

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.12.006

SnS₂/还原氧化石墨烯合成及在锂离子电池中应用

涂 敏^{1*}, 陈息坤²

(1.珠海市嘉德电能科技有限公司, 广东珠海 519000; 2.上海大学电气工程学院, 上海 200000)

摘要:通过水热法制备了 SnS₂/还原氧化石墨烯(SnS₂/RGO)复合材料,采用 X 射线衍射谱(XRD)、拉曼光谱(Raman)、X 射线光电子能谱(XPS)和 N₂ 吸附-脱附表征 SnS₂/RGO 复合材料的物相晶型、化学基团、元素组成和比表面积与孔隙孔径。SnS₂/RGO 复合材料作为锂离子电池负极材料组装纽扣电池。结果表明:电流密度 100 mA/g 条件下, SnS₂/RGO 复合材料的充放电比容量明显高于纯 SnS₂, SnS₂/RGO 复合材料第一次放电比容量高达 2803 mAh/g,表现出优异的电化学性能。循环 100 次后放电比容量仍然可以达到 941 mAh/g,而循环 100 次后纯 SnS₂ 的放电比容量远低于 SnS₂/RGO 复合材料,仅为 198 mAh/g,表现出良好的循环稳定性。1 000 mA/g 的高电流密度下, SnS₂/RGO 复合材料放电比容量依然可以达到 696 mAh/g,表现出良好的倍率性能。

关键词: SnS₂; 还原氧化石墨烯; 锂离子电池; 电化学性能; 电池负极材料

中图分类号: TQ317

文献标识码: A

Synthesis of SnS₂/reduced graphene oxide and its application in lithium ion batteries

Tu Min^{1*}, Chen Xikun²

(1.Jiade Energy Technology(Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2.College of Electrical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200000, China)

Abstract: SnS₂/reduced graphene oxide (SnS₂/RGO) composites were prepared by hydrothermal method. The phase, chemical groups, elemental composition, specific surface area and pore size of SnS₂/RGO composites were characterized by X-ray diffraction spectroscopy(XRD), Raman spectroscopy (Raman), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and N₂ adsorption-desorption. SnS₂/RGO composites were used as anode materials for lithium ion batteries to assemble button batteries. The results show that the charge-discharge specific capacity of SnS₂/RGO composite is significantly higher than that of pure SnS₂ at a current density of 100 mA/g. The first discharge specific capacity of SnS₂/RGO composite is as high as 2 803 mAh/g, showing excellent electrochemical performance. After 100 cycles, the discharge specific capacity can still reach 941 mAh/g, while the discharge specific capacity of pure SnS₂ is much lower than that of SnS₂/RGO composite after 100 cycles, only 198 mAh/g, showing good cycle stability. At a high current density of 1 000 mA/g, the discharge specific capacity of SnS₂/RGO composite can still reach 696 mAh/g, showing good rate performance.

Keywords: SnS₂; reduction of graphene oxide; lithium ion battery; electrochemical performance; battery anode material

收稿日期: 2024-06-29

修回日期: 2024-08-01

作者简介: 涂敏(1972—), 男, 本科, 中级工程师, 主要研究方向为锂电池材料、PACK 和锂电池电芯技术开发, email: tumin19720103@163.com

基金项目: 上海市科委重点项目(14DZ1206300)

随着新能源汽车和可再生能源存储的不断发展,能量密度高、稳定性好的储能器件受到广泛关注,包括超级电容器、锂离子电池和锂硫电池等^[1-3]。锂离子电池虽然具有高的比容量,但受制于负极材料石墨烯低的比容量(约372 mAh/g),锂离子电池的商业应用受到了极大地限制^[4-5]。因此,开发一种高比容量的锂离子电池负极材料十分重要。

二硫化锡(SnS_2)在锂离子转换和合金化过程表现出高的比容量(约1 136 mAh/g)^[6],具有通过范德华力结合的和石墨烯类似的结构^[7],是一种理想的锂离子电池负极材料。但 SnS_2 作为锂离子电池负极材料同样表现出一些问题,如循环过程中体积膨胀导致的比容量降低,导电性差影响电子转移等^[8-9],这使得 SnS_2 的倍率性能和循环性能表现不佳,解决这些问题十分重要。目前,通常通过两种技术路线解决以上问题,一是 SnS_2 的形貌调控,如制备一维纳米棒和二维纳米片等,形貌调控可以实现比表面积的提高,为锂离子的转移提供了更多的活性位点^[10-11];二是低维碳材料和 SnS_2 的复合,碳纳米管和介孔碳等低维碳材料和 SnS_2 复合后可以有效提高 SnS_2 的电化学性能^[12-13]。石墨烯作为一种锂离子电池负极材料具有良好的导电性和高的比表面积^[14],是一种理想的低维碳材料。

本研究通过水热法制备了 SnS_2/RGO 复合材料,通过XRD、Raman和XPS等技术表征了 SnS_2/RGO 复合材料,作为纽扣锂离子电池负极材料,评价了 SnS_2/RGO 负极的循环稳定性、恒流充放电、电化学交流阻抗和循环伏安等电化学性能。

