

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2026.01.008

三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响

张弛

(芜湖职业技术大学汽车与航空学院, 安徽 芜湖 241006)

摘要: [目的] 为了提升锂硫电池性能, 分析三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响。[方法] 以氧化还原石墨烯为原料, 采用水热法结合硬模板造孔工艺合成三维多孔还原氧化石墨烯, 通过热熔融扩散法制备硫基正极材料, 借助循环伏安法分析锂离子扩散特性, 并通过吸附试验评估多硫化锂束缚能力, 结合不同倍率下的循环性能测试验证材料效果。[结果] 三维多孔石墨烯表面形成超薄致密修饰层, 无明显裂纹; 同时, 修饰后的三维多孔石墨烯可有效抑制多硫化锂穿梭, 在超高倍率下循环平均比容量约为 351.6 mAh/g, 容量衰减率低至 0.013%, 显著优于对照材料。[结论] 三维多孔石墨烯表面修饰可通过物理屏障增强多硫化锂束缚, 抑制多硫化锂穿梭效应。

关键词: 锂硫电池; 穿梭效应; 三维多孔结构; 循环伏安法; 循环性能

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2026)01-0067-08

Effect of Surface Modification of Three-Dimensional Porous Graphene on Lithium-Sulfur Batteries

ZHANG Chi

(School of Automotive and Aviation, Wuhu Polytechnic University, Wuhu 241006, Anhui, China)

Abstract: [Objective] To improve the performance of lithium-sulfur batteries, the effect of surface modification of three-dimensional porous graphene on lithium-sulfur batteries was investigated. [Method] Using graphene oxide as the raw material, three-dimensional porous reduced graphene oxide was synthesized via a hydrothermal method combined with a hard template pore-forming process. Sulfur-based cathode materials were prepared by the thermal melting diffusion method. The lithium ion diffusion characteristics were analyzed by cyclic voltammetry, the binding capacity of lithium polysulfides was evaluated through adsorption experiments, and the material performance was verified by cycle performance tests at different current rates. [Result] An ultra-thin and dense modification layer with no obvious cracks was formed on the surface of three-dimensional porous graphene. Furthermore, the modified three-dimensional porous graphene could effectively suppress the shuttle of lithium polysulfides. It delivered an average specific capacity of approximately 351.6 mAh/g at an ultra-high current rate with an extremely low capacity decay rate of 0.013%, which was significantly superior to the control materials. [Conclusion] Surface modification of three-dimensional porous graphene can enhance the binding of lithium polysulfides through a physical barrier and thus effectively inhibit the shuttle effect of lithium polysulfides in lithium-sulfur batteries.

Keywords: lithium-sulfur battery; shuttle effect; three-dimensional porous structure; cyclic voltammetry; cycle performance

收稿日期: 2025-10-28

基金项目: 安徽省教育厅项目(2024AH040253); 芜湖市科技局项目(WHSYFZX202301、sgcjsyjzx09)。

作者简介: 张弛(1991—), 女, 安徽芜湖人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电池技术。E-mail: zhangchi@whit.edu.cn。

0 引言

在新能源储能技术领域,锂硫电池凭借其高达 1 675 mAh/g 的理论比容量和 2 600 Wh/kg 的理论能量密度,被视为下一代高能量密度电池体系的核心候选方案^[1]。然而,其商业化进程长期受制于 2 大核心瓶颈:(1)硫正极在充放电过程中生成的中间产物——长链多硫化锂(Li₂S₄₋₈)易溶解于有机电解液,引发“穿梭效应”,导致活性物质不可逆损失和库仑效率衰减;(2)硫与硫化锂的密度差异引发体积膨胀/收缩,造成电极结构粉化脱落,循环寿命大幅缩短。针对上述挑战,三维多孔石墨烯(three-dimensional porous graphene, 3D-PG)因其独特的物理化学特性成为研究热点^[2-3]。锂硫电池能量存储依赖硫与锂间的双电子氧化还原反应^[4],其化学反应式为 2Li + S ⇌ Li₂S。当锂硫电池放电时,锂离子通过电解液扩散至正极,与活性物质硫发生反应;充电时,锂离子和电子沿相反方向回到负极,实现电能与化学能的相互转化和储存。然而,在锂硫电池充放电过程中,会生成高阶多硫化锂,这些多硫化锂易溶于电解液^[5]。受浓度梯度和电场效应的驱动,它们会在正负极之间反复迁移,即产生穿梭效应。穿梭效应会导致活性物质的损失,使电池容量快速衰减,从而缩短锂硫电池的循环寿命^[6]。

