

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.04.008

## 锂硫电池中 CNTs-CNFs 夹层对多硫化物的捕获和加速转化机理

陈磊, 袁业辉, 宋瑞, 张超  
(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 为有效抑制多硫化锂 (LiPSs) 的穿梭效应, 通过静电纺丝、电化学沉积和化学气相生长技术在碳纳米纤维 (CNFs) 上垂直生长碳纳米管 (CNTs), 开发了一种超薄、轻质的多功能三维多层交联碳纳米纤维-碳纳米管 (CNTs-CNFs) 夹层, 并研究 CNTs-CNFs 对锂硫电池 (LSBs) 电化学性能的影响。研究表明: CNTs-CNFs 薄膜优异的导电性和丰富的孔隙结构为 LSBs 提供了均匀的导电网络和 LiPSs 的吸附过滤屏障, 与无夹层相比, 含有 CNTs-CNFs 夹层的电池具有更优异的容量保持率和循环稳定性, 在 0.2 C 电流密度下具有 1 296.7 mA·h/g 的初始放电比容量, 在 100 次循环后仍能提供了 864.7 mA·h/g 的放电比容量, 容量保持率为 66.68%。

**关键词:** 多硫化锂 (LiPSs); 碳纳米纤维-碳纳米管 (CNTs-CNFs); 夹层; 三维多层交联; 锂硫电池 (LSBs)

中图分类号: TQ152

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)04-0044-06

### Capture and accelerated conversion mechanism of polysulfides by CNTs-CNFs interlayer in lithium-sulfur batteries

CHEN Lei, YUAN Yehui, SONG Rui, ZHANG Chao

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to effectively suppress the shuttle effect of lithium polysulfides (LiPSs), carbon nanotubes (CNTs) were vertically grown on carbon nanofibers (CNFs) by electrospinning, electrochemical deposition and chemical vapor growth techniques. An ultra-thin, lightweight multi-functional three-dimensional cross-linked carbon nanofibers-carbon nanotubes (CNTs-CNFs) interlayer was developed to study the effect of CNTs-CNFs on the electrochemical properties of lithium-sulfur batteries (LSBs). The research results indicate that the excellent conductivity and abundant pore structure of CNTs-CNFs film provide uniform conductive network for LSBs and adsorption filtration barrier for LiPSs. Compared with the battery without interlayer, the battery with CNTs-CNFs interlayer has better capacity retention and cycle stability. It has an initial specific discharge capacity of 1 296.7 mA·h/g at a current density of 0.2 C, and can still provide a specific discharge capacity of 864.7 mA·h/g after 100 cycles, and the capacity retention rate is 66.68%.

**Key words:** lithium polysulfide (LiPSs); carbon nanofibers-carbon nanotubes (CNTs-CNFs); interlayer; 3D multilayer cross-linked; lithium-sulfur batteries (LSBs)

便携式电子产品、电动汽车以及大型工业设备的发展对具有高能量密度和长循环寿命的储能部件产生了巨大的需求<sup>[1]</sup>。目前锂离子电池的能量密度已接近其理论极限<sup>[2]</sup>。硫在正极反应过程中通过氧化还原反应表现出较高的理论容量(1 675 mA·h/g),使锂硫

电池 (LSBs) 获得约 2 600 W·h/kg 的理论比能量密度<sup>[3]</sup>。然而, LSBs 在实际应用中仍有许多缺点。首先, 硫 (S) 及其还原产物的导电性差, 阻碍了充放电过程中硫的化学反应; 其次, 多硫化锂 (LiPSs,  $\text{Li}_2\text{S}_x$ ,  $4 \leq x \leq 8$ ) 溶解在电解液中, 导致活性物质的严重损失, LiPSs 在电极

收稿日期: 2023-02-21

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2018M640240, 2019T120189)

通信作者: 陈磊 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为纳米纤维结构设计及在环境保护、新能源等方面的应用。

