

DOI: 10.11949/0438-1157.

还原氧化石墨烯填充木质碳骨架载硫正极的电化学性能研究

周政烨¹, 燕映霖¹, 曹托托¹, 杨蓉², 侯亮¹, 康裕祥¹, 夏辉凡¹, 卢虹羽¹(¹ 西安理工大学生态环境与化工学院, 陕西 西安 710054; ² 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 椴木基碳骨架与单质硫复合作为自支撑正极, 其有序多孔结构能够有效提升能量密度, 但对硫及多硫化锂的限域能力不足。通过在孔道中填充还原氧化石墨烯进行改性, 显著提升了椴木基碳骨架的比表面积与导电性, 同时利用其表面极性官能团增强对多硫化锂的化学吸附, 进而稳定电极结构, 提升电化学性能。改性后的椴木基复合材料在 0.1 倍电流密度下的首周放电比容量为 1077.1 mAh/g, 循环 100 周后仍能保持 983.7 mAh/g 的可逆容量, 保持率为 91.3%。

关键词: 锂硫电池; 椴木; 自支撑正极; 还原氧化石墨烯; 电化学性能

中图分类号: TQ152

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Electrochemical Performance of Sulfur-Loaded Cathodes Based on Reduced Graphene Oxide-Filled Wood-Derived Carbon Skeletons

ZHOU Zhengye¹, YAN Yinglin¹, CAO Tuotuo¹, YANG Rong², HOU Liang¹, KANG Yuxiang¹, XIA Huifan¹, LU Hongyu¹

(¹ School of Eco-environmental & Chemical Engineering, Xian University of Technology, Xian 710054, Shaanxi, China; ² Materials Science and Engineering College, Xian University of Technology, Xian 710048, Shaanxi, China)

Abstract: A self-supporting cathode was prepared by combining sulfur with a linden-derived carbon skeleton. The ordered porous structure of this carbon skeleton helps to increase energy density. However, it has limited ability to confine sulfur or lithium polysulfides. To address this issue, reduced graphene oxide was introduced into the pores of the carbon skeleton. This modification significantly improved the specific surface area and electrical conductivity of the carbon skeleton. Moreover, the polar functional groups on the reduced graphene oxide surface enhance the chemical adsorption of lithium polysulfides. This helps stabilize the electrode structure and improve electrochemical performance. The modified linden-derived composite achieved an initial discharge capacity of 1077.1 mAh/g at 0.1C. After 100 cycles, it still retained a reversible capacity of 983.7 mAh/g, with a capacity retention of 91.3%.

Keywords: lithium-sulfur battery; linden wood; self-supporting cathode; reduced graphene oxide; electrochemical

收稿日期: 2026-04-25 修回日期: 2026-06-11

通信作者: 燕映霖 (1987—), 男, 博士, 副教授, yyl3550@xaut.edu.cn

第一作者: 周政烨 (2004—), 男, 本科生, zhouzy040202@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(52571179); 陕西省科学技术能源实验室项目(ESL B/202423); 陕西省榆林市科技局产学研基金项目(2024-CXY-161); 西安理工大学大学生创新训练计划项目省级资助(2025年《"光雕木刻"一体化高比能电池》S202510700156)

引用本文: 周政烨, 燕映霖, 曹托托, 杨蓉, 侯亮, 康裕祥, 夏辉凡, 卢虹羽. 还原氧化石墨烯填充木质碳骨架载硫正极的电化学性能研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-9

Citation: ZHOU Zhengye, YAN Yinglin, CAO Tuotuo, YANG Rong, HOU Liang, KANG Yuxiang, XIA Huifan, LU Hongyu. Electrochemical Performance of Sulfur-Loaded Cathodes Based on Reduced Graphene Oxide-Filled Wood-Derived Carbon Skeletons[J]. CIESC Journal, XXXX, XX (XX): 1-9

performance

引 言

锂硫电池作为新一代的储能体系,凭借其超高的理论比容量(1675 mAh/g)和理论能量密度(2600 Wh/kg),以及原料储量丰富、环境友好等优势,展现出巨大的实用潜力^[1-3]。常规锂硫电池正极通常是将单质硫与多孔碳的复合材料、粘结剂和导电剂分散在有机溶剂中混合形成浆料,然后通过刮涂法涂覆在金属集流体(铝箔)上制备而成^[4-6]。然而集流体和各类添加剂的存在降低了单质硫含量,导致电池容量大幅衰减,实际能量密度降低^[7-9]。自支撑硫正极是一种采用多孔结构的整块导电骨架直接负载活性物质的一体化电极,避免了导电剂、粘结剂和集流体对硫含量的影响,从而提高实际能量密度^[10-12]。目前,常用的自支撑正极骨架材料有碳泡沫^[13]、碳纳米管/碳纤维^[14]、石墨烯^[15]等。

近年来,生物质碳由于价廉、环保、储量丰富等优点,已成为极具潜力的自支撑正极骨架材料并引起了广泛的关注^[16-18]。例如,柚子皮^[19]、棉花^[20]等生物质材料已成功应用于锂硫电池自支撑正极,并表现出了优异的电化学性能。在各类生物质材料中,木材不仅资源丰富、廉价易得且加工便捷、厚度可调,其微观层面更具有定向分级多孔结构^[21-23]。因此,将木材应用于锂硫电池,能形成连续三维导电骨架,既能高效负载并分散活性物质,又能促进电解液渗透与电荷传输,进而显著提升电池电化学性能,在储能领域极具应用潜力^[24-26]。但同时这种结构也有一定的局限性:由于木炭孔道直径较大(>50 μm),电解液运输效率提高的同时导致存储于孔壁内的单质硫和多硫化锂极易流失,加剧穿梭效应,循环稳定性劣化^[27-29]。