为解决上述问题,钟厉等^[7]将石墨烯前驱体进行预碳化处理,随后通过多步激光刻蚀优化多孔石墨烯薄膜结构,对石墨烯薄膜的表面形貌等性能进行表征,并探索其在电化学储能器件中的应用,解决离子的传输问题。周佳玉等^[8]通过循环充放电试验,考查不同隔膜的电池性能,并研究隔膜对多硫化锂氧化还原反应动力学的影响,采用锰催化剂改性玻璃纤维隔膜,探究其对电池性能的提升效果,旨在减少充放电过程中的能量损耗。王晨瑶等^[9]通过合成黑磷烯,对商用聚丙烯隔膜进行改性,探究黑磷烯对隔膜性能及锂硫电池性能的影响,通过分

析可知,改性后的聚丙烯隔膜加快了离子在电解液中的扩散,有效抑制了穿梭效应。

由此可知,针对锂硫电池的研究主要集中在抑制多硫化锂的穿梭效应,因此,本文采用水热法结合 SiO₂硬模板,合成三维多孔还原氧化石墨烯,同时分析三维多孔石墨烯孔道结构与多硫化锂穿梭效应的抑制效果,为锂硫电池正极载体材料提供技术参考。

1 三维多孔石墨烯制备及表征

三维多孔石墨烯因其独特的结构特性,在锂硫电池领域展现出巨大的应用潜力。锂硫电池具有高理论能量密度,然而,其充放电过程中存在多硫化锂穿梭效应,导致循环寿命缩短等问题,严重制约了锂硫电池的商业化应用。三维多孔石墨烯作为锂硫电池硫正极载体,通过其特殊的孔道结构有效抑制穿梭效应,提高电池性能。因此,本研究聚焦于三维多孔石墨烯的制备及材料表征,为后续研究其对锂硫电池性能的影响奠定基础。

1.1 试验仪器

本研究采用的主要设备仪器信息如表 1 所示。

表 1 主要设备信息

设备名称	设备型号	厂家
涂膜器	KTQ-2	东莞市万江广美精密仪器行
真空干燥箱	DZF-6020	杭州汇尔仪器设备有限公司
马弗炉	MF-1100C	安徽贝意克设备技术有限公司
手套箱	Super	合肥海瑞克斯科技有限公司
多通道电化学工作站	VSP-300	上海嘉斯科分析仪器有限公司
恒温磁力搅拌器	DF-101S	上海五相仪器仪表有限公司
扫描电子显微镜	S-4800	日立高新技术公司
X 射线衍射仪	DX-2700BH	丹东浩元仪器有限公司
分析天平	FA 1004	鹤壁市科达仪器仪表有限公司
测厚仪	D-MPOD	西安精大检测设备有限公司

表1中的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)是表征三维多孔石墨烯微观结构的关键工具,主要用于观察其表面与微观结构特征。通过SEM图像,可精确测量三维多孔石墨烯的孔道尺寸并分析其分布情况,进而辅助判断其对锂硫电池电化学性能的影响。

1.2 三维多孔石墨烯制备

三维多孔石墨烯以氧化还原石墨烯为原料,由10层碳原子以下的石墨烯片以三维排列方式构成。当其作为锂硫电池硫正极载体时,孔道结构尺寸对其性能有着至关重要的影响。若孔道尺寸较大,对多硫化物溶解的束缚作用会显著降低,同时对多硫化物向负极迁移的空间阻碍作用也会变弱,不利于抑制穿梭效应。因此,为了有效抑制穿梭效应,提高锂硫电池的循环稳定性,需要设计孔道结构尺寸较小的三维多孔石墨烯。

本文采用水热法结合硬模板造孔工艺,合成具有多孔结构的三维多孔还原氧化石墨烯材料,具体步骤如下。

1)预氧化石墨制备。在高温高压环境下,氧化石墨烯片会发生部分还原反应。未被还原的部分能够俘获水分子,从而构成孔隙结构。在水热过程中,氧化石墨烯片成为组成三维结构石墨烯材料的结构单元。