E-mail: chenlei@tiangong.edu.cn

之间的穿梭效应导致库仑效率下降;再次,硫和其反应产物 $\text{Li}_2\text{S}$ 之间的巨大密度差导致严重的体积膨胀,造成阴极的严重损坏<sup>[4]</sup>。解决LSBs的电化学效率低下和不稳定的方法之一是开发具有多孔收集器的层间材料来容纳硫和吸收LiPSs。早在2012年,Manthiram等<sup>[5]</sup>就提出了“夹层”的概念。夹层可以捕获LiPSs,从而抑制穿梭效应。它不仅简化了电池的加工过程,不需要复杂的复合材料合成和表面化学修饰,而且提高了电池的容量和循环寿命,从而促进了LSBs的实用化。此后,“夹层”在LSBs中的应用引起了广泛关注。

碳纳米管(CNTs)<sup>[6]</sup>由于其独特的一维纳米结构、良好的导电性、出色的柔韧性和化学稳定性,已经被广泛研究并应用于LSBs夹层材料。Huang等<sup>[7]</sup>通过简易真空过滤制备了氧化石墨烯(GO)/CNT复合膜。这种柔性薄膜被用作隔膜和阴极之间的夹层,以减少活性物质损失并抑制LiPSs的穿梭。带有GO/CNT夹层的LSBs在300次循环后提供了 $671\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 的优秀可逆容量,在 $0.2\text{ C}$ 下每循环的衰减率为 $0.043\%$ 。然而,由于CNTs的纳米尺寸,在传统状态下很难将其制备成独立的自支撑薄膜。在以前的研究中,已经开发了几种方法,通过一步旋转法、真空过滤法和原位生长法<sup>[8-10]</sup>将CNTs负载在独立的基底上。然而,它们都存在着CNTs和基底之间界面结合较弱的问题,这使得它们难以适应循环充放电试验中硫体积变化对结构的破坏,带来了电池循环寿命低的问题。

基于向外延展策略,结合CNFs连续、优异的机械性能和CNTs优异的导电性、柔韧性和稳定的化学性能等特点,本研究构建了三维多层交联碳纳米纤维-碳纳米管(CNTs-CNFs)导电网络。通过对聚丙烯腈(PAN)溶液进行静电纺丝制备PAN纤维;通过化学气相沉积(CVD)<sup>[11]</sup>在CNFs表面生长CNTs,成功制备了多功能三维多层交联导电网络。根据顶端生长的机理,在CNTs的生长过程中不会对CNFs造成损伤。此外,基于碳原子之间的牢固联系,可以保证CNFs和CNTs之间较强的界面结合<sup>[12]</sup>。多层交联的CNTs为电子运输提供了快速通道。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料和仪器

原料:聚丙烯腈( $M_w = 1.5 \times 10^5\text{ g/mol}$ ),上海麦克林生化科技有限公司;N,N-二甲基甲酰胺,分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;二硫化碳,分析纯,天津风船化学试剂科技有限公司;升华硫,分析纯,天津泰

兰德化工试剂厂;金属锂片( $\Phi 16\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ),天津中能锂业有限公司;电解液,苏州多多化学科技有限公司;隔膜(Celgard 2400)和纽扣电池壳体(CR2032),市售。

仪器:DHG-9123A型电热鼓风恒温干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DF-101S型恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;YFSP-GIII型静电纺丝机,天津市云帆科技有限公司;OTF-1200X-III型管式炉,合肥科晶材料技术有限公司;GCVD2-9-16型化学气相沉积炉(CVD),西尼特(北京)科技有限公司;S8100场发射扫描电镜(SEM),日本Hitachi公司;D8 Discover X-射线衍射仪(XRD),德国Bruker公司;XploRA PLUS激光共焦扫描成像拉曼光谱仪(Raman),日本Horiba公司;GENESIS 60S X-射线光电子能谱(XPS),美国EDAX公司;MSK-T-07型纽扣电池切片机,合肥科晶材料技术有限公司;MSK-110D型纽扣电池封装器,深圳科晶智达科技有限公司;MB-UniLab-Plus(1200/780)型手套箱,布劳恩惰性气体系统(上海)有限公司;CHI760E电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;CT3001A蓝电电池循环测试系统,武汉市蓝电电子股份有限公司。

