

高还原氧化石墨烯隔膜应用于锂硫电池的研究

张康明^{1,2}, 戴丽琴², 谢莉婧², 苏方远², 刘卓², 陈志文¹, 陈成猛^{2*}

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444;

2. 中国科学院山西煤炭化学研究所炭材料重点实验室, 山西 太原 030001)

摘要: 锂硫电池作为高能量密度的二次电池存在硫的低导电性和多硫化物的穿梭效应等问题。通过制备高还原度的氧化石墨烯隔膜, 并将其应用于锂硫电池。利用石墨烯片层形成的空间位阻和小介孔结构, 可阻挡多硫化物的迁移以及其高导电性可减弱电池极化。在 0.2 C 下, 采用高还原氧化石墨烯隔膜的锂硫电池初始比容量达到了 1 143.2 mAh/g, 经过 100 次循环后容量保持率为 74.25%。此外, 在 2 C 下仍有 626.1 mAh/g 的比容量。表明高还原氧化石墨烯隔膜可以有效提升锂硫电池的电化学性能, 体现出卓越的长循环稳定性和杰出的倍率性能。

关键词: 锂硫电池; 高还原氧化石墨烯; 隔膜; 空间位阻; 高导电性

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)01-0150-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.01.032

Highly-reduced graphene oxide separator for lithium-sulfur batteries

ZHANG Kang-ming^{1,2}, DAI Li-qin², XIE Li-jing², SU Fang-yuan², LIU Zhuo²,
CHEN Zhi-wen¹, CHEN Cheng-meng^{2*}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Key Laboratory of Carbon Materials, Institute of Coal Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Lithium-sulfur (Li-S) battery is expected to be widely applied as a secondary battery with a high energy density. However, it has some problems such as low conductivity of sulfur and shuttle effect of polysulfides, which limiting its development and application. Highly-reduced graphene oxide (HrGO) separator are prepared and applied to Li-S batteries. The migration of polysulfides can be blocked by the space steric hindrance and small mesoporous structure formed by graphene sheets, and graphene's high conductivity can reduce the polarization of battery. Under 0.2 C, the initial specific capacity of the Li-S battery with HrGO separator reaches 1 143.2 mAh·g⁻¹, and the capacity retention rate maintains 74.25% after 100 cycles. Under 2 C, in addition, the battery has still a specific capacity of 626.1 mAh·g⁻¹. The results show that HrGO separator can effectively improve the electrochemical properties of Li-S battery, presenting the excellent long cycle stability and prominent rate performance.

Key words: lithium-sulfur battery; highly-reduced graphene oxide; separator; space steric hindrance; high conductivity

为了应对大规模储能系统和电动车辆不断增长的需求, 锂硫电池作为高能量密度的二次电池系统已被广泛的研究。单质硫作为正极材料, 其理论比容量为 1 675 mAh/g, 并与金属锂为负极组成电池, 其理论能量密度达到 2 600 Wh/kg。此外, 单质硫有低成本、储量丰富和无毒等优点^[1-3]。然而, 锂硫电池目前仍面临着很多技术挑战, 从而阻碍其产业化进程。充放电中间产物多硫化物在醚类电解液中具有高度的可溶性, 其能够轻易地跨膜扩散, 从而造成活性物质的不可逆损失, 导致容量快速地

衰减; 硫和其放电终产物 (Li₂S/Li₂S₂) 的电子绝缘性质, 导致了迟钝的电化学动力学过程和严重的极化现象^[4]。

基于上面这些问题, 正极材料与硫复合设计被广泛地研究^[5-6]。虽然这样能提高硫的利用率, 限制可溶性的多硫化物, 但是仍有一部分多硫化物溶解到电解液中形成穿梭效应。相比之下, 功能化隔膜不仅能抑制多硫化物的穿梭, 而且可作为上层集流体对其上吸附的多硫化物进行再次利用^[7]。

炭材料常被用于隔膜的修饰, 其高比表面积及

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-11-19

基金项目: 山西省重大专项 (MC2016-8, MC2016-4); 省青年科技研究基金 (201601D021061)