1 实验

1.1 试剂和仪器

主要试剂:五水氯化锡($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、氨基硫脲(NH_2CSNH_2)、无水乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)、N-甲基吡咯烷酮(NMP)、聚偏二氟乙烯(PVDF)、氧化石墨烯(GO),均为分析纯,购自阿拉丁试剂公司;乙炔黑,购自天津亿博瑞化工公司。

主要仪器:D8型X射线衍射仪,德国Bruker; Virsa型拉曼光谱仪,英国Renishaw; AXIS SUPRA⁺型X射线光电子能谱仪,日本岛津; IMPS/IMVS型电化学工作站,美国Gamry; QBET型比表面积和孔

径分析仪,美国PMI。

1.2 材料的制备

通过溶剂热法制备 SnS_2 。1.0 mmol的 $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和6.0 mmol的 NH_2CSNH_2 均匀分散到100 mL无水乙醇中,溶解完全转移到水热反应釜中,180 °C反应24 h,冷却至室温得到固体粉末,使用无水乙醇和去离子水交替洗涤3次,80 °C干燥12 h,得到 SnS_2 。

通过水热法制备 SnS_2/RGO 。0.01 g的 SnS_2 和0.01 g的GO分散到50 mL去离子水中,持续搅拌6 h,转移到水热反应釜中,180 °C反应2 h,冷却至室温得到固体粉末,使用无水乙醇和去离子水交替洗涤3次,80 °C干燥12 h,得到 SnS_2/RGO 复合材料。

1.3 材料的表征和测试

通过XRD表征 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的物相晶型,Cu K α 靶, $I=40$ mA, $U=40$ kV, $\lambda=0.154$ 18 nm,扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$;通过Raman表征 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的化学基团,532 nm Ar⁺源,通光效率>30%,扫描范围 $120 \sim 2\,000$ cm^{-1} ;通过 N_2 吸附脱附测定 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的比表面积和孔隙孔径,77 K,孔径测试范围0.5~500.0 nm,BET测试范围 $0.000\,1 \sim \infty$ m^2/g ;通过XPS表征 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的元素组成,Al K α 源,功率600 W,分辨率 ≤ 0.45 eV, $U=0.5 \sim 5.0$ kV,基准284.6 eV校正。通过电化学工作站测定 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的循环伏安(CV)曲线和电化学交流阻抗(EIS),CV曲线测定过程中扫描速率0.1 mV/s, $U=0.01 \sim 0.30$ V。EIS测定过程中振幅5.0 mV,频率范围 $0.01 \sim 1 \times 10^5$ Hz。通过电测试仪测定 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的恒流充放电(GDC)曲线, $U=0.01 \sim 0.30$ V(vs. Li^+/Li)。

1.4 锂离子纽扣电池的组装

SnS_2/RGO 或 SnS_2 (活性组分)、乙炔黑(导电剂)和PVDF(黏结剂)按8:1:1质量比分散到少量NMP(分散剂)中混合均匀,通过涂布机将其均匀涂覆到铜箔(集流体)表面,涂膜厚度0.20 mm,60 °C预烘2 h,移入干燥箱中100 °C烘24 h,然后通过切片机将涂覆后的铜箔冲压形成15 mm的圆形工作电极。在Ar气氛的米开罗那真空手套箱中组装电池,顺序依次为正极外壳→工作电极(活性组分平均载量为0.025 mg)→电解质(1.0 mol/L LiPF_6 -EC/DMC/EMC,

体积比1:1:1)→隔膜→电解质→锂电极→弹片→负极外壳,最后通过封装机进行封装,室温下静置24 h。

2 结果与讨论

2.1 SnS₂和RGO质量比的确定

为了确定SnS₂/RGO的最佳质量比,分别测定了

100 mA/g条件下不同质量比SnS₂/RGO循环25次的放电比容量,结果见表1。由表1可知,质量比1:1的SnS₂/RGO表现出优异的放电性能,初次和循环25次的放电比容量均高于其它质量比SnS₂/RGO,因此,选用质量比1:1的SnS₂/RGO作为研究对象。

表1 不同质量比SnS₂/RGO循环25次放电比容量的变化

Tab.1 Changes of discharge specific capacity of SnS₂/RGO with different mass ratios after 25 cycles

SnS ₂ 和RGO质量比	电化学参数	循环次数					
		1	5	10	15	20	25
2:1	比容量 (mAh·g ⁻¹)	2 685	1 624	1 217	1 108	1 011	935
1:1		2 803	1 725	1 595	1 508	1 361	1 315
1:2		2 084	1 456	1 101	1 083	997	894
1:3		1 876	1 143	1 012	987	898	827
1:4		1 599	1 086	994	887	813	784

