



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109360926 B

(45)授权公告日 2020.03.24

(21)申请号 201811314352.9

(22)申请日 2018.11.06

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109360926 A

(43)申请公布日 2019.02.19

(73)专利权人 长沙矿冶研究院有限责任公司
地址 410000 湖南省长沙市岳麓区麓山南路966号

(72)发明人 庞胜利 朱盟 吴潇 沈湘黔
覃事彪 黎天保 谭金黎 王力
王艳华 陈涛

(74)专利代理机构 长沙朕扬知识产权代理事务所(普通合伙) 43213
代理人 毛志杰

(51)Int.Cl.

H01M 2/16(2006.01)

H01M 2/14(2006.01)

H01M 10/052(2010.01)

(56)对比文件

CN 107004828 A,2017.08.01,

WO 2018034501 A1,2018.02.22,

CN 107275551 A,2017.10.20,

CN 106299214 A,2017.01.04,

审查员 钱玉萍

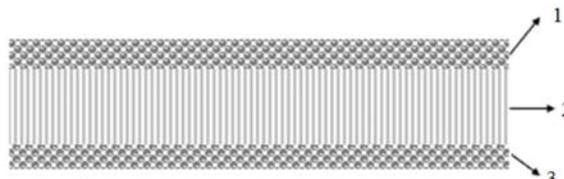
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种锂硫电池用功能化隔膜及其制备方法、
锂硫电池

(57)摘要

本发明提供了一种锂硫电池用功能化隔膜,该功能化隔膜依次包括正极侧功能层、中间基膜层和负极侧功能层;正极侧功能层和负极侧功能层均由包括内核和外壳的核壳结构材料堆积而成,其中,内核为高导电性碳材料,外壳主要由高分子聚合物组成;外壳的表面还吸附有功能化修饰基团;正极侧功能层和负极侧功能层的厚度均为0.5-10 μm。本发明的功能化隔膜,能够有效抑制聚硫锂向负极侧穿梭的现象,有效提高锂硫电池体系中硫的利用率,提高锂硫电池的循环性能、电池寿命和工作稳定性。本发明还提供了该功能化隔膜的制备方法,以及一种由该功能化隔膜制得的具有良好电化学性能的锂硫电池。



1. 一种功能化隔膜的制备方法,其特征在于,所述功能化隔膜依次包括正极侧功能层、中间基膜层和负极侧功能层;所述正极侧功能层和负极侧功能层均由包括内核和外壳的核壳结构材料堆积而成,其中,内核为高导电性碳材料,外壳主要由高分子聚合物组成;所述外壳的表面还吸附有功能化修饰基团;所述正极侧功能层和负极侧功能层的厚度均为 $0.5-10\mu\text{m}$;所述制备方法包括以下步骤:

(1) 将高分子聚合物前驱体、 CuSO_4 和碳材料加入到缓冲液中,然后进行搅拌,搅拌均匀后向其中加入 H_2O_2 ,继续搅拌均匀,得到混合浆料;

(2) 将步骤(1)后制得的混合浆料涂布在中间基膜的一侧,并将涂布好的隔膜烘干;

(3) 将步骤(1)后制备得到的混合浆料涂布在中间基膜的另一侧,或者先按照步骤(1)的方法制备新的混合浆料,再将新的混合浆料涂布在中间基膜的另一侧,随后将涂布好的隔膜烘干;

(4) 将步骤(3)后的隔膜用去离子水清洗,然后放入表面修饰剂溶液中浸泡,之后进行鼓风干燥,得到功能化隔膜。

2. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,所述高分子聚合物前驱体为邻苯二酚与多胺的混合物或者多巴胺单体,所述多胺为二乙烯三胺、三乙烯四胺、四乙烯五胺中的至少一种,所述高分子聚合物前驱体的加入量为缓冲液质量的 $0.01\text{ wt.}\%-1\text{ wt.}\%$ 。

3. 根据权利要求1或2所述的制备方法,其特征在于,所述表面修饰剂为聚苯乙烯磺酸、聚苯乙烯磺酸钠、十二烷基磺酸钠中的至少一种,所述表面修饰剂溶液的浓度为 $5-100\text{ mmol/L}$ 。

4. 根据权利要求1或2所述的制备方法,其特征在于,所述碳材料为科琴黑、Super-p、乙炔黑、碳纳米管、石墨烯中的至少一种,所述碳材料的加入量为缓冲液质量的 $0.1\text{ wt.}\%-10\text{ wt.}\%$ 。

5. 根据权利要求1或2所述的制备方法,其特征在于,所述 CuSO_4 的加入量为缓冲液质量的 $8.0\times 10^{-5}\text{ wt.}\%-1.6\times 10^{-3}\text{ wt.}\%$;所述 H_2O_2 的加入量为缓冲液质量的 $6.8\times 10^{-3}\text{ wt.}\%-1.4\times 10^{-1}\text{ wt.}\%$,加入所述 H_2O_2 后搅拌 $10-120\text{ min}$ 。

6. 根据权利要求1或2所述的制备方法,其特征在于,所述缓冲液为 Tris-HCl缓冲液,所述Tris-HCl缓冲液的pH值为 $7-10$,浓度为 $5-100\text{ mmol/L}$ 。

