

# 活性炭-CNT/PEG/硫复合材料的制备与储锂性能研究

赵航, 肖剑荣, 蒋皓宇, 王宏哲, 李延伟

(桂林理工大学, 广西 桂林 541006)

**摘要:** 通过密封加热熔融的方式制备了添加 CNT 的活性炭/硫锂离子电池正极活性材料, 并对其进行了 PEG 包覆复合改性, 制备了 C-CNT/S(PEG)正极复合材料。X 射线衍射(XRD)图谱显示复合材料具有较强的非晶结构, 且单质硫分散在碳材料的微孔之中。扫描电镜(SEM)显示 CNT 均匀分散在复合材料之中, 并形成了三维导电结构。放电比容量测试显示 CNT 的加入提高了复合材料的放电比容量; PEG 包覆的复合改性材料首次放电比容量高达 1371.1 mAh/g, 循环 50 次后放电比容量为 662.8 mAh/g。说明添加 CNT 及 PEG 包覆复合改性, 使活性炭/硫正极材料的电化学性能显著提高。

**关键词:** CNT; 包覆; PEG; 锂硫电池; 正极材料

中图分类号: TM912.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)04-0928-06

锂硫电池是一种以单质硫为正极、金属锂为负极的新型可充电电池, 硫正极具有高达 1675 mAh/g 的理论比容量和 2600 mWh/g 的理论能量密度<sup>[1]</sup>, 因其价格便宜、环境友好和易于获得等多种优势<sup>[2,3]</sup>, 成为最有可能替代现有各种商业化锂电正极材料的首选材料, 但当下仍存在很多亟待解决的问题。由于单质硫的绝缘性, 硫正极需要加入大量的导电剂, 这降低了活性材料的利用率<sup>[4]</sup>。放电过程中产生的中间产物多硫化锂会溶解在电解液中, 导致部分硫活性材料的不可逆损失, 会增大电解液黏度, 降低电解液的离子导电性, 并会扩散到锂负极并与其发生自放电反应, 降低活性材料的利用率和锂离子的循环效率<sup>[5]</sup>。不同类型的电解液及其配比的不同均会影响锂硫电池的性能, 研究发现选择合适的电解液体系和锂负极表面的修饰对其性能均有较大的提升<sup>[6-10]</sup>。硫正极在充放电时体积变化导致电极结构不稳定, 会造成电池容量的衰减, 选择性能良好的硫载体材料是解决体积效应的关键<sup>[11,12]</sup>。

寻找合适的碳材料成为锂硫电池研究中的重要工作, 碳/硫复合材料是锂硫电池正极活性材料的最合理的选择之一。活性炭具有导电性好、比表面积大、微孔强大吸附能力等特殊性能, 可提高锂硫电极的电化学性能<sup>[13]</sup>。碳纳米管(CNT)具有优良的导电性能、独特的三维空间构型、较高的比表面积、强大的吸附能力<sup>[14]</sup>。Xu 等通过制备纳米结构的 CNT/S 复合材料研究得出 CNT 的加入可以提高硫正极的导电性和放电比容

量<sup>[15]</sup>, Wang 等证实 CNT 的加入可以降低电极的极化现象<sup>[16]</sup>, W. Wei 等将 CNT 均匀分散在聚丙烯腈与硫之间, 增加了硫的利用率, 改善了电池的充放电性能和循环性能<sup>[17]</sup>。包覆改性也是锂离子电池正极材料研究中的一种重要手段, Ji 等制备了 PEG 包覆的介孔碳/S 复合材料, 20 次循环后放电比容量可达到 1100 mAh/g, 大大提升了正极材料的循环性能, 并提出了 PEG 包覆可改变正极材料的亲水性, 使介孔碳内部的电解液及溶解的多硫化物被限制在孔内, 则减少了电极外部电解液中的多硫化物对负极的腐蚀<sup>[18]</sup>。

本实验通过借鉴已有的对锂硫正极材料的改性方法<sup>[19, 20]</sup>, 研究基于活性炭/硫正极材料, 用 CNT 替换部分活性炭进行掺杂, 并进一步对其进行 PEG 包覆复合改性, 通过充放电测试等分析其电化学性能的变化。

