文章编号:1007 - 4252(2024)01 - 0001 - 015　　DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0008

高性能锂硫电池碳基硫宿主的研究进展

吴　燔[1],谢永辉[1],王星辉[1,*]
(1. 福州大学,福建省 福州市 350108)

摘要:“双碳”战略要求新型储能器件具备更高的能量密度和更低的成本。锂硫电池因其低成本、环保和高比能(2600 Wh kg^{-1})等优势,而成为储能领域中最具潜能的电池体系,已受到了广泛的关注及研究。近年来,锂硫电池已取得了系列进展,但仍面临一些问题与挑战,包括硫固有的电荷传输效率差、可溶性多硫化物的“穿梭效应”、充放电过程中的剧烈体积膨胀及锂枝晶的生长等,这些问题会导致锂硫电池性能下降甚至失效。碳基硫宿主具有多孔、高电导、轻质、大比表面积等优点,能够有效解决以上难题,已成为锂硫电池研究领域中的重要方向。而碳材料种类繁多,有碳纳米纤维、碳纳米管、碳纳米片、碳纳米花等,不同形貌或具备不同纳米尺度维度的碳纳米结构对锂硫电池的性能具有不同的影响规律。基于此,本文围绕高性能锂硫电池碳基硫宿主进行综述,分类综述了一维、二维、及多维复合碳材料在锂硫电池领域的应用及其性能,阐述不同维度碳基硫宿主对其电化学性能的影响规律,并对未来的研究方向进行了一定的展望。

关键词:锂硫电池;硫正极;碳材料;穿梭效应
中图分类号:TM912　　**文献标志码**:A

Research progress in carbon-based sulfur hosts for high-performance lithium-sulfur batteries

WU Fan[1], XIE Yonghui[1], WANG Xinghui[1,*]
(1. FuZhou University, FuJian 350108, China)

Abstract: The strategy of "carbon peaking and carbon neutrality goals" demands the new energy storage devices to have higher energy density and lower cost. Lithium-sulfur batteries have become the most potential battery system in the field of energy storage due to their advantages of low cost, environmental-friendly feature and high specific energy (2600 Wh kg-1), which have received extensive attention and investigation. In recent years, lithium-sulfur batteries have made a series of progress, but still face some problems and challenges, including the poor charge transfer efficiency of sulfur, the "shuttle effect" of soluble polysulfides, severe volume expansion during charge and discharge, and lithium dendrite growth, etc. These problems can lead to performance degradation or even failure of lithium-sulfur batteries. Bene-

收稿日期:2024-02-28;　　**修订日期**:2024-03-05
作者简介:吴　燔(1999-),硕士研究生,研究方向锂硫电池硫正极(E-mail:463189082@qq.com);
谢永辉(1995-),博士后,研究方向锂硫电池硫正极(E-mail:50877244@qq.com)
通信作者:王星辉(1986-),教授,主要研究方向为新型储能材料与器件领域(Email:seaphy23@fzu.edu.cn)

ficial from the advantages of porous, high conductivity, light weight, and large specific surface area, carbon-based sulfur hosts can effectively solve the above-mentioned problems and have become an important research areas in the field of lithium-sulfur batteries. There are various types of carbon materials, including carbon nanofibers, carbon nanotubes, carbon nanosheets, and carbon nanoflowers. Carbon-based materials with various morphology or size could have different effects on the performance of lithium-sulfur batteries. Herein, this review focus on the development of carbon-based sulfur hosts for high-performance lithium-sulfur batteries. We summarize the one-dimensional, two-dimensional, and multi-dimensional composite carbon-based sulfur hosts, and discuss their dimensional effects on the electrochemical performance of the sulfur cathodes. Lastly, the future research directions are prospected.