作者简介: 张康明 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为锂硫电池中功能化隔膜, 1242691489@qq.com; 陈成猛 (1985-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为新型炭材料, 通讯联系人, ccm@sxicc.ac.cn。

合适的孔结构可物理吸附多硫化物,抑制其产生的穿梭效应^[8-10]。石墨烯作为一种独特的二维炭材料,可组装形成层层搭接的连续层,通过空间位阻有效地抑制多硫化物的迁移。在石墨烯上的一些极性官能团和杂原子^[11-12],虽然可对多硫化物进行化学吸附,但这就不可避免会降低导电性,从而又造成了硫的低利用率。Huang等^[13]利用氧化石墨烯隔膜,在0.1 C电流密度下首次比容量为920 mAh/g。Zhu等^[14]制备了2种不同还原度的氧化石墨烯改性隔膜(碳质量分数分别为83.68%和62.05%),其中较高还原度的氧化石墨烯隔膜具有更加优异的电化学性能,以0.2 C经过100次循环后具有733 mAh/g和在大电流密度2 C下519 mAh/g的比容量。目前研究发现,不同还原程度的氧化石墨烯对锂硫电池会产生不同的影响。但是有关超高还原度的氧化石墨烯改性隔膜的报道较少,研究其对锂硫电池的影响有重要意义。

笔者成功制备了高还原度氧化石墨烯改性隔膜,并探究其在锂硫电池中的作用。通过在超高温下还原氧化石墨烯得到高还原度的氧化石墨烯,并通过真空抽滤方法制备得到高还原氧化石墨烯修饰的功能化隔膜,并将其应用在锂硫电池中。利用高还原氧化石墨烯形成的空间位阻和小介孔吸附对多硫化物的锚定作用,以及其高导电性加快了电动力学过程,有效地提升电池性能。

1 实验

1.1 HrGO 隔膜的制备

通过改进的Hummer's法制备氧化石墨烯,然后在2800℃下还原,得到高还原氧化石墨烯。将高还原氧化石墨烯粉体加入到无水乙醇中超声分散2 h,以获得均匀的高还原氧化石墨烯分散液,再通过真空抽滤的方式,将高还原氧化石墨烯沉积在PP隔膜表面,60℃烘干12 h。最终所得即为HrGO隔膜。

1.2 KB/S 正极的制备

将升华硫(S)和科琴黑(KB)以质量比2:1研磨混合。再将混合物置于氩气的密封容器内,在马弗炉中以5℃/min加热至155℃,并恒温8 h,得到KB/S正极材料。最后KB/S与Super P(导电剂)和PVDF(粘结剂)以质量比8:1:1混合,用NMP作为溶剂,通过研磨制得正极浆料并刮涂在铝箔上,60℃烘干12 h。最终所得即为KB/S正极。

1.3 材料表征和电化学测试

利用JEM-7001F型场发射扫描电子显微镜(SEM)对样品进行形貌观察,并用附带的X射线能谱仪(EDS)进行元素组成分析;利用AXIS VLTADLD型X射线光电子能谱(XPS)和Elementar Vario EL cube型元素分析仪进行元素组成分析;利用RTS-9型四探针测试仪测量导电性;通过DX-2700型X射线衍射仪(XRD)进行结构表征;以ASAP 2020型N₂物理吸附仪进行测试并计算比表面积和孔体积。

扣式电池在氩气保护下于手套箱中进行组装,KB/S片和Li金属片分别作为正负极。电解液为1.0 mol/L LiTFSI/[V(DOL):V(DME)=1:1],以0.1 mol/L LiNO₃作为添加剂。

通过电池测试系统(CT2001A)测试电池的恒流充放电性能,电压范围为1.7~2.8 V。利用电化学工作站(CHI760D)进行循环伏安测试,以0.1 mV/s速率在1.7~2.8 V区间进行扫描;电化学工作站(AUTOLAB 302N)在频率范围10⁵~10⁻² Hz下以5 mV的振幅进行交流阻抗测试。