2.2 复合材料物相晶型分析

通过XRD表征SnS₂和SnS₂/RGO的物相晶型,如图1所示。由图1可以看出,在 $2\theta=15.1^\circ$ 、 28.5° 、 32.0° 、 42.2° 、 50.2° 、 52.8° 、 62.3° 和 68.2° 位置的衍射峰分别对应于六方相SnS₂(JCPDS:# 23-0677)的(001)、(100)、(101)、(102)、(110)、(111)、(201)和(202)晶面^[15],且表现出良好的纯度和结晶度。SnS₂/RGO表现出和六方相SnS₂几乎一致的衍射峰模式,并未观察到明显的RGO衍射峰,这可能与RGO的无定型有关,SnS₂/RGO同样表现出良好的纯度和结晶度。

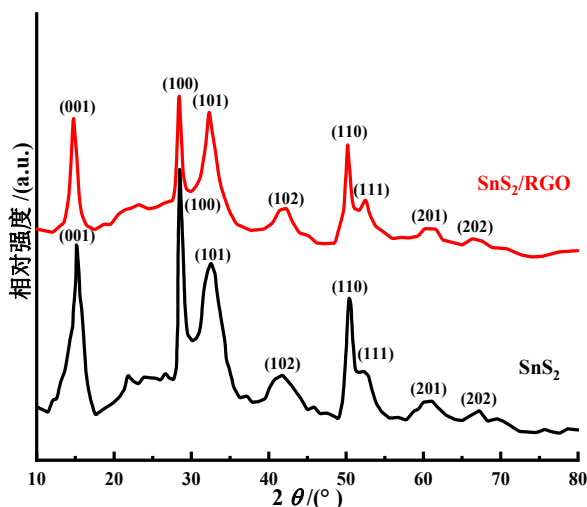
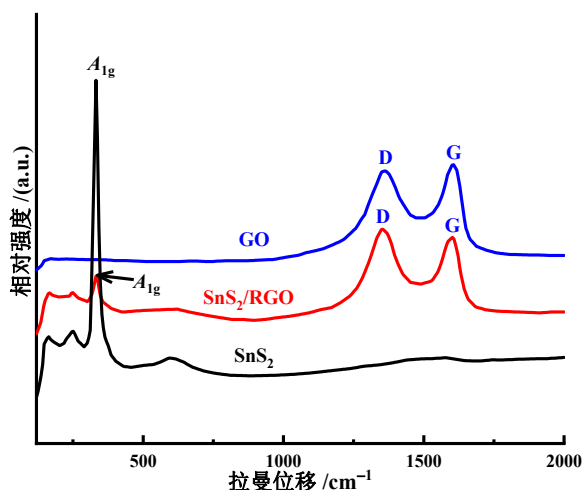


图1 SnS₂和SnS₂/RGO的XRD谱图

Fig.1 XRD patterns of SnS₂ and SnS₂/RGO

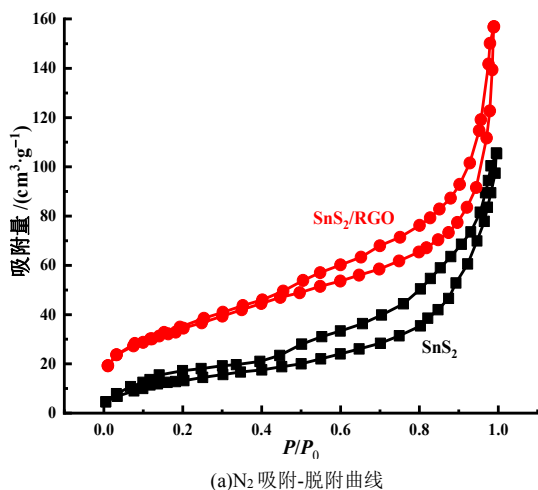
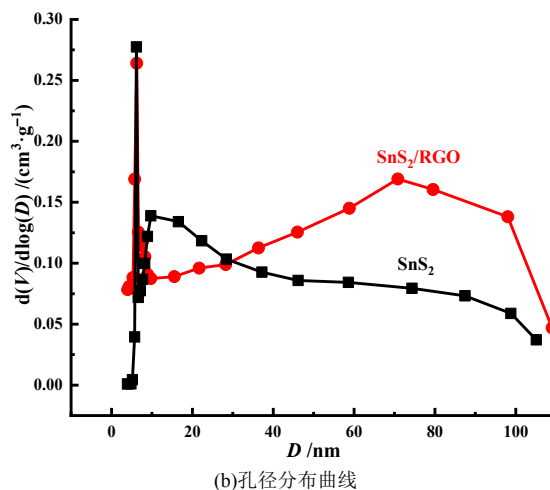
2.3 复合材料拉曼光谱分析

