

高纯硫化锂合成方法与应用研究进展

黄忠¹, 杜旺², 何宾宾^{2,3}, 刘禹辰²

(1. 湖北天宜磷氟科技研究有限公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500; 3. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600)

[摘要] 硫化锂(Li₂S)作为一种能量密度高、电化学性能优异的锂基材料,在锂硫电池和全固态电池等先进储能体系中具有巨大的应用前景,其在高温稳定性、界面兼容性和理论容量等方面具备显著优势,逐渐成为下一代储能材料研究的热点。系统梳理Li₂S的理化性质与应用领域,重点比较了固相反应法、溶液法、气相法、直接碳还原法及新兴合成技术的原理、工艺特点与适用性,指出不同合成方法在纯度控制、结构调控及产业化潜力方面的差异。结合市场需求、政策与宏观经济环境,分析产业发展趋势与研究热点。探讨合成方法优化与材料性能提升路径,为高纯Li₂S的发展提供系统参考与思路支持。

[关键词] 硫化锂; 合成方法; 应用; 发展方向

[中图分类号] TQ115; TQ152 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 09-0068-06

Research progress on synthesis method and application of high-purity lithium sulfide

HUANG Zhong¹, DU Wang², HE Binbin^{2,3}, LIU Yuchen²

(1. Hubei Tianyi Phosphorus Fluorine Technology Research Co., Ltd., Yichang 443000, China;
2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
3. National Engineering Technology Research Center for Development and Utilization of Phosphorus Resources, Kunming 650600, China)

Abstract: Lithium sulfide (Li₂S), as a lithium-based material with high energy density and excellent electrochemical performance, demonstrates significant application prospects in advanced energy storage systems such as lithium-sulfur batteries and all-solid-state batteries. It has become a research hotspot in next-generation energy storage materials due to its remarkable advantages in high-temperature stability, interfacial compatibility and theoretical capacity. The physical and chemical properties of Li₂S and its application fields are systematically reviewed, with a focus on comparing the principles, technological characteristics and applicability of solid-phase reaction methods, solution methods, gas-phase methods, direct carbon reduction methods and several emerging synthesis technologies. The differences in purity control, structural regulation and industrialization potential among different synthesis methods are highlighted. Meanwhile, combining market demands, policy and macroeconomic environment, industrial development trends and research hotspots are analyzed. A discussion of optimization strategies for synthesis methods and pathways for material performance enhancement is carried out, providing a systematic reference and conceptual support for the development of high-purity lithium sulfide.

Key words: lithium sulfide; synthesis methods; application; development direction

0 引言

随着能源需求不断增加和环境问题日益严峻,寻找高效、绿色的能源存储与转换材料成为全球科研和工业界的重点课题^[1]。锂离子电池作为目前最为广泛应用的能源存储电池,其性能提升仍然依赖于材料创新^[2]。在全固态电池中,固态电解质作为锂离子传输介质,其离子导电性、界面稳定性以及

制备成本直接影响电池的整体性能。硫银锗矿型固

[收稿日期] 2025-06-25

[作者简介] 黄忠(1983-),男,湖南怀化人,博士,正高级工程师,主要从事磷、氟资源的回收与加工处理研究。

[通信作者] 何宾宾(1985-),男,云南昆明人,博士,教授,主要从事磷、氟资源的回收与加工处理研究。

[基金项目] 云南省技术创新人才培养对象项目(何宾宾)

态电解质因其独特的晶体结构和优异的电化学性能而受到广泛关注^[3-4]。然而,该材料的合成通常依赖于高纯度的硫化锂(Li₂S)作为锂源和硫源之一。Li₂S作为一种具有良好电化学性能和高能量密度的材料,在锂电池,特别是固态电池和高容量电池中应用前景广阔^[5]。同时, Li₂S在热电材料、催化剂以及其他高科技领域也显示出巨大的应用潜力。然而,高纯度Li₂S材料的制备仍然面临一系列的技术挑战。

目前, Li₂S的合成方法多种多样,包括固相反应法、溶液法和气相等^[6]。虽然这些方法在一定程度上可以得到较为纯净的Li₂S,但如何有效控制杂质的生成,提升Li₂S的纯度,并且保证合成过程的可控性和经济性,仍是亟待解决的难题。此外,由于高纯Li₂S的性能在很大程度上受到合成工艺和反应条件的影响,因此,深入研究其合成方法与机制,探索更为高效的合成路线,对于提高Li₂S的质量及其在各个领域的应用具有重要意义。

