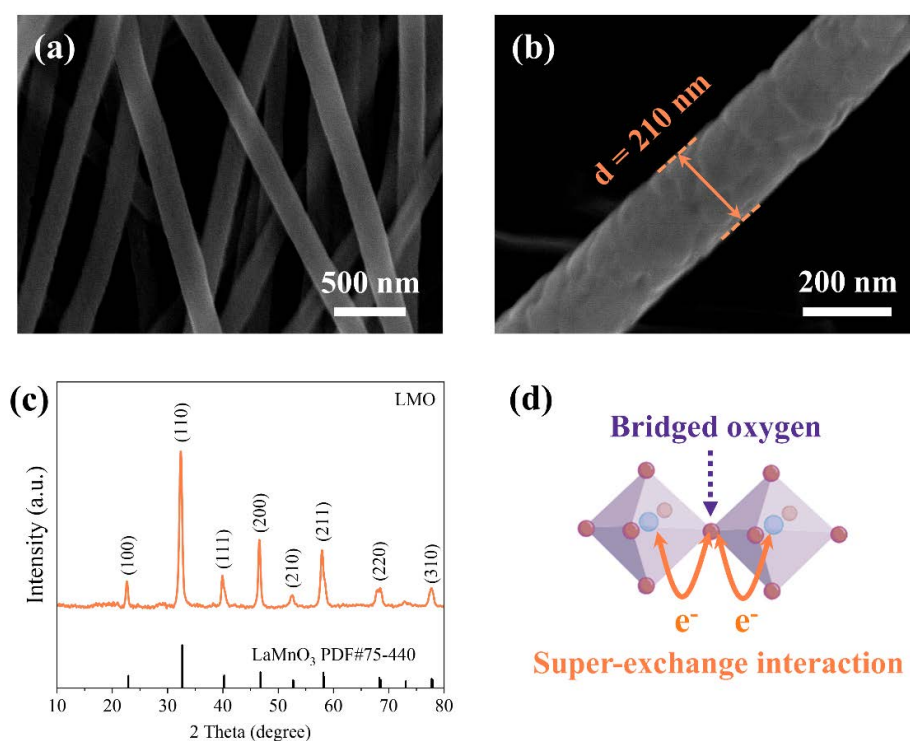


Figure 1. (a), (b) SEM images of LMO nanofibers. (c) XRD patterns of the as-prepared perovskite LMO nanofibers. (d) Schematic illustration of the super-exchange interaction mechanism in LMO

图 1. (a)、(b) LMO 纳米纤维的 SEM 图像。 (c) LMO 纳米纤维的 XRD 图谱。 (d) LMO 中超交换相互作用机制示意图

图 1(a)显示, 所制备的 LMO 呈现典型的一维纳米纤维形貌, 纤维表面粗糙, 平均直径约为 210 nm (图 1(b))。该一维结构具有较高的比表面积, 有利于暴露更多高催化活性位点; 同时, 纳米纤维相互交织形成三维导电网络, 可促进电荷传输。X 射线衍射(XRD)图谱(图 1(c))表明, 样品的衍射峰位置与正交钙钛矿结构 LaMnO_3 的标准卡片(PDF#75-0440)完全吻合, 且未观察到杂质峰, 证实成功合成了纯相 LaMnO_3 。

此外, LMO 中存在的超交换相互作用是其实现电子传导与催化功能的关键机制之一(图 1(d))。该作用主要源于 Mn^{3+} 的 e_g 轨道与桥联 O^{2-} 的 $2p$ 轨道之间的强轨道耦合。在典型的 Mn-O-Mn 单元中, 相邻 Mn^{3+} 离子通过氧离子的 $2p$ 轨道发生 e_g 电子云交叠与杂化, 从而使电子能够沿 Mn-O-Mn 路径实现离域化分布, 为材料提供了有效的电子传输通道。