2 结果与讨论

2.1 材料形貌结构与组成

高还原氧化石墨烯粉体、PP隔膜和HrGO隔膜的SEM图如图1所示。

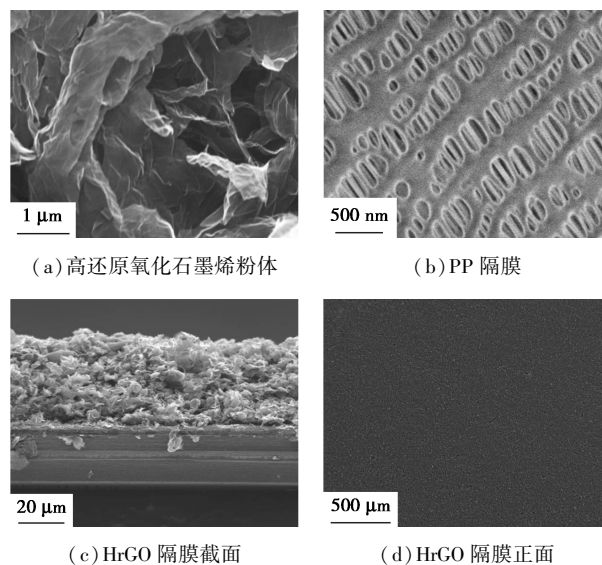


图1 高还原氧化石墨烯粉体、PP隔膜、HrGO隔膜截面和正面的SEM图

从图1(a)中可以看出,所制备的材料为片层的高还原氧化石墨烯。在锂硫电池中,由于PP隔膜

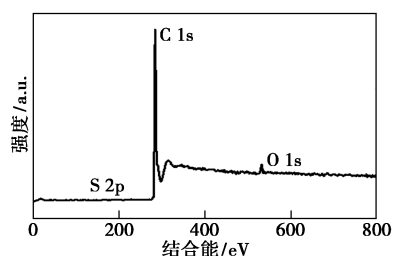
具有一定的孔隙结构[如图 1(b)所示],虽然可让锂离子快速通过,但也造成多硫化物自由地进行扩散运动,从而形成穿梭效应。对 PP 隔膜表面进行改性可有效抑制这种跨膜扩散。由图 1(c)和图 1(d)中可以看出,高还原氧化石墨烯层层搭接在一起,从而在 PP 隔膜表面形成连续阻挡层。这样 HrGO 隔膜不仅能对多硫化物进行空间位阻和物理吸附作用,而且作为上层集流体可将捕获的多硫化物再次利用。

为了表明高还原氧化石墨烯的还原程度,对样品进行 XPS 测试,分析其元素组成和价键情况,如图 2 和表 1 所示。在图 2(a)的 XPS 全谱中存在着明显的 C 1s 峰,同时还有微弱的 O 1s 峰和微乎其

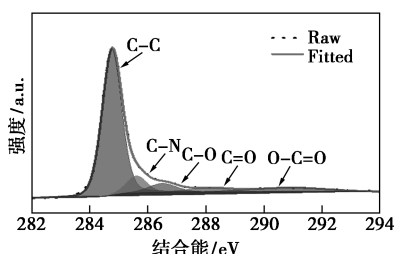
微的 S 2p 峰^[11,15]。由图 2(b)可知,C 原子除了在 284.8 eV 处有着强烈的 C—C 分峰,在 285.6 eV 处存在 C—N 分峰外,在 286.5、288.1 eV 和 290.9 eV 的分峰分别对应 C—O、C=O 和 O—C=O。为了进一步了解 O 原子的成键情况,在 O 1s 的分峰谱[图 2(c)所示]中,O 原子在 532.4 eV 和 533.6 eV 处的 C—O—C 和 C—O—H 分峰,对应于 C 1s 的分峰谱中 C—O 分峰,并大部分以 C—O—C 存在;而且在 530.2 eV 和 534.8 eV 的分峰所对应的 C=O 和 O—C=O 有相同分峰对应。由于在制备过程中残留极少量 S,使在 S 2p 的分峰谱[如图 2(d)]中 164.1 eV 和 168.4 eV 处表现出了分峰,分别代表了 C—S 和硫代硫酸盐。由表 1 中可以看出,经过 2 800℃ 高温还原之后,C 元素的质量分数高达 96.11%,而 O 元素的质量分数仅剩 1.87%,说明形成了超高还原度的氧化石墨烯。