Key words: Lithium sulfur battery; sulfur cathode; carbon material; shuttle effect

0 引言

随着全球对环境保护和可持续发展的重视,减少碳排放已成为各国的重要目标。为此,中国提出了“双碳”战略,即力争在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和。为了实现这一目标,开发一类高效、低成本的储能系统以推动清洁能源的大规模应用变得至关重要[1-7]。其中,电池储能系统是目前市场上最主要的储能系统,而在各种可充电电池体系中,锂硫电池具有极高的能量密度(2600 Wh kg^{-1}),而成为一种极具潜力的储能技术[8-10]。锂硫电池最早于 20 世纪初引入,采用单质硫作为活性阴极。由于硫元素价格低廉,天然丰富,且对环境友好,因此锂硫电池在环保和经济性上具备显著优势[11, 12]。然而,锂硫电池的商业应用还面临着诸多障碍和挑战:(1)单质硫和它的放电产物导电性极差,(2)单质硫在充放电过程中存在 80%的体积膨胀,会引起正极结构崩塌,活性物质脱落,(3)可溶性多硫化物的“穿梭效应”,(4)锂枝晶的生长[13-19]。这对锂硫电池结构设计提出了巨大的要求。

通过优化设计硫宿主材料使其具备物理限域、化学吸附和催化转化等功能,是解决以上问题的有效方案。硫宿主材料种类繁多,有碳基材料、导电聚合物、金属化合物、泡沫金属等。其中,碳基材料具有可控的孔结构、良好的导电性及较大的比表面积等优点,而成为硫的最佳宿主材料[20, 21]。首先,碳材料的多孔结构可对硫及其电化学产物进行物理限域,阻碍多硫化物在电解液中的溶解和扩散,以此削弱“穿梭效应”的负面效果[22],还能缓解硫在充放电过程中的体积膨胀问题。其次,碳材料良好的导电性有利于弥补硫的低电导,极大提升电极的电子传输能力。最后,碳基硫宿主的大比表面积有利于增大硫活性材料与电解液的接触面积,提供足够的反应活性位点,加快反应动力学。然而,非极性的碳基材料与极性多硫化物间的范德华力较弱,不能完全抑制多硫化物的扩散。通过在碳基硫宿主材料中引入杂原子掺杂或极性化合物表面修饰,可以增强其对多硫化物的亲和力,以实现化学吸附锚定多硫化物的功能[23]。例如,Ling[24]等通过简单的胶体二氧化硅纳米铸造法合成了氮掺杂介孔碳-硫复合电极;Zhang[25]等通过简单的水热法合成了氮掺杂的石墨烯片(NGS),随后注入硫纳米颗粒制备成氮掺杂石墨烯片/硫复合电极。修饰化学吸附载体能极大提升碳基硫宿主对多硫化物的吸附能力。进一步的,通过在碳基硫宿主上修饰金属、金属硫化物、金属硒化物等电催化材料,可以提高硫和多硫化物的转换反应动力学,以此降低电解液中多硫化物的浓度来缓解“穿梭效应”和提高倍率性能[26]。例如,Yuan[27]等设计出负载少量块状 CoS_2 的石墨烯(CoS_2@G)作为硫正极,与纯石墨相比,块状 CoS_2 作为吸附催化位点对多硫化物有较强催化能力。Wen[28]等应用 Co/CoSe 异质结于高性能锂硫电池,研究表明,该异质结具有高效的多硫化物吸附和催化转化性能。因此,通过设计各式各样的具备不同功能的碳基硫宿主已被证明能有效提升复合硫正极的储锂性能。

碳基硫宿主根据纳米几何结构,可分为一维、二维和多维复合碳基硫宿主(图 1)。一维碳基硫宿主在空间中有两个维度属于纳米尺度,常见的有碳纳米管、碳纳米纤维、碳纳米线等;二维碳基硫宿主在空间中有一个维度属于纳米尺度,其具有平面结构,可提供出色的面内导电性,常见的有石墨烯、碳纳米

片等;多维碳基硫宿主是由一维或二维碳材料组装而成的分等级多维结构,比如碳纳米花、多层复合碳等。不同维度的碳基硫宿主具有不同的物理和化学性质,其对锂硫电池的性能具有不同的影响规律,产生的效果也会有很大差异。据此,本综述将重点介绍不同维度的碳基硫宿主在锂硫电池中的应用,分类阐述一维、二维和多维复合碳基硫宿主对其电化学性能的影响规律,并对碳基硫宿主的优化设计方向进行展望。