3.2. LMO 的催化性能分析

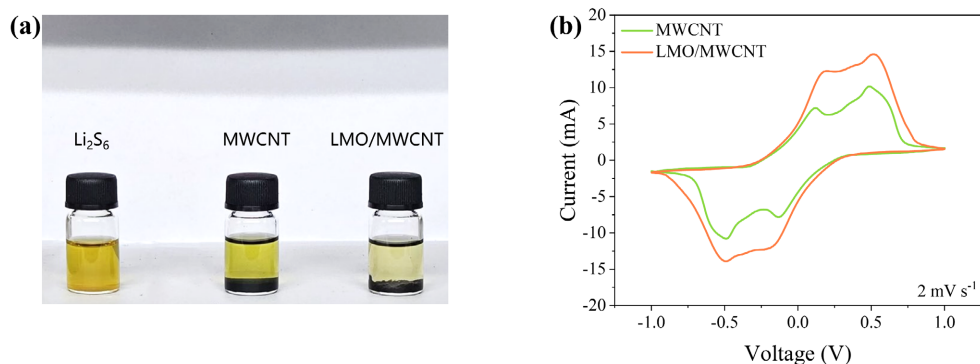


Figure 2. Visualized adsorption test of the LMO/MWCNT and MWCNT
图 2. LMO/MWCNT 和 MWCNT 的可视化吸附实验

为评估 LMO 对多硫化锂的相互作用，首先进行了可视化静态吸附实验。如图 2(a)所示，将等量 MWCNT 及 LMO/MWCNT 复合材料分别加入相同浓度的 Li_2S_6 溶液中。静置 2 h 后，LMO/MWCNT 样品对应的溶液颜色显著浅于 MWCNT 及空白对照组。该结果表明 LMO 对多硫化物具有强化学吸附能力。

为深入探究其对多硫化物的电催化转化动力学，进一步采用 Li_2S_6 对称电池进行循环伏安测试。如图 2(b)所示，LMO/MWCNT 电极表现出显著增强的氧化还原电流和更大的峰面积，表明该电极具有更快的多硫化物转化动力学与更彻底的电催化转化程度。该优异的电催化性能主要源于 LMO 中的超交换相互作用，该作用不仅促进了反应过程中的电荷转移，也优化了对多硫化物中间体的吸附与活化，从而加速其氧化还原反应动力学。

3.3. LMO 改性正极的动力学测试

为系统评价 LMO/MWCNT 复合材料在锂硫电池中的电化学行为，首先在 $0.1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 的扫描速率下对其进行循环伏安测试(电压窗口 1.7~2.8 V)。如图 3(a)所示，LMO/MWCNT/S 电极在约 2.34 V 和 2.02 V 处呈现出两个清晰的还原峰，分别对应于 S_8 向可溶性长链多硫化锂的转变以及进一步向固态 $\text{Li}_2\text{S}_2/\text{Li}_2\text{S}$ 的转化；在约 2.40 V 处观察到一个明显的氧化峰，对应 $\text{Li}_2\text{S}_2/\text{Li}_2\text{S}$ 的重新氧化过程。与纯 MWCNT/S 电极相比，LMO/MWCNT/S 的还原峰电位更高、氧化峰电位更低，表明其具有更小的极化电压($\Delta E = 0.37 \text{ V}$)。同时，LMO/MWCNT/S 的峰电流强度显著高于 MWCNT/S 电极，初步说明其具有更优的多硫化物转化动力学。为进一步揭示反应动力学的差异，我们在不同扫描速率下对两类电极进行了 CV 测试(图 3(b)，图 3(c))。结果表明，随着扫描速率提高，LMO/MWCNT/S 电极的峰形保持较好，峰位偏移较小，说明其具备更快的电荷转移与物质扩散能力。图 3(d)~(f)分别显示了峰 R_1 、 R_2 和 O_1 对应的塔菲尔曲线，LMO/MWCNT/S 在所有反应步骤中均表现出更低的塔菲尔斜率，证明其能够显著降低多硫化物转化过程中的活化能垒，加速反应进程[15]。

