

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.004

纳米锗-锡/碳复合材料的合成与电化学性能研究

Synthesis and electrochemical performance of nano-Ge-Sn/C composite material

乔雪, 杨雪彪, 黄婷婷, 王新月, 贾子辰, 王红强
QIAO Xue, YANG Xuebiao, HUANG Tingting, WANG Xinyue, JIA Zichen,
WANG Hongqiang

(河北大学 化学与环境科学学院, 河北 保定 071002)
(School of Chemistry and Environmental Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

摘要: 锗因其较高的理论容量成为最具应用前景的锂离子电池负极材料。设计制备了一种纳米锗-锡/碳复合材料, 碳材料可以在提高锗导电性的同时适应其体积变化, 锡的加入可以进一步提高材料导电性, 并且锗和锡 2 种组分脱/嵌锂的电位不同, 未参与反应的组分可以作为基体缓冲另一组分在充放电过程中的体积变化, 提高负极的结构稳定性。通过扫描电子显微镜(SEM)、能量分散光谱仪(EDS)和 X 射线衍射(XRD)方法对材料进行形貌表征, 并对结构和组分进行分析。将该材料作为锂离子电池负极材料, 在 0.50 A/g 的电流密度下, 首次放电容量达到 1 292 (mA·h)/g, 充放电 100 次后容量保持在 510 (mA·h)/g。当电流密度提高至 10.00 A/g 时, 仍具有 460 (mA·h)/g 的放电容量, 说明材料具有循环稳定性的同时还有较好的倍率性能。

关键词: 锂离子电池; 锗-锡/碳负极材料; 比容量; 电流密度; 锂化反应; 倍率性能

中图分类号: TK 02 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)07-0024-06

Abstract: Ge has become the most promising anode material for lithium-ion batteries due to its high theoretical capacity. Our team has prepared a nano-Ge-Sn/C composite material: carbon can improve the conductivity of Ge and adapt to the change in its volume, and Sn can further improve the conductivity of the material. Since the electric potentials of Ge and Sn to deintercalate/intercalate lithium ion are different, the component that does not participate in the reaction can be used as a matrix to buffer the volume change led by the other component in charge and discharge processes, which can improve the structural stability of the electrode. The morphology, structure and composition of the material were analyzed by SEM, EDS and XRD. The capacity of the lithium-ion battery taking this composite as its anode material was 1 292 (mA·h)/g in the first cycle discharge at a current density of 0.5 A/g, and remained at 510 (mA·h)/g after 100 cycles' discharge. When the current density was increased to 10 A/g, the battery kept a capacity of 460 (mA·h)/g. It indicates a good cyclical stability and rate performance of this composite.

Keywords: lithium-ion battery; Ge-Sn/C anode material; specific capacity; current density; lithiation reaction; rate performance

0 引言

18 世纪 60 年代以来, 持续大量的化石燃料消耗造成了严重的环境污染, 自然资源加速枯竭。为解决能源危机, 人们研发了可高效转换和存储能量的电池技术。电池技术须具有低成本、可持续、安全性高和低毒性等优势^[1-2]。经过 20 多年的研发, 锂离子电池成功实现商业化并且广泛应用于日常生活中^[3-5]。目前商用锂电池主要采用插层型正极和

石墨负极。正极材料包括 LiFePO₄(LFP)^[6-7], 钴和镍基氧化物(锂镍钴锰氧化物(NCM)), 但其发展受限于较低的理论比容量(250 (mA·h)/g), 而石墨的理论比容量也仅为 372 (mA·h)/g^[8], 显著降低了锂离子电池体系的能量密度。为实现大规模应用, 更小、更轻、更高的能量密度和可靠性是锂离子电池的发展趋势, 而电极的开发和改性是研究的核心。

锗基负极材料因具有较高的理论比容量(1 600 (mA·h)/g)而受到广泛关注, 然而其作为锂离子电池负极应用却受到体积膨胀、导电性差等问题的限制。研究人员在合成纳米材料的基础上, 通过结构调控和组分设计制备出具有优异电化学性能的负