笔者旨在总结目前高纯Li₂S合成的主要方法,并对各方法的优缺点进行分析和比较,重点讨论固相反应法、溶液法和气相等常见的合成路线,探讨如何通过调整合成条件和优化反应过程来提高Li₂S的纯度。此外,还将介绍一些新兴的合成方法,并对未来的研究方向进行展望。通过对高纯Li₂S合成研究的深入分析,推动Li₂S合成技术的发展,进而为其在能源、材料和化学工业中的应用提供更为坚实的基础。

1 硫化锂的性质与应用前景

Li₂S是一种典型的无机化合物,属于二元锂盐类,具有面心立方晶体结构(见图1)。在常温常压下, Li₂S为白色或浅黄色晶体,熔点约为938 °C,密度约为1.67 g/cm³,具备较高的热稳定性与化学稳定性^[7-8]。其在惰性气氛中较为稳定,在室温下不易与氧气反应,高温下具有还原性,能与

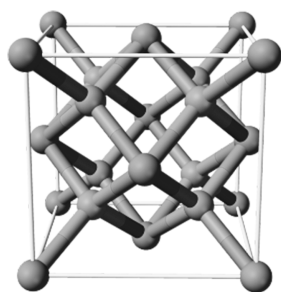


图1 Li₂S的晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of Li₂S

水反应生成氢氧化锂和硫化氢气体,具有较强的水解性。因此,其制备、储存和应用过程必须严格控制环境湿度和氧含量。

Li₂S是一种兼具高理论比容量、高能量密度与界面稳定性的功能性材料,在多个高性能领域展现出广泛应用前景,在电化学储能系统中地位尤为重要。在锂硫电池和全固态电池等新一代电池体系中, Li₂S既可作为正极材料的前驱体,也可在一定条件下参与构建复合固态电解质。Li₂S的充电激发过程通常涉及锂离子电池的电化学反应,在充电过程中,锂离子从负极迁移到正极,而在激发过程中,电子的转移和化学反应也会影响锂化过程(如图2所示)。其在高温条件下电导率显著提升,能够与多种硫化物电解质形成良好的界面匹配,是实现高能量密度、安全性与寿命兼顾的重要基础材料。除电池系统外, Li₂S还在热电材料、有机合成和功能陶瓷领域发挥着特殊作用。在热电转换方向, Li-Sn-S等固溶体中引入Li₂S可有效提升载流子迁移率和热电优值(ZT),适用于高温热电器件。在精细化工与药物合成领域, Li₂S作为高反应活性的硫源,可用于构建多种含硫有机分子,如硫醚、硫酰胺及配体类功能材料,在高选择性合成和定向催化反应中具备独特优势。

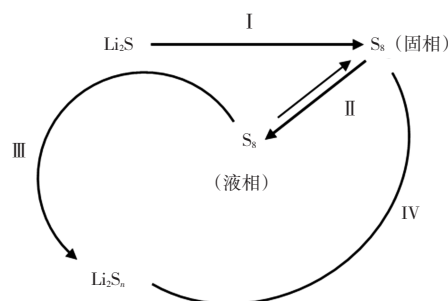


图2 Li₂S充电激发过程^[9]

Fig. 2 Charging excitation process of Li₂S

在电池技术中, Li₂S的应用集中于锂硫电池和全固态电池体系。与金属锂负极不同, Li₂S具有更高的化学稳定性和较低的反应活性,有助于提升电池组装的安全性,规避金属锂易形成枝晶、诱发短路等安全风险。在锂硫电池中, Li₂S可作为预锂化的正极前驱体,其理论比容量高达1 166 mA·h/g,远高于传统氧化物或磷酸盐类正极材料,可大幅度提升整体能量密度^[10]。在全固态体系中, Li₂S与典型硫化物电解质界面匹配性良好,适合构建连续离子通道结构,有利于提升电荷转移效率与界面稳定性。这类复合电池结构尤其适用于

航空航天、军事装备以及高端电动汽车等对能量密度、安全性和稳定性要求极高的应用场景。

然而,在高性能电池应用中,对 Li_2S 材料的纯度和结构提出了严格要求。微量杂质,如 Li_2CO_3 、 LiOH 、 Li_2SO_4 的存在会干扰电极界面稳定性,增加副反应倾向,从而影响电池循环寿命与库仑效率。研究表明, Li_2S 纯度每提高0.1%,可使电池循环寿命提升5%~10%^[11]。因此,在材料合成过程中需严格控制反应条件,确保产物纯度达到99.99%以上,并实现粒径分布均一、晶型纯正、无杂相。高纯 Li_2S 材料还应具备良好的微纳结构调控能力,以便与电解质形成大接触面积的电极界面,提高反应效率。