为定量评估催化剂对终产物 Li_2S 沉积行为的影响，我们开展了恒电位放电测试。在 2.05 V 的恒电位条件下，记录电流 - 时间响应曲线(图 3(g)~(h))。LMO/MWCNT 电极在约 2547 s 时达到峰值电流(约 0.47 mA)，而 MWCNT 电极的响应显著迟缓，峰值电流(约 0.32 mA)出现时间延长至约 4170 s。LMO/MWCNT 电极峰值电流出现时间大幅提前，表明 LMO 显著降低了 Li_2S 的形核过电势。在恒电位测试中，电流响应的快慢直接对应于电化学步骤的能垒高低。LMO 表面丰富的活性位点可对多硫化物产生有效吸附，为 Li_2S 提供了大量成核中心，从而显著降低成核所需的能量势垒。根据电流 - 时间积分计算得到的 Li_2S 沉

积容量, LMO/MWCNT 电极达到 $342 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 远高于 MWCNT 电极的 $292 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。更高的峰值电流与更大的沉积容量共同说明 LMO 不仅加速了成核过程, 也优化了后续的 Li_2S 生长动力学。MWCNT 虽具有良好的电子传导能力, 但其表面对多硫化物的吸附作用较弱, 催化活性有限, 导致 Li_2S 沉积缓慢且覆盖不完全。相比之下, LMO 作为钙钛矿催化剂, 其表面金属位点与多硫化物之间存在较强的化学相互作用, 可促进电子从电极向吸附的多硫化物转移, 引导 Li_2S 以更致密、均匀的形貌沉积, 从而提升整体沉积容量。由此证明 LMO 能有效促进 Li_2S 的成核与生长, 提升硫物种的固-液转化效率。