还原氧化石墨烯(RGO)凭借其仅有原子级厚度的二维纳米结构,具有优异的力学性能和导电性,且含氧官能团可通过化学吸附作用锚定多硫化锂,抑制穿梭效应^[30-32]。本文采用RGO填充策略对木质碳骨架进行电化学改性。RGO与木质碳孔道交织形成复合导电网络,使材料的比表面积提升至402.454 m^2/g ,为硫的负载提供了更多存储位点,同时利用空间限域作用抑制活性物质的流失,增强碳骨架的稳定性。载硫后系统研究复合正极的电化学性能,观察其自支撑形态和有序多孔结构,分析

RGO填充对电极循环稳定性和倍率性能的影响规律,解释物理限域与化学吸附协同作用的电化学改性机制,为木质碳骨架的制备与储能应用提供理论参考。

1 实验

1.1 实验原材料

椴木,广东鼎正木业贸易有限公司;氧化石墨烯(GO)、冰醋酸、醋酸钠、亚氯酸,升华硫、无水乙醇,天津天力化学试剂有限公司;盐酸(HCl),西安化学试剂厂;高纯锂片,北京有色金属研究院;电解液(1 mol/L 双三氟甲烷磺酰亚胺锂(LiTFSI)和1 wt.% 硝酸锂(LiNO_3)溶解在1:1体积比的1,3-二氧戊环(DOL)和乙二醇二甲醚(DME)混合溶液中)、扣式电池壳,苏州乾民化学试剂有限公司;隔膜(Celgard2320),深圳市科晶智达科技有限公司。

1.2 实验过程

1.2.1 椴木基碳的制备 将椴木块裁切成2 mm薄片,于70 $^{\circ}\text{C}$ 去离子水中煮至木片沉底以排出内部空气。用醋酸钠、冰醋酸和亚氯酸配制质量分数为1%和5%的亚氯酸钠溶液并依次浸泡椴木片,于60 $^{\circ}\text{C}$ 下浸泡6 h后冲压成16 mm直径圆片,洗涤后移入55 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱保温12 h;干燥后移入管式炉,在氮气气氛中升温至1000 $^{\circ}\text{C}$ 并保温3 h,降温至室温后,用砂纸打磨至厚度为400–600 μm 并清洗至pH为7,置于55 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱干燥12 h,得到去木质素后碳化的椴木片,记作CDLD。

1.2.2 椴木基碳@石墨烯骨架的制备 称取10 mg的GO溶于20 mL去离子水,超声2 h至完全分散,得到GO分散液。将去木质素后碳化的椴木片(CDLD)平铺于抽滤装置,按GO与CDLD质量比1:5定量加入上述分散液进行抽滤。抽滤后将负载GO的CDLD样品夹于两块石墨板间冷冻12 h,再经-60 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻干燥24 h。将干燥后的样品与石墨板一同移入管式炉,通入氮气30 min以排尽空气,再以5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至600 $^{\circ}\text{C}$ 并保温1 h,在此过程中GO被还原为RGO。将产物经1 mol/L HCl溶液和去离子水各清洗两次,再用去离子水洗至pH为7,移入55 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥12 h,得到椴木基碳石墨烯复合骨架,记作CDLD@G。

1.2.3 正极材料的制备 按摩尔比7:1称取S和

Li_2S_8 , 分散在 10 mL 空白电解液中, 60 °C 搅拌 24 h 得到 0.39 mol/L Li_2S_8 电解质溶液。向 CDLD 和 CDLD@G 中分别滴加 20 μL 的 Li_2S_8 溶液, 并在氮气氛围中静置 2 h, 最终得到直径约 16 mm, 厚度为 400–600 μm 的椴木基碳/硫复合正极和椴木基碳@石墨烯/硫复合正极, 分别命名为 S/CDLD 和 S/CDLD@G。每个正极片的活性物质含量约为 2 mg。

1.3 样品的性能及表征

采用日本岛津 XRD-6100 型 X 射线衍射仪 (XRD) 表征 S/CDLD 与 S/CDLD@G 的晶体结构; 借助北京精微高博 JW-BK122W 型比表面积及孔径分析仪 (氮气吸附法) 测定多孔碳材料的比表面积与孔径分布; 利用日本电子 JSM-6700 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品的形貌与微观结构。

1.4 电池组装和电化学性能测试

在氩气氛围手套箱 (氩气纯度 $\geq 99.99\%$, 水、氧含量体积分数均低于 $1 \times 10^{-6}\%$) 中完成 2025 型扣式电池的组装, 电池由正极壳、弹片、垫片、自制碳硫复合正极、Celgard2320 隔膜、金属锂负极、负极壳及电池级电解液组成。采用深圳新威尔 Neware BTS 型电池测试仪测试恒电压充放电特性、比容量、循环稳定性及倍率性能; 采用上海辰华 CHI660D 型电化学工作站进行不同扫速的循环伏安 (CV) 测试与分析, 探究电极反应的可逆性及电化学反应动力学特征。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

椴木基碳骨架的 SEM 图片如图 1 所示。从图 1 (a) 可以观察到 CDLD 样品具有明显的孔道结构, 其孔道分布均匀且连续贯通, 有利于电解液快速渗透。高倍 SEM 图 (图 1 (b)) 进一步显示, CDLD 样品孔壁较厚且表面平整, 作为自支撑电极骨架具有不易坍塌变形的优点, 为电子传导提供了更为稳固的通路。复合 RGO 后的 SEM 图如图 1 (c) 所示, 可见引入 RGO 并未对材料的孔径分布和大小产生明显影响。从更高倍数的 SEM 图 (图 1 (d)) 中可以清楚地观察到 RGO 已成功分布在孔道结构内, 并且部分与孔壁粘连。RGO 界面与木材孔壁相互贯通交联, 形成了更发达更规则的孔道结构, 不仅增加了材料的比表面积, 使硫单质可以更好地均匀分散负载, 增进孔道间物质传输效率, 而且 RGO 的吸附作用可