2)氧化石墨的进一步处理。将预氧化石墨放置于洁净的瓶中,缓慢向瓶中加入适量硫酸,并使用恒温磁力搅拌器搅拌均匀。随后,分多次加入高锰酸钾,控制反应条件,搅拌反应2 h后,加入140 ml水,并通过水浴等方式控制溶液温度处于80~90℃。接着,加入适量双氧水,使溶液呈现亮黄色,此时表明反应达到一定程度。静置一段时间后,倒出上层清液,并采用1%的盐酸对下层沉淀物进行洗涤,以去除其中的 SO_4^{2-} 。

3)硫的装载:通过热熔融扩散法完成硫的装载。将处理后的材料与硫按照一定比例混合,在特

定温度下进行热处理,使硫均匀地扩散到材料中,制备出具有三维结构的硫基正极材料3D-S-RGO。

4)氧化石墨烯的制备:利用去离子水将3D-S-RGO透析至中性,以去除其中的杂质离子。然后,经冷冻干燥后得到氧化石墨烯,为后续研究三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响奠定基础。

1.3 三维多孔石墨烯材料表征方法

在研究三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响时,为了准确观察三维多孔石墨烯材料的微观结构特征,采用扫描电子显微镜(SEM)对其进行表征。具体操作步骤如下。

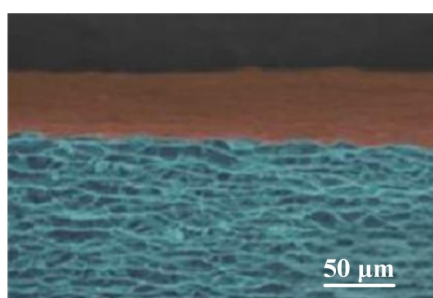
1)使用导电胶将待测三维多孔石墨烯样品牢固地粘在样品台上,确保样品在观察过程中不会脱落。

2)选取10 kV的加速电压,该电压既能保证成像清晰度,又能确保结构观察的准确性。

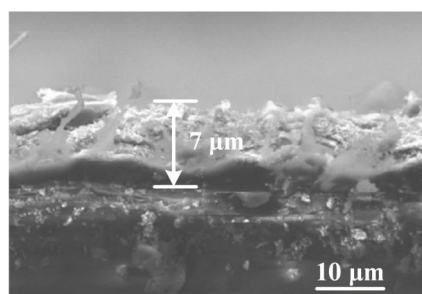
由于三维多孔石墨烯材料制备方法的特殊性,在制备过程中,首先沉积在滤膜上的是一层厚度超薄且堆积紧密的石墨烯层。随后,石墨烯片与相关组分会在此石墨烯层上逐渐沉积,排列形成有序的多孔结构,如图1所示。

由图1可知,三维多孔石墨烯的表面被一层平坦且紧密的膜覆盖,该膜延伸至三维多孔石墨烯的整个表面,且表面无明显裂纹。这种经过表面修饰的表层结构具有重要作用,它能够有效减少多硫化物的渗透扩散,从而抑制穿梭效应。进一步观察图1(b)可以发现,该表面修饰层的厚度约为7 μm。从微观结构来看,其主要由多片石墨烯堆叠而成。这种堆叠结构具有独特的优势,一方面,它能够保障电子传导的连续性,确保电池在充放电过程中电子能够顺畅地传输,提高电池的充放电效率;另一方面,可通过物理屏障作用增强对多硫化物的束缚,减少多硫化物在电解液中的溶解和迁移,从而提高电池的循环稳定性。由图1(c)可以观察到石墨烯片间相互堆叠的痕迹,其表面同样被表面修饰处

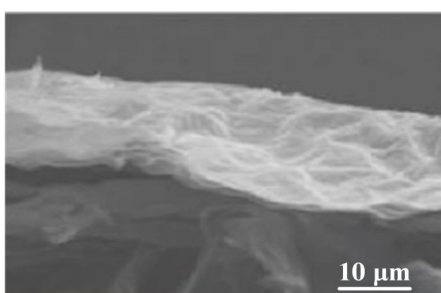
理。这一结果进一步验证了表层石墨烯膜可完整覆盖整个材料结构。这种完整的覆盖结构能够全方位地抑制多硫化物的渗透和扩散,有效提升对多硫化物的抑制效果,为提高锂硫电池的性能提供有力保障。