7. 根据权利要求1所述的制备方法,其特征在于,所述中间基膜为多孔聚合物隔膜或者表面涂覆有陶瓷涂层的陶瓷隔膜,所述多孔聚合物隔膜为PE或PP膜,所述陶瓷涂层为氧化铝涂层、硫酸钡涂层、 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ 涂层或者玻璃颗粒涂层;所述中间基膜的孔隙尺寸为 $0.01-1\mu\text{m}$,厚度为 $5-30\mu\text{m}$ 。

8. 根据权利要求1或2所述的制备方法,其特征在于,所述步骤(2)和步骤(3)中干燥的温度为 $25-80^\circ\text{C}$,时间为 $0.5-30\text{ min}$;所述步骤(4)中鼓风干燥的温度为 $25-90^\circ\text{C}$,时间为 $0.5-30\text{ min}$ 。

9. 一种锂硫电池,其特征在于,所述锂硫电池中包括根据权利要求1-8中任一项所述的制备方法制备得到的功能化隔膜。

一种锂硫电池用功能化隔膜及其制备方法、锂硫电池

技术领域

[0001] 本发明属于电池材料及其制备技术领域,尤其涉及一种锂硫电池用功能化隔膜及其制备方法,还涉及一种具有该功能化隔膜的锂硫电池。

背景技术

[0002] 随着现代经济的高速发展,日常生活中人们对能源的需求日益增加。锂硫电池作为具有非常高能量密度的二次电池,具有环境友好、生产成本低、回收成本低等优点,已经成为近来研究的热点,是一种有良好的应用前景的锂离子电池。

[0003] 但是锂硫电池离实际应用仍有很大的距离,其存在电池的循环性能差、倍率性能差以及安全稳定性能较差等问题,这些问题与锂硫电池所使用的隔膜自身固有的特性密切相关。传统用锂电隔膜的孔径结构为微米或亚微米尺度,其不能够有效阻止聚硫锂的穿梭,造成电池的循环性能下降;此外,隔膜的浸润性差,这会导致锂离子的传导电阻升高以及锂离子分布不均,造成电池倍率性能下降,同时负极还可能发生锂枝晶生长的问题;而且隔膜表层一般不导电,致使负极电荷分配不均和产生更多的“死锂”,降低了电池的循环性能,进一步加速锂枝晶的生长。针对以上问题,研究者们做了大量的隔膜改性实验,虽然说都在一定程度上提高了电池的循环性能以及倍率性能,但是仍存在电池稳定性差,容易产生“死硫”等问题。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是,克服以上背景技术中提到的不足和缺陷,提供一种锂硫电池用功能化隔膜,同时还提供该功能化隔膜的制备方法以及一种具有该功能化隔膜的锂硫电池;将该功能化隔膜应用于锂硫电池中能够提高锂硫电池的循环性能、倍率性能和安全性能,从而显著提高锂硫电池的寿命和使用稳定性。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提出的技术方案为:

[0006] 一种锂硫电池用功能化隔膜,所述功能化隔膜依次包括正极侧功能层、中间基膜层和负极侧功能层;所述正极侧功能层和负极侧功能层均由包括内核和外壳的核壳结构材料堆积而成,其中,内核为高导电性碳材料,外壳主要由带负电荷的、高粘附性的高分子聚合物组成;所述外壳的表面还吸附有功能化修饰基团;所述正极侧功能层和负极侧功能层的厚度均为0.5-10 μm 。

[0007] 作为一个总的发明构思,本发明还提供一种上述的功能化隔膜的制备方法,包括以下步骤:

[0008] (1) 将高分子聚合物前驱体、 CuSO_4 和碳材料加入到缓冲液中,然后进行搅拌,必须等搅拌均匀后再向其中加入触发剂 H_2O_2 以加快高分子材料间的聚合过程,继续搅拌均匀,得到混合浆料;

[0009] (2) 将步骤(1)后制得的混合浆料涂布在中间基膜的一侧,并将涂布好的隔膜烘干;

[0010] (3) 将步骤(1)后制备得到的混合浆料涂布在中间基膜的另一侧,或者先按照步骤(1)的方法制备新的混合浆料,再将新的混合浆料涂布在中间基膜的另一侧,随后将涂布好的隔膜烘干;

[0011] (4) 将步骤(3)后的隔膜用去离子水清洗,然后放入表面修饰剂溶液中浸泡,之后进行鼓风干燥,得到功能化隔膜。

[0012] 上述的制备方法,优选的,所述高分子聚合物前驱体为邻苯二酚与多胺的混合物或者多巴胺单体,所述多胺为二乙烯三胺、三乙烯四胺、四乙烯五胺中的至少一种,所述高分子聚合物前驱体的加入量为缓冲液质量的0.01wt.%-1wt.%。本发明中,多巴胺单体聚合而成的聚多巴胺高分子聚合物具有优异的粘结力,以多巴胺单体作为高分子聚合物前驱体应用于功能化隔膜的制备中,能够确保功能层的粘结效果,而且它还带有负电荷,能够抑制具有电负性的多硫化物通过隔膜向负极的扩散。邻苯二酚与多胺混合后生成的也是一种高分子聚合物,与聚多巴胺具有类似的性能,但以邻苯二酚与多胺的混合物作为高分子聚合物前驱体的价格优势更为明显,成本仅为多巴胺单体的10%以下。

[0013] 上述的制备方法,优选的,所述表面修饰剂为聚苯乙烯磺酸、聚苯乙烯磺酸钠、十二烷基磺酸钠中的至少一种,所述表面修饰剂溶液的浓度为5-100mmol/L。