### 1.2 材料制备

#### 1.2.1 CNTs-CNFs的制备

图1所示为CNTs-CNFs的制备流程。

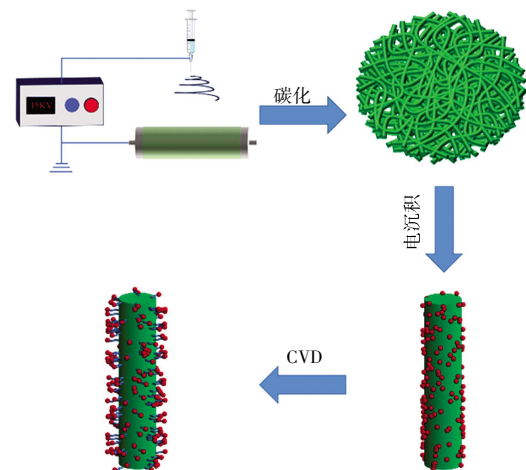


图1 CNTs-CNFs的制备流程

Fig.1 Preparation process of CNTs-CNFs

将 $2\text{ g}$ 聚丙烯腈(PAN)粉末加入到 $14.66\text{ g}$  N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中,置于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴锅中连续搅拌直至得到透明的溶液,质量分数为 $12\%$ 。将配置完成的PAN溶液使用静电纺丝机纺成纳米纤维膜。随后将烘干的PAN初生纤维膜,放入带有升温程序的鼓风干燥烘箱里进行预氧化处理。待烘箱的温

度降至室温时,将预氧化后的纳米纤维膜剪成合适的尺寸放入到氧化铝磁舟里,再将氧化铝磁舟放到管式炉里进行碳化。随后将 CNFs 剪成大中的正方形,在事先配置好电沉积液中预先浸泡 5 min。以饱和甘汞电极为参比电极,铂片电极为对电极,CNFs 样品用铂电极夹住固定作为工作电极电沉积 Ni,记作 CNFs-Ni。将制备好 CNFs-Ni 纳米纤维膜放入氧化铝磁舟内,一起放进 CVD 反应炉腔内生长 CNTs,记作 CNTs-CNFs。

### 1.2.2 电池组装

为了确定 CNTs-CNFs 夹层的积极作用,本研究使用 CNTs-CNFs 作为阴极集流体,制备了带有和不带有 CNTs-CNFs 夹层的 2 种电池。CNTs-CNFs/S 阴极是事先准备好的。用裁片机将 CNTs-CNFs 制成直径 15 mm 的圆盘。在 CNTs-CNFs 圆盘表面滴加一定量的 S/CS<sub>2</sub> (100 mg/mL),转移到通风橱中使溶剂蒸发,然后在封闭的反应器中 155 °C 热处理 6 h,得到 CNTs-CNFs/S 阴极。CNTs-CNFs/S 的 S 含量约为 2.9 mg/cm<sup>2</sup>。

为了进行电化学测量,在手套箱中组装了使用夹层和不使用夹层的 2 种 CR2032 硬币型电池 (H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> < 0.01 mg/L),其中 CNTs-CNFs/S 复合材料直接作为阴极,锂金属片作为阳极,使用 Celgard 2400 规格的隔膜。电解液是通过将 1 mol/L 浓度的双(三氟甲烷)磺酰亚胺锂(LiTFSI)溶解在乙二醇二甲醚/1,3-二氧戊环(DME/DOL,体积比为 1:1)中制备的,并含有 0.1 mol/L 浓度的 LiNO<sub>3</sub>。

### 1.3 测试与表征

(1) 形貌与材料表征:采用扫描电子显微镜(FE-SE, Gemini SEM 500)观察 CNTs-CNFs 的微观结构;使用 X 射线衍射仪(XRD)分析其晶体结构;通过 X 射线能谱仪(EDS)和 X 射线光电子能谱(XPS)分析样品的元素分布和组成;采用拉曼光谱(Raman, XploRA PLUS)表征样品的结构,其激发波长为 514 nm。

(2) 电化学性能测试:采用 CHI760E 型电化学工作站对组装的纽扣电池进行循环伏安曲线测试(CV)和交流阻抗测试(EIS);采用武汉市蓝电电子股份有限公司生产的“LAND”电池测试系统进行循环性能和倍率性能的测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 形貌分析