以进一步锚定多硫化物, 减轻因“穿梭效应”而引起的活性物质流失, 提升电池的循环稳定性。

图 2 (a) 展示了两种碳骨架的 XRD 图谱, 从中可以观察到两种材料都有明显的两个鼓包峰, 位于 22° 和 44° 左右, 分别对应无定形碳的 (002) 和 (100) 晶面, 符合椴木基碳材料高度无序的特征。相较之下, CDLD@G 的峰强更弱, 这是由于 RGO 在椴木的孔道结构中填充与分布, 在一定程度上对碳骨架表面起到了物理遮蔽的作用, 并对椴木基碳本身的晶体衍射信号产生了一定的稀释, 进一步证明 RGO 与椴木基碳材料成功复合。两种正极材料的 XRD 图谱如图 2 (b) 所示, 从中可以观察到 S/CDLD 和 S/CDLD@G 均存在单质硫的尖锐衍射峰, 与单质硫的标准卡片 (JCPDS No.08-0247) 比对后发现二者衍射峰的位置相同, 表明单质硫与两种碳骨架成功复合。S/CDLD@G 的峰强明显弱于 S/CDLD, 说明复合 RGO 的碳骨架提供了更多的活性位点, 有效抑制了硫颗粒在表面的过度聚集与裸露, 促使硫均匀分散在孔道结构中, 有望提升活性物质的利用率。

CDLD 和 CDLD@G 碳骨架的氮气等温吸/脱附曲线如图 2 (c) 所示。根据国际理论和应用化学联合会的分类, CDLD 和 CDLD@G 碳骨架的氮气等温吸/脱附曲线都具有 I 型和 IV 型混合特征。两者在较低的相对压力下吸附量迅速上升, 表明这两种材料中有少量的微孔结构。当相对压力 P/P_0 在 0.4–1 之间时, 两种样品呈现出 H4 型滞回环, 表明样品中还存在一定的介孔结构, 提供了更大的比表面积和充足的孔容, 有助于单质硫的承载。相对应的孔径分布曲线如图 2 (d) 所示, 两种样品的比表面积及孔径百分比数值见表 1。由表可知, 样品 CDLD 的比表面积为 $191.815 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔容为 $0.143 \text{ cm}^3/\text{g}$; CDLD@G 的比表面积为 $402.454 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔容为 $0.249 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。可见两种样品孔容的大小与比表面积是相互对应的。RGO 的复合显著提高了碳骨架的比表面积, 为活性物质硫提供了更充足的负载位点, 有利于改善电极结构稳定性。

2.2 电化学性能分析

为了探究形貌与电化学性能之间的构效关系, 将两种正极材料组装成扣式电池并测试其电化学性能。图 3 (a) 展示了 0.1C (电流密度倍率, $1\text{C}=1675 \text{ mA/g}$) 下, S/CDLD 和 S/CDLD@G 样品的首周放电比容量。两种样品的放电曲线均在 2.3–2.4 V 和 2.0–2.1 V 处出现两个明显的平台, 这分别对应单质硫向

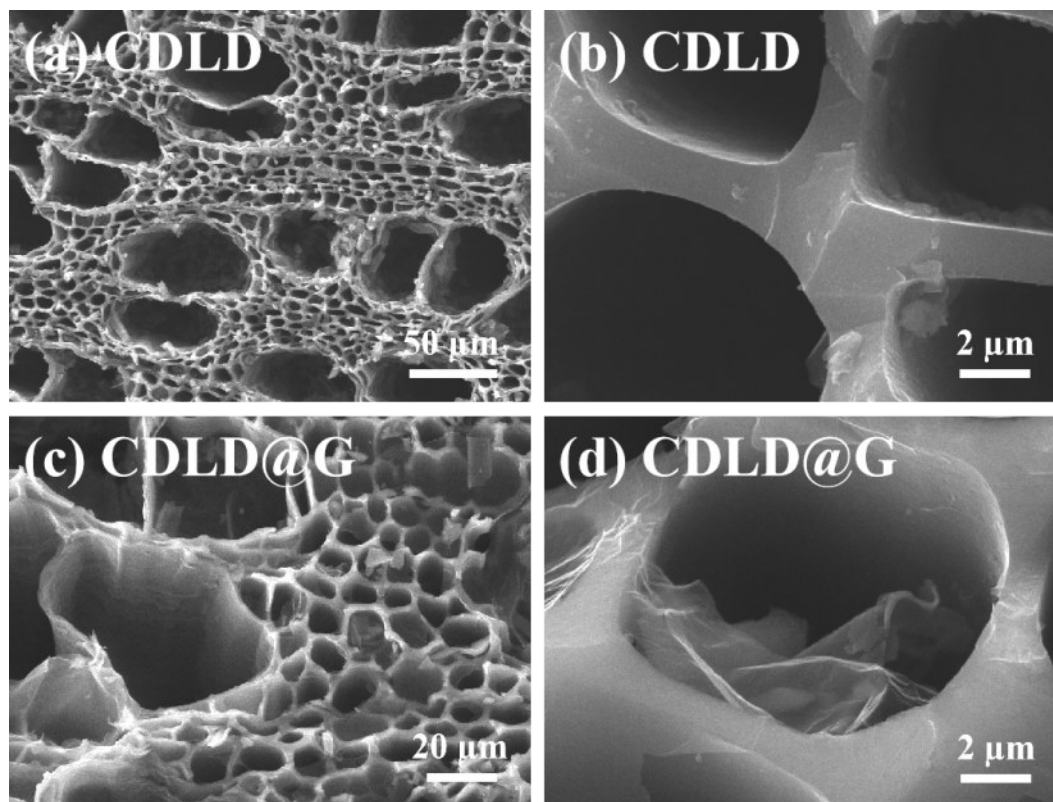


图1 椴木基碳材料复合RGO前后的SEM图:(a-b)CDLD;(c-d)CDLD@G

Fig. 1 SEM images of linden wood-based carbon materials before and after RGO compounding: (a-b) CDLD; (c-d) CDLD@G