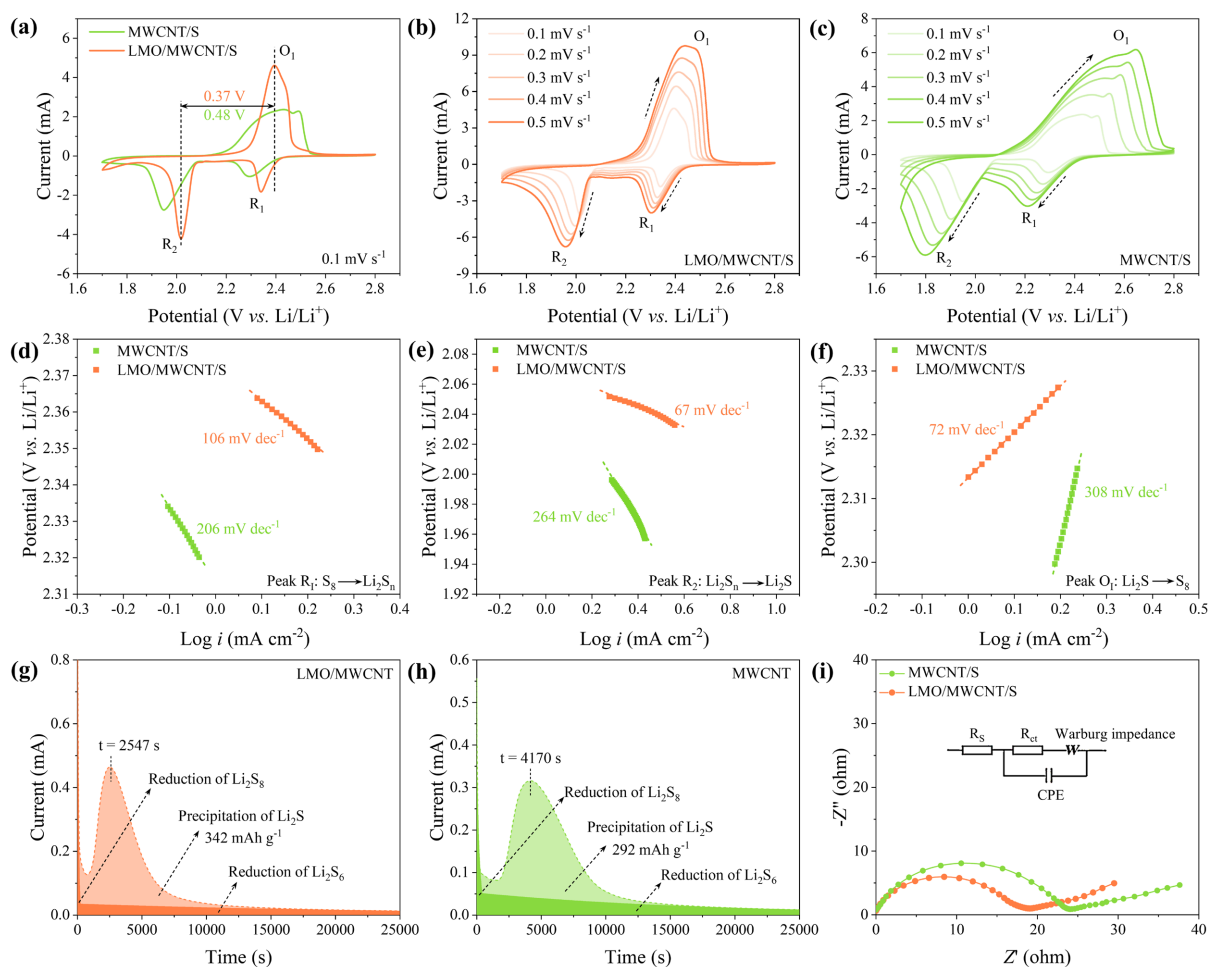


Figure 3. (a) CV curves of the cells with different cathodes at a scan rate of $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. (b)~(c) CV curves of the LMO/MWCNT/S and MWCNT/S cathode from $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ to $0.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Tafel plots derived from (d) peak R₁, (e) peak R₂ and (f) peak O₁. Potentiostatic discharge profiles of cells with (g) LMO/MWCNT and (h) MWCNT/S electrodes. (i) Nyquist plots of cells with LMO/MWCNT/S and MWCNT/S cathode

图 3. (a) 不同正极材料在 $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速率下的循环伏安曲线。(b)、(c) LMO/MWCNT/S 与 MWCNT/S 正极在 $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 至 $0.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描范围内的循环伏安曲线。(d)~(f) 分别基于还原峰 R₁、还原峰 R₂ 与氧化峰 O₁ 绘制的塔菲尔图。(g)、(h) 分别基于 LMO/MWCNT 与 MWCNT/S 电极的恒电位放电曲线。(i) 基于 LMO/MWCNT/S 与 MWCNT/S 正极的奈奎斯特图

此外, 通过电化学阻抗谱分析了电极/电解液界面的传输特性(图 3(i))。Nyquist 图中高频区半圆直径对应电荷转移电阻, 低频区直线斜率反映离子扩散行为。根据建立的等效电路图拟合得出, LMO/MWCNT/S 正极的电荷转移电阻为 18.9Ω , 小于 MWCNT/S 电极的 24.1Ω , 同时 LMO/MWCNT/S 正极具有更陡的 Warburg 斜率, 说明其具有更快的界面反应动力学与更优的锂离子扩散速率[16]。以上结

果共同表明, LMO 的引入显著增强了电极的导电性、催化活性与离子传输能力, 这一方面源于其纳米纤维结构所形成的连续导电网络, 另一方面则与 LMO 中 Mn-O-Mn 超交换作用所调制的表面电子结构及电荷转移能力密切相关, 从而协同提升了锂硫电池的综合电化学性能。