[0014] 上述的制备方法,优选的,所述碳材料为科琴黑、Super-p、乙炔黑、碳纳米管、石墨烯中的至少一种,所述碳材料的加入量为缓冲液质量的0.1wt.%-10wt.%。本发明的方法,制备功能化隔膜的过程中加入碳材料,一方面,碳材料具有良好的导电性,使制备的功能层具有良好的电子电导性能,从而起到二次集流体和促进多硫化物的氧化还原反应的作用;另一方面,碳材料为聚合物包覆层及其表面修饰层提供了骨架,使整个功能层具有较大的带有负电荷的表面,该表面通过静电排斥阻止多硫化物向负极的扩散,同时不会形成致密的膜,避免了Li⁺穿过困难的问题,最终形成多硫化物和Li⁺的选择透过层。

[0015] 上述的制备方法,优选的,所述CuSO₄的加入量为缓冲液质量的 8.0×10^{-5} wt.%- 1.6×10^{-3} wt.%;所述H₂O₂的加入量为缓冲液质量的 6.8×10^{-3} wt.%- 1.4×10^{-1} wt.%,加入所述H₂O₂后搅拌10-120min。

[0016] 上述的制备方法,优选的,所述缓冲液为Tris-HCl,所述Tris-HCl缓冲液的pH值为7-10,浓度为5-100mmol/L。

[0017] 上述的制备方法,优选的,所述中间基膜为多孔聚合物隔膜或者表面涂覆有陶瓷涂层的陶瓷隔膜,所述多孔聚合物隔膜为PE或PP膜,所述陶瓷涂层具有锂离子电导特性,具体为氧化铝涂层、硫酸钡涂层、Li₇La₃Zr₂O₁₂涂层或者玻璃颗粒涂层;所述中间基膜的孔隙尺寸为0.01-1μm,厚度为5-30μm。

[0018] 上述的制备方法,优选的,所述步骤(2)和步骤(3)中干燥的温度为25-80℃,时间为0.5-30min;所述步骤(4)中鼓风干燥的温度为25-90℃,时间为0.5-30min。

[0019] 上述的制备方法,优选的,所述步骤(1)中搅拌在脱泡搅拌机中进行。

[0020] 作为一个总的发明构思,本发明还提供一种锂硫电池,所述锂硫电池中包括上述的功能化隔膜或者根据上述的制备方法制备得到的功能化隔膜。

[0021] 与现有技术相比,本发明的优点在于:

[0022] (1) 本发明的功能化隔膜,正、负极侧功能层中含有高分子聚合物以及功能化修饰基团,而这两者中含有大量的负电荷,使得功能层形成一个很强的负电荷层,能够通过空间

静电排斥作用阻止锂硫电池正极溶出的多硫化物向负极方向扩散,从而有效抑制聚硫锂向负极侧穿梭的现象,提高锂硫电池的循环性能。

[0023] (2) 本发明的功能化隔膜,正、负极侧功能层内部颗粒之间以及功能层与中间基膜之间的粘结均靠壳层内的高粘性高分子聚合物实现,避免了粘结剂的使用,从而避免了现有粘结剂如La132由于不具有锂离子传导特性,在功能层中会堵塞 Li^+ 传输通道,导致隔膜 Li^+ 传输性能下降等问题;且本发明所采用的该类高分子聚合物具有非常强的粘性,能够确保功能层的粘附效果。

[0024] (3) 本发明的功能化隔膜,中间基膜层的孔隙尺寸为微米或亚微米尺度,而两侧的改进功能层则具有更小的孔径,孔径均为1-800nm,能够有效抑制多硫化物的穿梭。

[0025] (4) 本发明的功能化隔膜,在中间基膜层上形成的负极侧功能层具有导电性,能够有效提高负极金属锂表层电荷分布的均匀性,达到抑制电荷聚集效应引起的锂枝晶生长的目的,实现电池寿命和工作稳定性的显著提高。

[0026] (5) 本发明的功能化隔膜,在中间基膜层上形成的正极侧功能层为电子电导层,可以使电池工作过程中形成的“死硫”重新参与电化学反应,从而有效提高锂硫电池体系中硫的利用率。

[0027] (6) 本发明的功能化隔膜的制备方法,工艺简单、操作便捷、对环境友好、适于工业化生产。

[0028] (7) 采用本发明的功能化隔膜制备得到的锂硫电池,具有较高的初始放电比容量和良好的循环稳定性,具有良好的电化学性能。

附图说明

[0029] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0030] 图1是本发明实施例1中制备得到的锂硫电池用功能化隔膜的结构示意图;

[0031] 图2是本发明实施例1中双面涂覆有硫酸钡的陶瓷隔膜的表面的SEM图;

[0032] 图3是本发明实施例1中正极侧功能层表面的SEM图;

[0033] 图4是本发明实施例1中锂硫电池在0.1C充放电倍率下的首次充放电曲线(原始样:B- BaSO_4 ,隔膜改性后样品:M- BaSO_4);

[0034] 图5是本发明实施例1中锂硫电池在1C充放电倍率下的循环性能曲线(原始样:B- BaSO_4 ,隔膜改性后样品:M- BaSO_4);

[0035] 图6是本发明实施例2中PE隔膜的表面的SEM图;

[0036] 图7是本发明实施例2中锂硫电池在0.5C充放电倍率下的循环性能曲线。

[0037] 图例说明:

[0038] 1、正极侧功能层;2、中间基膜层;3、负极侧功能层。

具体实施方式

[0039] 为了便于理解本发明,下文将结合说明书附图和较佳的实施例对本文发明做更全

面、细致地描述,但本发明的保护范围并不限于以下具体实施例。

[0040] 除非另有定义,下文中所使用的所有专业术语与本领域技术人员通常理解含义相同。本文中所使用的专业术语只是为了描述具体实施例的目的,并不是旨在限制本发明的保护范围。

[0041] 除非另有特别说明,本发明中用到的各种原材料、试剂、仪器和设备等均可通过市场购买得到或者可通过现有方法制备得到。

[0042] 实施例1:

[0043] 一种本发明的锂硫电池用功能化隔膜,该功能化隔膜的结构示意图如图1所示,包括正极侧功能层1、负极侧功能层3和中间基膜层2,正极侧功能层和负极侧功能层均由包括内核和外壳的核壳结构材料堆积而成;其中,正极侧功能层的内核为科琴黑,外壳主要由聚多巴胺组成,外壳的表面还吸附有功能化修饰基团磺酸根,正极侧功能层的厚度为 $3\mu\text{m}$,孔径为 $20\text{--}500\text{nm}$;负极侧功能层的内核为碳纳米管,外壳主要由聚多巴胺组成,外壳的表面还吸附有功能化修饰基团磺酸根,正极侧功能层的厚度为 $1\mu\text{m}$,孔径为 $100\text{--}600\text{nm}$;

[0044] 一种本实施例的功能化隔膜的制备方法,包括以下步骤:

[0045] (1) 将占缓冲液质量 $0.5\text{wt.}\%$ 的多巴胺、 $1.2\times 10^{-3}\text{wt.}\%$ 的 CuSO_4 和 $4.0\text{wt.}\%$ 的科琴黑置于pH值为10、浓度为 25mmol/L 的Tris-HCl缓冲液中,混合均匀后得到混合物料,将混合物料加入脱泡搅拌机中进行搅拌,搅拌均匀后向再其中加入占缓冲液质量 $1.2\times 10^{-1}\text{wt.}\%$ 的 H_2O_2 ,继续搅拌 10min ,混合均匀后得到混合浆料;

[0046] (2) 将步骤(1)后制得的混合浆料涂布在双面涂覆有硫酸钡的陶瓷隔膜的一侧以制备正极侧功能层,刮刀高度设置为 $10\mu\text{m}$,然后将涂布好的隔膜烘干,烘干温度为 80°C ,时间为 5min ;双面涂覆有硫酸钡的陶瓷隔膜的孔隙尺寸为 $0.02\text{--}0.3\mu\text{m}$,厚度为 $5\mu\text{m}$,双面涂覆有硫酸钡的陶瓷隔膜的表面的SEM图如图2所示;

[0047] (3) 将占缓冲液质量 $0.1\text{wt.}\%$ 的多巴胺、 $8.0\times 10^{-4}\text{wt.}\%$ 的 CuSO_4 和 $1.0\text{wt.}\%$ 的碳纳米管置于pH值为8、浓度为 5mmol/L 的Tris-HCl缓冲液中,混合均匀后得到混合物料,将混合物料加入脱泡搅拌机中进行搅拌,搅拌均匀后向再其中加入占缓冲液质量 $6.8\times 10^{-2}\text{wt.}\%$ 的 H_2O_2 ,继续搅拌 20min ,混合均匀后得到混合浆料;

[0048] (4) 将步骤(3)后制备得到的混合浆料涂布在双面涂覆有硫酸钡的陶瓷隔膜的另一侧以制备负极侧功能层,刮刀高度设置为 $10\mu\text{m}$,然后将涂布好的隔膜烘干,烘干温度为 45°C ,时间为 20min ;

[0049] (5) 将步骤(4)后的隔膜用去离子水清洗,然后放入聚苯乙烯磺酸溶液中浸泡 20min ,之后进行鼓风干燥,鼓风干燥的温度为 80°C ,时间为 30min ,得到功能化隔膜。

[0050] 利用SEM技术对改性隔膜的厚度及表面形貌进行测试,利用恒流充放电技术对锂硫电池采用改性隔膜前后的电化学充放电性能进行测试。图3给出了所制备功能化隔膜正极侧功能层的SEM图;如图所示,核壳结构颗粒能够均匀的分布于正极侧功能层内,表明该方法能够形成均匀的功能层。

[0051] 将本实施例制备得到的功能化隔膜应用于锂硫电池中,其中锂硫电池正极硫的负载量为 $3\text{mg}/\text{cm}^2$,负极用的是商业化金属锂片,电解液组分为 1M LiTFSI 和 0.15M LiNO_3 溶于DOL/DME(1:1=v/v)中。组装在充满氩气的手套箱中进行,电池壳为CR2025。

[0052] 对本实施例中制得的锂硫电池的电化学性能进行测试。图4给出了使用功能化隔

膜前后锂硫电池在0.1C的充放电曲线,从图中可以看出,相对于未经改性处理的隔膜,本发明的功能化隔膜能将锂硫电池的初始放电比容量从845mAh/g提高到1080mAh/g。图5给出了使用功能化隔膜前后锂硫电池在1C的充放电曲线,从图中可以看出功能化隔膜能够显著提高锂硫电池在1C的循环性能。

[0053] 实施例2:

[0054] 一种本发明的锂硫电池用功能化隔膜,该功能化隔膜包括正极侧功能层、负极侧功能层和中间基膜层,正极侧功能层和负极侧功能层均由包括内核和外壳的核壳结构材料堆积而成;其中,正极侧功能层的内核为Super-P,外壳主要由聚四乙烯五胺组成,外壳的表面还吸附有功能化修饰基团磺酸根,正极侧功能层的厚度为4 μm ;负极侧功能层的内核为石墨烯,外壳主要由聚三乙烯四胺组成,外壳的表面还吸附有功能化修饰基团磺酸根,正极侧功能层的厚度为0.8 μm ;

[0055] 一种本实施例的功能化隔膜的制备方法,包括以下步骤:

[0056] (1) 将占缓冲液质量0.1wt.%的邻苯二酚、0.1wt.%的四乙烯五胺、 1.6×10^{-3} wt.%的 CuSO_4 和3.2wt.%的Super-P置于pH值为7、浓度为10mmol/L的Tris-HCl缓冲液中,混合均匀后得到混合物料,将混合物料加入脱泡搅拌机中进行搅拌,搅拌均匀后向再其中加入占缓冲液质量0.13wt.%的 H_2O_2 ,继续搅拌100min,混合均匀后得到混合浆料;

[0057] (2) 将步骤(1)后制得的混合浆料涂布在PE隔膜的一侧以制备正极侧功能层,刮刀高度设置为15 μm ,然后将涂布好的隔膜烘干,烘干温度为60 $^\circ\text{C}$,时间为20min;PE隔膜的孔隙尺寸为0.05-0.2 μm ,厚度为20 μm ,PE隔膜的表面的SEM图如图6所示;

[0058] (3) 将占缓冲液质量0.02wt.%的邻苯二酚、0.02wt.%的三乙烯四胺、 3.2×10^{-4} wt.%的 CuSO_4 和0.64wt.%的石墨烯置于pH值为7、浓度为5mmol/L的Tris-HCl缓冲液中,混合均匀后得到混合物料,将混合物料加入脱泡搅拌机中进行搅拌,搅拌均匀后向再其中加入占缓冲液质量0.02wt.%的 H_2O_2 ,继续搅拌120min,混合均匀后得到混合浆料;

[0059] (4) 将步骤(3)后制备得到的混合浆料涂布在PE隔膜的另一侧以制备负极侧功能层,刮刀高度设置为4 μm ,然后将涂布好的隔膜烘干,烘干温度为45 $^\circ\text{C}$,时间为0.5min;

[0060] (5) 将步骤(4)后的隔膜用去离子水清洗,然后放入聚苯乙烯磺酸溶液中浸泡40min,之后进行鼓风干燥,鼓风干燥的温度为60 $^\circ\text{C}$,时间为20min,得到功能化隔膜。

[0061] 将本实施例制备得到的功能化隔膜应用于锂硫电池中,其中锂硫电池正极硫的负载量为3mg/cm²,负极用的是商业化金属锂片,电解液组分为1M LiTFSI和0.15M LiNO_3 溶于DOL/DME (1:1=v/v)中。组装在充满氩气的手套箱中进行,电池壳为CR2025。

[0062] 对本实施例中制得的锂硫电池的电化学性能进行测试。图7给出了所制备锂硫电池在0.5C下的放电曲线,由图可知,相对于商业化隔膜,经过改性后的隔膜能够显著提高电池的初始放电比容量和循环稳定性。

[0063] 结合上述实施例1和实施例2可以看出,将通过本发明的方法制备得到的功能化隔膜应用于锂硫电池后,有助于锂硫电池电化学性能的提升,而电化学性能的提高源自于正负极功能层基于静电斥力作用对多硫化物向负极测穿梭过程的抑制、正极侧功能层电子电导对多硫化物氧化还原过程的优化以及负极侧功能层电子电导对于金属锂负极表面电荷分布的优化。