除了对结构和纯度的要求,环境湿度控制亦是影响 Li_2S 性能稳定性的重要因素。在 Li_2S 的实际应用过程中,露点控制是一项关键的环境管理指标^[12]。由于 Li_2S 具有较强的吸湿性,会在空气中迅速吸收水分并与其反应生成 H_2S 气体,不仅导致材料性能退化,还可能带来安全和腐蚀风险。因此,在生产、运输、保存及使用过程中,须严格控制环境湿度,一般要求露点控制在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,部分高纯应用场景甚至要求低于 $-60\text{ }^\circ\text{C}$,以确保 Li_2S 不发生明显水解反应。

在生产环节,通常采用全密闭惰性气氛进行物料转移与反应控制,并结合低露点干燥塔或分子筛系统维持工艺气体的极低水含量;运输过程中则采用真空封装或干燥氮气保护,辅以铝塑包装材料或多重密封容器;储存阶段, Li_2S 应置于手套箱或恒温恒湿仓内,环境露点须持续监测并保持稳定;在材料使用环节,尤其是与电解质混合或成膜操作中,同样需在严格干燥环境下操作,避免界面水分引发副反应。

当前在工业应用中,低露点环境的实现仍面临一定成本压力,但通过优化除湿材料、冷凝系统和干燥循环工艺,有望在不显著提升成本的前提下保障 Li_2S 材料的质量稳定性和使用安全性。

2 高纯硫化锂的合成方法

Li_2S 的合成方法主要包括固相反应法、溶液法、气相法、直接碳还原法,此外还有一些新兴方法。以下将逐一论述其原理、工艺流程、优缺点及典型研究成果。

2.1 固相反应法

固相反应法是在早期合成 Li_2S 过程中应用最广泛的一种方法,其基本过程是将金属锂或其化合物

与硫元素在高温下反应生成 Li_2S ,反应通常在惰性气氛(如氮气或氩气)中进行。该反应的温度控制范围为 $400\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$,主要是为了避免反应剧烈或因硫蒸发导致反应物比例失衡^[13]。该方法典型的反应式为:



这种方法的优点在于工艺相对简单,对设备要求不高,所需原料来源广泛且廉价,适合批量反应,是实验室和初期工程化制备中常用的方法。尽管如此,该方法也存在一定的局限性:如高温条件下反应容易引入副产物;反应过程激烈,特别是在使用金属锂作为原料时,存在较大的安全风险;此外,产物纯度受到原材料活性、颗粒分布及反应均匀性的影响,容易因局部过热或传质不充分而形成杂质。

为提升合成质量,常引入机械球磨、冷压成形、惰性封装等辅助方式,以改善反应接触界面,提高均匀性与安全性^[14-15]。有研究通过降低反应温度延长反应时间等手段实现较好的晶体完整性与纯度控制。这些改进虽然在一定程度上提升了材料品质,但也相应增加了工艺复杂性^[16]。

2.2 溶液法

溶液法(也称湿法合成)是一种常见的 Li_2S 制备途径,主要通过锂源(如 LiOH 、 Li_2CO_3)与硫源(如 Na_2S 、 CS_2 等)在溶剂中发生反应,生成 Li_2S 沉淀,随后经热处理制得目标产物^[17-18]。这种方法通常在较为温和的条件下进行,便于反应控制与形貌调节,特别适合制备纳米颗粒、球形或片状等特定结构,有助于提升材料在后续应用中的分散性与界面反应性能。

与固相反应法相比,溶液法操作温度低、能耗较小,且对设备要求不高,因此在实验室研究中广泛应用。该方法的另一个显著优势在于,产品形貌可调性较强,适用于微纳尺度的结构调控。WARREN等^[19]基于溶液悬浮法系统研究了 $\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$ 体系的合成路径与结构调控机制,该方法将 Li_2S 和 P_2S_5 添加在极性溶剂(乙腈、四氢呋喃(THF)等)中,经搅拌、超声处理后蒸发溶剂并在惰性气氛下退火,获得了具有 $\beta\text{-Li}_3\text{PS}_4$ 、 $\text{Li}_3\text{P}_3\text{S}_{11}$ 等晶相结构的玻璃陶瓷型固态电解质材料,不仅拓展了 Li_2S 的合成思路,也为其在固态电解质体系中的工程化应用提供了技术支持。