3.4. LMO 改性正极的电池性能

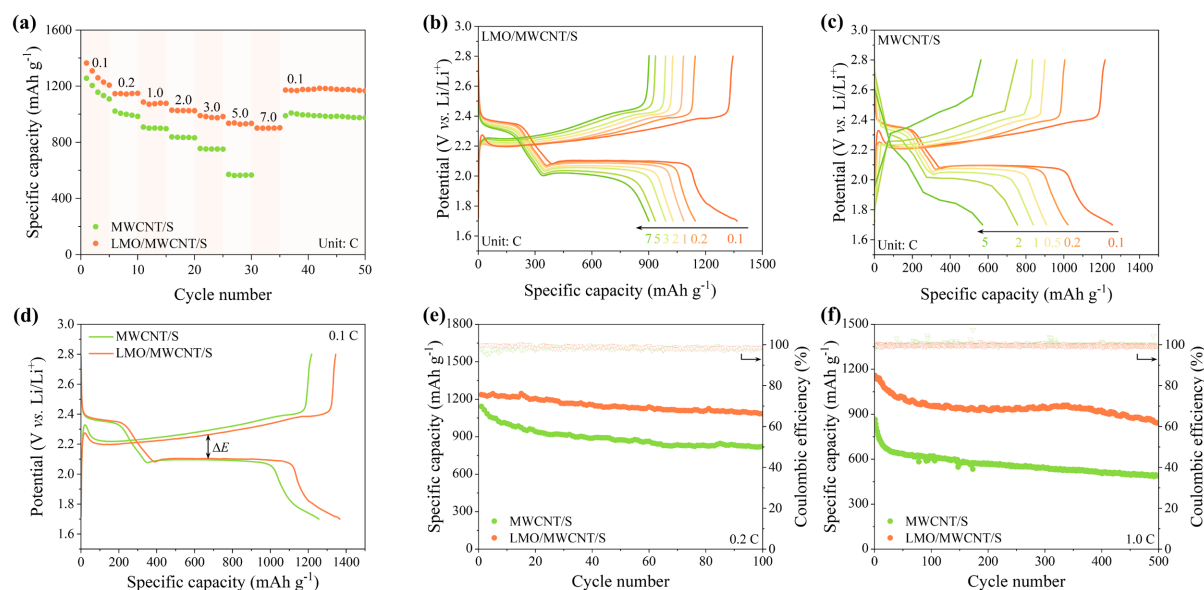


Figure 4. (a) Rate performances of LMO/MWCNT/S and MWCNT/S cathodes. Galvanostatic charge-discharge profiles of the (b) LMO/MWCNT/S cathode and (c) MWCNT/S cathode at various rates. (d) Initial GCD curves of different cells. Cycle stability at (e) 0.2 C and (f) 1.0 C of different cathodes

图 4. (a) LMO/MWCNT/S 与 MWCNT/S 正极的倍率性能。(b) LMO/MWCNT/S 正极及(c) MWCNT/S 正极在不同倍率下的恒流充放电曲线。(d) 不同电池的首圈充放电曲线。(e) 0.2 C 与(f) 1.0 C 电流密度下不同正极的循环稳定性

为全面评估 LMO/MWCNT/S 正极的性能, 我们系统测试了其倍率能力与循环稳定性。首先, 在 0.1 C 至 7.0 C 的不同电流密度下进行倍率性能测试(图 4(a))。LMO/MWCNT/S 电极在 0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0 和 7.0 C 下的平均放电比容量分别达到 1364、1145、1086、1028、990、935 和 901 mAh·g⁻¹。显著高于初始纯 MWCNT/S 电极在同等测试条件下的容量表现, 此外不同倍率下的恒流充放电曲线进一步揭示了其反应特征(图 4(b), 图 4(c))。对于 LMO/MWCNT/S 电极, 即使在 7.0 C 较高倍率下, 其放电曲线仍能保持明显的两个电压平台, 分别对应长链与短链多硫化物的生成, 且平台极化电压较小, 表明极化程度低、反应动力学迅速。相比之下, MWCNT/S 电极在电流增大时平台特征模糊、极化显著增大。图 4(d)对比了两种电极在 0.1 C 下的首圈充放电曲线。LMO/MWCNT/S 电极电化学极化显著减小, 并且充电曲线的过电位更低。该结果表明, LMO 电催化剂能够有效促进多硫化物的氧化还原反应动力学, 降低充放电过程中的能量损耗。