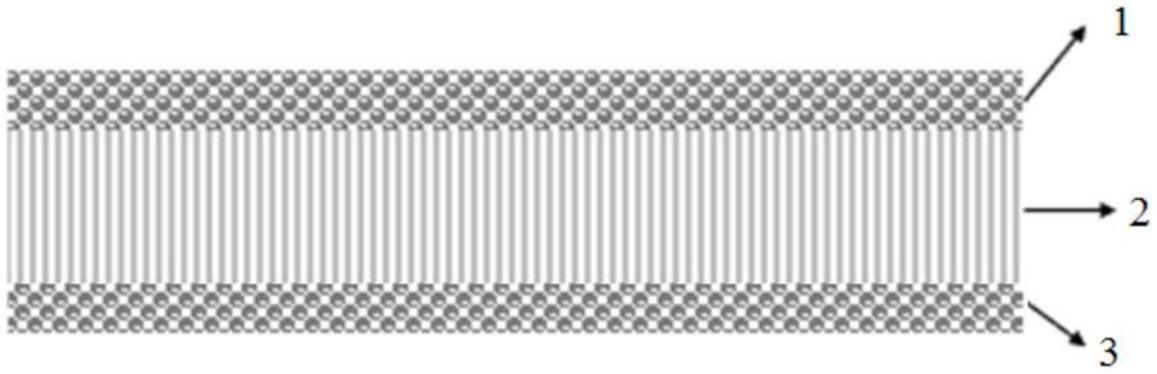


图1

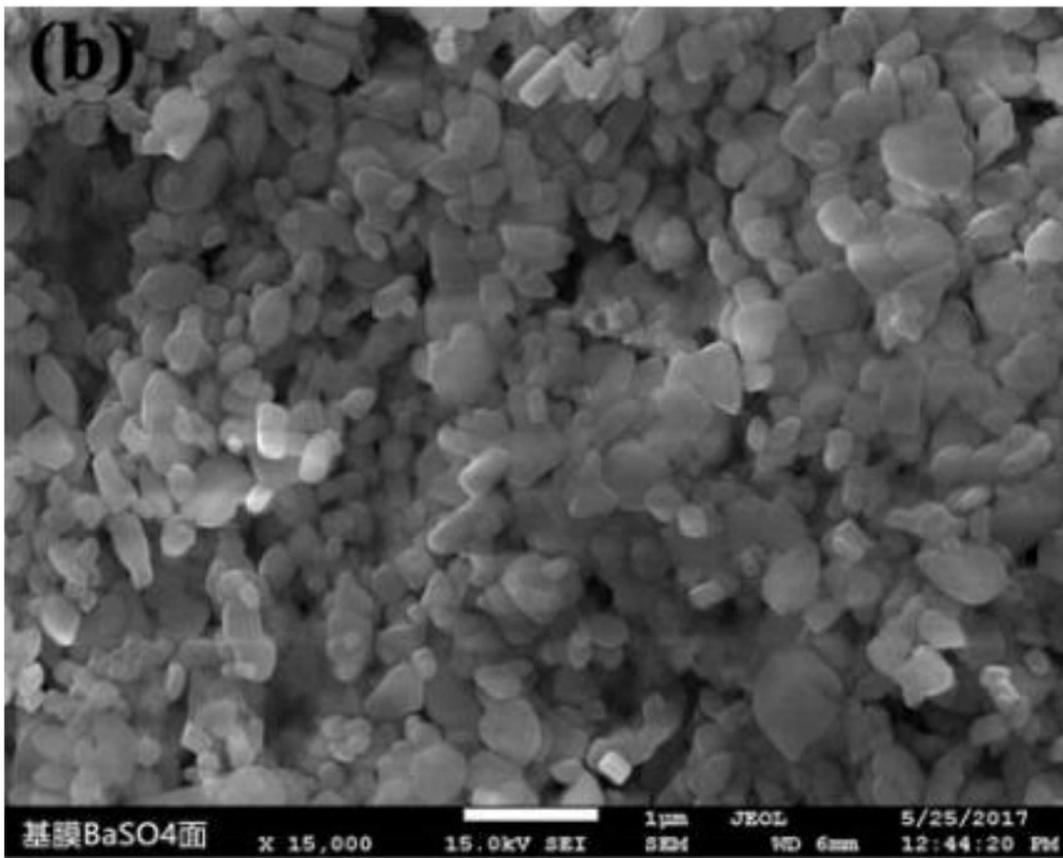


图2