不过,溶液法也存在一些难以忽视的限制,如反应过程中可能引入较多杂质,需通过额外纯化步

骤提升产品质量^[20]。此外,反应介质和体系组成较为复杂,后处理步骤烦琐,常涉及溶剂去除、洗涤和干燥等多个过程,整体工艺较难实现规模放大。因此,该方法更适用于性能精细调控与基础机制研究场景。为进一步提高产品的纯度与形貌可控性,相关研究中常引入模板剂或表面活性剂,这些辅助剂可在溶液中调节反应界面行为,通过控制pH、反应温度和反应时间等因素,达到对颗粒结构与尺寸的精准调节,从而改善最终产品的物理化学性能。

2.3 气相反应法

气相反应法是一种相对较新的Li₂S合成方法,通常采用硫化氢(H₂S)、二硫化碳(CS₂)等硫化气体与锂蒸气或锂化合物在高温气氛中反应生成Li₂S,反应过程一般在高真空或惰性气体环境下进行,对设备密封性和气体控制能力要求较高^[21-23]。该方法可以实现较为高效的合成过程,基本反应方程如下:



这种方法的显著优势在于可获得高纯度产品,适用于快速反应体系,并具备较好的连续化生产潜力。由于反应物以气态形式参与反应,扩散与反应速率较快,在特定条件下还能用于制备具有薄膜或涂层结构的Li₂S材料,因此在特定器件结构中,如电池正极涂层、界面缓冲层等中应用较为理想。LI等^[24]提出以萘基锂(Li-NAP)与硫化氢气体(H₂S)自发反应,常温下快速生成纳米级Li₂S颗粒。该方法合成的Li₂S粒径约为100 nm,具有良好的结构均一性和极高的纯度,同时避免了高温合成可能引入的氧化副反应

不过,气相反应法的实际应用也面临诸多挑战,如反应过程所需设备复杂且昂贵,对系统密封性和反应控制提出了较高要求;反应中所用的硫化氢气体具有较强毒性,存在较大的安全风险。因此在操作中须采取严格的防护措施。此外,整个过程能耗较大,限制了其在大规模工业化应用的可行性。

2.4 直接碳还原法

在高纯Li₂S的制备中,直接碳还原法是一种传统且广泛应用的工艺路线。该方法通常以硫酸锂(Li₂SO₄)为锂源,在高温下与碳源(通常为活性炭、炭黑或聚合物碳前驱体)反应生成Li₂S,同时释放出CO或CO₂等气体。反应通常在700~900℃的惰性气氛(如Ar或N₂)中进行,具备操作简便、原料廉价等优点^[25]。

近年来,研究者通过优化碳源类型、控制反应气氛与升温速率,有效提升了产物纯度与反应收率。WU等^[26]以聚乙烯醇(PVA)为碳源,通过一步碳热还原硫酸锂(Li₂SO₄)来制备高纯Li₂S,优化原料配比为 $n(\text{Li}_2\text{SO}_4) : n(\text{PVA}) = 1.0 : 3.7$,改良球磨与烧结工艺为750℃、5 h、氩气气氛,所得Li₂S纯度达99.67%,晶型良好,杂质控制优于传统活性炭体系;TU等^[27]提出了一种基于硫酸锂碳热还原反应的低成本、大规模制备策略,该方法以Li₂SO₄为锂源、蔗糖为碳源,通过水相混合、预烧、氮气气氛下高温煅烧及乙醇提纯等步骤,最终获得高纯度Li₂S,产率达81.08%。

不过,该方法也存在一定局限,如生成气体可能对设备密封性构成挑战,残碳杂质控制较难,需配套热处理与后纯化工艺。总体来看,直接碳还原法因其工艺成熟、原料易得、成本低廉,仍是当前高纯Li₂S制备中具有代表性和可行性的技术路径之一。