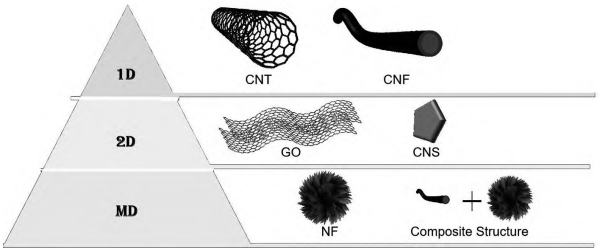

图 1　应用于锂硫电池的不同维度碳基硫宿主

Fig. 1 Carbon based hosts with Different dimensional for lithium-sulfur batteries

1　一维碳基硫宿主

最常见的一维碳基硫宿主材料是碳纳米管和碳纳米纤维,均具有超高纵横比和优异的导电性,能够形成一维电子传输通道,加速硫的电荷转移动力学,以提高锂硫电池的倍率性能。例如,Yao 等[29]在多壁碳纳米管上均匀生长钴掺杂氧化锡(Co-SnO_2@CNT)作为一维碳基硫宿主。其中,羧化多壁碳纳米管是良好的导电骨架,可以提供硫转换反应的电子并防止 SnO_2纳米颗粒的团聚,而 Co-SnO_2具有化学吸附和催化转化功能。得益于以上优化设计,该复合硫正极在 1 C 电流密度下,循环 600 圈后仍具有 709 mAh g^{-1}的高比容量,每圈的容量衰减率低至约 0.042%。Ao 等[30]使用静电纺丝技术制备了“壁挂式”$CoSe_2$修饰的含有碳纳米管的碳复合纳米纤维($CoSe_2$@ CNF/CNT)。其中,N 掺杂的一维碳纳米纤维与碳纳米管促进了电子/离子的传输效率,一维纳米结构形成的多孔结构可提供足够的空间来缓解硫正极的体积膨胀,并起到一定的“物理限域”功能。而修饰的 $CoSe_2$纳米颗粒可以作为化学吸附剂和电催化剂,锚定多硫化物并加速其氧化还原动力学,以此抑制“穿梭效应”。该电极在 1 C 电流密度下,在 500 次充放电后放电比容量仍有 766.4 mAh g^{-1},每圈的容量衰减率低至约 0.06%。以上所制备的多功能硫宿主均具有极好的化学吸附和催化转化能力。

整体而言,相互交联的一维碳材料形成的三维多孔导电网络可以降低硫正极的电荷转移阻抗,缓解活性材料硫的体积变化,增大电解液与电极的接触面积,以此提高硫正极的储锂性能。然而,由一维材料组成的三维导电网络孔洞是连通和开孔的,在物理限域功能方面有待加强。因此,需要在一维碳基硫宿主表面进一步修饰具备强化学吸附和电催化转化功能的表面功能材料,以协同提升其性能。

2　二维复合碳基硫宿主

自从发现二维石墨烯以来,二维纳米材料,如纳米片、多孔碳和 MXenes 等,已经引起了人们的广泛关注。石墨烯,其晶体结构由单层碳原子形成,具有大比表面积、高机械强度和极高的导电性,有利于提高电极整体的电子电导率,加速氧化还原动力学。用含氧基团改性石墨烯是制备功能石墨烯材料最常见、最简单的方法。功能石墨烯含有大量的环氧、羰基、羧基、羟基等基团,提高了石墨烯的极性。因此,它可以实现与多硫化物的强相互作用,能有效减弱“穿梭效应”。Zhu 等[31]人提出一种通过原位组装的二维二硫化钒(VS_2)和还原氧化石墨烯(rGO)纳米片构建的硫宿主(G-VS_2)。其中石墨烯片提供了一个高电导的、稳定的碳骨架来促进电子传输,并缓解体积膨胀,从而提高硫的利用率和电化学性能。导电极性二维 VS_2具有充足的层间自由储硫空间,并为多硫化物提供了丰富的吸附和催化位点。这些优势使得 G-VS_2电极具有优异的电化学性能,在 5 C 的大电流下循环 300 圈仍有 532 mAh g^{-1}的放电比容量,并展现出了极高的循环稳定性。Xie 等[32]通过简单的溶液法和碳化硒化处理,在柔性碳布上构筑了一种“多功能”的 MOF 衍生 $Co_{0.85}Se$ 纳米颗粒嵌入氮掺杂碳纳米片($Co_{0.85}Se$/NC)自支撑复合电极(图 2a)。这种相互交错的多孔氮掺杂碳纳米片具有大的比表面积和孔隙率(图 2b,c),不仅可以在多硫化物转化中发挥“物理限域”效果限制活性物质硫,还能缓解其充放电过程中的体积膨胀。修饰的 $Co_{0.85}Se$ 纳米颗粒既可以作为化学吸附位点锚定多硫化物,还可以作为电催化剂加速多硫化物的