长循环稳定性是衡量锂硫电池实用性的关键指标。在 0.2 C 电流密度下进行循环测试(图 4(e)), LMO/MWCNT/S 电极初始放电容量为 1225 mAh·g⁻¹, 容量保持率达 87.6%, 显著高于 MWCNT/S 电极的 71.9%。而在更高的 1.0 C 电流下循环 500 次(图 4(f)), 容量衰减率低至 0.055%。与之相比, MWCNT/S 电极在相同条件下的容量衰减更为迅速(0.087%)。上述优异的倍率与循环性能可归因于 LMO 的独特结构与电子特性。一方面, 三维连续纳米纤维网络提供了丰富的活性位点与高效的电子/离子传输路径; 另一方面, LMO 晶体中固有的 Mn-O-Mn 超交换作用发挥了关键影响。其不仅增强了材料的本征电子传导, 促

进了反应过程中的电荷转移，更通过调控表面锰活性中心的电子状态，优化了对多硫化物的吸附与催化转化动力学。这种由“三维导电网络-强吸附-高效催化”构成的协同机制，共同确保了电极在较高电流下的长效稳定循环。

4. 结论

本研究通过静电纺丝法制备了 LaMnO_3 钙钛矿纳米纤维，并将其用于锂硫电池正极修饰，系统考察了其电化学行为及作用机制。实验表明，该材料不仅借助三维纤维网络提升了电极的导电性与结构稳定性，更通过 Mn-O-Mn 超交换作用增强了界面电荷转移效率，降低反应能垒，从而实现对多硫化物的高效吸附与快速催化转化。电池在循环中表现出高可逆容量与优异的动力学性能，证实了基于电子关联的材料设计在调控锂硫反应动力学方面的有效性。该研究为发展兼具高导电性与催化活性的金属氧化物宿主材料提供了理论依据，也为进一步利用强关联体系设计高性能储能器件开辟了可行路径。