图 2 所示为 CNTs-CNFs 的 SEM 图,图 3 为 CNTs-CNFs 和 CNFs-Ni 的 EDS 元素分析图。

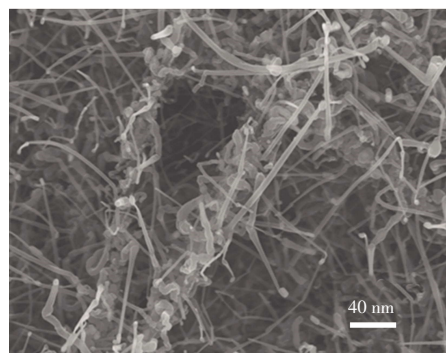
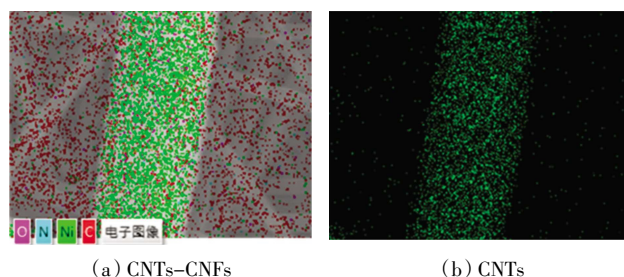


图 2 CNTs-CNFs 的 SEM 图

Fig.2 SEM image of CNTs-CNFs



(a) CNTs-CNFs

(b) CNTs

图 3 CNTs-CNFs 和 CNFs-Ni 的 EDS 元素分析

Fig.3 EDS elemental analysis of CNTs-CNFs and CNFs-Ni

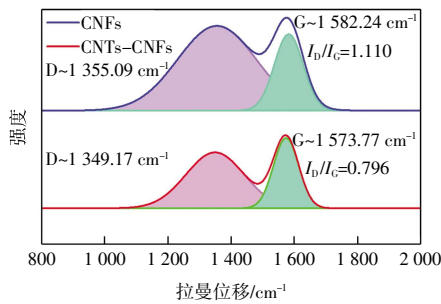
由图 2 可见,CNTs 成功生长在 CNFs 表面,密度大,长度适宜。CNTs 的根部垂直生长在 CNFs 表面,CNTs 的尖端在 N<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气氛的流动下呈现交叉缠绕,均匀分散的 CNTs 交叉扭转形成的导电网络有望通过物理屏障和化学吸附的协同作用锚定 LiPSs,从而缓解穿梭效应<sup>[13]</sup>。

由图 3(a)可以看出,CNTs-CNFs 表面的绿色颗粒状物质即为 Ni。由图 3(b)可见,与 CNFs-Ni 的轮廓清晰一致,再一次证明 Ni 被均匀负载。

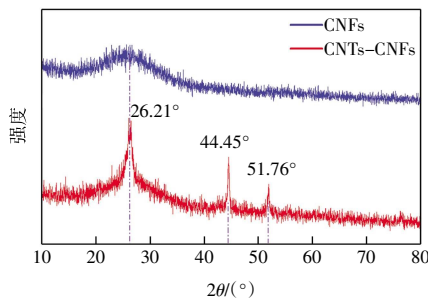
### 2.2 材料分析

图 4 所示为 CNTs-CNFs 与 CNFs 的 Raman 光谱图及 XRD 谱图。

由图 4(a)可见,CNTs-CNFs 与 CNFs 具有类似的光谱特征,但 CNTs-CNFs 的 D 带和 G 带中心位置相较于 CNFs 发生了偏移,向着 CNTs 的特征峰位置移动。CNTs-CNFs 和 CNFs 的 I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> 的比值分别为 0.796 和 1.110。CNTs-CNFs 具有更低的峰强度比主要归因于成功生长了石墨化程度更高的 CNTs<sup>[14]</sup>。从图 4(b)中可以得出,26.21° 的衍射峰归因于 CNFs 的 (112) 结晶面,而 CNTs-CNFs 在 44.45° 附近显示了一个更明显的衍射峰,对应于 (100) 涡轮增压层的碳表面,表明出现了部分石墨化结构,证明了 CNTs 的生成<sup>[15]</sup>。51.76° 的衍射峰可归结为 Ni 的 (200) 晶面<sup>[16]</sup>。碳材料相关的尖锐峰也再次证明 CNTs 的生长。