(a)表面结构



(b)修饰层厚度



(c)堆叠痕迹

图1 三维多孔石墨烯材料(SEM)

综上所述,本文通过特定的制备工艺成功制备了三维多孔石墨烯,并采用SEM对其微观结构进行了详细表征。结果表明,所制备的三维多孔石墨烯具有独特的表面修饰结构和有序的多孔结构,这些结构特征有望在锂硫电池中发挥重要作用,有效抑制穿梭效应,提高电池的电化学性能。

2 试验准备

在完成三维多孔石墨烯制备及表征后,围绕锂硫电池进行试验前期准备,为后续研究提供基础条件。

2.1 锂硫电池制备

在研究三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响时,以三维多孔石墨烯作为正极载体开展电池制备。具体流程如下。

1)将三维多孔石墨烯与硫单质按2:8的质量比通过熔融扩散法混合,将其放至研钵中研磨均匀后,放入烘箱在155℃下保温24h,待物料自然冷却,所得混合物即为锂硫电池正极活性材料。

2)将正极活性材料移入研钵,滴入适量N-甲基吡咯烷酮(N-Methyl-2-pyrrolidone, NMP)作为溶剂,持续研磨至形成均匀电极浆料。剪裁合适尺寸的铝箔作为电极基底,将浆料均匀涂覆在铝箔表面,严格控制涂覆厚度以保证正极片硫载量稳定在1.0~1.5 mg/cm²。将涂覆后的铝箔转移至烘箱干燥6h,随后裁切成直径14mm的圆形正极片。电池组装前,需将正极圆片再次烘干以彻底去除残留水分。

3)电池组装时,将烘干的正极圆片置于正极壳中央,敷设预先制备的中间层材料于正极表面,滴加40 μL电解液后,使用封口机完成电池封装。组装完毕的电池需静置12h,使电解液充分浸润电极。对于对称电池,电解液更换为0.2 mol/L Li₂S₆溶液,其余封装流程与常规锂硫电池一致。通过电化学测试分析三维多孔石墨烯基材料对多硫化锂氧化还原反应的催化作用,评估表面修饰对电池性能的影响。

2.2 影响指标分析

制备电池后,确定三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响指标。

2.2.1 循环伏安法

在三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响研究中,本文采用循环伏安(Cyclic Voltammety, CV)法对其进行测试,该方法主要通过对锂硫电池工作电极施加线性扫描,同步采集电流响应信号以实现分析^[10-12]。当电活性物质发生还原反应时,伏安图谱会呈现特定电位区间的还原峰,发生氧化反应时,则呈现特定电位区间的氧化峰。从锂硫电池的循环伏安(CV)曲线中,可以获取电池电化学反应的具体情况,同时,可判断锂硫电池的极化程度,评估三维多孔石墨烯表面修饰对电池电化学行为的影响。

为分析三维多孔石墨烯表面修饰是否具备更强的锂离子传输能力,对锂硫电池进行不同扫描速率的循环伏安测试,并基于测试结果计算锂硫电池中的离子扩散速率,其计算公式如式(1)所示。

$$I_p = 2.69 \times 10^5 n^{1.5} AD^{0.5} Cv^{0.5} \quad (1)$$

式中: I_p 为锂硫电池峰值电流, n 为电荷转移数, A 为电极面积, D 为锂离子扩散系数, C 为锂离子浓度, v 为线性扫描速率。

2.2.2 硫化物吸附量计算

为评估三维多孔石墨烯表面修饰对多硫化物的吸附能力,本文进行了吸附量测定。将制备的三维结构石墨烯材料投入目标溶液中,随后进行密封,将其置于振荡器中,并在恒温条件下保温6 h,随后取样,测量溶液中多硫化物的浓度。多硫化物的浓度主要通过紫外分光光度仪检测,多硫化物吸附量的计算公式如式(2)所示。

$$X = \frac{(N_0 - N_t) \times V}{M} \quad (2)$$

式中: X 为多硫化物吸附量, N_0 为多硫化物初始浓度, N_t 为特定时间后剩余的多硫化物浓度值, V 为水溶液体积, M 为三维石墨烯固体质量。

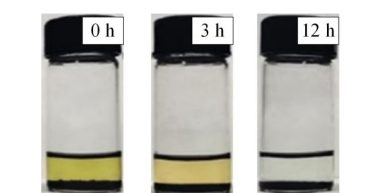
通过对多硫化物吸附量的计算,可辅助判断三维多孔石墨烯表面修饰对多硫化物的束缚能力,为后续分析提供数据支撑。