极材料。如Kwon等^[9]通过2步法合成了双孔锗纳米结构,通过调整前驱体 GeO_2 和 SiO_2 的相对比例来形成不同种类的孔。这种双孔结构的锗负极在0.32 A/g电流密度下充放电100次后容量保持率为100.0%,在0.80 A/g电流密度下循环300次后容量保持率为94.4%。此外,多孔结构可缩短锂离子扩散路径,所以在8.00 A/g大电流密度下电池比容量依然可以达到740 (mA·h)/g,具有优异的倍率性能。Lin等^[10]通过熔融盐金属热反应法制备介孔空心锗微球,其比表面积为110 m^2/g ,平均孔径5.7 nm。该材料用作锂离子电池负极时,在0.32 A/g电流密度下充放电150次后仍具有1291 (mA·h)/g的可逆容量,在1.28 A/g电流密度下充放电循环400次后容量为1217 (mA·h)/g。说明介孔空心锗微球因其较小的颗粒尺寸及增大的比表面积,循环稳定性更好。Wang等^[11]通过模板法将锗量子点均匀嵌入三维有序多孔氮掺杂碳骨架中作为无黏结剂负极。在量子尺寸锗和多孔碳结构的共同作用下,锂离子和电子可被快速传输,并保持材料结构稳定以得到优异的循环性能和倍率性能。电池在5.00 A/g电流密度下充放电1200次后可逆容量超过1000 (mA·h)/g,每次循环容量衰减仅0.023%。

在合成纳米锗/碳材料中加入锡。锡的导电性远高于锗,可提高材料导电性,并与锂进行合金化反应。同时,锡嵌锂后膨胀率小于锗,可在一定程度上抑制体积膨胀。此外,锗与锡锂化反应的电位不同,锡锂化时锗可作为缓冲介质;锗-锡共锂化时,已经预锂化的锡可作为缓冲介质保护电极结构。这种逐步锂化过程可有效减轻电极在充放电时的体积应变,提高材料稳定性。

1 试验

1.1 材料制备

将200 mg聚丙烯腈(PAN)加入10 mL的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中,搅拌至PAN完全溶解。加入293 μL 的 GeCl_4 和15 mg的 SnCl_2 ,继续搅拌至均匀后放入烘箱除去溶剂得到前驱物。将所得固体在氩气气氛下高温煅烧,先以2 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至250 $^\circ\text{C}$,保温4 h;再以5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至700 $^\circ\text{C}$,保温2 h,得到C@GS3负极材料。C@GS10制备方法与上述方法相同, GeCl_4 和 SnCl_2 用量分别为260 μL 和47 mg。C@Ge制备过程中 GeCl_4 的用量为308 μL ,不加入 SnCl_2 。

1.2 材料表征

使用FEI公司的Nova Nano SEM450型扫描电子显微镜对材料进行形貌表征和能量分散光谱(EDS)

元素分析。使用布鲁克公司D8 ADVANCE型衍射仪对材料进行物相结构分析,射线源为Cu靶($\lambda=1.54056 \text{ \AA}$),扫描范围为 $20^\circ\sim 80^\circ$ 。

1.3 材料电化学性能测试

将制得的材料与导电炭黑(Super P)及羧甲基纤维素钠(CMC)以8:1:1的质量比分散到蒸馏水中混成浆料,均匀涂覆在铜箔上,在120 $^\circ\text{C}$ 下真空干燥3 h。烘干后切成直径12 mm的圆片称量备用。组装电池的全过程在充满氩气的手套箱里进行,电池型号为CR2032,所用电解液为1.0 mol/L的 LiPF_6 溶液,溶剂为含5.0%氟代碳酸乙烯酯(FEC)且体积比为1:1:1的碳酸乙烯酯(EC)/碳酸二甲酯(DMC)/碳酸甲乙酯(EMC),隔膜为Celgard 2400聚丙烯膜。

用LAND CT2001A型电池测试系统对电池进行充放电测试,电压范围为0.01~1.50 V。循环伏安测试在Bio-Logic VSP电化学工作站上完成,电压范围为0.01~1.50 V,扫描速率为0.1~1.0 mV/s。

2 试验结果与讨论

2.1 材料微观形貌表征

图1为制备锗-锡/碳复合材料的流程。首先将PAN, GeCl_4 和 SnCl_2 在DMF中均匀混合,除去溶剂后将得到的前驱体进行高温煅烧,在此过程中PAN在高温下发生碳化,氯化锗和氯化亚锡在高温和碳存在的条件下分别还原成锗和锡得到纳米锗-锡/碳复合材料。在锂化过程中,锡先与锂发生合金化反应,也就是预锂化,同时体积膨胀,未反应的锗充当缓冲剂并进行电子和离子传导。而后锡和锗共同锂化,此时 Li_xSn 充当缓冲剂缓解体积膨胀。整个过程中碳基质也起到了导电和适应体积变化的作用。