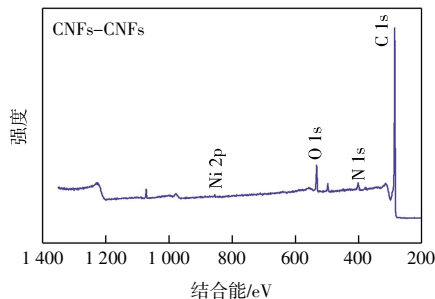
(a) CNTs–CNFs 与 CNFs 的 Raman 光谱



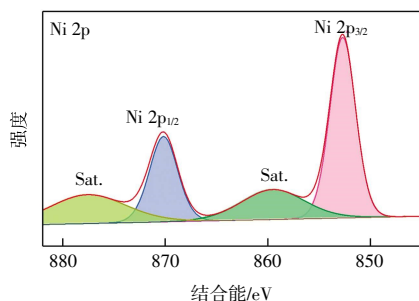
(b) CNTs–CNFs 和 CNFs 的 XRD 谱图

图 4 CNTs–CNFs 与 CNFs 的 Raman 光谱及 XRD 谱图  
Fig.4 Raman and XRD patterns of CNTs–CNFs and CNFs

图 5 所示为 CNTs–CNFs 的 X 射线光电子能谱图和 Ni 的 X 射线光电子能谱图。



(a) CNTs–CNFs 的 X 射线光电子能谱



(b) Ni 的 X 射线光电子能谱

图 5 CNTs–CNFs 和 Ni 的 X 射线光电子能谱  
Fig.5 XPS of CNTs–CNFs and Ni

由图 5(a)可知,CNTs–CNFs 中存在着 C、N、O 和 Ni 共 4 种元素。由图 5(b)可见,在 852.7 eV 和 870.2 eV 的峰值分别对应于 Ni 2p<sub>1/2</sub> 和 Ni 2p<sub>3/2</sub> 的结合能<sup>[17]</sup>,其余 2 个峰是 Ni 2p 的卫星峰。这充分证实了 CVD 工艺中

的高温还原得到了金属 Ni 颗粒,Ni 不仅可以提高锂离子电池正极的电导率,还可以通过路易斯酸碱相互作用增强 LiPSs 的化学捕集能力<sup>[18]</sup>。