3 表面修饰对锂硫电池的影响

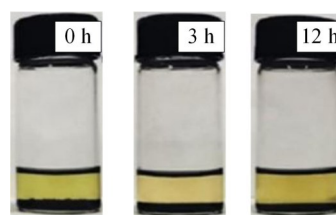
在三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响研究中,本文通过抑制多硫化锂的穿梭效应、循环伏安曲线及循环性能测试,综合评估多孔石墨烯膜材料的性能特征,明确三维多孔石墨烯表面修饰对电池性能的影响。

3.1 多硫化锂穿梭抑制性能分析

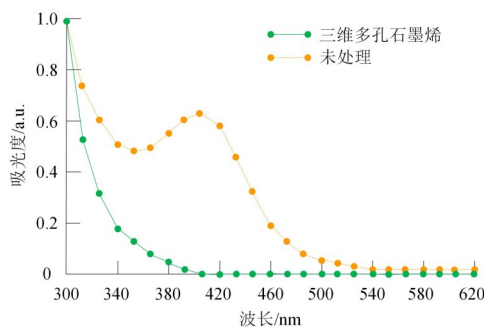
为了系统分析三维多孔石墨烯修饰材料在锂硫电池中,抑制硫穿梭效应的作用机制,首先测试三维多孔石墨烯基材料对多硫化锂的吸附性能。在相同质量的 Li_2S_6 溶液中加入制备的三维多孔石墨烯(试验组),对照组不做任何处理。将2种溶液静置12 h后,通过紫光-可见光吸收光谱对其进行测试,得到溶液中多硫化锂的相对含量,如图2所示。



(a)加入三维多孔石墨烯的 Li_2S_6 溶液



(b)未进行处理的 Li_2S_6 溶液



(c) Li_2S_6 溶液的紫外-可见光吸收谱

图2 穿梭抑制性能分析

静置后的 Li_2S_6 溶液颜色深浅顺序表示其对多硫化锂的吸附能力的高低. 由图 2(a) 与图 2(b) 可以看出, 经过 12 h 的静置后, 加入三维多孔石墨烯的溶液最先变得透明, 而未进行处理的溶液样品的颜色变化较小, 这表明, 经过表面修饰的三维多孔石墨烯对溶液中的多硫化锂具有更强的吸附能力. 这种显著的吸附能力差异源于三维多孔石墨烯独特的结构特性. 其多孔结构提供了大量的活性位点, 这些位点能够与多硫化锂分子发生物理或化学相互作用, 从而将多硫化锂牢牢吸附在材料表面. 进一步分析 2 种溶液中的紫外-可见光吸收光谱, 结果如图 2(c) 所示, 可以看出, 多硫化锂在 380~420 nm 的波长附近存在特征吸收峰, 其中加入了三维多孔石墨烯的溶液中的吸收峰强度明显低于未处理的溶液, 这与计算得到的吸附结果一致, 这表明, 三维多孔石墨烯表面修饰材料可有效避免活性物质的大规模损失.

3.2 锂离子扩散系数分析

在三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响研究中, 除了抑制多硫化锂的穿梭效应外, 其锂离子扩散速率也是反映锂硫电池性能的关键指标, 以量化分析三维多孔石墨烯表面修饰材料对离子传输的促进作用. 得到的三维多孔石墨烯表面修饰与未进行任何处理的锂硫电池, 在不同扫描速率下的 CV 曲线和相关表征图如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 当扫描速率从 0.05 mV/s 增加至 0.25 mV/s 时, Li_2S_6 溶液中存在 2 个还原峰与 1 个氧化峰. 对比图 3(a) 与图 3(b) 可得, 加入三维多孔石墨烯的溶液中的氧化峰更加突出, 这是由于三维多孔石墨烯的加入改变了原有的电化学反应, 促进了溶液中的氧化反应. 三维多孔石墨烯的引入改变了电极表面的电子结构和反应活性位点分布, 促进了氧化反应的进行. 同时, 这种结构还可能改变了电极表面的电荷分布, 降低了氧化反应的活化能, 使得氧化反应更容易发生, 进而导致氧化峰更加突出. 同时可