参考文献

- [1] Hou, R., Wei, Y., Zhang, J., Chen, J., Chen, S., Sun, S., *et al.* (2025) Advances in High-Entropy Catalysts for Lithium-Sulfur Batteries: Design Principles, Recent Progress, and Prospects. *Advanced Science*, **12**, e11072. <https://doi.org/10.1002/adv.202511072>
- [2] Liu, X., Zhang, L., Ma, X., Lu, H., Li, L., Zhang, X., *et al.* (2023) Conversion of Polysulfides on Core-Shell CoP@C Nanostructures for Lithium-Sulfur Batteries. *Chemical Engineering Journal*, **454**, Article ID: 140460. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140460>
- [3] Dai, J., Zhu, Y., Yin, Y., Tahini, H.A., Guan, D., Dong, F., *et al.* (2019) Super-Exchange Interaction Induced Overall Optimization in Ferromagnetic Perovskite Oxides Enables Ultrafast Water Oxidation. *Small*, **15**, Article ID: 1903120. <https://doi.org/10.1002/smll.201903120>
- [4] Sun, J., Du, L., Sun, B., Han, G., Ma, Y., Wang, J., *et al.* (2020) Bifunctional $\text{LaMn}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{O}_3$ Perovskite Oxide Catalyst for Oxygen Reduction and Evolution Reactions: The Optimized E_g Electronic Structures by Manganese Dopant. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 24717-24725. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c03983>
- [5] Liao, Y., Liu, J., Chen, H., Yi, Y., Xi, X., Liu, J., *et al.* (2025) Unraveling Double-Exchange Effect Coupling Spin Modulation of $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1.5}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_{6-\delta}$ Electrocatalyst for Solid Oxide Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **147**, 21003-21013. <https://doi.org/10.1021/jacs.5c05525>
- [6] Lv, Y., Bai, L., Jin, Q., Deng, S., Ma, X., Han, F., *et al.* (2024) $\text{VSe}_2/\text{V}_2\text{C}$ Heterocatalyst with Built-In Electric Field for Efficient Lithium-Sulfur Batteries: Remedies Polysulfide Shuttle and Conversion Kinetics. *Journal of Energy Chemistry*, **89**, 397-409. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.10.003>
- [7] Zhang, C., Wang, X., Jin, Q., Zhang, Z., Zhang, X. and Wu, L. (2025) High-Entropy-Induced Strong Dipole Moment for Accelerating Sulfur Reduction Kinetics Lithium-Sulfur Batteries across a Wide Range of Temperatures. *Energy Storage Materials*, **76**, Article ID: 104147. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2025.104147>
- [8] Mo, Y., Yang, K., Lin, J., Liu, M., Ye, G. and Yu, J. (2023) CoSe_2 Anchored Vertical Graphene/Macroporous Carbon Nanofibers Used as Multifunctional Interlayers for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 6349-6360. <https://doi.org/10.1039/d2ta10020g>
- [9] Bai, Z., Wang, Z., Wang, T., Wu, Z., Li, R., Gao, X., *et al.* (2024) Deciphering the E_g Occupancy Descriptor on Perovskite Oxides for Lithium-Sulfur Batteries. *Energy Storage Materials*, **71**, Article ID: 103657. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103657>
- [10] Qi, R., Zhao, L., Liu, P., Zhen, Y., Fu, X., Li, X., *et al.* (2025) Radically Activating Surface Status of Perovskite Oxides by Gradient Oxygen Vacancy Engineering for High-Rate and Durable Li-S Battery. *Energy Storage Materials*, **75**, Article ID: 104065. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2025.104065>
- [11] Liu, Y., Ye, C., Zhao, S., Wu, Y., Liu, C., Huang, J., *et al.* (2022) A Dual-Site Doping Strategy for Developing Efficient Perovskite Oxide Electrocatalysts Towards Oxygen Evolution Reaction. *Nano Energy*, **99**, Article ID: 107344. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107344>
- [12] Zhang, T., Zhao, Z., Zhang, D., Liu, X., Wang, P., Li, Y., *et al.* (2023) Superexchange-Induced Pt-O- Ti^{3+} Site on Single Photocatalyst for Efficient H_2 Production with Organics Degradation in Wastewater. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **120**, e2302873120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2302873120>
- [13] Zhang, C., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, X. and Wu, L. (2024) Oxygen-Vacancy-Reinforced Perovskites Promoting

-
- Polysulfide Conversion for Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*, **661**, 472-481. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.01.179>
- [14] Song, N., Ma, J., Liang, Y., Wang, P., Yuan, J., Xiong, S., *et al.* (2025) Phase and Orbital Engineering Effectuating Efficient Adsorption and Catalysis toward High-Energy Lithium-Sulfur Batteries. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2420588. <https://doi.org/10.1002/adma.202420588>
- [15] Yang, J., Cao, C., Qiao, J., Qiao, W., Jiang, B., Tang, C., *et al.* (2023) Self-Assembled BNNSs/rGO Heterostructure as a Synergistic Adsorption and Catalysis Mediator Boosts the Electrochemical Kinetics of Lithium-Sulfur Batteries. *Chemical Engineering Journal*, **471**, Article ID: 144737. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144737>
- [16] 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>