多硫化锂及多硫化锂向硫化锂的物相转变过程。S/CDLD和S/CDLD@G正极材料的首周放电比容量分别为961.4和1077.1 mAh/g,说明RGO的引入有效改善了电极材料的导电性。两种材料的倍率性能如图3(b)所示,可见在不同的电流密度下,S/CDLD@G电极的电化学性能往往表现更佳,且当电流密度提高到1C时能够保持更高的放电比容量。这主要是因为复合RGO的样品在充放电过程中可以加强对多硫化锂的有效束缚,抑制电池的穿梭效应;同时,RGO为活性物质提供了更多的吸附位点,有利于电解液与正极材料充分接触,从而提升了传质效率。当电流密度恢复到0.1C时,S/CDLD@G电极仍能保持更高的放电比容量,证明其具有更优异的电化学可逆性。图3(c)为扫描速度0.1 mV/s时两种正极材料的首圈CV曲线图,可以观察到两种材料的循环曲线均包含两个还原峰和一个氧化峰,分别与充放电曲线中的平台对应,说明在电化学过程中存在多种物相转变。S/CDLD@G在1.6 V附近还出现了新的还原峰,这源于RGO表面的含氧官能团在低电位下发生的还原反应。此外,S/CDLD@G电极具有更小的极化电压和更大的响应面积,证明其具备更加出色高度可逆的电化学反应动力学。图3

(d)展示了两种正极材料的循环性能曲线。由图可知,S/CDLD和S/CDLD@G在100次循环后的可逆容量分别达到658.7和983.7 mAh/g;容量保持率分别为68.5%和91.3%。与S/CDLD相比,S/CDLD@G电极在长循环过程中展现出更高的可逆容量与更优异的容量保持率。这是因为RGO为椴木基碳的孔道结构提供了更多的开放空间与吸附位点,对循环过程中产生的多硫化锂起到有效的物理限域和化学吸附作用,能够显著抑制穿梭效应,减少活性物质的流失与不可逆容量衰减。以上数据表明RGO对椴木基碳材料具有显著的修饰作用,能够使其展现出更优异的电化学性能。

为了进一步探究S/CDLD@G在高倍率下的循环稳定性,将S/CDLD@G电极组装成电池并在1C条件下进行长循环测试,结果如图3(e)所示。在循环350次后电极仍可保持533.2 mAh/g的可逆容量,表现出高循环稳定性和低容量衰减,进一步证明了RGO的复合能够有效稳定电极结构,抑制因穿梭效应而引起的自放电现象,显著提升锂硫电池的长循环性能。在此基础上,针对传统高面载硫正极普遍存在的电极易开裂、结构稳定性差、电荷传输受阻等问题,本文制备了面载密度高达4.7 mg/cm²的S/