为了证明SnS₂和RGO的成功复合,通过Raman对SnS₂、GO和SnS₂/RGO进行表征,得到如图2的结果。由图2可以看出,GO在位移1 342和1 593 cm⁻¹位置处表现出两个明显的振动峰,对应于GO的D和G振动峰^[16]。D振动峰是由碳平面缺陷引起的,反映了无序结构。G振动峰是由C—C键的伸缩振动引起的,对应了E_{2g}振动模式,反映了sp²杂化C的区域尺寸^[17]。SnS₂在位移315 cm⁻¹位置表现出明显的振动峰,对应于Sn—S键的A_{1g}振动模式^[18]。SnS₂/RGO在位移315、1342和1593 cm⁻¹位置表现出三个明显的振动峰,分别对应了Sn—S键的A_{1g}振动峰、D振动峰和G振动峰。D/G强度比(I_{D/G})反映了无序度,理论上GO被还原为RGO的过程会发生含氧官能团的脱除,会使得sp²杂化区域尺寸增大和无序度降低,I_{D/G}值表现为减小^[19]。实测GO和SnS₂/RGO的I_{D/G}值分别为0.95和1.13,I_{D/G}值表现出明显的增大,造成这一结果的原因可能是sp³杂化区域发生含氧官能团的脱除,碎裂为数量众多的sp²杂化区域,新形成的sp²杂化区域尺寸远小于原sp²杂化区域尺寸,叠加后使得sp²杂化区域平均尺寸减小,表现为I_{D/G}值增大,GO被还原为RGO。以上结果说明成功制备了SnS₂/RGO复合材料。

图 2 SnS₂、GO 和 SnS₂/RGO 的 Raman 谱图Fig.2 Raman of SnS₂, GO and SnS₂/RGO

2.4 复合材料比表面积和孔径分析

通过N₂吸附-脱附测定SnS₂和SnS₂/RGO的比表

(a) N₂ 吸附-脱附曲线

(b) 孔径分布曲线

图 3 SnS₂ 和 SnS₂/RGO 的 N₂ 吸附脱附曲线和孔径分布曲线Fig.3 N₂ adsorption-desorption isotherms and pore size distribution curves of SnS₂ and SnS₂/RGO

2.5 复合材料元素组成分析

通过XPS表征SnS₂和SnS₂/RGO的元素组成,结果如图4所示。由图4(a)可以看出,SnS₂/RGO复合材料含有C、Sn、O和S四种元素组成。由图4(b)可以看出,结合能288.6、285.4和284.5 eV位置分别对应了C—S键、C—O键和C—C键的拟合峰,并未表现出C=O键的拟合峰,取而代之的是新形成的C—S键,C—S键的形成说明了SnS₂和RGO之间发生了键合。由图4(c)可以看出,结合能495.2和486.7 eV附近对应了Sn 3d_{3/2}和Sn 3d_{5/2}的拟合峰,这说明SnS₂和SnS₂/RGO存在Sn⁴⁺。可以明显地发现RGO复合后拟

面积和孔径分布,得到如图3的结果。由图3(a)可以看出,SnS₂和SnS₂/RGO均表现为Type-IV吸附等温曲线,存在明显的H3回滞环,高P/P₀区域存在毛细凝聚现象,吸附等温曲线存在偏移并不重合,这说明SnS₂和SnS₂/RGO存在丰富的孔状结构。SnS₂的比表面积和孔体积分别为55.48 m²/g和0.160 3 cm³/g,RGO复合后使得比表面积和孔隙体积明显提高,SnS₂/RGO的比表面积和孔隙体积分别为131.26 m²/g和0.254 6 cm³/g。由图3(b)可以看出,SnS₂和SnS₂/RGO平均孔径分别为13.08和8.49 nm,RGO复合后平均孔径降低,因为SnS₂/RGO复合材料存在丰富的介孔和大孔结构。高的比表面积和孔隙体积提高了储锂活性位点的数量,存进锂离子和表面电子之间的高效传输^[20]。

合峰发生了明显的向高结合能偏移,拟合峰位置的偏移反映的是元素结合能的变化,元素结合能来源于原子核和核外电子之间的库伦引力,Sn原子提供成键电子,Sn原子对核外电子的束缚能力增强,表现为拟合峰向高结合能方向偏移。由图4(d)可以看出,结合能162.7和161.5 eV位置分别对应了S 2p_{1/2}和S 2p_{3/2}的拟合峰,这说明SnS₂和SnS₂/RGO存在S²⁻。RGO复合后S 2p_{1/2}和S 2p_{3/2}的拟合峰均发生了明显的向高结合能偏移,S原子对核外电子的束缚能力增强。以上结果证明了成功制备了SnS₂/RGO复合材料。