### 2.3 电化学性能分析

以 CNTs–CNFs 作为夹层置于 CNTs–CNFs/S 复合正极材料和隔膜之间组装了 CR2032 电池,测试得到电化学阻抗谱,如图 6 所示。

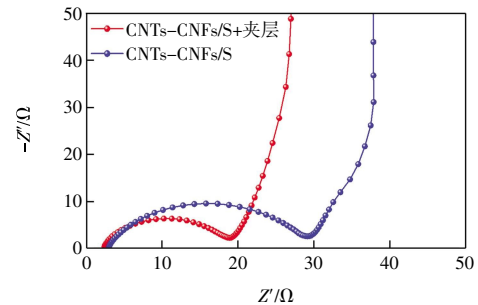


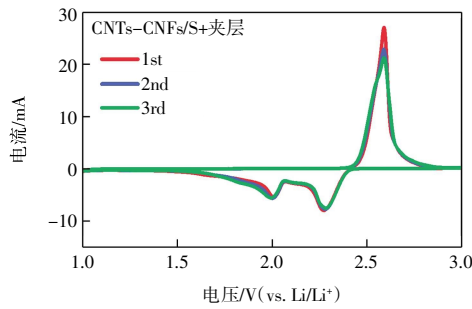
图 6 有夹层的电池和没有夹层的电池的交流阻抗谱

Fig.6 EIS of cells with and without interlayer

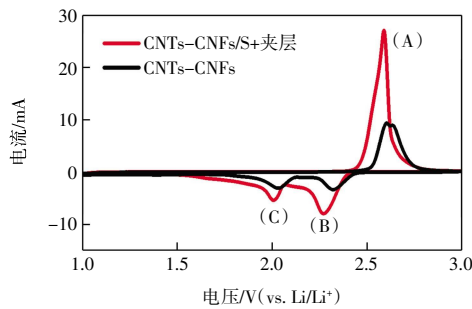
由图 6 可以看出,电池的 EIS 图谱由高频区代表电荷转移阻抗的半圆和低频区代表锂离子扩散阻抗的斜线组成,半圆直径代表电荷转移电阻<sup>[19]</sup>。电池在加入夹层以后,半径变小,夹层电池的电荷载荷阻抗变小,这说明具备优异导电性能的 CNTs–CNFs 夹层为 S 及 LiPSs 提供了更多的电子通道,增强了 LiPSs 的氧化还原动力学,促进放电产物充分的转换,从而促进更快的电荷转移,这也有利于提高 S 活性物质的利用率。同时低频区斜线的斜率变化不明显,这说明锂离子的扩散速率并没有因为 CNTs–CNFs 夹层的加入而变得困难<sup>[20]</sup>。

图 7 所示为有夹层电池的 CV 曲线以及有无夹层电池的 CV 曲线对比。

如图 7(a)所示,能够观察到 LSBs 中 S 阴极在充放电过程中的氧化还原特征峰。位于 2.3 V 左右的第 1 个还原峰对应于环形硫被初步还原为可溶性的中间产物 LiPSs,位于 2.0 V 左右的第 2 个还原峰则对应于 LiPSs 被进一步还原生成不溶性的 Li<sub>2</sub>S<sub>2</sub> 和 Li<sub>2</sub>S 固体。位于 2.5~2.6 V 左右的氧化峰则是对应于短链 LiPSs 被氧化最终生成环形硫。同时曲线具有良好的重叠度,峰形和位置无明显改变,表明加入夹层的 LSBs 具有稳定的电极结构和良好的可逆充放电过程。从图 7 (b)中可以看出,加入夹层以后的电池具有一个窄的峰宽、大的峰值电流强度和低的氧化电位,有夹层的电池峰值电流分别为 27.11、7.942 和 5.385 mA;未加夹层的电池峰值电流分别为 9.384、3.368 和 3.084 mA,



(a) 有夹层电池的 CV 曲线



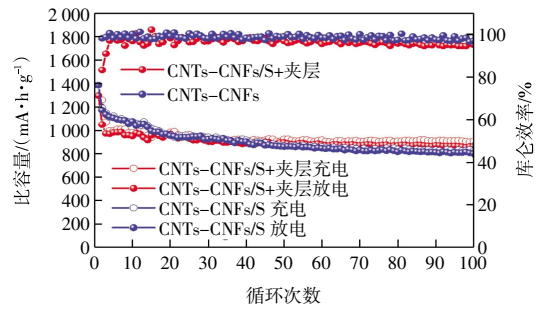
(b) 有夹层电池与无夹层电池 CV 曲线对比

图 7 有夹层电池的 CV 曲线和有无夹层电池的 CV 曲线对比  
Fig.7 CV curve of cell with interlayer and comparison of CV curves of cell with and without interlayer

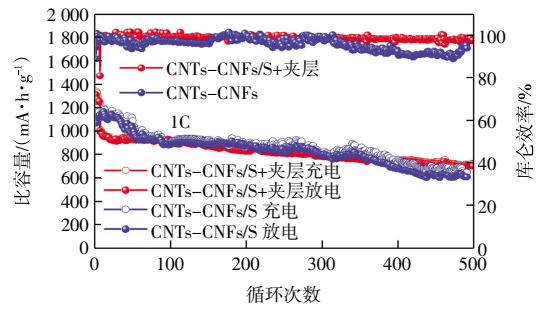
说明电池中的锂离子和电子的快速传输,电化学动力学得到增强,同时电极的极化程度降低。这表明CNTs-CNFs 夹层的加入,改善了 LSBs 的氧化还原动力学,降低了电极的极化<sup>[21]</sup>。