图2为C@GS3,C@GS10和C@Ge的扫描电子显微镜(SEM)成像图和EDS分析结果。材料中存在C,Ge和Sn。没有Cl说明 GeCl_4 与 SnCl_2 已完全反应。表1为C@Ge,C@GS3和C@GS10中C,Ge和Sn的原子百分比。计算得出C@GS3和C@GS10中,Sn占Ge和Sn总量的摩尔分数分别为1.5%,5.3%。

2.2 材料物相结构表征

图3为C@GS3,C@GS10和C@Ge复合材料的X射线衍射(XRD)图。由图3可见,3种材料都具有锗衍射峰,且与立方锗(JCPDS No. 04-0545)的特征峰相对应^[12-14]。

C@GS3和C@GS10中存在相对较弱的锡特征峰,这与元素分析图中结果一致。材料中均不存在反应物氯化锗和氯化亚锡,说明已经反应完全。而图中没有与碳相关的衍射峰,是因为碳的特征峰与强度较高的锗(111)晶面衍射峰位置接近,2种衍射

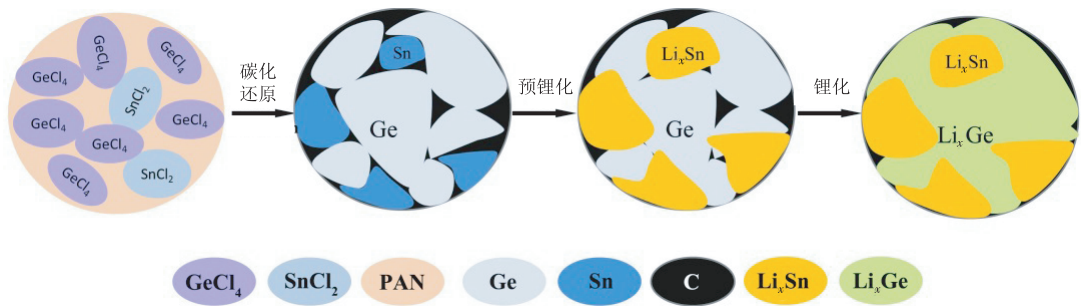


图 1 锗-锡/碳复合材料合成示意

Fig. 1 Schematic illustration for the synthesis of Ge-Sn/C composite material

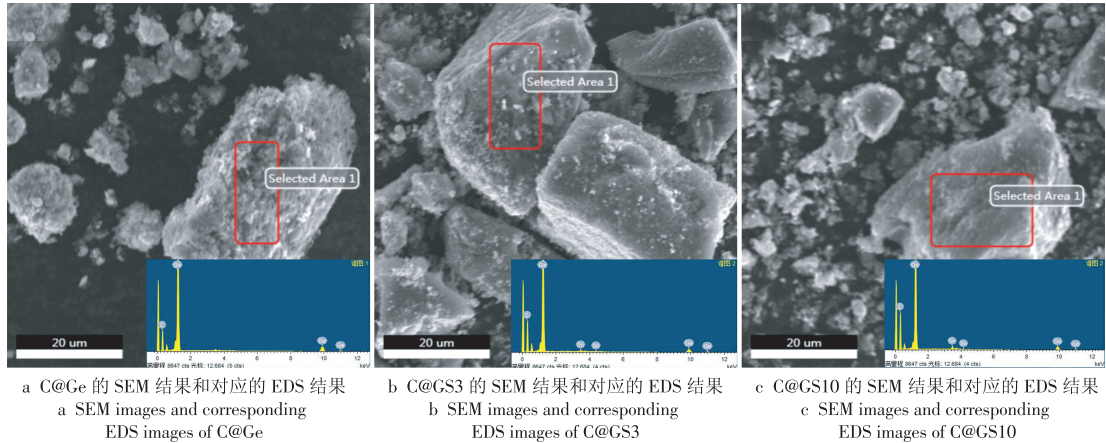


图 2 C@Ge, C@GS3 和 C@GS10 的 SEM 结果和对应的 EDS 结果

Fig. 2 SEM images and corresponding EDS images of C@Ge, C@GS3 and C@GS10

表 1 C@GS3, C@GS10, C@Ge 中 C, Ge, Sn 原子百分比
Tab. 1 Atomic percentage of C, Ge and Sn in C@GS3, C@GS10 and C@Ge %