以看出, 在不同的扫描速率下, 加入三维多孔石墨烯的电池, 其循环伏安曲线的峰电流均大于未进行任何处理的电池, 这说明加入三维多孔石墨烯可

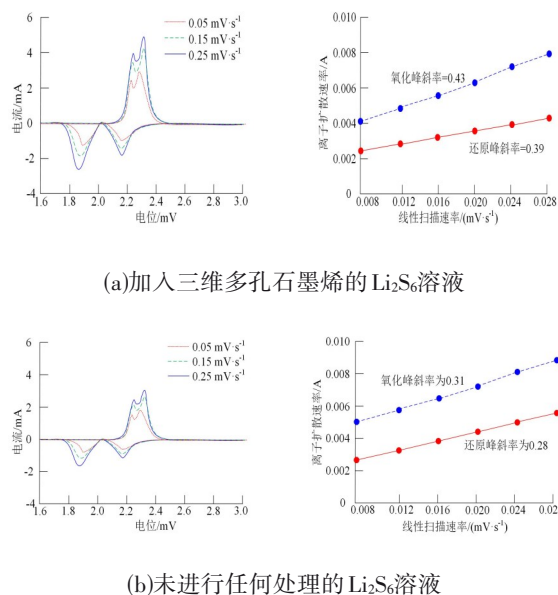


图 3 不同扫描速率的 CV 曲线和离子扩散速率

促进电池的反应动力学. 峰电流的增大意味着电池内部的电化学反应速率加快. 在充放电过程中, 锂离子快速地在电极与外电路之间传输, 从而加速了电池内部的氧化还原反应, 提高了反应动力学性能. 进一步分析氧化峰与还原峰的拟合直线的斜率可以看出, 加入三维多孔石墨烯的溶液中的拟合直线斜率大于未进行任何处理的溶液, 这表明该三维多孔石墨烯修饰层能使电池获得最大的锂离子扩散系数, 为提升电池倍率性能奠定基础. 拟合直线斜率与锂离子扩散系数密切相关, 斜率越大说明锂离子扩散系数越大. 三维多孔石墨烯的多孔结构为锂离子的传输提供了畅通的通道, 减少了锂离子在电极材料中的扩散阻力. 此外, 其独特的电子结构可能对锂离子的迁移起到引导作用, 使得锂离子能够更高效地在电极材料中扩散, 从而提高锂离子扩散系数, 这对于提升电池在高倍率充放电条件下的性能至关重要.

3.3 锂硫电池循环性能分析

为进一步研究三维多孔石墨烯基修饰材料对锂硫电池的影响,本次试验还测试了采用三维多孔石墨烯表面修饰的锂硫电池在高倍率下的循环性能,以验证其对锂硫电池长循环稳定性的提升效果,得到的循环性能分析结果如图4所示。

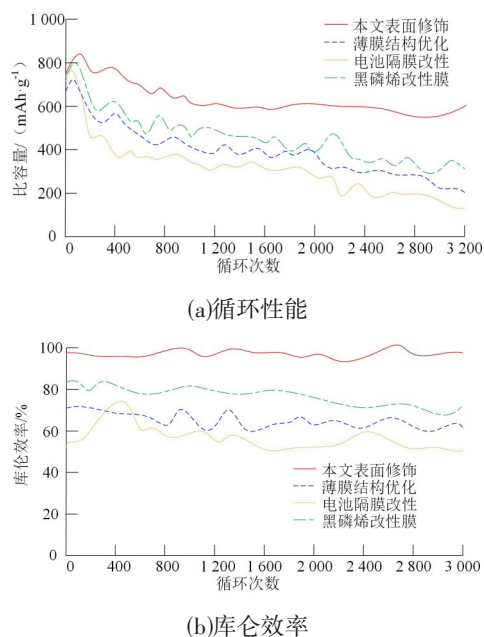


图4 循环性能分析

由图4中的结果可以看出,锂硫电池在800次的循环初期,电池内部的硫利用率较低,其电池比容量会出现一定下降。在循环初期,电池内部的硫可能没有完全参与电化学反应,部分硫处于未活化状态,导致硫利用率较低。同时,电极材料与电解液之间需要一定的时间来建立稳定的界面。随着循环的不断进行,锂硫电池的状态逐渐趋于稳定,根据对比结果可以看出,本文采用的三维多孔石墨烯表面修饰材料在循环过程中,其库仑效率始终稳定在99%。库仑效率的稳定表明电池在充放电过