## 1 实验

按质量比为 6:4 称取升华硫(于 60 °C 下干燥 12 h)和活性炭, 放入玛瑙研钵中混合研磨 30 min 后放入聚四氟乙烯(PTFE)反应釜中, 将反应釜在手套箱中打开放置 30 min 以排除里面残留的空气, 防止硫在高温下被氧化。在手套箱内将反应釜封装取出, 放入马弗炉中以 5 °C/min 的速率加热至 155 °C 保温 8 h, 使得硫充分熔融并扩散到活性炭的孔隙中去, 待温度降至室温, 得到黑色粉末状活性材料, 标记为 C/S。

按质量比 3:6:1 称取活性炭、升华硫和 CNT(管径

收稿日期: 2015-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (11364011, 21263003)

作者简介: 赵航, 男, 1991 年, 硕士生, 桂林理工大学理学院, 广西 桂林 541006, 电话: 0773-5891235, E-mail: xjr@glut.edu.cn

8~10 nm, 长度 8~13  $\mu\text{m}$ ), 用与制备 C/S 相同的方法制得掺入 CNT 的活性材料, 标记为 C-CNT/S; 称取样品 C-CNT/S 与聚乙二醇 4000 质量比为 19:1 的原料, 放入玛瑙研钵中混合研磨 30 min, 加适量蒸馏水于 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴搅拌烘干, 然后在 60  $^{\circ}\text{C}$  下真空干燥 12 h, 制得活性材料标记为 C-CNT/S(PEG)。

将制备好活性材料、乙炔黑(导电剂)和 PVDF(粘接剂)按 7:2:1(质量比)放入玛瑙研钵中混合研磨均匀, 以 N-甲基吡咯烷酮为溶剂, 混合均匀后涂覆于铝箔集流体上, 60  $^{\circ}\text{C}$  真空干燥 10 h; 再将其冲剪成直径为 16 mm 的圆片, 制成正极片, 在 60  $^{\circ}\text{C}$  下真空干燥 12 h。

电池的装配在干燥的充满氩气的手套箱内进行( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  含量均 $\leq 0.1 \mu\text{g/g}$ )。以上述制备的复合电极为工作电极, 锂片为负极极片, PP/PE/PP(Celgard2400)为二次锂电池隔膜, 电解液采用自制的 1 mol/L 双(三氟甲烷磺酰)亚胺锂(LiTFSI)/乙二醇二甲醚(DME)+1,3-二氧戊环(DOL)(体积比为 1:1)的混合溶液, 组装成 CR-2025 扣式电池。电池组装完成后, 静置 12 h 化成, 然后在室温下用 LAND 测试系统对电池进行横流充放电性能测试, 充放电电压范围为 1.5~2.8 V, 电流密度为 200 mA/g; 在 CHI750E 电化学工作站上进行循环伏安和交流阻抗测试, 电压扫描范围为 1.0~3.0 V, 扫描速度为 0.1 mV/s; 测试频率范围为 0.01 Hz~100 kHz, 交流信号振幅为 5 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构及形貌表征

#### 2.1.1 X射线衍射XRD分析

由图1可知单质硫峰强而尖锐, 在整个扫描范围内存在明显的强衍射峰, 表示材料具有很强的晶态结构, 其中最强的衍射峰位于 $2\theta=23.083^{\circ}$ 和 $2\theta=27.769^{\circ}$ , 属于斜方晶型衍射峰, 为典型的 $\text{S}_8$ 结构<sup>[21]</sup>; 活性炭在 $2\theta=20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时出现了1个“馒头峰”, 呈现出比较强的非晶态。3种所制得正极活性材料呈现出比较强的活性炭的典型“馒头峰”, 同时也存在晶态硫的衍射峰, 但硫晶体峰的强度明显下降, 表明升华硫在复合材料中晶态与非晶态并存。图中可以看出C/S材料的衍射峰较明显, 表明绝大部分硫进入了活性炭的纳米微孔之中, 但还有少量硫沉积在碳材料的表面<sup>[22]</sup>。图中显示部分活性炭替换为CNT使复合材料的衍射峰减弱, 表明部分单质硫进入到CNT之中, 使细化的硫颗粒紧密吸附在CNT之上, 增强了材料的非晶态结构。经PEG包覆复合改性之后, 活性材料的衍射峰强度进一步减弱, 表明PEG已成功包覆于C-CNT/S之