表 1 HrGO 的元素分析和电导率

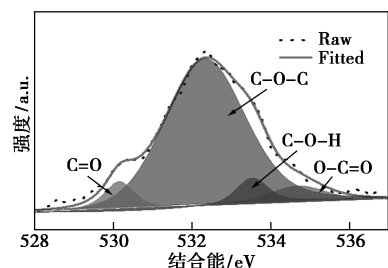
样品	w(C)/ %	w(H)/ %	w(N)/ %	w(O)/ %	w(S)/ %	电导率/ (S·cm ⁻¹)
HrGO	96.11	0.19	0.47	1.87	0.01	3.33



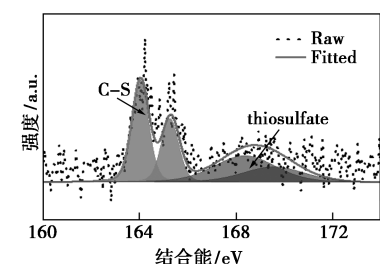
(a) XPS 全谱图



(b) C 1s 分峰谱



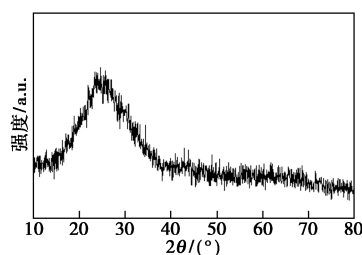
(c) O 1s 分峰谱



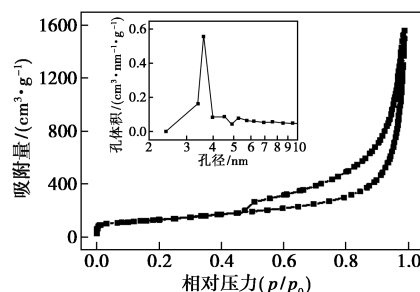
(d) S 2p 分峰谱

图 2 高还原氧化石墨烯的 XPS 谱图

高还原氧化石墨烯的 XRD 谱图及 N₂ 吸脱附等温曲线见图 3。



(a) XRD 图



(b) N₂ 吸脱附等温曲线

图 3 高还原氧化石墨烯的 XRD 谱图及 N₂ 吸脱附等温曲线(插图为孔径分布图)

从图 3(a)中可以看出,原来在 2θ 为 11°左右的氧化石墨烯(001)晶面衍射峰基本消失,而在 2θ 为

25°附近出现了1个宽且强度不大的衍射峰,为石墨烯(002)晶面,说明得到了高还原度的片层剥离的氧化石墨烯。

从图3(b)中可以看出,在 p/p_0 0.5~1.0处存在明显的 H_3 型滞后环,呈经典的介孔IV型等温曲线。从图3(b)的插图中可以看出,孔主要是2~10 nm的小介孔,可以为多硫化物的吸附提供容纳空间。通过BET法计算得到样品的比表面积达462.8 m^2/g ,孔体积由BJH法估算为2.42 cm^3/g 。高还原氧化石墨烯具有高比表面积和大孔容,可以充分地吸附和容纳多硫化物,并提高硫的利用率。