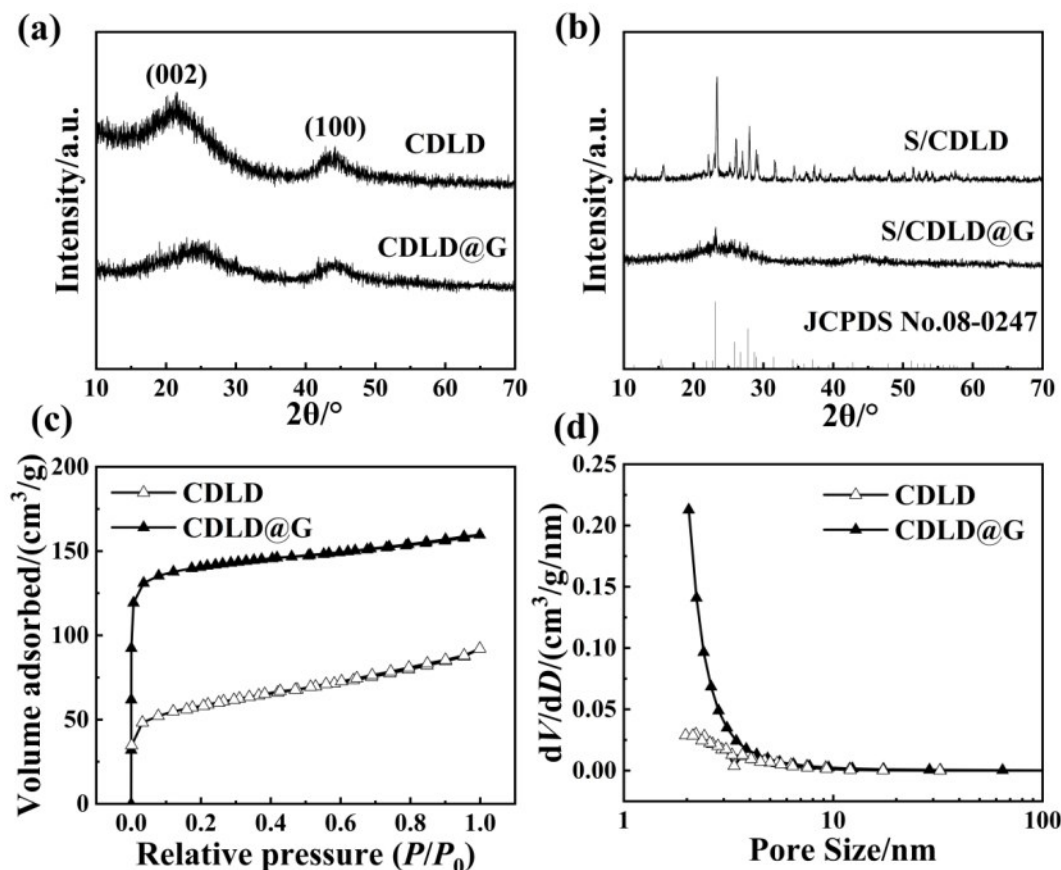


图2 椴木基碳材料(a)和碳硫复合材料(b)的XRD图;椴木基碳材料的氮气等温吸/脱附曲线图(c)及孔径分布图(d)
Fig. 2 The XRD patterns of linden wood-based carbon materials (a) and carbon-sulfur composite materials (b); N₂ adsorption-desorption isotherms (c) and pore size distribution curve (d) of linden wood-based carbon materials

表1 椴木基碳材料的比表面积、孔径、孔容以及孔径百分比数据表

Table 1 Data table of specific surface area, pore size, pore volume and pore size percentage of linden wood-based carbon materials

样品	比表面积/ (m ² /g)	孔容/ (cm ³ /g)	平均孔径/ (nm)	孔径分布/%		
				≤2 nm	2-50 nm	≥50 nm
CDLD	191.815	0.143	2.972	8.94	83.36	7.70
CDLD@G	402.454	0.249	2.476	10.85	79.69	9.46

CDLD@G 电极,其电化学性能测试结果如图 3(f)所示。在 0.1C 的电流密度下循环 200 次后,电极仍能保持 710.2 mAh/g 的可逆容量,且过程无明显的容量衰减现象。结果表明, S/CDLD@G 电极在高载硫条件下仍可保持优异的电化学性能,因此上述自支撑电极材料的设计有助于实现锂硫电池的商业化应用。

为了更加直观的反映 S/CDLD@G 的电化学反应动力学,对其进行了不同扫描速率下的测试和拟合。将样品在 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1 mV/s 的扫描速率下进行 CV 测试,如图 4(a)所示。随着扫描速率的增加, S/CDLD@G 电极的还原峰向低电位方向移

动,氧化峰向高电位方向移动,反应的极化作用在不断增加,但仍保持良好的电化学反应可逆性。此外,该电极在不同扫描速率下仍能保持尖锐清晰且峰位偏离程度小的氧化峰和还原峰,说明发达的孔道结构增加了电解液的运输及锂离子的传质效率,表现出更加迅速稳定的电化学响应和更加优异的氧化还原动力学。基于变速 CV 测试结果,进一步分析样品的电化学反应动力学机制。根据峰值电流 I 与扫描速率 v 之间的幂律关系:

$$I(v) = av^b \quad (1)$$

其中 a 为常数, b 为指数。等式两边同时取对数可得:

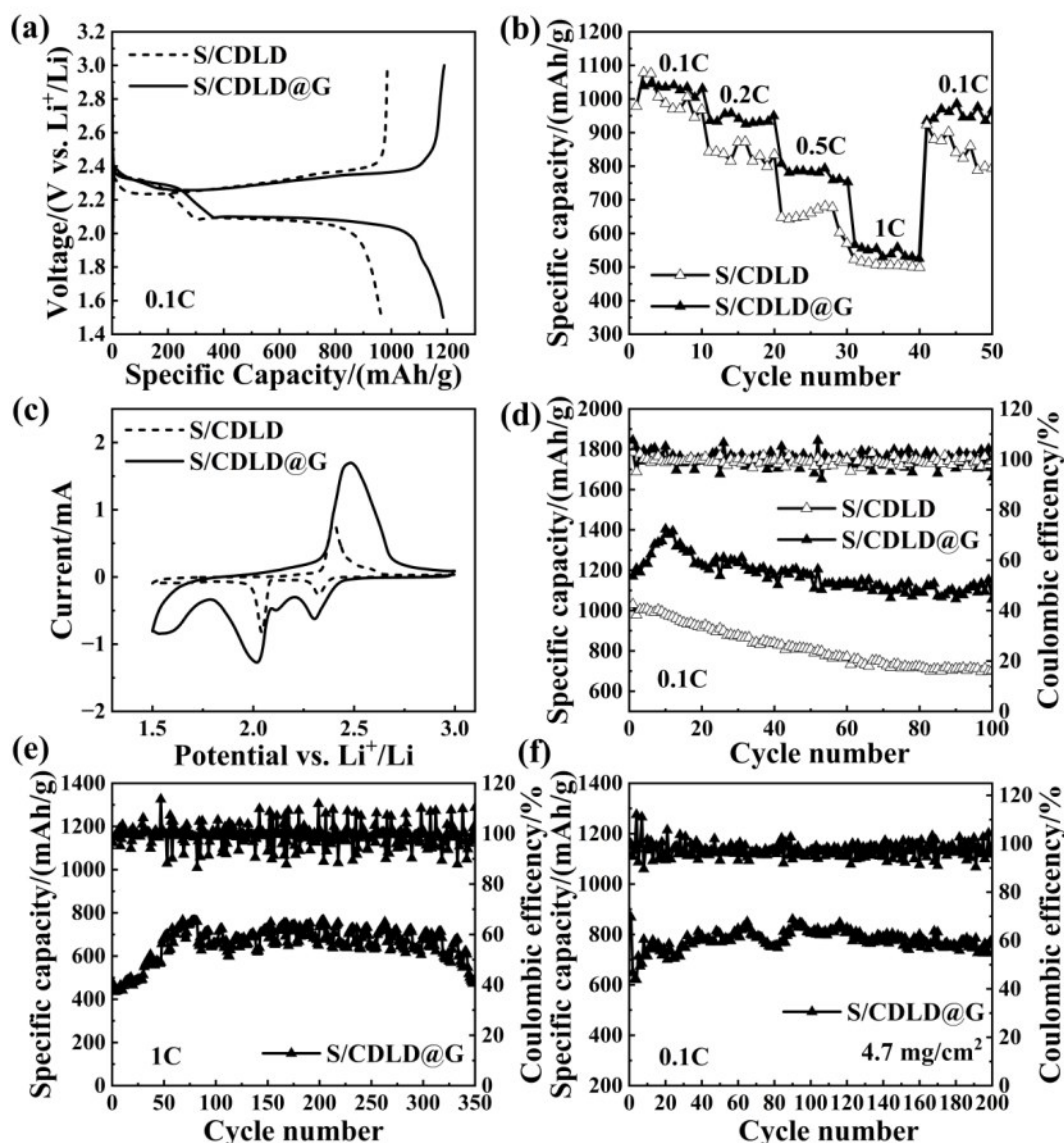


图3 椴木基碳硫复合材料全电池性能:(a)首周放电比容量;(b)倍率性能;(c)CV曲线;(d)循环性能曲线;(e)高倍率长循环性能曲线;(f)高面载电极循环性能曲线

Fig. 3 Performance of linden wood-based carbon-sulfur composite materials full battery: (a) Initial charge-discharge curves; (b) Rate performance; (c) CV curves; (d) Cycling performance curves; (e) High-rate long-cycle performance curves; (f) High-loading electrode cycling performance curves

$$\log(I) = \log(a) + b \log(v) \quad (2)$$

将不同扫描速率下的峰值电流与扫速进行线性拟合即可得到 b 值。当 b 值接近0.5时,电极过程以离子扩散控制为主;当 b 值接近1时,则以电容控制为主。

图4(b)展示了S/CDLD@G的拟合结果,其氧化峰拟合所得 b 值为0.55,两个还原峰拟合所得 b 值分别为0.45和0.62。三个峰的拟合结果均接近0.5,说明该电极主要受离子扩散控制。图4(c)为0.1 mV/s扫速下的赝电容拟合曲线,在该扫速下赝电容贡献占比仅为28%。图4(d)进一步展示了不同扫速下

扩散控制电容的贡献占比。由图可知,尽管赝电容贡献随扫速增加而增加,但在较宽的扫速范围内,扩散控制仍在电极过程中占主导地位,进一步证明了该材料以离子扩散控制为主,表现出典型的电池动力学特性。上述一系列电化学测试结果一致表明,S/CDLD@G在反应活性、电化学动力学及循环稳定性等方面均具备显著优势。

3 结论

针对椴木基碳骨架对多硫化锂限域能力不足

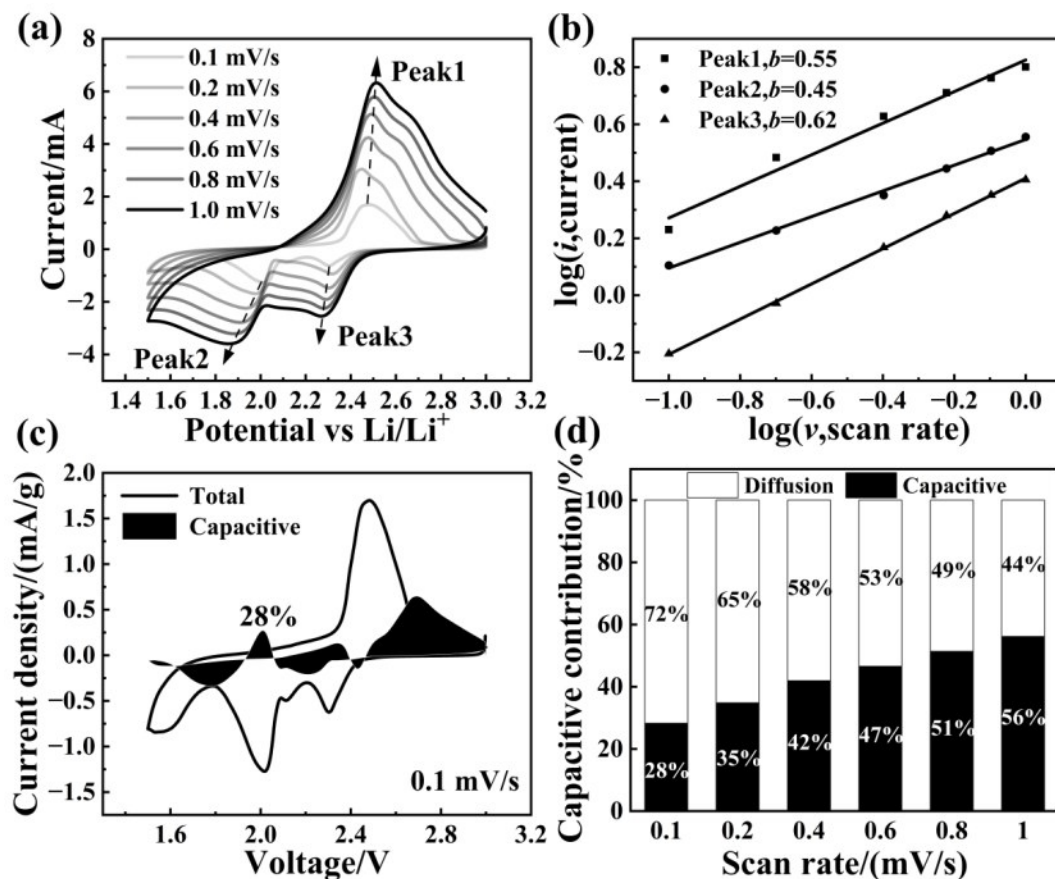


图4 复合RGO后椴木基碳硫复合电极的电化学行为:(a)不同扫描速率下CV曲线;(b)logi-logv图;(c)0.1 mV/s扫速下的赝电容拟合;(d)不同扫速下扩散电容占比

