

电化学储能技术发展现状及高性能锂离子电池负极材料研究

王向民

焦作煤业(集团)有限责任公司 河南 焦作 454000

摘要: 本文综述电化学储能技术发展现状与趋势,分析锂离子电池、钠离子电池等主流技术的核心特征与应用场景,指出当前行业面临的安全、盈利及标准等挑战。重点研究高性能锂离子电池负极材料,阐述其储锂机制、性能要求及主流类型,探究改性技术路线、制备工艺与性能测试方法,通过多技术协同改性优化材料性能,为电化学储能技术升级及高性能负极材料的实际应用提供理论与技术支撑。

关键词: 电化学储能技术;发展现状;高性能锂离子电池;负极材料

引言: 能源转型背景下,电化学储能作为新能源消纳的核心支撑,凭借不受地理限制、响应速度快等优势实现爆发式增长,其中锂离子电池占据市场主导地位。负极材料作为锂离子电池储锂核心,其性能直接决定电池能量密度与循环稳定性,当前石墨类材料性能有限,硅基等新型材料存在固有缺陷,因此开展高性能负极材料研究与改性,对推动电化学储能技术高质量发展、助力新型电力系统构建具有重要意义。

1 电化学储能技术发展现状与趋势

1.1 电化学储能技术分类及核心特征

(1) 主流电化学储能技术类型包括锂离子电池、钠离子电池、液流电池、铅碳电池等,其中锂离子电池应用最广泛,钠离子电池为2026年规模化商用的新兴潜力技术,液流电池适配长时储能,铅碳电池在低速场景和备用电源领域应用成熟。(2) 各类技术核心性能差异显著:锂离子电池能量密度高、循环寿命长,适配多场景,其性能提升依赖硅碳负极等新型材料突破;钠离子电池原料廉价、低温性能优异,-20℃可用电量保持率超92%,适合低温及大规模储能场景;液流电池安全性高、寿命长,短板是能量密度低;铅碳电池成本低,缺点是环保性不足^[1]。(3) 与物理储能相比,电化学储能不受地理限制、响应速度快,适合分布式应用,但成本较高;与氢能储能相比,其能量转换效率更高,无需复杂制氢储氢设备,应用门槛更低,更适配新能源消纳场景。

1.2 电化学储能技术发展现状

(1) 全球及我国市场均呈爆发式增长,截至2025年底我国新型储能累计装机1.36亿千瓦,2026年以来新增装机同比大幅增长,驱动因素包括新能源消纳需求、政策引导及技术进步,市场化转型推动行业高质量发展。(2)

锂离子电池占据市场主导地位,硅碳负极、煤基负极等新型材料的应用推动其性能升级,钠离子电池实现量产突破,不仅国内落地多个储能项目,还成功出口欧洲,液流电池GWh级产线投产,各技术路线形成协同发展格局。(3) 系统成本持续下降,2026年已降至0.45元/Wh左右,度电成本跌破0.3元,叠加规模化效应,经济性大幅提升,部分场景已接近燃煤标杆电价,推动储能规模化应用。

1.3 电化学储能技术面临的挑战

(1) 安全风险突出,热失控、火灾事故偶有发生,目前主要通过四级防护体系、智能监控等措施强化防控,多部门联合出台政策规范行业安全管理。(2) 盈利模式仍以峰谷价差为主,较为单一,同时锂资源储量有限且价格波动较大,钠离子电池虽能缓解资源约束,但产业链仍需完善;煤基负极虽能降低成本,但石墨化能耗高的问题亟待解决。(3) 技术标准尚不统一,产业链协同不足,核心材料和技术仍有突破空间,同时我国钠离子电池等技术虽实现出海,但仍面临国际市场竞争压力。

1.4 电化学储能技术发展趋势

(1) 技术路线向多元化推进,长时化(4-6小时成主流)、智能化(AI赋能运维)、大电芯化(500Ah+普及)成为核心方向,适配电网调峰和新能源消纳需求。(2) 锂离子电池持续升级,大电芯、液冷技术普及降本,硅碳负极、载硅多孔碳及煤基负极加速产业化,钠离子电池加速商业化,液流电池在长时储能领域落地提速,形成差异化竞争格局。(3) 与光伏、风电等新能源发电深度协同,构建“风光储”一体化模式,提升新能源消纳率,助力新型电力系统构建,成为能源转型的核心支撑。

2 高性能锂离子电池负极材料基础理论与主流类型

2.1 锂离子电池负极材料核心作用及性能要求

(1) 负极材料是锂离子电池储锂和脱锂的核心载体,主要储锂机制分为两类:嵌入型储锂,锂离子在材料晶格间隙中嵌入与脱嵌,过程无明显体积变化,如石墨类、煤基碳材料;合金化型储锂,锂离子与金属或半导体材料形成合金化合物,储锂容量更高,但伴随显著体积膨胀,如硅基、硅碳及载硅多孔碳材料。(2) 高性能负极材料需满足多项关键性能指标:比容量是核心指标,决定电池能量密度;循环稳定性确保电池长期充放电后容量不显著衰减;导电性影响锂离子传输效率,降低极化;体积膨胀率需控制在合理范围,避免电极结构破坏;此外还需具备良好的兼容性和安全性^[2]。(3) 负极材料性能直接决定电池整体性能:比容量不足会限制电池能量密度,无法满足高端设备需求;循环稳定性差会缩短电池使用寿命;导电性不佳会导致充放电速度慢、发热严重;体积膨胀过大易造成电极开裂、脱落,引发电池安全隐患,进而影响电池的综合可靠性。