2.2 电化学性能

PP隔膜和HrGO隔膜的锂硫电池CV曲线如图4所示。

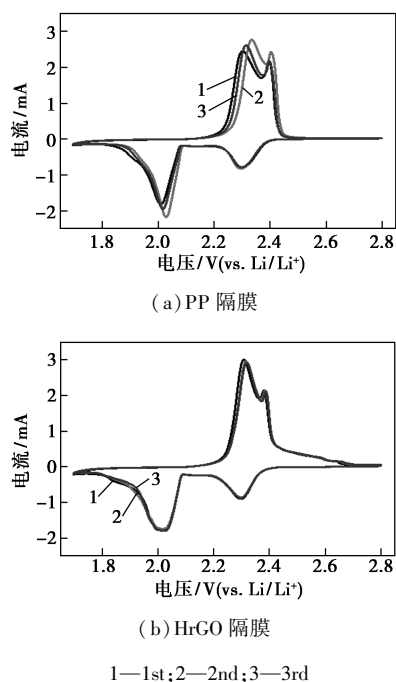


图4 PP隔膜和HrGO隔膜的锂硫电池CV曲线

由图4可以看出,2个CV曲线在2.3 V和2.0 V处都存在2个明显的还原峰,分别对应 S_8 转化成长链的可溶性多硫化物(Li_2S_x , $4 \leq x \leq 8$)和进一步还原为短链的不溶性 Li_2S_2 和 Li_2S ;在2.3 V和2.4 V处有2个连续的氧化峰,代表 Li_2S_2 和 Li_2S 连续氧化生成 Li_2S_x ($4 \leq x \leq 8$),最终形成 S_8 [2]。与PP隔膜相比,在HrGO隔膜的CV图中,初始3个周期的氧化和还原峰几乎重合,表明具有高的电化学可逆性和卓越的循环稳定性。

在不同电流下PP和HrGO隔膜的锂硫电池循环稳定性如图5所示。

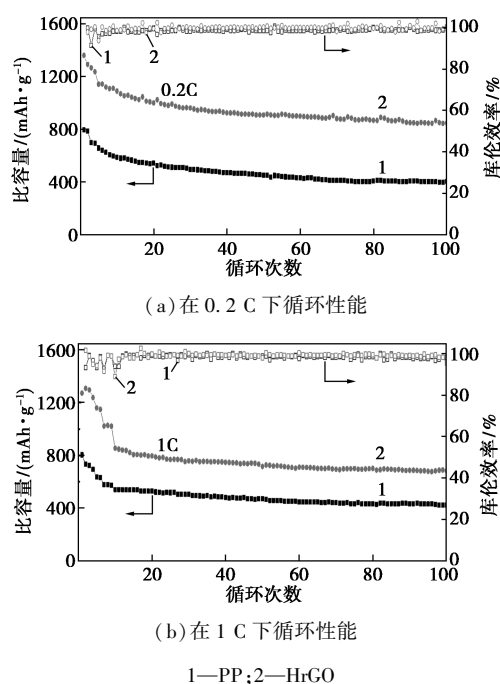


图5 PP和HrGO隔膜的锂硫电池在0.2 C和1 C下循环性能

从图5(a)中可以看出,在0.2 C下,HrGO隔膜的首次放电比容量为1143.2 mAh/g ,在96次循环后放电比容量仍然保持有848.8 mAh/g ,容量保持率达到了74.25%;而PP隔膜的初始放电比容量为658.3 mAh/g ,在循环后仅剩405.5 mAh/g ,容量保持率只有61.60%。此外,由图5(b)可以看出,在1 C下,HrGO隔膜具有854.7 mAh/g 的初始比容量,并且在100次循环后仍保持683.0 mAh/g 的比容量。结果表明,HrGO隔膜不仅可以极大地提高电池的初始比容量,而且由于石墨烯层层搭接而成的结构可对多硫化物形成空间位阻,同时其高比表面积和大孔容能物理吸附多硫化物使其呈现出优异的循环稳定性。

PP和HrGO隔膜的锂硫电池的电化学性能如图6所示。

由图6(a)中可以看出,在2 C下,PP隔膜的比容量只有180.7 mAh/g ,但是HrGO隔膜达626.1 mAh/g 。由图6(b)中可以看出,高频区的半圆与离子迁移阻抗 R_{im} 有关;中频区的半圆则与电荷转移阻抗 R_{ct} 相对应 [13,16]。经过拟合,PP隔膜的 R_{im} 和 R_{ct} 分别为19.4 Ω 和10.6 Ω ;HrGO隔膜的 R_{im} 和 R_{ct} 则分别为23.0 Ω 和2.4 Ω 。表明虽然高还原氧化石墨烯会使 R_{im} 稍微增大,但是由于其高导电性(表1),使得 R_{ct} 显著减小,有利于电荷的快速转移。由