转化反应动力学。实验结果证明，$Co_{0.85}Se$/NC 能够促进长链多硫化物向 Li_2S_2/Li_2S 的转化。此电极实现“物理限域”、“化学吸附”、“催化转化”三功能协同，因此具有优异的放电容量和循环稳定性，1 C 电流密度下，其放电比容量高达 1001 mAh g^{-1}。

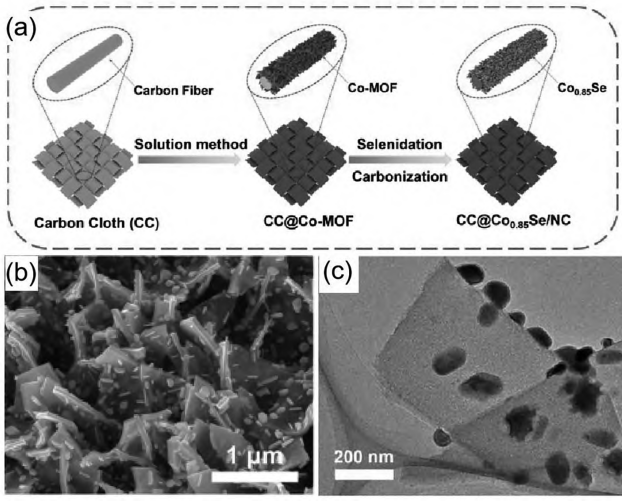

图 2 （a-c）CC@ $Co_{0.85}Se$/NC 的制备示意图及 SEM 与 TEM 图像[32]

Fig. 2 (a-c) Schematic diagram and SEM and TEM images of CC@ $Co_{0.85}Se$/NC[32]

相比于一维，二维碳基硫宿主具有更大的比表面积，这不仅可为多硫化物提供更大的反应接触面积，又能提供更多的表面空间用于负载具有化学吸附和催化转化的功能修饰材料，从而达到提升硫正极性能的目的。然而，二维碳材料存在易于堆叠且层间离子和电子输运能力难等缺陷，需要进一步优化设计二维碳基硫宿主的结构和组分。

3 多维复合碳基硫宿主

多维复合碳基硫宿主是由一维或二维碳材料复合组装而成的分等级多维结构，通常由碳纳米管、石墨烯、碳纳米纤维、碳纳米花等材料复合而成。当前，已设计出的多维复合碳基硫宿主有碳纳米花、碳纳米蜂窝、碳纳米泡沫和多层碳材料[33-35]等。Huang[36]等人使用 rGO 和碳纳米管构建了三维网状多孔碳骨架，并在其上原位生长 MoS_2，制备了 MoS_2@ rGO/CNTs 硫宿主。具有介孔结构的三维碳骨架作为三维导电网络，显著提高了硫正极的导电性和结构稳定性，并为活性物质提供了大量的活性位点。MoS_2起到“化学吸附”与“催化转化”作用，有效地抑制了“穿梭效应”。因此，MoS_2@ rGO/CNTs/S 正极材料表现出良好的电化学性能。在 0.5 C 下循环 200 次后，每次循环的容量衰减率仅为0.09%。