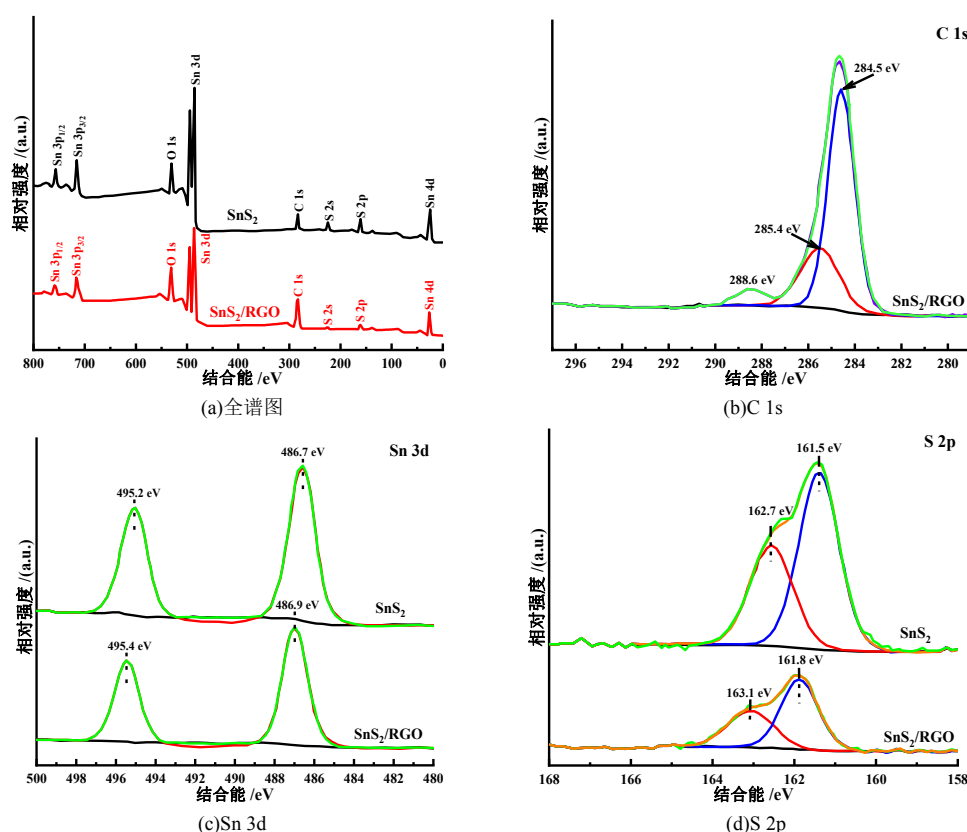


图4 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的 XPS 全谱以及 C 1s、Sn 3d 和 S 2p 的高分辨率谱图

Fig.4 The XPS full spectra of SnS_2 and SnS_2/RGO and the high-resolution spectra of C 1s, Sn 3d and S 2p of SnS_2 and SnS_2/RGO

2.6 复合材料形貌结构分析

通过SEM观察 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的形貌结构,结果如图5所示。由图5(a)可以看出, SnS_2 呈现层状堆叠的六边形二维纳米片结构,堆叠的结构为活性中

心提供了更多的附着位点。由图5(b)可以看出,六边形二维 SnS_2 纳米片均匀分散在RGO表面, SnS_2 和RGO结合良好未发生团聚,这有利于提高比表面积。

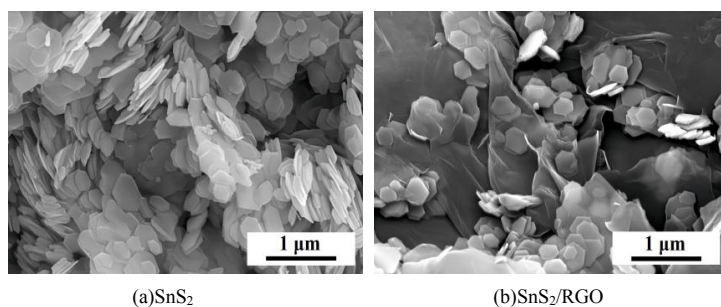


图5 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的 SEM 图

Fig.5 SEM images of SnS_2 and SnS_2/RGO

2.7 复合材料循环伏安性能分析

图6为 SnS_2 和 SnS_2/RGO 电极在电压范围0.01~0.30 V和扫描速率0.1 mV/s条件下的三次充放电循环伏安曲线。电池阳极发生氧化反应,阴极发生还原反应。由图6(a)可以看出, SnS_2 阴极第一次循环扫描过程表现出3个还原峰,电压0.12 V位置对应了生

成Sn-Li合金的合金化过程, Sn 单质和 Li^+ 反应得到电子生成Sn-Li合金,电压0.86 V位置对应了固体电解质界面膜(SEI)的形成,电压1.37 V位置对应了 Li^+ 的嵌入转化过程, SnS_2 和 Li^+ 反应得到电子生成Sn单质和 Li_2S 。电池阳极第一次循环扫描过程仅在电压0.55 V位置出现了一个氧化峰,对应了Sn-Li合金的

去合金化过程, Sn-Li 合金失去电子生成单质 Sn 和 Li^+ 。由图 6(b) 可以看出, SnS_2/RGO 阴极第一次循环扫描过程表现出 5 个还原峰, 电压 0.21 V 位置对应了 Sn 单质和 Li^+ 反应得到电子生成 Sn-Li 合金的合金化过程, 电压 0.69 V 位置和 SEI 膜的生成有关, 1.08~1.66 V 范围的三个还原峰是由 SnS_2 和 Li^+ 反应得到电子生成 Sn 单质和 Li_2S 过程引起的, 对应了 Li^+ 的嵌入转化过程。电池阳极第一次循环扫描过程在电压 0.56、1.91 和 2.38 V 位置出现了 3 个氧化峰, 其中电