图 6(c)和图 6(d)中可以看出,PP 隔膜的放电平台随着电流的不断增大而快速下降,最后在 2 C 时几乎消失;而 HrGO 隔膜的放电平台仅呈现出轻微下降。这是由于高还原氧化石墨烯的高导电性,提高了电池反应动力学,并减弱了其极化现象,从而使 HrGO 隔膜在大电流下仍有较好的性能。

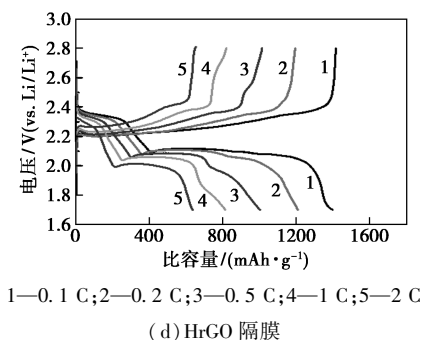
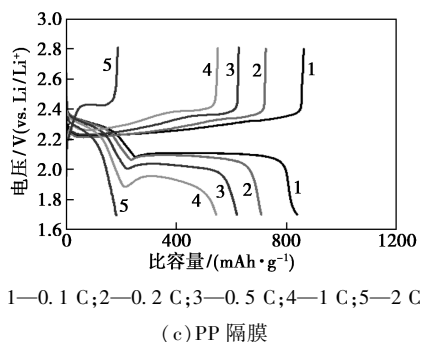
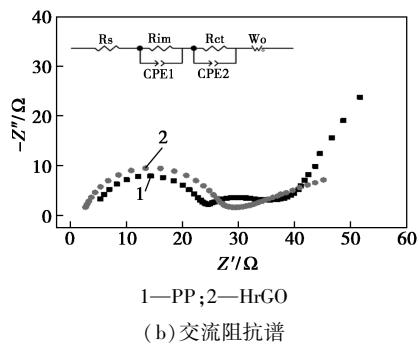
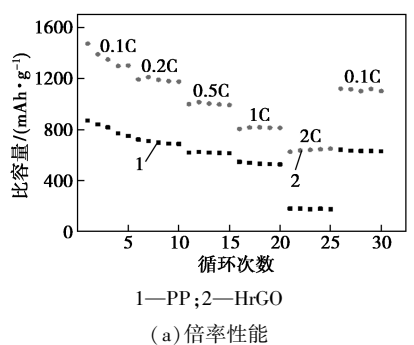


图 6 PP 和 HrGO 隔膜的锂硫电池倍率性能、交流阻抗谱和充放电曲线

通过 EDS 能谱表征 HrGO 隔膜在 0.2 C 下 100

次循环后 C、O、S 的元素分布,结果如图 7 所示。

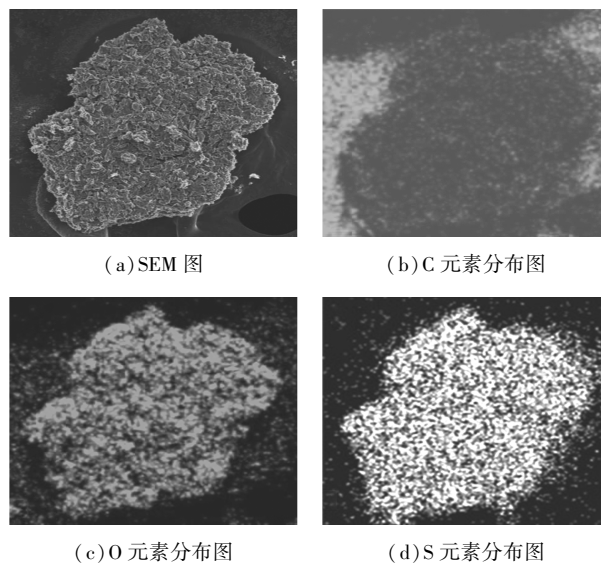


图 7 高还原氧化石墨烯在 0.2 C 下 100 次循环后的 SEM 图及元素分布图

由图 7(b)中可以看出,HrGO 隔膜只表现出较弱的 C 元素信号,这是由于 C 被捕获的多硫化物转化成的连多硫酸盐所覆盖,从而表现出强烈的 S 和 O 元素信号[如图 7(c)和图 7(d)所示]。表明高还原氧化石墨烯可有效地阻挡和吸附多硫化物,抑制穿梭效应的形成。