多层碳材料是指具有多空间层级（如外、中、内层等）的碳基硫宿主，不同层级可使用不同维度的碳材料组合而成。同时，不同层间孔洞的梯度设计可以加强“物理限域”功能，这有利于实现高硫负载下锂硫电池的稳定性能。2023 年，我们课题组[37]成功地通过溶液法结合化学气相沉积（CVD）和等离子体增强化学气相沉积（PECVD）技术，在碳布上构筑了一种一维氮掺杂碳纳米管（CNT）网络复合金属 Co 纳米颗粒作为碳内层，三维石墨烯纳米花（GF）为碳外层的独特的复合双层碳结构自支撑柔性硫宿主（Co/CNT@ GF）（图 3a，b）。这种互连的碳结构构建了一种类似“干丝瓜”的三维氮掺杂混合网络骨架，提升了材料导电性，并为体积膨胀预留了更多的空间。外部包覆的微米级 GF 外层很好地封装了整个“干丝瓜”网络骨架，有效地阻止了多硫化物与电解液的直接接触，保护骨架中的活性物质，进一步限制了“穿梭效应”，同时金属 Co 具有化学吸附和催化转化的功能，能够化学锚定多硫化物和加速多硫化物的转化，最终提升了该多层碳基硫宿主的电化学性能。该硫宿主在 1 C 下循环 400 圈后，仍有 799 mAh g^{-1}的容量，每个循环容量衰减低至 0.08%（图 3c）。

与一维与二维相比，多维复合碳硫宿主具有更大的比表面积、更广的物理限域空间、丰富的活性位点和复杂的交联导电网络，在物理限域、化学吸附、催化转化等功能化修饰方面更具优势。当然，多层碳基结构设计增加了实验的步骤，不利于规模化制备和商业化应用。因此，需要设计简单方法实现大规模多维复合硫宿主的进一步设计。

4 总结与展望

本文综述了高性能锂硫电池碳基硫宿主的相关进展，介绍了具有不同维度（一维、二维、及多维复合）的碳基硫宿主。一维碳基硫宿主有纵横比高、导电性强、比表面积大和机械强度高等优势，能有效提高反应动力学。二维碳基硫宿主既有一维碳材料高的比表面积和大孔体积等优势，又具备不同于一

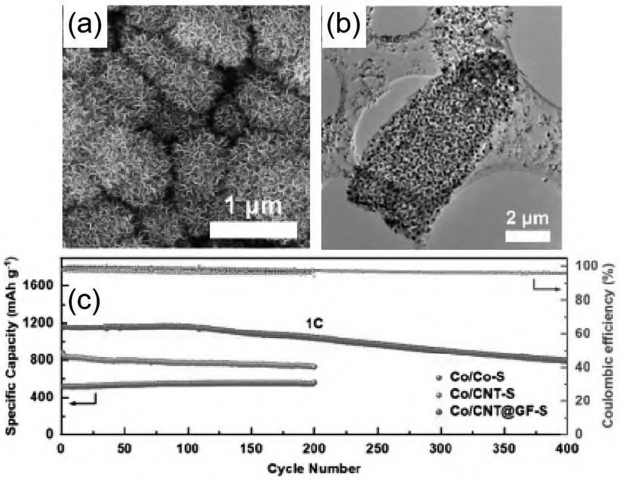

图 3　(a-c) Co/CNT@ GF 的 SEM、TEM 图和循环性能图[37]

Fig. 3 (a-c) SEM and TEM images and cycling performance of Co/CNT@ GF[37]

维结构的二维特征,能形成二维平面导电通道,相互交联形成的三维网络结构具有更好的物理限域功能。多维复合硫宿主电极不仅兼具低维碳基硫宿主优势,而且能通过更复杂的多维复合,形成更复杂的多层、多级复合三维结构,提供更多的物理限域场所和更高效的电荷输运路径,因此有望成为最优的碳基硫宿主电极设计方案。

虽然目前锂硫电池碳基硫宿主已有很多的研究,但仍然有很多问题值得关注和探究。为了锂硫电池的进一步发展,对未来的研究提出以下展望。(1)实现高载量、贫电解液条件下复合硫正极的稳定循环。目前已报道的能够实现稳定循环的碳基硫正极大都是小载量,且使用的电解液用量较多,这对于实际商用来说,还远远不够,因此需要进一步通过优化碳基硫宿主的微纳结构以及提高负载修饰材料的功能性,以开发出更高效的碳基硫宿主。