Fig. 4 The electrochemical behavior of linden wood-based carbon-sulfur composite electrodes after RGO compounding: (a) CV curves at different scanning rates; (b) logi-logv diagram; (c) Pseudo capacitance fitting at a sweep rate of 0.1 mV/s; (d) The proportion of diffusion capacitance at different scanning speeds

的问题,本研究设计了以RGO填充碳骨架孔道的改性策略,并对其进行了结构表征和电化学性能分析。RGO的复合将椴木的通孔分隔成为多个开放的空间,强化了对多硫化物的限域作用,在保留生物质碳原有结构的同时也为活性物质硫提供了更多的存储位点;RGO表面极性官能团还能对多硫化锂起到化学吸附的作用,缓解因穿梭效应而引起的自放电现象。复合RGO后的椴木基碳材料具有402.454 m²/g的大比表面积和0.249 cm³/g的孔容。在0.1C电流密度下,S/CDLD@G正极的首周放电比容量达到1077.1 mAh/g,循环100周后仍能达到983.7 mAh/g,容量保持率为91.3%。同时,制备的高面载S/CDLD@G电极也同样展现出优异的电化学稳定性。综上,椴木基碳@石墨烯/硫复合材料表现出良好的电化学性能,为锂硫电池木质碳正极材料的设计与开发提供可行思路。

符号说明

- a, b —— 幂律公式中的常数和指数
- C —— 电流密度倍率
- CDLD —— 去木质素后碳化的椴木片
- CDLD@G —— 椴木基碳石墨烯复合骨架
- CV —— 循环伏安
- D —— CDLD和CDLD@G的孔径, nm
- DME —— 乙二醇二甲醚
- DOL —— 1,3-二氧戊环
- GO —— 氧化石墨烯
- HCl —— 盐酸
- I —— 电流, mA
- LiNO₃ —— 硝酸锂
- LiTFSI —— 双三氟甲烷磺酰亚胺锂
- P, P_0 —— 分别为平衡压力与氮气的饱和蒸气压, kPa
- RGO —— 还原氧化石墨烯
- SEM —— 扫描电子显微镜
- S/CDLD —— 椴木基碳/硫复合正极