2.5 高纯Li₂S的新合成方法

ZHAO等^[28]提出了一种基于醇溶液中复分解反应的新型合成路线。该方法以LiCl和Na₂S为原料,在乙醇中常温反应生成Li₂S纳米晶,并经干燥处理获得高纯产物。为降低杂质,研究对比了多种后处理方式,发现80℃下在H₂S气氛中干燥能显著抑制副产物生成,产品粒径约10 nm,纯度接近商用电池级Li₂S。该材料用于制备Li₆PS₅Cl固态电解质时,离子电导率达3.1 mS/cm,性能优异且操作温和、工艺绿色,适合扩展用于高纯Li₂S的大规模制备。YANG等^[29]提出了一种基于氢气还原硫酸锂(Li₂SO₄)的绿色合成路线,用于制备高纯Li₂S。该方法以氢气为还原剂,在700℃条件下将预处理后的Li₂SO₄煅烧转化为Li₂S,最终产物纯度可达99.96%,收率最高为81.86%。相比传统碳热还原法,该工艺避免了CO₂等温室气体的生成,具备环境友好性和工业可行性。新合成方法虽具备明显优势,但多集中于实验室研究,技术未完全成熟。

2.6 合成方法比较

目前高纯Li₂S的合成主要集中于固相反应法、溶液法、气相反应法及直接碳还原法4类。各方法在纯度控制、成本、工艺成熟度等方面存在明显差异。固相反应法适合大规模制备,可获得高结晶度、高纯度材料,技术路线较为成熟,但由于其热处理过程能耗大,设备要求高,经济性不佳,且安全性差;溶液法产物形貌可控,在中试规模具有一

定推广潜力,但整体工艺更复杂,易引入杂质,对溶剂系统与后处理提出更高要求;气相反应法产品纯度高,但工艺复杂;直接碳原法工艺成熟,原料易得,成本低廉,但生成气体,对设备密封性要求较高。新兴方法虽具优势,但尚未完全成熟,仍需进一步优化。控制合成过程中的温度、气氛、反应时间、原料粒度与纯度等关键参数,是获得高纯 Li_2S 产品的关键。综合考虑技术成熟度、纯度控制能力和产业化可行性,直接碳还原法和溶液法仍是当前研究和工业中最常采用的方法。

针对不同应用需求,在材料性能、合成成本与工艺适应性之间建立合理平衡,仍是未来高纯 Li_2S 合成工艺优化的重要研究方向。

3 市场分析及未来发展方向

3.1 市场现状与规模分析

近年来,随着全球新能源技术迅猛发展,对高性能储能系统的需求持续攀升。 Li_2S 作为电池正极材料,展现出显著的优势。 Li_2S 理论比容量高达 $1\,166\text{ mA}\cdot\text{h/g}$,远超传统正极材料如锰酸锂($110\text{ mA}\cdot\text{h/g}$)、磷酸铁锂($140\text{ mA}\cdot\text{h/g}$)、钴酸锂($180\text{ mA}\cdot\text{h/g}$)和镍钴锰(NCM523 $160\text{ mA}\cdot\text{h/g}$, NCM811 $195\text{ mA}\cdot\text{h/g}$)。同时, Li_2S 理论能量密度达到 $2\,322\text{ W}\cdot\text{h/kg}$,显著优于现有材料(见表1)。这一特性使 Li_2S 在提高电池能量密度和续航能力方面具有巨大潜力。 Li_2S 相较于常用氧化物正极材料,在热稳定性和电化学惰性方面表现更为优越,因此在提高电池安全性方面具有独特优势。此外,从材料安全性角度来看, Li_2S 具有良好的热稳定性与电化学惰性,相较于高电压工作状态下容易热失控的层状氧化物类材料,在安全性能方面表现更为优越。尽管 Li_2S 存在导电性差与反应速率缓慢等问题,但通过材料改性及界面工程等优化策略,能有效缓解上述限制。因此, Li_2S 凭借其高比容

量、高能量密度及良好的安全性,在下一代高能量密度储能系统中展现出巨大应用前景。

我国在相关产业规划中明确提出,到2027年将实现硫化物全固态电池小规模量产,预计搭载车辆可达3 000辆左右^[31]。按照这一发展预期推算,固态电解质的年需求量将达到300~500 t规模,相应地带动 Li_2S 原材料需求在100~200 t^[32]。随着技术成熟度提升和应用场景不断拓展, Li_2S 在固态电池领域的市场需求有望持续增加,整体材料市场容量预计将在未来几年内实现跨越式增长。 Li_2S 作为其核心前驱材料,正在逐步进入规模化生产与应用阶段。特别是在高能量密度和安全性能需求不断提升的背景下,新能源汽车和储能系统对高纯度电池材料的依赖日益加深,成为推动 Li_2S 市场扩张的直接动力。同时,各国围绕碳中和目标所制定的大规模储能项目加快落地实施,也为 Li_2S 在新型储能体系中的应用提供了更广阔的空间。在技术革新、政策导向和市场需求多重作用下, Li_2S 市场正步入快速发展通道^[30]。