3 结论

通过高温热还原法制备得到超高还原度氧化石墨烯,并通过真空抽滤法制备得到高还原度氧化石墨烯改性隔膜,在锂硫电池中表现出优异的长循环稳定性和高倍率性能。采用 HrGO 隔膜的锂硫电池,由于高还原氧化石墨烯片组成连续的阻挡层,可通过空间位阻和物理吸附多硫化物,从而抑制其形成穿梭效应;其高导电性有利于电荷的转移。使电池在 0.2 C 下,初始比容量达到了 1 143.2 mAh/g,前 100 次容量保持率为 74.25%;在大电流 2 C 下仍有 626.1 mAh/g 的比容量。HrGO 隔膜应用于锂硫电池中,不仅可提高比容量,而且具有高功率密度,对产业化有重要的价值。

参考文献

[1] Seh Z W, Sun Y, Zhang Q, *et al.* Designing high-energy lithium-sulfur batteries[J]. *Chem Soc Rev*, 2016, 45: 5605-5634.
[2] He Y, Chang Z, Wu S, *et al.* Effective strategies for long-cycle life lithium-sulfur batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6: 6155-6182.

(下转第 160 页)

- [11] Wang X Q, Wang F, Bo C, *et al.* Promotion of phenol photodecomposition and the corresponding decomposition mechanism over g-C₃N₄/TiO₂ nanocomposites [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 453: 320–329.
- [12] Nie N, Zhang L, Fu J, *et al.* Self-assembled hierarchical direct Z-scheme g-C₃N₄/ZnO microspheres with enhanced photocatalytic CO₂ reduction performance [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 441: 12–22.
- [13] Hummers J R W S, Offeman R E. Preparation of graphitic oxide [J]. *J Am Chem Soc*, 1958, 80(6): 1339–1339.
- [14] Mishra A, Mehta A, Kainth S, *et al.* A comparative study on the effect of different precursors for synthesis and efficient photocatalytic activity of g-C₃N₄/TiO₂/bentonite nanocomposites [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(18): 13126–13142.
- [15] Huang M, Yu J, Hu Q, *et al.* Preparation and enhanced photocatalytic activity of carbon nitride/titania(001 vs 101 facets)/reduced graphene oxide (g-C₃N₄/TiO₂/rGO) hybrids under visible light [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 1084–1093.
- [16] Kumar S, Surendar T, Baruah A, *et al.* Synthesis of a novel and stable g-C₃N₄-Ag₃PO₄ hybrid nanocomposite photocatalyst and study of the photocatalytic activity under visible light irradiation [J]. *Mater Chem*, 2013, A1: 5333–5340.
- [17] Wu F, Li X, Liu W, *et al.* Highly enhanced photocatalytic degradation of methylene blue over the indirect all-solid-state Z-scheme g-C₃N₄-RGO-TiO₂, nanoheterojunctions [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 405: 60–70.
- [18] Su F B, Zhao X S, Wang Y, *et al.* Synthesis of graphitic ordered macro porous carbon with a three-dimensional interconnected pore structure for electrochemical applications [J]. *Journal of Physics Chemistry B*, 2005, 109: 20200–20206.
- [19] Zhao D, Sheng G, Chen C, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue under visible irradiation on graphene @ TiO₂ dyade structure [J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2012, 111(2): 303–308.
- [20] Boonprakob N, Wetchakun N, Phanichphant S, *et al.* Enhanced visible-light photocatalytic activity of g-C₃N₄/TiO₂ films [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2014, 417(3): 402–409.
- [21] Zhou X, Peng F, Wang H, *et al.* Carbon nitride polymer sensitized TiO₂ nanotube arrays with enhanced visible light photoelectrochemical and photocatalytic performance [J]. *Chemical Communications*, 2011, 47(37): 10323–10325.
- [22] Zhang J, Chen Y, Wang X. Two-dimensional covalent carbon nitride nanosheets: Synthesis, functionalization, and applications [J]. *Energy Environmental Science*, 2015, 8(11): 3092–3108.
- [23] Zheng D, Pang C, Wang X. The function-led design of Z-scheme photocatalytic systems based on hollow carbon nitride semiconductors [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(98): 17467–17470.
- [24] Chai B, Peng T, Mao J, *et al.* Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-Pt-TiO₂ nanocomposite as an efficient photocatalyst for hydrogen production under visible light irradiation [J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2012, 14: 16745–16752.
- [25] Hafeez H Y, Lakhera S K, Bellamkonda S, *et al.* Construction of ternary hybrid layered reduced graphene oxide supported g-C₃N₄-TiO₂ nanocomposite and its photocatalytic hydrogen production activity [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(8): 3892–3904.
- [26] Dutta S, De S, Patra A K, *et al.* Microwave assisted rapid conversion of carbohydrates into 5-hydroxymethylfurfural catalyzed by mesoporous TiO₂ nanoparticles [J]. *Applied Catalysis A General*, 2011, 409(23): 133–139.
- [27] Nie Guangxia. Preparation of 5-hydroxymethylfurfural by dehydration of fructose by solid acid of graphite derivative [D]. Tianjin; Tianjin University of Technology, 2015. ■