材料	$x(\text{C})$	$x(\text{Ge})$	$x(\text{Sn})$
C@Ge	83.2	16.8	0
C@GS3	86.8	13.0	0.2
C@GS10	88.7	10.7	0.6

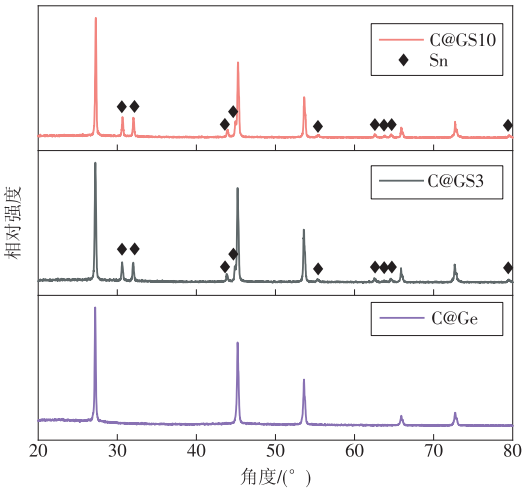


图 3 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 的 XRD 结果

Fig. 3 XRD patterns of C@GS3, C@GS10 and C@Ge

峰发生重合, 导致碳的衍射峰不容易被观察到。

2.3 材料电化学性能分析

图 4a 为 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 在 0.50 A/g

电流密度下的循环性能。由图 4a 可见 C@GS3 的初始放电容量最高, 为 1 292 (mA·h)/g, 而 C@GS10, C@Ge 的容量分别为 1 256, 1 053 (mA·h)/g, 这是因为加入少量的锡后提高了材料的导电性, 被碳包裹的锗反应更加完全, 而 C@GS10 的容量较低是因为锡的理论容量低于锗, 含量增加后会降低材料整体的容量。3 个电极的首次循环库伦效率都在 65.0% 以下, 这种不可逆的容量损失是因为电极材料与电解液在固液相界面上发生反应, 形成了电子绝缘的固体电解质相界面膜 (SEI)^[15-17]。持续充放电 100 次之后, C@GS3 还具有 510 (mA·h)/g 的容量, 相当于第 2 次循环容量的 65.0%, 而 C@GS10 和 C@Ge 相对于第 2 次循环的容量保持率分别为 64.0% 和 36.0%, 说明加入锡之后材料的循环稳定性有明显的提升。但是随着锡含量的增多, C@GS10 的比容量整体偏低。

图 4b 为 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 在 0.20, 0.50, 1.00, 2.00, 5.00, 8.00 和 10.00 A/g 电流密度下的倍率性能。由图 4b 可见 C@GS3 在不同电流密度下都具有最高的容量, 在 10.00 A/g 的大电流密度下仍然具有 460 (mA·h)/g 的容量。而 C@GS10 因为锡含量增多而导致容量较低, C@Ge 虽然在首次循环时具有较高容量, 但是随着循环次数增多衰减

严重,在 10.00 A/g 电流密度下只有 210 (mA·h)/g 的容量。当电流密度恢复至 0.20 A/g 时,C@GS3 的容量为 670 (mA·h)/g,C@GS10,C@Ge 的容量分别为 580,520 (mA·h)/g,而且由图 4a 及图 4b 可见,C@GS3 和 C@GS10 在经过 70 次充放电后稳定性要高于 C@Ge。结果表明,锡的加入不仅提高了材料的结构稳定性,而且可以改善其倍率性能。