(2)开发高比能和高能量密度碳基复合硫正极。目前报道的碳基硫宿主电极常常使用商用碳布作为集流体,其较大的质量密度和蓬松的结构,极大的影响了锂硫电池整体的比能量和能量密度。需要开发新型轻质、高密度碳基集流体来改良及质量和体积能量密度。

(3)锂硫电池储锂机制的深入解析。由于锂硫电池的电化学转发反应设计固-液-固相转换,对其储能机理的探究并未全面,需要开发更前言和先进的原位表征手段及模拟计算来揭示其内在机理,来进一步改良和优化碳基硫宿主电极的性能。

参考文献:

[1] DUNN B, KAMATH H, TARASCON J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices [J]. Science, 2011, 334(6058): 928-35.

[2] TARASCON J M, ARMAND M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries [J]. Nature, 2001, 414(6861): 359-67.

[3] ZHANG Q, HUANG Q, HAO S M, et al. Polymers in Lithium-Sulfur Batteries [J]. Adv Sci (Weinh), 2022, 9(2): e2103798.

[4] LIU Z, CHEN M, ZHOU D, et al. Scavenging of "Dead Sulfur" and "Dead Lithium" Revealed by Integrated-Heterogeneous Catalysis for Advanced Lithium-Sulfur Batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(46).

[5] SUSANTYOKO R A, WANG X, SUN L, et al. Influences of annealing on lithium-ion storage performance of thick germanium film anodes [J]. Nano Energy, 2015, 12: 521-7.

[6] SUSANTYOKO R A, WANG X, FAN Y, et al. Stable cyclic performance of nickel oxide-carbon composite anode for lithium-ion batteries [J]. Thin Solid Films, 2014, 558: 356-64.

[7] KE B, WANG X, CHENG S, et al. Ultrahigh-power iron oxysulfide thin films for microbatteries [J]. Science China Materials, 2022, 66(1): 118-26.

[8] HURTLEY S, LAVINE M S. An elevated lithium battery [J]. Science, 2018, 361(6404): 763.15-5.

[9] LI G, CHEN Z, LU J. Lithium-Sulfur Batteries for Commercial Applications [J]. Chem, 2018, 4(1): 3-7.

[10] CHOMBO P V, LAOONUAL Y. A review of safety strategies of a Li-ion battery [J]. Journal of Power Sources, 2020, 478.

[11] GAO R, ZHANG M, HAN Z, et al. Unraveling The Coupling Effect Between Cathode And Anode Towards Practical Lithium-Sulfur Batteries [J]. Adv Mater, 2023: e2303610.

[12] KIM J T, HAO X, WANG C, et al. Cathode materials for single-phase solid-solid conversion Li-S batteries [J]. Matter, 2023, 6(2): 316-43.

[13] SHI H, WEN G, NIE Y, et al. Flexible 3D carbon cloth as a high-performing electrode for energy storage and conversion [J]. Nanoscale, 2020, 12(9): 5261-85.

[14] FENG S, FU Z H, CHEN X, et al. A review on theoretical models for lithium-sulfur battery cathodes [J]. InfoMat,

2022, 4(3).

[15]ZHAO M, LI B Q, ZHANG X Q, et al. A Perspective toward Practical Lithium-Sulfur Batteries [J]. ACS Cent Sci, 2020, 6(7): 1095-104.

[16]DENG R, KE B, XIE Y, et al. All-Solid-State Thin-Film Lithium-Sulfur Batteries [J]. Nanomicro Lett, 2023, 15(1): 73.

[17]LAI Y, YANG T, YANG Y, et al. A lithiophilic and conductive interlayer for dendrite-free lithium metal anodes [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462.

[18]YANG Y, CAO J, LI W, et al. Ultrahigh-capacity and dendrite-free lithium metal anodes enabled by lithiophilic bimetallic oxides [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(44): 23896-904.