S/CDLD@G —— 椴木基碳@石墨烯/硫复合正极

V ——CDLD和CDLD@G的孔容, cm^3/g

v ——扫描速率, mV/s

XRD——X射线衍射仪

参考文献

- [1] Guo Y, Niu Q, Pei F, et al. Interface engineering toward stable lithium - sulfur batteries[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, **17**(4): 1330-1367.[LinkOut]
- [2] Wang T, He J R, Zhu Z, et al. Heterostructures regulating lithium polysulfides for advanced lithium - sulfur batteries[J]. *Advanced Materials*, 2023, **35**(47): 2303520.[LinkOut]
- [3] Chen S L, Miao K J, Zhou J Q. Advances in lithium - sulfur batteries for commercialization[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, **45**: e01500.[LinkOut]
- [4] Huang J, Li C, Jiang D K, et al. Solid-state electrolytes for lithium metal batteries: state - of - the - art and perspectives[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**: 2411171.[LinkOut]
- [5] Song H M, Münch K, Liu X, et al. All-solid-state Li - S batteries with fast solid - solid sulfur reaction[J]. *Nature*, 2025, **637**(8047): 846-853.[LinkOut]
- [6] Zhu X X, Wang L G, Bai Z Y, et al. Sulfide-based all - solid - state lithium - sulfur batteries: challenges and perspectives[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, **15**(1): 75.[LinkOut]
- [7] Zhu L X, Zhang X Y, Zhang J, et al. A review on sulfur-based composite cathode materials for lithium - sulfur batteries: Progress and prospects[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, **1010**: 178282.[LinkOut]
- [8] Chen Y Q, Zhang X D, Chen Q D, et al. Self - supported tungsten nitride and carbide heterostructures with vanadium doping tandemly catalyze the conversion of polysulfides for lithium - sulfur batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(1): 2411941.[LinkOut]
- [9] Huang S Y, Xiu H J, Yin D W, et al. Cellulose Fiber based self - supporting paper cathode with multi - scale network structure for high performance lithium-sulfur battery[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, **216**: 118806.[LinkOut]
- [10] Wu J, Yang Q, Liu J N, et al. Self - supporting nanoporous carbon films with single-atom co - N - C sites as hosts for lithium - sulfur batteries[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, **7**(24): 27858-27864.[LinkOut]
- [11] Yan Y P, Zhou X X, He J H, et al. Self - supporting metal-organic frameworks (MOFs) and their derivatives for lithium - sulfur batteries: a comprehensive review[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2026, **548**: 217218.[LinkOut]
- [12] Feng P, Wu Q P, Xu Y L, et al. Nanosized Li_2S - loaded polar porous carbon nanofibers as self-supporting electrodes in anode - free lithium - sulfur batteries[J]. *Advanced Science*, 2026, **13**(5): e16575.[LinkOut]
- [13] Su Q, Yin X Y, He Y L, et al. TiO_2/CNTs dual - decorated functional carbon foam as self-supporting sulfur host for boosting the adsorption and redox kinetics of polysulfides[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, **1010**: 178225.[LinkOut]
- [14] Shao J S, Huang C, Zhu Q, et al. Flexible CNT-interpenetrating hierarchically porous sulfurized polyacrylonitrile (CIHP - SPAN) electrodes for high - rate lithium - sulfur (Li - S) batteries[J]. *Nanomaterials*, 2024, **14**(13): 1155.[LinkOut]
- [15] Lu J X, Zhu M Y, Wang C G, et al. Nitrogen-doped 3D porous composite GA/HNBRL used as a self-supporting electrode to enhance the adsorption and conversion of polysulfide in high - capacity Li - S batteries[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2025, **13**(50): 21405-21417.[LinkOut]
- [16] Cheng T, Cui H M, Shi J S, et al. Biomass - derived ultra-thin wall interconnected porous carbon as sulfur host for lithium - sulfur batteries[J]. *Chemical Physics Letters*, 2026, **882**: 142478.[LinkOut]
- [17] Song S, Oh Y S, Seo S W, et al. Pine bark-derived activated carbon as a high - performance sulfur host for lithium - sulfur batteries[J]. *Batteries & Supercaps*, 2026, **9**(3): e202500747.[LinkOut]
- [18] Yan Y L, Song M Z, Yang Y Y, et al. Heteroatom doping carbon film derived from hyphae as a self-supporting cathode for advanced lithium sulfur batteries[J]. *Applied Surface Science*, 2024, **659**: 159915.[LinkOut]
- [19] He J J, Tang Y, Li M, et al. Ni quantum dot-embedded and N - doped biomass - derived porous carbon as an efficient sulfur host for lithium - sulfur batteries[J]. *Journal of Materials Science*, 2025, **60**(35): 15706-15723.[LinkOut]
- [20] Wang Y, Dong Z F, Liu Z L, et al. MoS_2 loaded cotton stalk based porous carbon with high N content improves the electrochemical performance of Li - S batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, **105**: 114756.[LinkOut]
- [21] Xie J Y, Yan Y L, Zou Y M, et al. Wood-derived carbon/CNT aerogel composites for Li - S batteries: enhanced polysulfide adsorption and electrochemical kinetics[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2025, **996**: 119392.[LinkOut]
- [22] Fan S, Li J B, Huang S Y, et al. Micro-nano conductive network structured aramid paper - based self - supporting cathode enhances cycling stability in lithium - sulfur battery[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, **17**(12): 18458-18472.[LinkOut]
- [23] Ma Y Y, Shi Y, Yu J Y, et al. Synergistic catalysis of bimetallic tellurides on biomass - derived carbon for polysulfide conversion in Li - S batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, **155**: 121432.[LinkOut]
- [24] 任冰, 曹托托, 燕映霖, 等. 自支撑椴木基碳/硫复合材料的制备及其电化学性能研究[J/OL]. *化工新型材料*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20251211.1404.003>. Ren B, Cao T T, Yan Y L, et al. Preparation and electrochemical performance study of self-supporting basswood-based carbon/sulfur composite [J/OL]. *New Chemical Materials*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20251211.1404.003>. 网址有效. 点击这里, 可链出核对其他内容
- [25] 景玮, 燕映霖, 樊潮江, 等. 木质结构自支撑碳材料在新型电化学储能器件中的研究进展[J]. *中国造纸*, 2022, **41**(1): 106-117. Jing W, Yan Y L, Fan C J, et al. Research progress of wood - based self-supporting carbon materials in new electrochemical energy storage devices[J]. *China Pulp & Paper*, 2022, **41**(1): 106-117.[知网中文][知网英文]
- [26] 曹托托, 燕映霖, 任冰, 等. 巴尔沙木衍生自支撑碳硫正极的制备与电化学性能研究[J]. *功能材料*, 2026, **57**(1): 103-110. Cao T T, Yan Y L, Ren B, et al. Study on preparation and

- electrochemical properties of balsa wood derived self - supporting carbon - sulfur cathodes[J]. Journal of Functional Materials, 2026, **57**(1): 103-110.[万方]
- [27] Shi M J, Han X, Qu W, et al. Nanocellulose - derived hierarchical carbon framework-supported P-doped MoO₂ nanoparticles for optimizing redox kinetics in lithium - sulfur batteries[J]. Advanced Materials, 2025, **37**(22): 2419918.[LinkOut]
- [28] Li B Y, Yan Y L, Zhang X S, et al. ZIF-67 decorated wood derived carbon host dual - stage - order microchannels for self - supporting cathode of high - performance lithium sulfur batteries [J]. Advanced Powder Technology, 2025, **36**(9): 105016.[LinkOut]
- [29] Zhang T, Tang X, Guan B, et al. ZIF-8 modified wood - derived hierarchical porous carbon for polysulfide confinement in lithium - sulfur battery cathodes[J]. Journal of Power Sources, 2025, **650**: 237464.[LinkOut]
- [30] Li Z, Liu J P, Wang T L, et al. Reduced graphene oxide participation enabling fast nano - homogeneous deposition of sulfur for lithium - sulfur battery cathode[J]. Carbon, 2024, **222**: 118966.[LinkOut]
- [31] Zhang G W, You J J, Chen Q, et al. Mesoporous NiCo₂S₄@rGO nanocomposites as sulfur carriers for high performance lithium sulfur batteries[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, **19**(4): 100535.[LinkOut]
- [32] Wang Y, Yang B, Yu H Q, et al. 3D porous carbon gel composite with transition metal particles for anchoring-diffusion-conversion of polysulfides for lithium - sulfur batteries[J]. Journal of Materiomics, 2026, **12**(2): 101156.[LinkOut]