上, 增强了复合材料的非晶态结构<sup>[18,23]</sup>。

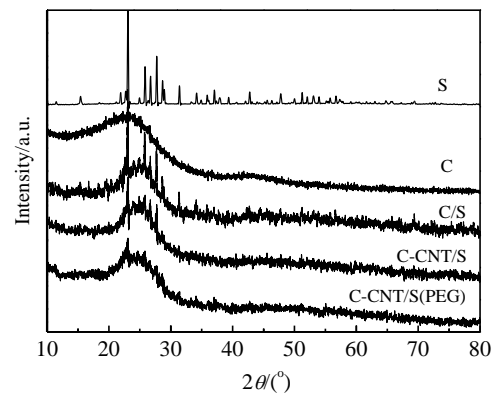


图1 升华硫、活性炭和制备的3种活性材料的XRD图谱  
Fig.1 XRD patterns of S, activated carbon, C/S, C-CNT/S, and C-CNT/S(PEG)

#### 2.1.2 扫描电镜SEM测试

图2为3种复合活性材料的SEM照片。由图2a可知, 活性炭材料的颗粒粒径较大且不均匀, 由于活性炭表面具有大量介孔及微孔结构, 大部分硫可进入并附着在活性炭微孔之内, 只有少量硫包覆在活性炭的表面, 导电性较差, 利用率较低。图2b为加入CNT后CNT周围活性材料的形貌图像, 由图可知, CNT直径明显比活性炭粒径小很多, 单质硫均匀分散在CNT的表面及内部, 由于CNT细小的孔径结构, 可以使硫颗粒细化, 增加了硫正极的利用率, CNT在单质硫内部及表面形成了独特的三维导电网络, 改善了单质硫正极的导电性能。另外, CNT形成了独特的三维网络弹性结构, 可缓解充放电过程中硫正极体积变化引起的内应力, 有助于提高正极材料结构的稳定性<sup>[24]</sup>。图2c是经PEG包覆复合改性之后材料的形貌图, 可以看出CNT掺入之后, 在可分辨活性炭颗粒的放大倍数下并不能明显辨认出CNT的存在, 但进一步放大倍数, 由图2d看出CNT存在于各活性炭颗粒之间, 形成了各活性炭颗粒之间的电子通道, 增加了活性炭材料的导电性能; 由于包覆的PEG比例较少, 并不能从SEM图像中明显看出PEG包覆的区别。

### 2.2 电化学性能研究

#### 2.2.1 循环伏安测试

图3是3种复合材料电极在1.0~3.0 V的循环伏安曲线。从图中可以看出, 3种复合材料都呈现出了锂硫电池的特征氧化还原峰, 每种材料在2.3和2.0 V左右分别存在1个还原峰, 分别为 $\text{S}_8$ 分子向多硫离子 $\text{Li}_2\text{S}_x(x=4\sim 6)$ 的转化和进一步向 $\text{Li}_2\text{S}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{S}$ 的还原<sup>[25,26]</sup>。反向扫描中

在2.5 V附近存在1个氧化峰，对应着电池充电平台的电压值<sup>[27]</sup>。由图中可以看出C/S, C-CNT/S, C-CNT/S(PEG) 3种复合材料2个还原峰的电压分别依次增大，氧化峰的

容量仅为833 mAh/g，而添加CNT后提高为1004.9 mAh/g，经PEG包覆复合改性之后首次放电比容量高达1371.1 mAh/g，放电性能显著提升。C/S复合材料中有相当部分的硫附着在碳材料表面，在首次放电过程中仅

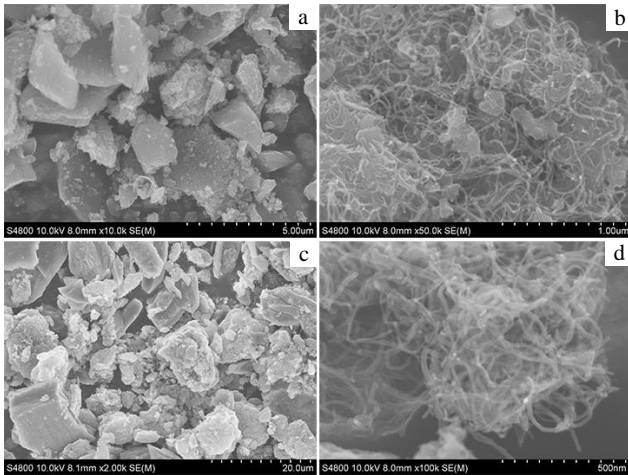


图 2 3种活性材料的SEM照片

Fig.2 SEM images of 3 cathode materials: (a) C/S, (b) C-CNT/S, and (c, d) C-CNT/S(PEG)