压 0.56 V 位置对应了 Sn-Li 合金失去电子生成单质 Sn 和 Li^+ 的去合金化过程, 电压 1.91 V 位置对应了单质 Sn 和 Li_2S 反应失去电子发生氧化反应生成 SnS_2 和 Li^+ 过程, 电压 2.38 V 位置对应于 Li^+ 从 SnS_2 中的脱出过程, 在随后的 2 次阳极循环扫描过程中并未发生 Li^+ 的脱出, 这说明 SnS_2 可能发生了重新堆垛。循环伏安曲线存在大量重叠, 这说明 Li^+ 的嵌入和脱出具有良好的可逆性。

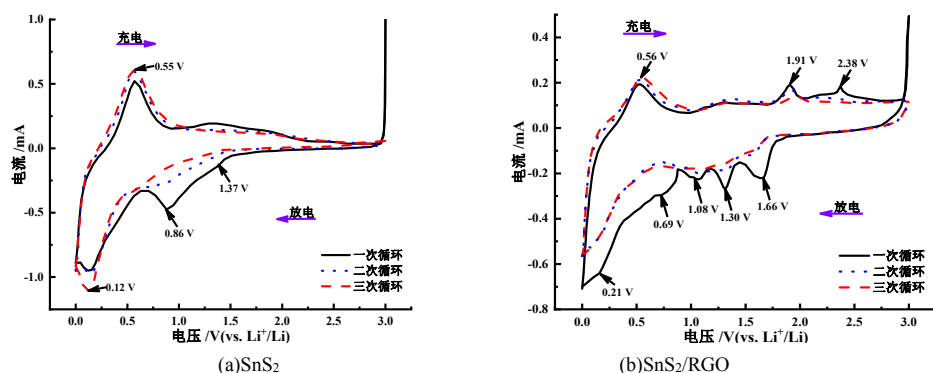


图 6 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的三次充放电循环 CV 曲线

Fig.6 CV curves of SnS_2 and SnS_2/RGO after three charge-discharge cycles

2.8 复合材料恒流充放电性能分析

图 7 为 SnS_2 和 SnS_2/RGO 电极在电压范围 0.01~0.3 V 和电流密度 100 mA/g 条件下的三次恒流充放电曲线。由图 7(a) 可以看出, SnS_2 首次充电的比容量分别为 875 mAh/g, 首次放电的比容量为 1 523 mAh/g, 容量损失率和库伦效率分别为 42.5% 和 57.5%, 第二次充放电过程的容量损失率降低至 14.8%, 库伦效率提升至 85.2%, 第三次充放电过程的容量损失率降低至 10.9%, 库伦效率提升至 89.1%。由图 7(b) 可以看出, SnS_2/RGO 第一次充电和放电的比容量分别为 1 843 和 2 803 mAh/g, 容量损失率和库伦效率分别为 34.2% 和 65.8%, 第二次充放

电过程库伦效率提升至 88.2%, 第三次充放电过程库伦效率提升至 91.1%, 容量损失率仅为 8.9%。对比 SnS_2 和 SnS_2/RGO 电极三次充放电的比容量可以发现, SnS_2/RGO 电极表现出高的充放电比容量, 且三次循环充放电的库伦效率高于 SnS_2 电极, 表现出低的容量损失率。RGO 复合后提高了 SnS_2 的比表面积, 通过 N_2 吸附-脱附结果可知 SnS_2/RGO 的比表面积是 SnS_2 的 2.36 倍, 高的比表面积为 Li^+ 的嵌入和脱出提供了丰富的活性位点, 且 RGO 的复合可以提高材料的导电性, 降低材料的电阻, EIS 结果证明了这一点。

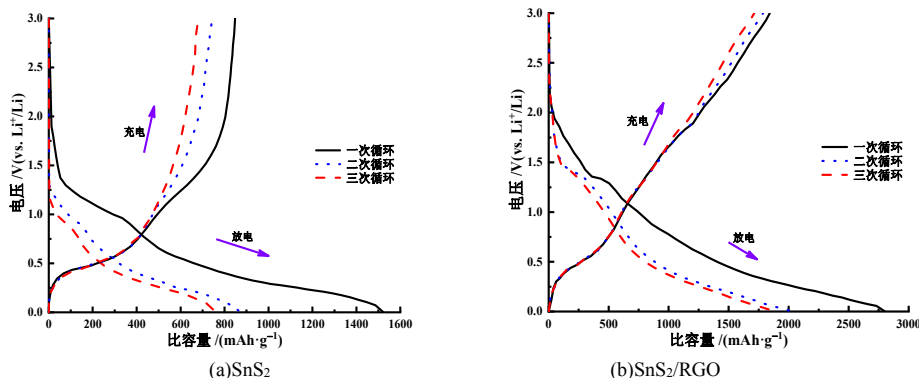


图 7 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的三次恒流充放电曲线

Fig.7 cubic constant current charge discharge curves of SnS_2 and SnS_2/RGO were obtained