3.2 未来技术发展趋势与研究热点

未来锂硫电池技术的发展将主要聚焦于全固态体系的产业化、工艺优化、寿命提升以及纳米结构调控等关键方向^[33]。其中,全固态锂硫电池(ASSLSBs)因其具备更高的安全性和能量密度,被普遍认为是实现锂硫电池商业化的核心突破口,预计在未来5~10年内,其产业化进程将显著加快。同时,提升生产工艺的成熟度与经济性也将成为重要研究热点,通过优化固相反应法、溶液法及气相反应法等主流合成路线,不仅可以有效提升材料纯度至99.99%以上,还能在保障性能的前提下大幅度降低制备成本,从而增强产业应用的可行性。在性能提升方面,循环寿命与稳定性仍是制约锂硫电池发展的核心技术瓶颈。围绕该问题,未来研究将集中于电解质配方优化、电极/电解质界面稳定性提升以及功能化界面涂层、多功能隔膜材料的构建,以实现更优的循环稳定性和容量保持率。此外,纳米尺度调控在提升 Li_2S 活性物质的电化学性能中表现出巨大潜力,未来将进一步探索颗粒形貌控制与表面功能化策略,以改善界面反应动力学并抑制多硫化锂穿梭效应,从而实现锂硫体系在高比容量、高能量密度、长寿命和高安全性方向的多维度协同优化。

3.3 政策支持与宏观经济环境分析

全球各主要经济体纷纷制定了明确的电动汽车

表1 电池正极材料性能对比^[30]

Table 1 Performance comparison of positive electrode materials for battery

正极材料	价格/ (万元·t ⁻¹)	比容量/ (mA·h·g ⁻¹)	能量密度/ (W·h·kg ⁻¹)	安全性
锰酸锂	4	110	435	良好
磷酸铁锂	4	140	476	好
钴酸锂	25	180	693	差
NCM523	15	160	592	一般
NCM811	18	195	722	差
硫化锂	25	1 166	2 322	好

普及目标与碳中和战略,从政策层面强力推动新能源材料市场的快速扩张。在欧洲,欧盟通过“绿色协议”计划,提出到 2035 年全面禁止销售传统燃油车,进一步加快新能源汽车和储能系统的落地实施;在我国,新能源汽车和储能技术已纳入战略性新兴产业发展规划,“十四五”期间更是投入大量资金支持新能源产业链上下游企业的成长^[34]。这些政策措施对高纯 Li₂S 市场的需求形成了有力推动,为未来其在全球范围内的持续增长奠定了坚实基础。

4 结论

Li₂S 作为锂硫电池及全固态电池体系中的关键材料,在近年来引起了广泛关注。围绕其合成、纯化与应用的研究不断深入,不同合成方法在材料纯度、形貌调控和规模化潜力方面各有优势与限制。新兴技术为 Li₂S 提供了新的制备思路,尽管尚处于实验探索阶段,但展现出较大的发展潜力。随着高比能储能系统的逐步推进, Li₂S 的材料性能、界面稳定性和制备工艺将成为决定其实际应用的重要因素。电池工业化进程对其纯度和结构提出了更高要求,同时也推动了合成路线的持续优化。在政策、技术和市场多重驱动下, Li₂S 的研究正逐步从材料开发向体系集成过渡,未来其在能源存储、功能材料及交叉领域中的应用值得持续关注。

[参考文献]

[1] 周豪慎.为绿色能源赋能:动力电池和储能电池的发展与创新[J].科学通报,2025,70(9):1115-1117.
ZHOU H S. Empowering green energy: Development and innovation of powerbatteries and energy storage batteries [J]. Chinese Science Bulletin,2025, 70(9): 1115-1117.

[2] 张朝龙,张侯峰,陈阳,等.基于 CNN-CBAM-BiLSTM 融合模型的锂离子电池健康状态估计方法[J/OL].电源学报.https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250410.1125.012.
ZHANG C L, ZHANG Y F, CHEN Y, et al.Lithium ion battery based on CNN-CBAM-BiLSTM fusion model state of health estimation method[J/OL]. Journal of Power Supply. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250410.1125.012.