电压分别依次减小，这是由于C/S复合材料的导电性能较差会引起锂电池的电化学极化，产生较低的放电电压平台；高导电性CNT的加入缓解C/S复合材料的极化，使C-CNT/S复合材料的放电平台有一定的提升；PEG包覆复合改性同样减弱了C-CNT/S复合材料的极化现象，使C-CNT/S(PEG)复合材料的放电平台电压进一步提升。

由于CNT具有高的导电性能及独特的三维导电结构减弱了C/S正极材料导电性能较差引起的电化学极化现象，提升了正极材料的放电平台电压，降低了充电平台电压；包覆PEG复合改性的正极材料因其具有的包覆结构促进了放电反应的有效进行，进一步减弱了C/S正极材料的极化现象，使放电电压平台进一步提高。由图可以看出，随着改性步骤的进一步进行，PEG包覆复合改性正极材料的循环伏安曲线中充放电平台更为集中，添加CNT和PEG包覆都显著地提高了材料的电化学反应可逆性，这是由于经过改性的正极材料基于更稳定的材料结构减弱了放电过程中多硫化物的副反应，增加了多硫化物的有效利用，稳定了充放电平台。

### 2.2.2 首次放电性能测试

图4给出了3种正极材料在电流密度为100 mA/g下的首次放电曲线。由图可以看出：锂硫电池具有2个明显的放电平台，分别为2.0和2.3 V左右，对应着循环伏安曲线上的2个还原峰。图中所示C/S电极的首次放电比

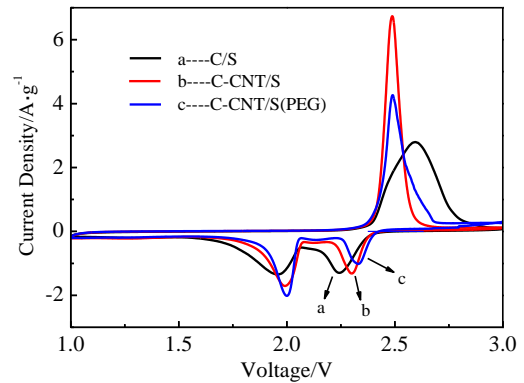


图3 3种复合正极材料循环伏安性能曲线

Fig.3 Cyclic voltammetry curves of 3 cathode materials

有部分硫贡献了放电比容量，这是由于在C/S复合材料放电过程中会生成可溶性的中间产物多硫化物溶解在电解液中，增大了电解液的粘度，降低了锂离子的扩散速率，并且部分多硫化物扩散至锂负极导致活性物质的不可逆损失，降低了放电比容量。PEG包覆之后放电比容量明显提高，这是由于在C-CNT/S(PEG)电极中产生的多硫化物很好的被PEG包覆层限制<sup>[18,28]</sup>，阻碍了多硫化物向硫正极外部电解液的扩散，从而减少了多硫化物的溶解，使锂硫电池放电过程中原来不能提供放电容量的多硫化物得到了充分利用，提高了放电比容量，延长了2个放电平台。由图4可以看出C/S复合材料经CNT的掺入和PEG的包覆之后，2个放电平台均有所提升，这与图3中循环伏安性能曲线表现一致。

### 2.2.3 循环性能测试

图5给出了3种不同锂硫复合材料在电流密度为200 mA/g下前50次的循环性能曲线。C/S, C-CNT/S, C-CNT/S(PEG)正极材料在50次循环后，放电比容量分