2.9 复合材料倍率性能分析

图8为在100、200、300、500和1 000 mA/g电流密度下测定的 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的倍率性能。由图8可以看出, SnS_2/RGO 在电流密度100、200、300、500和1 000 mA/g条件下放电的比容量分别为1 595、1 275、1 023、888和696 mAh/g, 相同电流密度下 SnS_2 的放电比容量分别为470、305、229、147和8.2 mAh/g, 1 000 mA/g的高电流密度条件下 SnS_2 的放电比容量降低明显。相同电流密度条件下的充放电过程, SnS_2/RGO 的充放电的比容量均高于 SnS_2 。在电流密度100 mA/g条件下进行二次充放电, SnS_2/RGO 充电和放电的比容量恢复到821和859 mAh/g, 相同条件下 SnS_2 的充电和放电的比容量只能恢复到215和223 mAh/g。 SnS_2/RGO 表现出良好的电化学性能, 得益于RGO复合后提高了导电性。

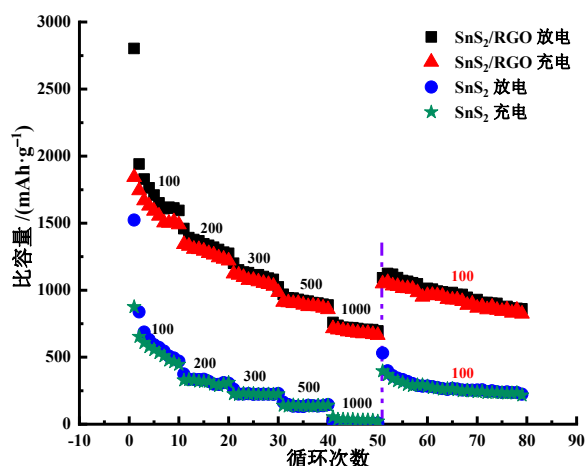


图8 不同电流密度下测定的 SnS_2 和 SnS_2/RGO 倍率性能
Fig.8 SnS_2 and SnS_2/RGO rate performance measured at different current densities

2.10 复合材料循环稳定性分析

图9为在100 mA/g电流密度下测定的 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的循环稳定性。由图9可以看出, 100 mA/g电流密度下 SnS_2/RGO 循环100次放电和充电的容量仍然达到了947和941 mAh/g, 此时的库伦效率为99.37%, 表现出良好的循环稳定性。循环100次 SnS_2 的放电和充电的容量仅为217和198 mAh/g, 此时的库伦效率为91.24%, 主要是充放电过程中 SnS_2 会发生结构体积变化, RGO的复合不仅提高了导电性同时增强了稳定性。

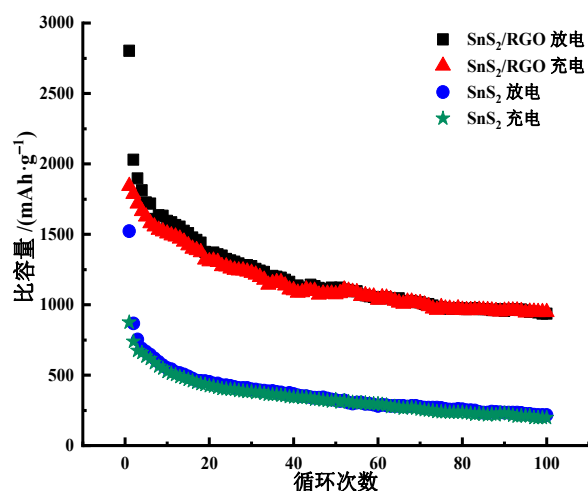


图9 100 mA/g条件下测定的 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的循环稳定性
Fig.9 Cycle stability of SnS_2 and SnS_2/RGO at 100 mA/g

2.11 复合材料电化学交流阻抗分析

图10为 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的EIS谱图。Nyquist圆弧半径的大小反映了材料电化学交流阻抗的大小。由图10可以看出, SnS_2/RGO 的Nyquist圆弧半径明显小于 SnS_2 , SnS_2 和 SnS_2/RGO 的电阻分别为127.2和26.8 Ω , 相比纯 SnS_2 , SnS_2/RGO 的电阻明显降低, 导电性提高, 电荷传质阻力降低, 有利于提高 Li^+ 的转移速率, 丰富的介孔和大孔结构为 Li^+ 提供了稳定转移通道。

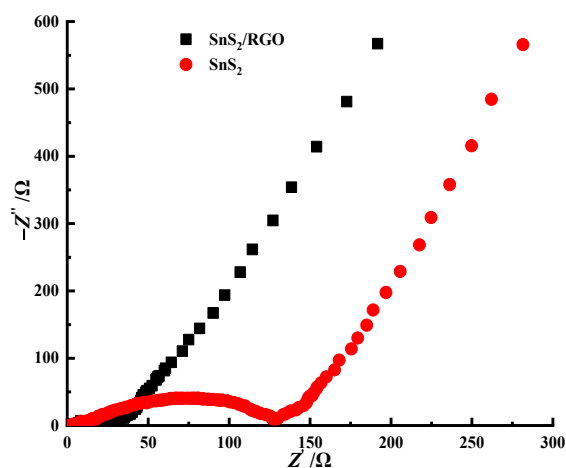


图10 SnS_2 和 SnS_2/RGO 的EIS谱图
Fig.10 EIS spectra of SnS_2 and SnS_2/RGO

3 结论

通过溶剂热法制备了 SnS_2/RGO 复合材料, 作为锂离子电池负极材料组装为纽扣电池。RGO的复合比表面积提高为 Li^+ 的嵌入和脱出提供了丰富的活性位点, 导电性增强, 电荷传质阻力减小, 提高了