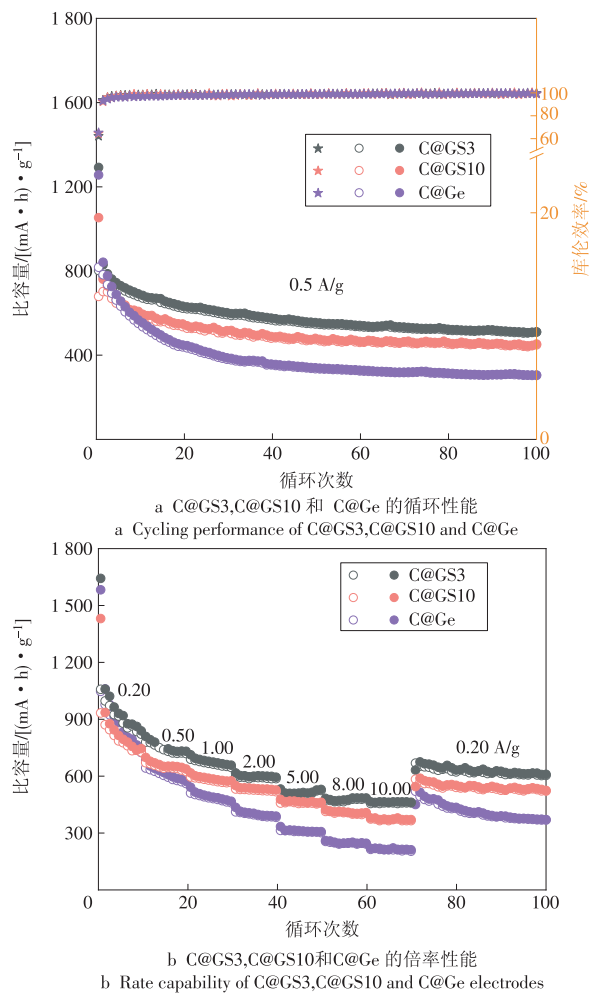


图 4 C@GS3,C@GS10 和 C@Ge 的循环性能和倍率性能
Fig. 4 Cyclical and rate performances of C@GS3,C@GS10 and C@Ge

图 5 为 C@GS3,C@GS10 和 C@Ge 在不同电流密度下的充放电曲线,图中标注的是在 10.00 A/g 电流密度下充电和放电的中值电压差-极化电压,分别为 0.40 V,0.44 V 和 0.52 V。

表 2 为 3 种材料在其他电流密度下的极化电压。由表 2 可见,C@GS3 和 C@GS10 的极化电压小于 C@Ge,说明加入锡可有效缓解电极的极化现象,增强电子传导和离子扩散,提高电极反应动力学性能^[18-20],这也是 C@GS3 具有优异倍率性能的原因。

图 6 为 C@GS3,C@GS10 和 C@Ge 在较大电流密度 2.00 A/g 下的长循环性能。在前 2 次 0.50 A/g 的小电流活化之后,C@GS3 和 C@GS10 表现出优异的

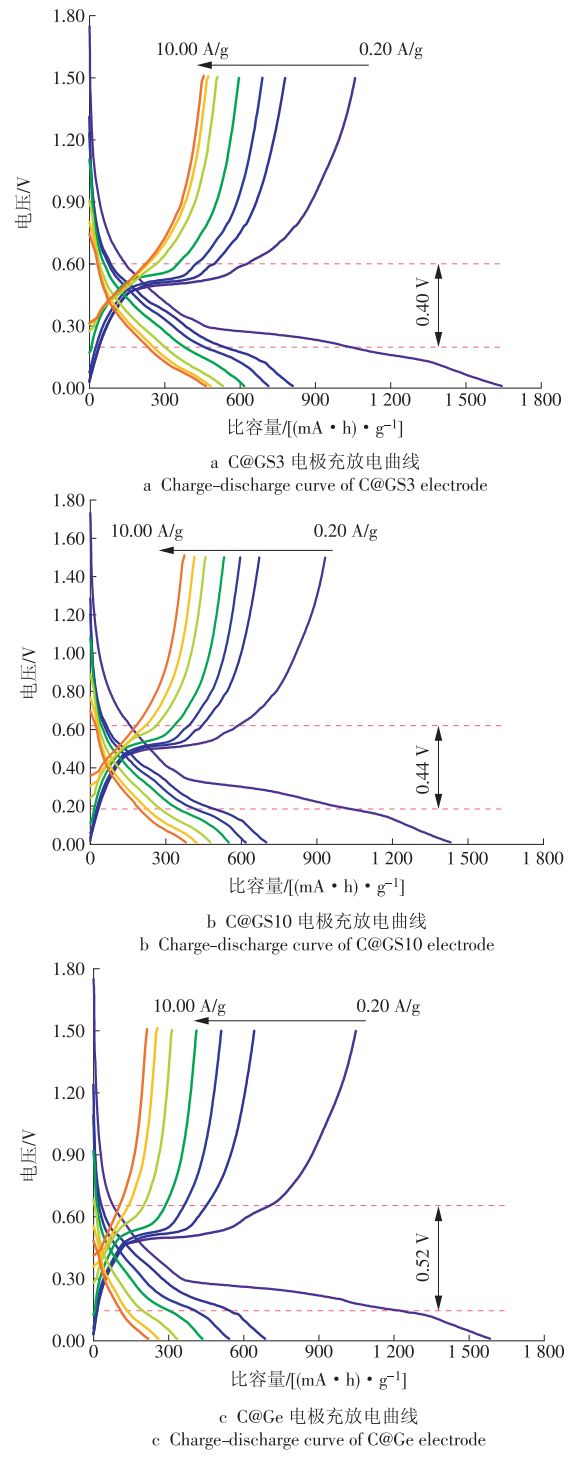


图 5 C@GS3,C@GS10 和 C@Ge 电极的充放电曲线
Fig. 5 Discharge/charge curves of C@GS3,C@GS10 and C@Ge electrodes