图 8 所示为有夹层的电池与没有夹层的电池的循环稳定性测试结果。

图 8(a)显示了在 0.2 C 下,有夹层和无夹层电池的循环性能。有夹层电池的初放电比容量为 1 296.7 mA·h/g,100 次循环后,放电比容量为 864.7 mA·h/g,容量保持率为 66.68%,优于无夹层的电池(802 mA·h/g,57.85%)。结果表明,CNTs-CNFs 夹层可以抑制穿梭效应,减少活性物质的不可逆损失。图 8(b)显示了有夹层的电池和无夹层的电池在 1 C 高电流密度下的循环性能。先在 0.2 C 下激活 5 个循环后,再进行 1 C 测试。由图 8(b)可以看出,有夹层的电池放电比容量经历了一个衰减和增加的过程,这可以归因于活性材料的重新排列和多次充放电后电解液的充分浸润。500 次循环后,放电比容量为 699.2 mA·h/g,容量保持率为 53.28%,每循环的库仑效率始终保持在 95%以上,比无夹层的电池更稳定。在 360 圈之前,无夹层电池的放电比容量高于有夹层的电池,但在 360 圈之后,有夹层的电池实现了反超。夹层的引入大大改善了电池的循环稳定性,并最终延长了电池的循环寿命<sup>[22]</sup>。



(a) 0.2 C 电流密度循环 100 次



(b) 1 C 电流密度循环 500 次

图 8 有夹层的电池与没有夹层的电池的循环稳定性测试  
Fig.8 Cyclic stability testing of batteries with and without interlayers

### 3 结论

通过静电纺丝、电化学沉积和化学气相生长技术制备了一种多功能三维多层交联 CNTs-CNFs 导电网络骨架,作为 LSBs 的自支撑夹层,并研究分析了 CNTs-CNFs 夹层对锂硫电池电化学性能的影响。研究结果表明:

(1) 密集排列的二维 CNTs 和 CNFs 之间形成的三维间隙确保了电解液的有效渗透和吸附/催化位点的暴露。CNTs-CNFs 实现了 LiPSs 的物理阻隔和化学吸附,加速了电池反应过程中的相界催化作用,S 的利用率得到提高。

(2) 具备 CNTs-CNFs 夹层的电池在 0.2 C 时显示出良好的循环稳定性,100 次循环后容量保持率为 66.68%。当在 1 C 测试时,它在 500 次循环后仍有 699.2 mA·h/g 的比容量。

(3) CNTs-CNFs 夹层的引入大大提高了活性材料的利用率,并有效地抑制了 LiPSs 的穿梭效应,加上其简单易行的制备过程,CNTs-CNFs 夹层的开发和应用对提高 LSBs 的电化学性能展现了极大的潜力。