Li⁺的转移速率。电流密度100 mA/g条件下充放电 SnS₂/RGO复合材料的充放电的比容量明显高于纯 SnS₂, SnS₂/RGO电极第一次充电和放电的比容量分别为1 843和2 803 mAh/g。SnS₂/RGO电极循环100次放电和充电的电容量仍然达到了947和941 mAh/g, 表现出良好的循环稳定性。

参考文献

- [1] 巩鹏妮, 弓巧娟, 梁云霞, 等. 镍钴硫化物、石墨烯与聚苯胺复合材料在超级电容器中的应用研究进展[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(3): 90-94.
- [2] Huang J, Xu H, Pei Y R, et al. Controlled morphology significantly enhances electrochemical performance of LaNiO₃-NiO anodes for Li-ion batteries[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109497.
- [3] Abbasi M, Frank I, Nadimi E. Doping engineering in MoS₂ as the cathode-host in lithium-sulfur batteries: A first principles investigation[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 95: 112555.
- [4] Qu J Y, Ren Z J, Yan L, et al. Mixed crystal FeF_x submicron spheres loaded on fluorinated graphene as cathode materials for Lithium-Ion batteries[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2024, 960: 118195.
- [5] Zhu B N, Liu D D, Zhong B, et al. NiSe₂/CoSe₂ heterostructure nanoparticles anchoring on graphene for enhanced Li-ions storage[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 688: 133685.
- [6] Xu P, Wang X D, Guo D R, et al. Flower-like carbon spheres formed by self-assembly of nitrogen-doped porous nanoribbons to boost SnS₂ nanosheets for advanced lithium storage[J]. Diamond & Related Materials, 2024, 143: 110936.
- [7] Ping X, Liao M D, Wang X D, et al. Honeycomb substrate carbon and nitrogen-doped coated carbon synergistically boost SnS/ZnS for efficient lithium storage[J]. Materials Letters, 2024, 357: 135710.
- [8] Wei H, Min Q, Xun H, et al. Formamide-assisted synthesis of SnS₂ nanosheets for high capacity and stable Li-ion battery[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2024, 330: 124456.
- [9] Wang J H, Zheng J D, Gao L P, et al. Nitrogen-doped carbon-coated hollow SnS₂/NiS microflowers for high-performance lithium storage[J]. Frontiers of Materials Science, 2023, 17(3): 230654.
- [10] Chen L, Ma K, Zhou L L, et al. Confining ultrafine SnS₂ nanoparticles into MXene interlayer toward fast and stable lithium storage[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 247: 117087.
- [11] Yin L X, Li H M, Cheng R L, et al. Controllable synthesis of SnS₂ nanoflakes as high-performance anode for lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(1): 191-203.
- [12] Jin C Q, Wei Y X, Nan R H, et al. C@SnS₂ core-shell 0D/2D nanocomposite with excellent electrochemical performance as lithium-ion battery anode[J]. Electrochimica Acta, 2024, 476: 143747.
- [13] Xu Z X, Lu W H, Zhang T, et al. Metal-organic framework-derived SnS₂/C/CNT as anode material for lithium-ion batteries with high capacity and stability[J]. Energy Technology, 2023, 12(1): 21-26.
- [14] Ji J W, Zhou Z, Fu K, et al. Enhanced Li⁺ storage through highly hybridized networks of self-assembled SnS₂/rGO aerogels[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 828: 154192.
- [15] 肖彬, 谢泽林, 吴刚, 等. 纳米 SnS₂/Sb₂S₃@G 异质结的构筑及其储锂性能[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(7): 2210-2221.
- [16] Yu Z, Li X, Yan B, et al. Rational design of flower-like tin sulfide @ reduced graphene oxide for high performance sodium ion batteries[J]. Materials Research Bulletin, 2017, 96: 516-523.
- [17] Wang H, Robinson J T, Li X, et al. Solvothermal reduction of chemically exfoliated graphene sheets[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(29): 9910-9911.
- [18] Munisamy M, Hassan Z, Perumal N, et al. Flower-like SnS₂/honeycomb-like g-C₃N₄ composite as an anode material for high-rate, long-term lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107894.
- [19] Allen M J, Tung V C, Kaner R B. Honeycomb carbon: a review of graphene[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(1): 132-145.
- [20] Dai J Y, Liao J, He M Y, et al. Si@SnS₂-reduced graphene oxide composite anodes for high-capacity lithium-ion batteries[J]. ChemSusChem, 2019, 12(23): 5092-5098.