表 2 不同电流密度下 C@GS3,C@GS10 和 C@Ge 的极化电压

Tab. 2 Polarized voltages of C@GS3,C@GS10 and C@Ge electrodes under different currency								V
材料	电流密度/(mA·g ⁻¹)							
	0.20	0.50	1.00	2.00	5.00	8.00	10.00	
C@GS3	0.25	0.24	0.26	0.29	0.35	0.39	0.40	
C@GS10	0.26	0.25	0.26	0.30	0.36	0.40	0.44	
C@Ge	0.26	0.28	0.31	0.35	0.41	0.48	0.52	

循环性能。循环 400 次后, C@GS3 和 C@GS10 的容量分别保持在 386, 310 (mA·h)/g, 而 C@Ge 的容量只有 205 (mA·h)/g。C@GS3 和 C@GS10 在大电流密度下依然具有优异的循环稳定性, 得益于锡组分的加入, 不仅增强了锆的导电性, 而且有效抑制了锆的体积膨胀, 保证了电极结构的稳定。

图 7 为 C@GS3 和 C@Ge 在 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mV/s 扫描速率下的循环伏安曲线。

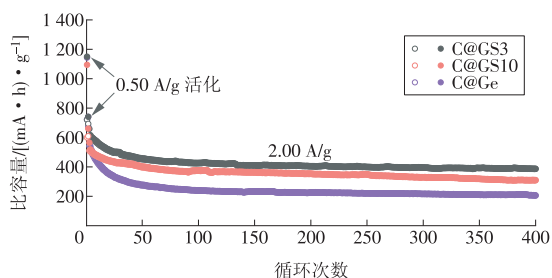
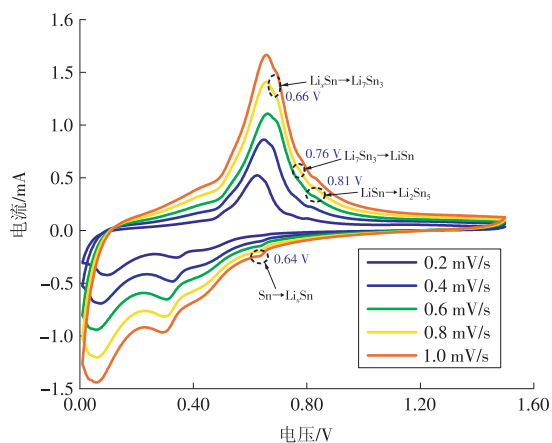


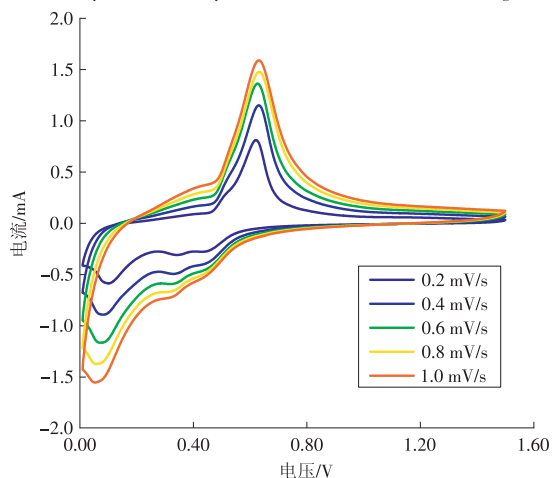
图 6 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 在 2.00 A/g 电流密度下的长循环性能

Fig. 6 Long cyclical performances of C@GS3, C@GS10 and C@Ge electrodes at a current density of 2.00 A/g



a C@GS3 在不同扫描速率下的循环伏安曲线

a Cyclic voltammetry curves of C@GS3 at different scanning rates



b C@Ge 在不同扫描速率下的循环伏安曲线

b Cyclic voltammetry curves of C@Ge at different scanning rates

图 7 C@GS3 和 C@Ge 在不同扫描速率下的循环伏安曲线
Fig. 7 Cyclic Voltammetry measurements of C@GS3 and C@Ge at different scanning rate