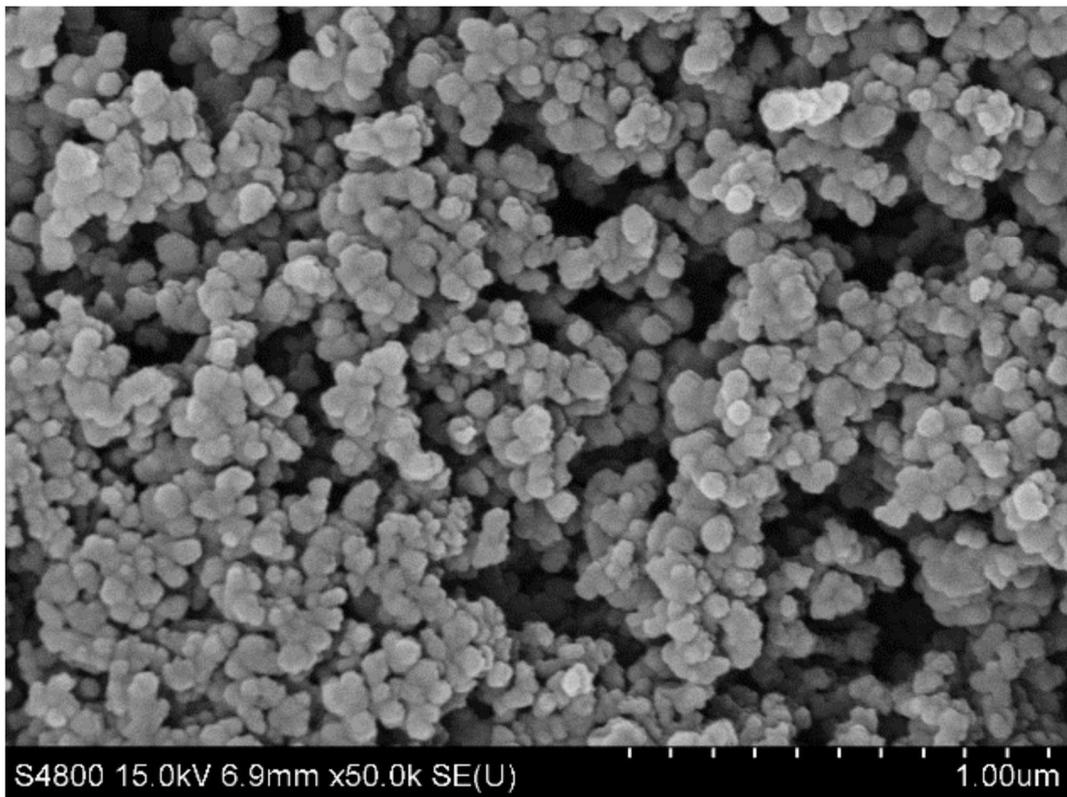


图3

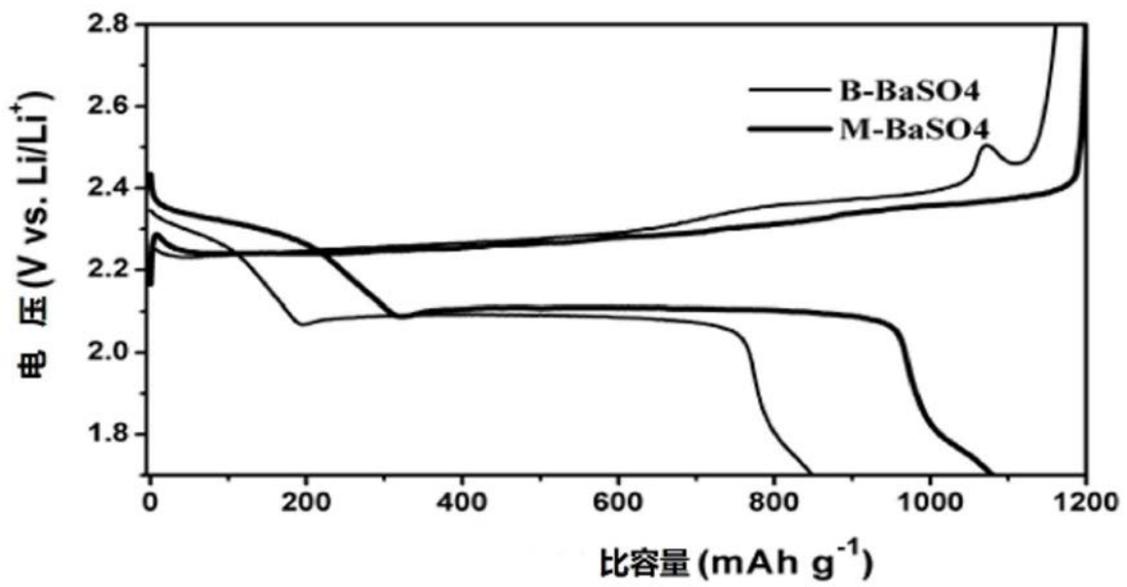


图4

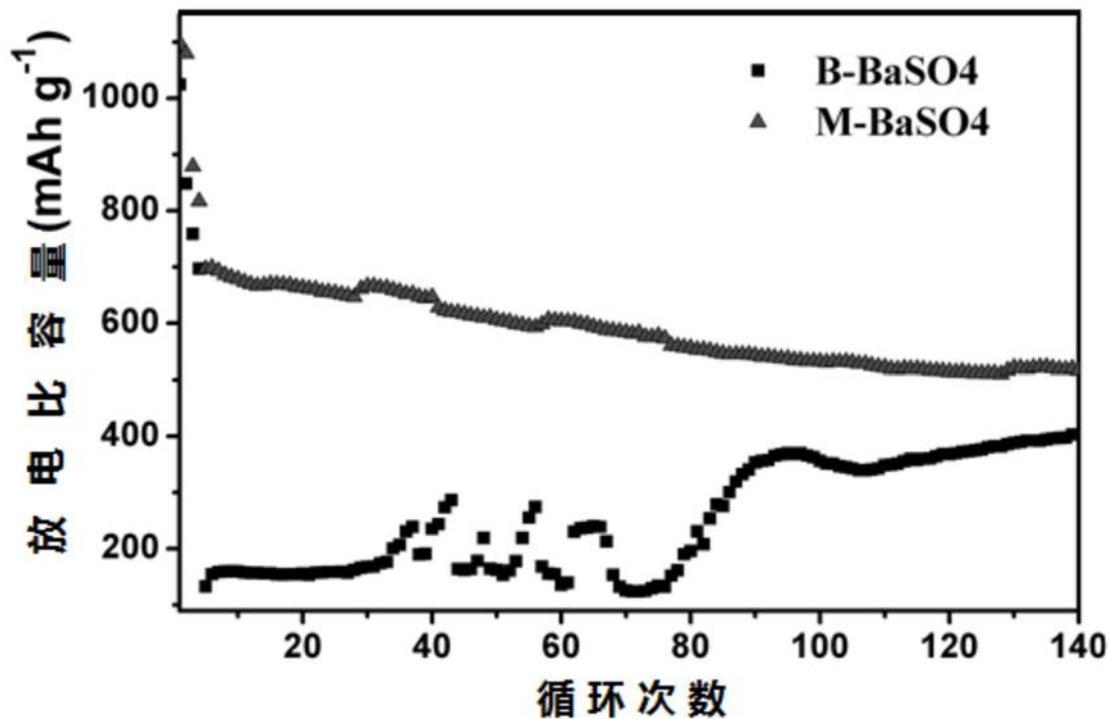