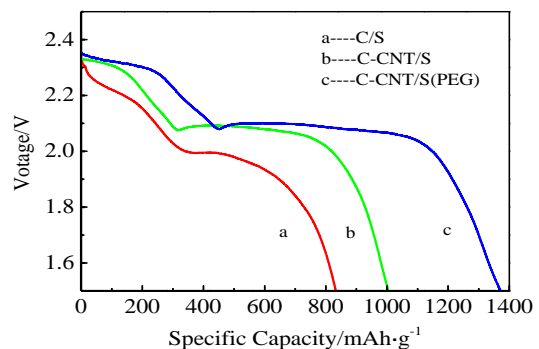


图4 3种复合材料在100 mA/g的首次放电曲线

Fig.4 First discharge curves of 3 cathode materials at 100 mA/g

别为592.4, 640.4和662.8 mA/g, 由图可知锂硫电池前几次放电比容量的衰减较大, 是由于放电过程中硫正极产生了不可逆反应的多硫化物<sup>[29]</sup>。从图上可以看出CNT的加入明显提高了复合材料的放电比容量, 这是由于CNT具有高的比表面积、较强的吸附能力, 限制了放电过程中硫正极周围多硫化物的活动范围, 有效抑制了放电产物多硫化物的溶解流失, 并且基于CNT独特的三维网络结构而具有的高导电性能, 促进了放电过程中化学反应的进行, 所以CNT的加入减少了硫正极的不可逆损失, 提高了活性物质的利用率, 从而改善了锂硫电池的放电性能。由图可知活性材料C-CNT/S(PEG)相比于C-CNT/S循环性能得到明显改善, 由于PEG的加入减少了硫在正极材料中的比重, 所以在前20次左右的循环中PEG包覆使放电容量有微量的减少, 但20次以后循环过程中的容量恢复明显好于未进行包覆改性的正极材料, 这是由于PEG复合材料的包覆结构为锂硫放电过程中的化学反应提供了良好的反应空间, 限制了多硫化物的活动范围, 从而减少了多硫化物的不可逆损失, 在循环性能图上表现为减缓了循环过程中放电比容量的衰减速度, PEG包覆复合改性提高了锂硫电池正极材料的循环性能。

2.2.4 倍率性能测试

图6给出了在3种复合正极材料的倍率性能曲线。可以看出虽然材料C-CNT/S的放电比容量均高于C/S材料, 但整体的倍率性能都有待提高, 2种活性材料在放电电流1 A/g阶段时每阶段中间一次的放电比容量分别降为0.1 A/g阶段中间一次的70.8%和80.9%, 但材料C-CNT/S(PEG)此时还能保持87.8%的比容量。添加CNT后正极材料放电性能的改变和图5中的性能表现一致, CNT的加入减少了硫正极的不可逆损失, 提高了活性物质的利用率, 增加了正极材料的放电比容量。由于C-CNT/S(PEG)的包覆结构可以将多硫化物固定在活性

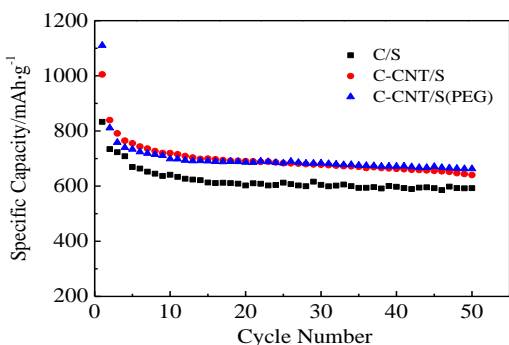


图5 3种复合材料循环性能曲线

Fig.5 Cycle characteristic of 3 cathode materials

炭材料的微孔之中及CNT与硫复合的结构之中, 限制了充放电过程中多硫化物在电解液中的溶解和扩散, 从而使长链的多硫化物进一步还原成短链的多硫化物, 减弱了穿梭效应对放电比容量的影响。PEG包覆的复合材料促进了有效放电反应的进行, 增加了大倍率下活性材料的利用率, 提高了大倍率下的放电比容量, 改善了锂硫正极材料的倍率性能。