由图 7 可见, 与 C@Ge 相比, C@GS3 不仅有锆的氧化还原峰^[21-22], 而且有电流强度较弱的锡的氧化还原峰。放电过程中在 0.64 V 锡预锂化成 Li_xSn , 而后是锆、锡的共锂化; 在充电过程中, 先是锂化的锆脱锂, 然后锂化锡逐步脱锂。循环伏安曲线表明, C@GS3 材料是经过逐步锂化反应的。在锡嵌锂时, 未反应的锆作为缓冲介质, 保护整个电极结构不被破坏。在接下来的共锂化过程中, 预锂化的锡可以缓解体积膨胀, 从而保证了电极材料的完整性^[23-24]。

图 8 为 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 的电化学交流 (EIS) 阻抗图谱, 图中中频区域对应电荷在界面的传递电阻。由图 8 可见, C@GS3 的电荷转移电阻最小, 表明加入锡可促进电荷传导, 提高材料导电性。

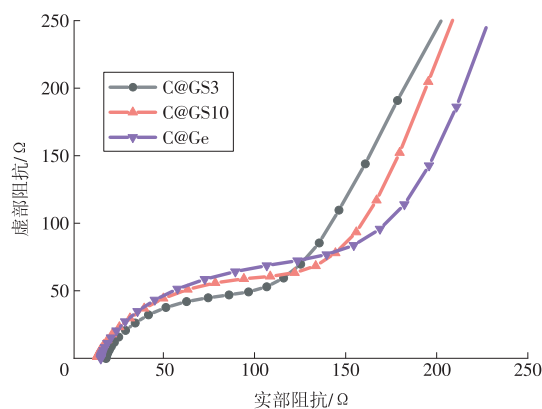


图 8 C@GS3, C@GS10 和 C@Ge 的 EIS 阻抗图谱

Fig. 8 Electrochemical Impedance Spectroscopy of C@GS3, C@GS10 and C@Ge

3 结论

为解决锆负极电导率低、循环稳定差等问题, 在锆/碳材料中加入锡, 明显改善其电化学性能。先将锆与无定形碳进行复合, 提高锆导电性并可适应锆体积变化。锡的导电性优于锆, 加入锡可进一步提升材料导电性。而且锡可与锂发生反应, 又与锆锂化电位不同, 放电过程中预锂化的锡可在锆-锡共锂化时充当缓冲介质, 保护电极结构。C@GS3 和 C@GS10 具有良好的循环稳定性。在 0.50 A/g 电流密度下循环 100 次后, C@GS3 仍具有 510 (mA·h)/g 的容量, 相当于第 2 次循环时容量的 65.0%。

参考文献:

- [1] 李小强, 陈欣, 李洪波, 等. 碳包覆 CaSnO_3 纳米纤维作为高性能锂离子电池负极材料[J]. 无机化学学报, 2021, 37(4): 700-708.
- LI Xiaoqiang, CHEN Xin, LI Hongbo, et al. Carbon-coated CaSnO_3 nanofibers as high performance anode materials for lithium ion batteries [J]. Chinese Journal of Inorganic