#### 参考文献:

[1] HUANG Y, ZHENG M B, LIN Z X, et al. Flexible cathodes

- and multifunctional interlayers based on carbonized bacterial cellulose for high-performance lithium-sulfur batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(20): 10910-10918.
- [2] ZHENG S N, SUN D L, WU L L, et al. Carbon fiber supported two-dimensional ZIF-7 interlayer for durable lithium-sulfur battery[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 870: 159412.
- [3] WANG J G, YANG Y, KANG F Y. Porous carbon nanofiber paper as an effective interlayer for high-performance lithium-sulfur batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 168: 271-276.
- [4] 赵永男, 李杨, 高海燕. 硫化聚丙烯凝胶的制备及其锂硫电池性能[J]. *天津工业大学学报*, 2023, 42(6): 67-73.
- ZHAO Y N, LI Y, GAO H Y. Preparation and lithium sulfur battery performance of sulfurized polyacrylonitrile gel[J]. *Journal of Tiangong University*, 2023, 42(6): 67-73 (in Chinese).
- [5] SU Y S, MANTHIRAM A. A new approach to improve cycle performance of rechargeable lithium-sulfur batteries by inserting a free-standing MWCNT interlayer[J]. *Chemical Communications*, 2012, 48(70): 8817-8819.
- [6] XIAO J R, ZHAO H, JIANG A H, et al. Preparation and lithium storage properties of active carbon-CNT/sulfur composite[J]. *Ionics*, 2015, 21(5): 1241-1246.
- [7] HUANG J Q, XU Z L, ABOUALI S, et al. Porous graphene oxide/carbon nanotube hybrid films as interlayer for lithium-sulfur batteries[J]. *Carbon*, 2016, 99: 624-632.
- [8] MA L, CHEN A P, LU J D, et al. In situ synthesis of CNTs/Fe-Ni/TiO<sub>2</sub> nanocomposite by fluidized bed chemical vapor deposition and the synergistic effect in photocatalysis[J]. *Particology*, 2014, 14: 24-32.
- [9] GAO W L, KONO J. Science and applications of wafer-scale crystalline carbon nanotube films prepared through controlled vacuum filtration[J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(3): 181605.
- [10] SUNDARAM R M, WINDLE A H. One-step purification of direct-spun CNT fibers by post-production sonication[J]. *Materials & Design*, 2017, 126: 85-90.
- [11] YU H, CHEN L, LI W X, et al. Root-whisker structured 3D CNTs-CNFs network based on coaxial electrospinning: A free-standing anode in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 863: 158481.
- [12] FENG L, LI K Z, XUE B, et al. Optimizing matrix and fiber/matrix interface to achieve combination of strength, ductility and toughness in carbon nanotube-reinforced carbon/carbon composites[J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 9-16.
- [13] ZHANG C B, LI K, LUO W, et al. SiO<sub>2</sub> hollow nanotubes composite aramid fiber interlayer for absorption of polysulfides in highly stable lithium-sulfur batteries[J]. *Vacuum*, 2022, 195: 110684.
- [14] YANG H Q, PANS J, MADD, et al. Light-harvesting dendrimer zinc-phthalocyanines chromophores labeled single-wall carbon nanotube nanoensembles: Synthesis and photoinduced electron transfer[J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 179: 588-594.
- [15] SUN W Y, BAI J, LI C P, et al. Effect of graphitization degree of electrospinning carbon fiber on catalytic oxidation of styrene and electrochemical properties [J]. *Chemical Physics Letters*, 2019, 715: 299-309.
- [16] ZUO X T, ZHEN M M, WANG C. Ni@N-doped graphene nanosheets and CNTs hybrids modified separator as efficient polysulfide barrier for high-performance lithium sulfur batteries[J]. *Nano Research*, 2019, 12(4): 829-836.
- [17] HE J R, BHARGAVA, MANTHIRAM A. High-energy-density, long-life lithium-sulfur batteries with practically necessary parameters enabled by low-cost Fe-Ni nanoalloy catalysts [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5): 8583-8591.
- [18] WANG D H, ZHENG G X, ZHANG W Y, et al. A highly stable cathode for lithium-sulfur battery built of Ni-Doped carbon framework linked to CNT[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 881: 160496.
- [19] MENG Q L, YANG R, LIU Y, et al. Lightweight freestanding hollow carbon fiber interlayer for high-performance lithium-sulfur batteries[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(4): 5296-5305.
- [20] ZHANG Y, WANG B Y, JING P, et al. Bioderived carbon fiber conductive networks with inlaid electrocatalysts as an ultralight freestanding interlayer for working Li-SeS<sub>2</sub> pouch cells [J]. *Carbon*, 2022, 189: 10-20.
- [21] ZHUANG R Y, YAO S S, SHEN X Q, et al. A freestanding MoO<sub>2</sub>-decorated carbon nanofibers interlayer for rechargeable lithium sulfur battery[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(3): 1111-1120.
- [22] ZHANG Y L, LIN Y X, HE L F, et al. Dual functional Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>@Ni core-shell nanoparticles decorating nanoporous carbon as cathode scaffolds for lithium-sulfur battery with lean electrolytes[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(5): 4173-4179.

#### 本文引文格式:

陈磊,袁业辉,宋瑞,等. 锂硫电池中CNTs-CNFs夹层对多硫化物的捕获和加速转化机理 [J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(4): 44-49.

CHEN L, YUAN Y H, SONG R, et al. Capture and accelerated conversion mechanism of polysulfides by CNTs-CNFs interlayer in lithium-sulfur batteries[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(4): 44-49 (in Chinese).