2.2.5 阻抗测试

图7是活化前后3种复合正极材料电池的交流阻抗图谱, 活化条件是3次扫描速度为0.1 mV/s的循环伏安测试。从图中可以看出所有的图谱都由1个高频区的半圆和1条低频区的斜线组成, 高频区半圆在实轴下的截距代表电池欧姆电阻和电解液电阻, 高中频区的半圆直径反映的是电极内的电荷转移阻抗, 低频区的直线代表的是扩散阻抗<sup>[30]</sup>。从图中可以看出, 活化前C/S材料的阻抗最大, CNT的加入使阻抗变小, 这是由于CNT能有效增强复合材料的导电性能, 其独特的三维空间结构形成导电网络使复合材料电极的极化得以减弱; 经PEG包覆复合改性之后正极复合材料的阻抗变大, 这是由于PEG本身不导电, 会在电解液与活性硫之间增加一道屏障, 这道屏障虽然使复合材料的电荷转移阻抗有少量增加, 但可以缓解多硫化物与电解液的接触而产生的多硫化物溶解。3种材料活化之后相应的阻抗都大大减小, 并且3种材料活化后的阻抗大小排序依然与活化前一致, 这是因为锂硫电池经过数次充放电之后, 正极材料在电解液之中与电解液得到充分接触, 减小了锂硫电池正极材料的电荷转移阻抗。活化之后经过改性的正极材料阻抗较未改性材料的大大减小, 并且从图中可以看出活化之后PEG的包覆对含有CNT复合材料阻抗的影响并不大, 包覆PEG的正极材料阻抗变化对材料性能的影响远小于其独特包覆结构对电池电化学性能的改善。

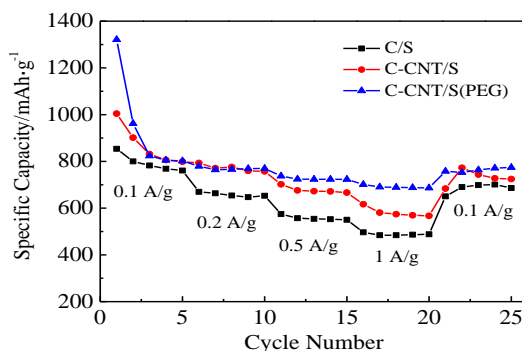




图6 3种复合材料倍率性能曲线

Fig.6 Rate capacities of 3 cathode materials

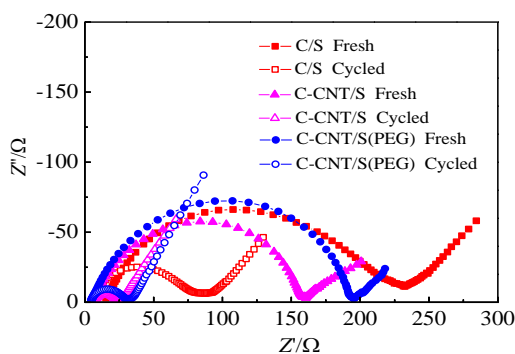


图 7 活化前后3种材料电池的阻抗变化图谱

Fig.7 Fresh/cycled EIS spectra of 3 cathode materials

### 3 结 论

1) 分别通过对活性炭/硫活性材料的CNT掺杂和进一步PEG包覆的复合改性制备了3种活性材料 (C/S, C-CNT/S, C-CNT/S(PEG))。

2) 结果显示基于独特三维导电结构CNT的加入改善了正极材料的导电性能,与活性炭/硫材料复合之后,明显从整体上提高了硫正极活性材料的放电比容量。

3) 进行PEG包覆复合改性的C-CNT/S(PEG)材料首次放电比容量高达1371.1 mAh/g,是由于PEG的包覆能抑制多硫化物的溶解流失,提高活性物质的利用率;并且包覆PEG的复合改性材料还明显提高了电池的循环性能,在50次充放电循环后比容量还能稳定在662.8 mAh/g,大大改善了硫正极材料的电化学性能。

4) 另外CNT的加入及PEG包覆复合改性可以显著减弱极化现象,表现为放电平台的提升和充电平台的下降,改善了锂硫电池的放电性能。

#### 参考文献 References

[1] Miao L X, Wang W K, Wang A B *et al. J Mater Chem*[J], 2013, 1: 11659  
 [2] Wu Y L, Yang J, Wang J L *et al. Acta Phys Chim Sin*[J], 2010, 26(2): 283  
 [3] Diao Y, Xie K, Xiong S Z *et al. J Electrochem Soc*[J], 2012,