[3] LU P S, XIA Y, SUN G C, et al.Realizing long-cycling all-solid-state Li-Inll TiS₂ batteries using Li_{6-x}M_xA_{1-x}S₄I (M=Si, Sn) sulfide solid electrolytes [J].Nature Communications, 2023, 14(1):4077.

[4] DEISEROTH H J, KONG S T, ECKERT H, et al.Li₆PS₅X: A class of crystalline Li-rich solids with an unusually high Li⁺ mobility [J].Angewandte Chemie,2008,120(4):767-770.

[5] NEUMANN J, PETRANIKOVA M, MEEUS M, et al.Recycling of lithium-ion batteries—current state of the art, circular economy, and next generation recycling [J]. Advanced Energy Materials, 2022,12(17):1-26.

[6] 孙家乐,田欢,雷振,等.全固态电池关键材料-硫化锂制备研究

进展[J/OL].无机盐工业.https://doi.org/10.19964/j.issn.1006-4990.2024-0517.

SUN J L, TIAN H, LEI Z, et al.Advances in the preparation of lithium sulphide, a keymaterial for all-solid-state batteries [J/OL]. Inorganic Chemicals Industry. https://doi.org/10.19964/j.issn.1006-4990.2024-0517.

[7] HIESGEN R, SÖRGE S, COSTA R, et al.AFM as an analysis tool for high-capacity sulfur cathodes for Li - S batteries [J]. Beilstein Journal of Nanotechnology,2013,4(1):611-624.

[8] WIHEEB A D, SHAMSUDIN I K, AHMAD M A, et al.Present technologies for hydrogen sulfide removal from gaseous mixtures [J].Reviews in Chemical Engineering,2013,29(6):449-470.

[9] LI S Q, LENG D, LI W Y, et al.Recent progress in developing Li₂S cathodes for Li₂S batteries [J].Energy Storage Materials, 2020,27:279-296.

[10] JI X L, LEE K T, NAZAR L F A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries [J].Nature Materials,2009,8(6):500-506.

[11] LIU Y Z, MENG X Y, SHI Y, et al.Long-Life Quasi-Solid-State Anode-Free Batteries Enabled by Li Compensation Coupled Interface Engineering [J].Advanced Materials, 2023, 35 (42) : e2305386.

[12] 李铁南.锂电池生产露点控制[J].内江科技,2010,31(10):113,116.

[13] 韩建军.硫化锂制备工艺综述[J].河南化工,2020,37(1):10-13.
HAN J J.Review of Preparation Process of Lithium Sulfide [J]. Henan Chemical Industry,2020, 37(1): 10-13.

[14] 李良彬,叶明,潘志芳,等.一种利用电池级金属锂制备高纯硫化锂的方法:CN116040587A[P].2023-05-02.

[15] 梁初,胡梦茹,王凯,等.一种硫化锂的绿色高效制备方法:CN112125322B[P].2022-04-15.

[16] SMITH W H, VASELABADI S A, WOLDEN C A.Synthesis of high-purity Li₂S nanocrystals via metathesis for solid-state electrolyte applications [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023,11(14):7652-7661.

[17] 韩金龙,陆子恒,杨春雷.一种硫化锂的制备方法:CN114394608A[P].2022-04-26.

[18] 何志达,朱刘,高远,等.一种高纯硫化锂的制备方法及装置:CN105016310A[P].2015-11-04.

[19] WARREN Z, ROSERO-NAVARRO N C.Solution-Based Suspension Synthesis of Li₂S-P₂S₅ Glass-Ceramic Systems as Solid-State Electrolytes:A Brief Review of Current Research [J]. ACS Omega,2024,9(29):31228-31236.

[20] FANG L R, ZHANG Q R, HAN A G, et al.Green synthesis of the battery material lithium sulfide via metathetic reactions [J]. Chemical Communications,2022,58(36):5498-5501.

[21] 罗发洪,朱辰.一种硫化锂的制备方法:CN108400327A [P]. 2018-08-14.

[22] 陶升东,李荐.一种制备硫化锂的方法:CN108190845A [P]. 2018-06-22.

[23] JACOB S R, BROWN P M.Process for producing high purity lithium sulfide:US19780872310[P].1978-01-25.

[24] LI X M, WOLDEN C A, BAN C M, et al.Facile synthesis of

(下转第 90 页)