程中,电荷的转移和存储具有高度的可逆性。三维多孔石墨烯表面修饰材料保证了电池内部电荷转移的高效性和可逆性,进而维持了较高的库仑效率。同时可以看出,锂硫电池在10 C的超高倍率下的循环后,平均比容量仍处于较高状态,约为351.6 mAh/g ,其电池容量的衰减率仅为0.013%,而对比的3种材料的电池容量衰减率分别为1.79%、0.98%以及1.13%。三维多孔石墨烯表面修饰后的锂硫电池的容量衰减率最低。在超高倍率下,三维多孔石墨烯表面修饰后的锂硫电池容量衰减率最低,说明该材料在这些方面表现出色。通过这一对比结果可以看出,经过表面修饰的三维多孔石墨烯基材料对锂硫电池的电化学反应具有良好的催化作用,能够加快氧化还原反应速率,有效提升电池循环寿命,在实用锂硫电池中具备应用潜力。

4 结束语

本文研究三维多孔石墨烯表面修饰对锂硫电池的影响。首先,通过水热法结合硬模板造孔工艺构建孔道可控的三维多孔石墨烯结构,从多硫化锂穿梭与锂离子传输2类问题入手,提升锂硫电池的综合性能。随后,通过微观结构观察验证物理屏障效果,并通过电化学测试量化锂离子扩散特性,对三维多孔石墨烯修饰的作用机制进行分析,明确三维多孔石墨烯材料结构与锂硫电池性能之间的关系。试验结果表明,三维多孔石墨烯表面修饰能够抑制多硫化锂的穿梭,提升锂硫电池的循环寿命与倍率性能,为锂硫电池的开发提供解决思路。未来可继续探索该材料在不同场景的适配性,为全球能源转型提供储能技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨小龙,王晨溟,卢振杰,等.三维多孔碳纳米管-还原氧化石墨烯复合气凝胶应用于高性能对称超级电容器[J].无机化学学报,2024,40(1):155-163.
- [2] 张双红,刘娇,欧子敬,等.超疏水还原氧化石墨烯/聚氨酯复合海绵的制备及其传感性能[J].材料工程,2024,52(3):109-116.

- [3] LIU H, BSUN B Q, ZHU P Y, et al. Preparation of three-dimensional porous graphene by hydrothermal and chemical reduction with ascorbic acid and its electrochemical properties[J]. Chemistry Open, 2022, 11(11): e202200161.
- [4] LI J, WANG X W, LV P, et al. Coral structure nano micro-mesoporous sphere as an effective host for Li-S batteries[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2025: 5.
- [5] 许旭鹏, 许旭明, 陈虹艳, 等. 原位表征技术在锂硫电池机理研究中的应用[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(4): 1239-1252.
- [6] 石孟琪, 王欢, 王守娟, 等. 木质素基炭材料的制备及其在锂硫电池中的研究进展[J]. 化工学报, 2025, 76(4): 1463-1483.
- [7] 钟厉, 廖声朝, 康俊, 等. 多孔石墨烯薄膜结构优化及其电容性能研究[J]. 表面技术, 2025, 54(4): 221-232.
- [8] 周佳玉, 刘佩妮, 周昶安, 等. 锂硫电池隔膜改性增强电池循环稳定性[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(1): 78-87.
- [9] 王晨瑶, 翁海瑞, 李明娟, 等. 黑磷烯改性膜的制备及其锂硫电池性能[J]. 电源技术, 2024, 48(8): 1572-1579.
- [10] 姜松, 战瑞瑞, 李红丽, 等. 石墨烯复合材料胶接制备失效数值仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 384-387+409.
- [11] 涂敏, 陈息坤. SnS₂/还原氧化石墨烯合成及在锂离子电池中应用[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(12): 40-47.
- [12] 张家, 丘丽萍, 易辉萍, 等. 还原型氧化石墨烯/金纳米粒子修饰玻碳电极检测氯霉素[J]. 沈阳化工大学学报, 2024, 38(6): 497-502+535.

责任编辑: 李远辉