159(4): 421  
 [4] Suo L, Hu Y S, Li H *et al. Nat Commun*[J], 2013, 4: 1481  
 [5] Hassoun J, Scrosati B. *Angew Chem Int Ed*[J], 2010, 49(13): 2371  
 [6] Yang Y, Zheng G Y, Cui Y. *Energy Environ Sci*[J], 2013, 6: 1552  
 [7] Yao Z D, Wei W, Wang J L *et al. Acta Phys Chim Sin*[J], 2011, 27(5): 1005  
 [8] Celine B, Jean C L, Sebastien P *et al. J Electro Chem Soc*[J], 2013, 160(3): 430  
 [9] Ding Fei(丁 飞), Liu Xingjiang(刘兴江), Zhang Jing(张 晶) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1664  
 [10] Fu Y Z, Su Y S. *Acc Chem Res*[J], 2013, 46(5): 1021  
 [11] He X, Ren J, Li W *et al. J Power Sources*[J], 2009, 190: 154  
 [12] Zheng Wei(郑 伟), Hu Xinguo(胡信国), Zhang Cuifen(张翠芬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(8): 1223  
 [13] Ran E, Gregory S, Arnd G *et al. Adv Mater*[J], 2011, 23: 5641  
 [14] Yuan L X, Yuan H P, Qiu X P *et al. J Power Sources*[J], 2009, 189: 1141  
 [15] Xu G Y, Ding B, Nie P *et al. Acta Phys Chim Sin*[J], 2013, 29(3): 546  
 [16] Yin L, Wang J, Yang J *et al. J Mater Chem*[J], 2011, 21(19): 6807  
 [17] Wei W, Wang J, Zhou L *et al. Electrochem Commun*[J], 2011, 13(5): 399  
 [18] Ji X L, Lee K T, Nazar L F. *Nat Mater*[J], 2009, 8: 500  
 [19] Xiao L F, Cao Y L, Xiao J *et al. Adv Mater*[J], 2012, 24: 1176  
 [20] Choi Y J, Chung Y D, Baek C Y *et al. J Power Sources*[J], 2008, 184(2): 548  
 [21] Yuan L X, Yuan H P *et al. ACS Nano*[J], 2011, 5(11): 9187  
 [22] Zhang B, Lai C, Zhou Z *et al. Electrochim Acta*[J], 2009, 56: 1  
 [23] Li G C, Li G R, Ye S H *et al. Adv Energy Mater*[J], 2012, 2(10): 1238  
 [24] Yuan L X, Yuan H P, Qiu X P *et al. J Power Sources*[J], 2009, 189(2): 1141  
 [25] Peter G B, Stefan A F, Laurence J *et al. J Power Sources*[J], 2012, 11: 19  
 [26] Wu F X, Hyea K, Alexandre M *et al. Adv Energy Mater*[J], 2014, 4(11): 00196  
 [27] Wang Y X, Huang L, Sun L C *et al. J Mater Chem*[J], 2012, 22: 4744  
 [28] Li N W, Zheng M B, Lu H L *et al. Chem Commun* [J], 2012,

48: 4106

[29] Li X, Cao Y, Wen Q *et al. J Mater Chem*[J], 2011, 21: 16 603

[30] Yuan L, Qiu X P, Chen L Q *et al. J Power Sources*[J], 2009, 189: 127

## Preparation and Lithium Storage Performance of Activated Carbon-CNT/PEG/Sulfur Composite Cathode Material

Zhao Hang, Xiao Jianrong, Jiang Haoyu, Wang Hongzhe, Li Yanwei

(Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

**Abstract:** Activated carbon-CNT/sulfur composite cathode material for lithium-ion battery was prepared by a melting method in a sealed FTPE reactor. Further, the composite was modified by PEG-coating, and the cathode composite material of C-CNT/S(PEG) was obtained. X-ray diffraction (XRD) analysis shows that the C-CNT/S(PEG) composite has an amorphous structure, and the sulfur is dispersed into the microspores of carbon material. Scanning electron microscopy (SEM) tests indicate that the CNT is uniformly dispersed in the composite, which forms a three-dimensional conductive structure. Discharge capacity tests reveal the addition of CNT improves the discharge capacity of the composite. The first discharge capacity of PEG-coated composite C-CNT/S(PEG) is up to 1371.1 mAh/g and the discharge capacity remains to be 662.8 mAh/g after 50 cycles. The results demonstrate that the addition of CNT and PEG-coating can greatly improve the electrochemical performance of activated carbon/sulfur cathode materials.

**Key words:** CNT; coating; PEG; lithium-sulfur battery; cathode materials

---

Corresponding author: Xiao Jianrong, Ph. D., Professor, College of Science, Guilin University of Technology, Guilin 541006, P. R. China, Tel: 0086-773-5891235, E-mail: xjr@glut.edu.cn