- Chemistry, 2021, 37(4): 700–708.
- [2] WANG Hongqiang, ZHANG Na, LI Ying, et al. Unique flexible $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{S/rGO-CNT}$ electrode via the synergistic adsorption/electrocatalysis effect toward high-performance lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(21): 6518–6524.
- [3] 张林森, 郭春朵, 宋延华, 等. 原位合成 $\text{Ni}_3\text{N/g-C}_3\text{N}_4$ 复合材料的储锂性能[J]. *电池*, 2021, 51(1): 13–16.
- ZHANG Linsen, GUO Chunduo, SONG Yanhua, et al. Lithium storage performance of in-situ synthesized $\text{Ni}_3\text{N/g-C}_3\text{N}_4$ composite [J]. *Battery Bimonthly*, 2021, 51(1): 13–16.
- [4] CHEN Z, YANG X B, QIAO X, et al. Lithium-ion-engineered interlayers of V_2C MXene as advanced host for flexible sulfur cathode with enhanced rate performance [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2020, 11(3): 885–890.
- [5] 惠康龙, 傅继澎, 高湉, 等. 金属硫化物在可充电电池中的研究进展[J]. *应用化学*, 2020, 37(12): 1384–1402.
- HUI Kanglong, FU Jipeng, GAO Tian, et al. Research progress of metal sulfides in rechargeable batteries [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2020, 37(12): 1384–1402.
- [6] HU Zhenglin, ZHANG Shu, ZHANG Chuanjian, et al. High performance germanium-based anode materials [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2016, 326: 34–85.
- [7] 方华, 丰小华, 张林森, 等. 锂离子电池硅/碳复合负极材料的研究现状[J]. *电池*, 2020, 50(6): 580–584.
- FANG Hua, FENG Xiaohua, ZHANG Linsen, et al. Research status quo of silicon/carbon composite anode material for Li-ion battery [J]. *Battery Bimonthly*, 2020, 50(6): 580–584.
- [8] XI Xiaoli, CHEN Guanglei, NIE Zuoren, et al. Preparation and performance of LiFePO_4 and LiFePO_4/C cathodes by freeze-drying [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 497(1–2): 377–379.
- [9] KWON D, RYU J, SHIN M, et al. Synthesis of dual porous structured germanium anodes with exceptional lithium-ion storage performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 374: 217–224.
- [10] LIN N, LI T Q, HAN Y, et al. Mesoporous hollow Ge microspheres prepared via molten-salt metallothermic reaction for high-P-performance Li-storage anode [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(10): 8399–8404.
- [11] WANG Y, LUO S N, CHEN M, et al. Uniformly confined germanium quantum dots in 3D ordered porous carbon framework for high-performance Li-ion battery [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(16): 2000373.
- [12] LIU Xin, LIU Yusi, HARRIS M M, et al. Germanium nanoparticles supported by 3D ordered macroporous nickel frameworks as high-performance free-standing anodes for Li-ion batteries [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 354: 616–622.
- [13] MULLANE E, KENNEDY T, GEANEY H, et al. A rapid, solvent-free protocol for the synthesis of germanium nanowire lithium-ion anodes with a long cycle life and high rate capability [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(21): 18800–18807.
- [14] KWON D, RYU J, SHIN M, et al. Synthesis of dual porous structured germanium anodes with exceptional lithium-ion storage performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 374: 217–224.
- [15] LI Dan, WANG Hongqiang, LIU Huakun, et al. A new strategy for achieving a high performance anode for lithium ion batteries encapsulating germanium nanoparticles in carbon nanoboxes [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(5): 1501666.
- [16] 杨丽杰. 锂离子电池石墨类碳负极的容量衰减机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [17] 任永欢. 锂离子电池低温/高电压电解液研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [18] QU J, YIN Y X, WANG Y Q, et al. Layer structured $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanodisk/reduced graphene oxide composites as high-performance anode materials for lithium-ion batteries [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(9): 3932–3936.
- [19] 许康力. 锂-硫电池电极材料制备及电化学反应动力学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [20] 张孝华. 层状 P2 型 $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{5/9}\text{Al}_{1/9}\text{O}_2$ 钠离子电池正极材料的性能提升与电极动力学研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [21] YE Xucun, LIN Zhihua, LIANG Shujie, et al. Upcycling of electroplating sludge into ultrafine Sn@C nanorods with highly stable lithium storage performance [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(3): 1860–1866.
- [22] QIAO X, YANG X B, ZHANG N, et al. One-step in situ encapsulation of Ge nanoparticles into porous carbon network with enhanced electron/ion conductivity for lithium storage [J]. *Rare Metals*, 2021, 40: 2432–2439.
- [23] 于敬学. 硅和锗基纳米材料的合成及作为锂离子电池负极材料的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] 王帮润. 高比能量锂离子电池硅/锗基负极材料的制备及其电化学性能研究[D]. 合肥: 中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所), 2019.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

乔雪(1995—), 女, 河北邯郸人, 在读硕士研究生, 从事新型储能材料和储能技术的研究工作。

杨雪彪(1995—), 男, 河北张家口人, 在读硕士研究生, 从事负极电极材料的设计及合成研究工作。

黄婷婷(1996—), 女, 河北承德人, 在读硕士研究生, 从事锂硫电池正极材料的合成研究工作。

王新月(1996—), 女, 河北定州人, 在读硕士研究生, 从事无机纳米材料的合成研究工作。

贾子辰(1998—), 男, 河北石家庄人, 在读硕士研究生, 从事电极材料电化学性能测试研究工作。

王红强(1984—), 男, 河北保定人, 副教授, 博士, 从事新型储能材料和技术研究工作(E-mail: hwang@hbu.edu.cn)。