图5

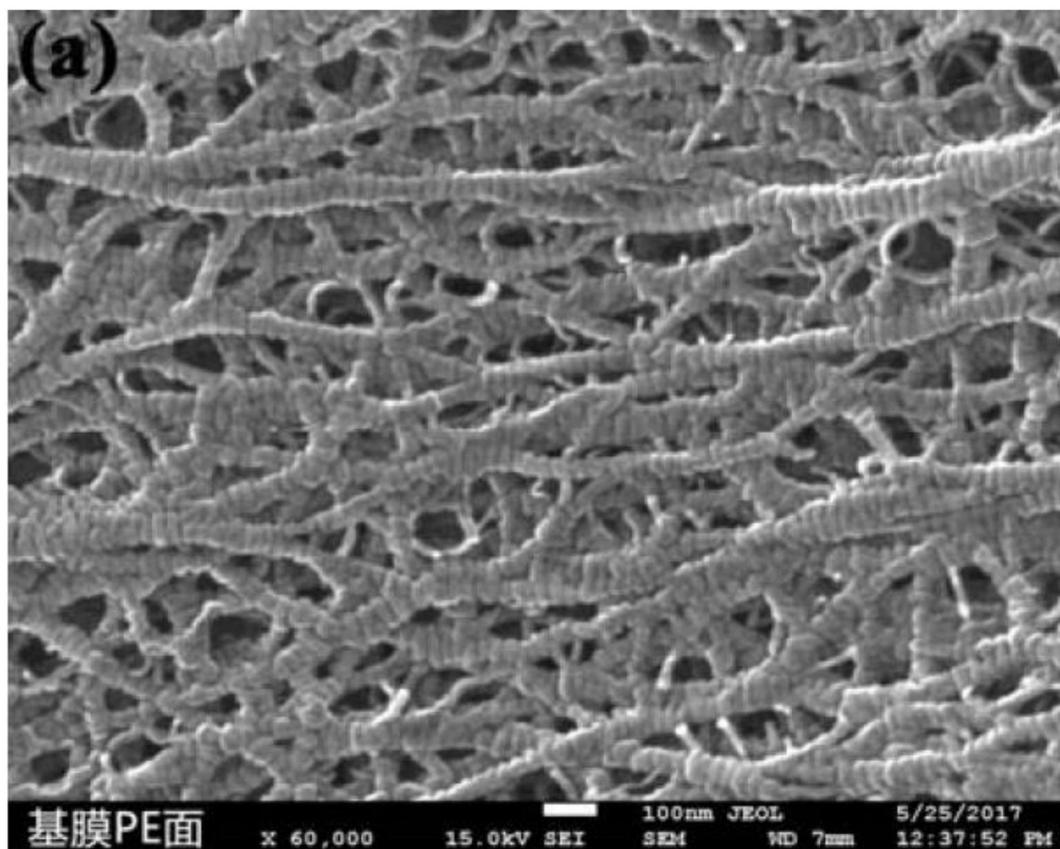


图6

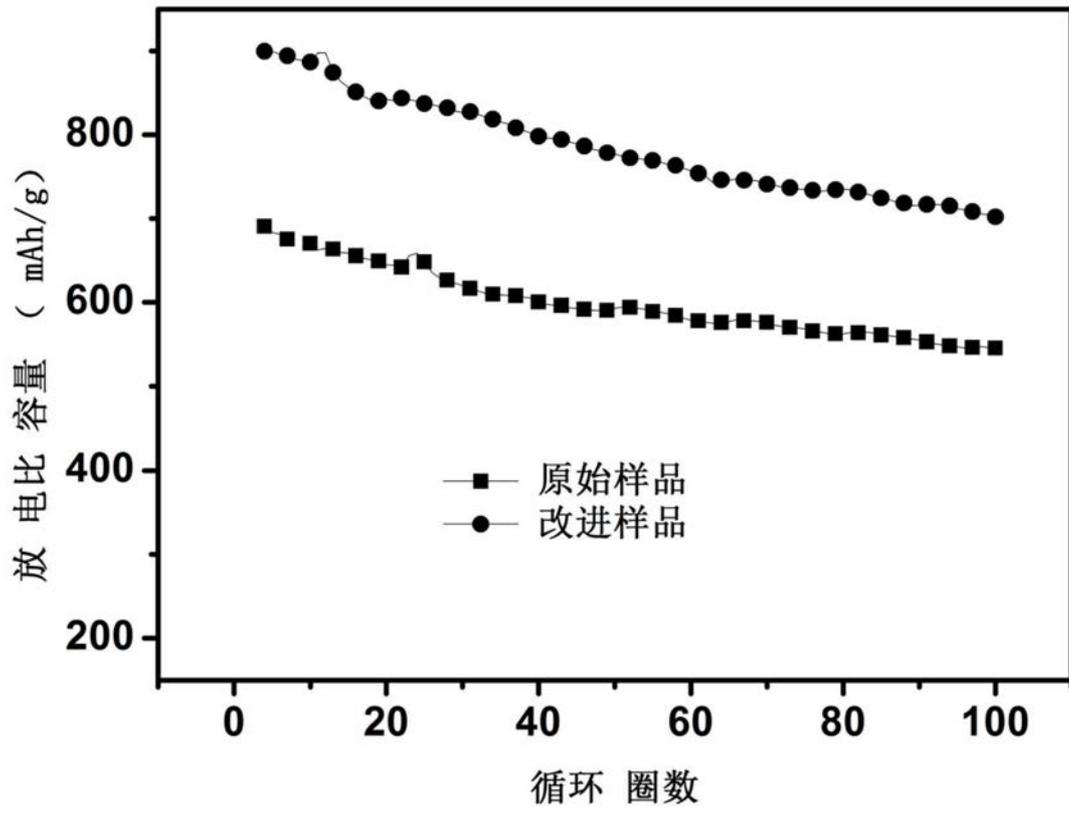


图7