(上接第 154 页)

- [3] Liu M, Qin X, He Y B, *et al.* Recent innovative configurations in high-energy lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5: 5222–5234.
- [4] Manthiram A, Fu Y, Chung S H, *et al.* Rechargeable lithium-sulfur batteries [J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114(23): 11751–11787.
- [5] Zhang L, Wang Y, Niu Z, *et al.* Advanced nanostructured carbon-based materials for rechargeable lithium-sulfur batteries [J]. *Carbon*, 2019, 141: 400–416.
- [6] Wang D W, Zeng Q, Zhou G, *et al.* Carbon-sulfur composites for Li-S batteries: Status and prospects [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(33): 9382.
- [7] Shaibani M, Hollenkamp A F, Hill M R, *et al.* Permselective membranes in lithium-sulfur batteries [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2017, 16: 31–38.
- [8] Zhang Z, Lai Y, Zhang Z, *et al.* A functional carbon layer-coated separator for high performance lithium sulfur batteries [J]. *Solid State Ionics*, 2015, 278: 166–171.
- [9] Kim H M, Hwang J Y, Manthiram A, *et al.* High-performance lithium-sulfur batteries with a self-assembled MWCNT interlayer and a robust electrode-electrolyte interface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8: 983–987.
- [10] Lee D K, Ahn C W, Jeon H J. Web-structured graphitic carbon fiber felt as an interlayer for rechargeable lithium-sulfur batteries with highly improved cycling performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 360: 559–568.
- [11] Zhang L, Wan F, Wang X, *et al.* Dual-functional graphene carbon as polysulfide trapper for high performance lithium sulfur batteries [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10: 5594–5602.
- [12] Han P, Manthiram A. Boron- and nitrogen-doped reduced graphene oxide coated separators for high-performance Li-S batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 369: 87–94.
- [13] Huang J Q, Zhuang T Z, Zhang Q, *et al.* Permselective graphene oxide membrane for highly stable and anti-self-discharge lithium-sulfur batteries [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(3): 3002–3011.
- [14] Zhu P, Zang J, Zhu J, *et al.* Effect of reduced graphene oxide reduction degree on the performance of polysulfide rejection in lithium-sulfur batteries [J]. *Carbon*, 2018, 126: 594–600.
- [15] Qu H, Zhang J, Du A, *et al.* Multifunctional sandwich-structured electrolyte for high-performance lithium-sulfur batteries [J]. *Advanced Science*, 2018, 5: 1700503.
- [16] He Y, Chang Z, Wu S, *et al.* Effective strategies for long-cycle life lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 10: 981–986. ■