[19]CAO J, DENG L, WANG X, et al. Stable Lithium Metal Anode Achieved by In Situ Grown CuO Nanowire Arrays on Cu Foam [J]. Energy & Fuels, 2020, 34(6): 7684-91.

[20]WANG Y, SUN L, XIAO D, et al. Silicon-Based 3D All-Solid-State Micro-Supercapacitor with Superior Performance [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(39): 43864-75.

[21]WANG X, SUN L, SUSANTYOKO R A, et al. A hierarchical 3D carbon nanostructure for high areal capacity and flexible lithium ion batteries [J]. Carbon, 2016, 98: 504-9.

[22]WANG L, ZHANG M, ZHANG B, et al. A porous polycrystalline $NiCo_2P_x$ as a highly efficient host for sulfur cathodes in Li-S batteries [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(40): 23149-56.

[23]ZHANG M, CHEN W, XUE L, et al. Adsorption-Catalysis Design in the Lithium-Sulfur Battery [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 10(2).

[24]SUN F, WANG J, CHEN H, et al. High efficiency immobilization of sulfur on nitrogen-enriched mesoporous carbons for Li-S batteries [J]. ACS applied materials & interfaces, 2013, 5(12): 5630-8.

[25]WANG X, ZHANG Z, QU Y, et al. Nitrogen-doped graphene/sulfur composite as cathode material for high capacity lithium-sulfur batteries [J]. Journal of Power Sources, 2014, 256: 361-8.

[26]QIN J, WANG R, XIAO P, et al. Engineering Cooperative Catalysis in Li-S Batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(26).

[27]YUAN Z, PENG H J, HOU T Z, et al. Powering Lithium-Sulfur Battery Performance by Propelling Polysulfide Redox at Sulfiphilic Hosts [J]. Nano Lett, 2016, 16(1): 519-27.

[28]WEN Y, SHEN Z, HUI J, et al. Co/CoSe Junctions Enable Efficient and Durable Electrocatalytic Conversion of Polysulfides for High-Performance Li-S Batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(20).

[29]YAO Y, CHANG C, LI R, et al. Intrinsic catalytic Sites-Rich Co-doped SnO_2 nanoparticles enabling enhanced conversion and capture of polysulfides [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431.

[30]AO J, XIE Y, LAI Y, et al. $CoSe_2$ nanoparticles-decorated carbon nanofibers as a hierarchical self-supported sulfur host for high-energy lithium-sulfur batteries [J]. Science China Materials, 2023, 66(8): 3075-83.

[31]ZHU X, ZHAO W, SONG Y, et al. In Situ Assembly of 2D Conductive Vanadium Disulfide with Graphene as a High-Sulfur-Loading Host for Lithium-Sulfur Batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(20).

[32]XIE Y, CAO J, WANG X, et al. MOF-Derived Bifunctional $Co_{(0.85)}Se$ Nanoparticles Embedded in N-Doped Carbon Nanosheet Arrays as Efficient Sulfur Hosts for Lithium-Sulfur Batteries [J]. Nano Lett, 2021, 21(20): 8579-86.

[33]SHAO Y, XIE Y, YANG Y, et al. Bilayer carbon-based structure with the promotion of homogenous nucleation for lithium metal anodes [J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(7): 1558-66.

[34]TSAO Y, GONG H, CHEN S, et al. A Nickel-Decorated Carbon Flower/Sulfur Cathode for Lean-Electrolyte Lithium-Sulfur Batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(36).

[35]XIE Y, ZHENG W, AO J, et al. Multifunctional Ni-doped $CoSe_2$ nanoparticles decorated bilayer carbon structures for polysulfide conversion and dendrite-free lithium toward high-performance Li-S full cell [J]. Energy Storage Materials, 2023, 62.

[36]HUANG Y, CHEN Y, SONG X, et al. Construction of MoS_2@reduced graphene oxide/carbon nanotubes three-dimensional network structure and its application in lithium-sulfur batteries [J]. Materials Today Chemistry, 2023, 30.

[37]XIE Y, AO J, ZHANG L, et al. Multi-functional bilayer carbon structures with micrometer-level physical encapsulation as a flexible cathode host for high-performance lithium-sulfur batteries [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451.