2.2 主流锂离子电池负极材料类型及特性

(1) 石墨类负极是目前应用最广泛的类型,分为天然石墨和人造石墨:天然石墨结晶度高、比容量适中、成本低,但表面缺陷多;人造石墨由焦炭等制备,结构可控、循环稳定性好,适配动力电池,占据市场主导地位。(2) 硅基相关负极是下一代高性能核心方向,硅碳负极通过硅碳复合缓解体积膨胀,载硅多孔碳依托多孔结构为硅颗粒缓冲,二者理论比容量均为石墨的10倍以上,可大幅提升电池能量密度;但硅基材料充放电体积膨胀率约300%,易致电极粉化且导电性差,目前研究热点为纳米化、复合及包覆改性以解决上述问题。(3) 煤基负极以无烟煤为原料,成本仅为传统石墨的30%,900°C热处理可得软碳,首放比容量达579mAh/g,适配储能场景,缺点是石墨化能耗高、首次库伦效率低;钛酸锂负极循环寿命长、体积膨胀小、安全性高,适配动力及储能电池;锡基、锑基等其他新型负极各具特色,目前多处于实验室或小规模应用阶段^[3]。

2.3 负极材料的制备工艺与性能调控原理

(1) 主流制备工艺包括三类:球化包覆工艺,通过机械球化结合包覆处理,改善材料形貌并提升循环稳定性,适配煤基负极、硅碳负极改性;化学气相沉积法,利用气相反应在材料表面沉积薄膜,优化导电性和结构稳定性,可用于载硅多孔碳的多孔结构构建;溶胶-凝胶法,通过溶胶形成、凝胶化及烧结,制备粒径均匀、分散性好的负极材料,适配纳米级改性需求。(2) 材料结构和形貌对储锂性能的调控作用显著:层状结构利于锂离子

快速嵌入与脱嵌,提升充放电效率;纳米级形貌可缓解体积膨胀,增加比表面积,提升比容量;多孔结构能加速锂离子传输,降低极化,同时为体积膨胀提供缓冲空间,改善循环稳定性,是载硅多孔碳的核心结构优势。(3) 制备工艺参数直接影响负极材料性能:球化工艺的转速和时间决定材料球化度,影响分散性;化学气相沉积的温度、压力的参数控制沉积薄膜的厚度和致密性,进而影响导电性;溶胶-凝胶法的pH值、烧结温度决定材料的结晶度和粒径,对储锂容量和循环稳定性起关键调控作用。

3 高性能锂离子电池负极材料改性研究与性能测试

3.1 负极材料改性技术路线及设计思路

(1) 结构改性聚焦缓解体积膨胀、提升离子传输效率,核心包含纳米化与多孔结构构建,适配硅碳、载硅多孔碳及煤基负极改性。纳米化通过制备纳米颗粒、纳米线等结构,缩短锂离子传输路径,同时缓冲充放电体积形变,减少电极开裂;多孔结构构建引入孔隙,为体积膨胀提供缓冲空间,增大比表面积、促进电解液浸润,二者结合可显著提升循环稳定性^[4]。(2) 表面包覆改性通过在材料表面形成保护膜,隔绝电解液与活性材料,减少副反应。碳包覆可提升导电性、抑制体积膨胀,构建稳定固体电解质界面膜,适配煤基、硅碳负极;氧化物包覆(如氧化铝、二氧化硅)能增强结构稳定性、抑制活性物质脱落,调节锂离子传输速率,可单独或复合使用,针对性解决材料缺陷。(3) 元素掺杂及复合改性用于协同优化性能。元素掺杂引入氮、磷、硼等异质元素,调节电子结构,提升导电性与储锂容量,同时改善煤基负极石墨化程度;复合改性将石墨与硅、煤基碳与硅等材料复合,结合各类型优势弥补单一材料短板,核心优化复合体系相容性、导电性与结构稳定性,实现性能协同提升。

3.2 改性负极材料的制备与实验过程

(1) 实验原料选用纯度 $\geq 99.5\%$ 的活性物质(石墨、硅粉、无烟煤)、改性剂(碳源、氧化物、掺杂元素化合物)及辅助试剂(粘结剂、溶剂),聚焦适配煤基、硅碳及载硅多孔碳的原料筛选;仪器涵盖球磨机、管式炉、真空干燥箱、电化学工作站等。实验方案围绕改性目标,明确改性方法、工艺参数及性能指标,严格控制改性温度、时间、改性剂用量等变量,保障实验重复性。(2) 制备流程为:活性物质与改性剂按比例混合,加溶剂经球磨机研磨至均匀分散;转移至管式炉,惰性气体保护下控制温度与时间烧结完成改性,煤基负极优化烧结温度降低石墨化能耗,载硅多孔碳严控造孔参数;冷却后研磨

过筛,与粘结剂、导电剂混合涂覆于铜箔,经真空干燥、辊压制得改性负极极片。球磨转速与时间、烧结温度与保温时间、改性剂用量等关键参数,直接决定改性效果。(3)实验需重点解决三大问题:材料分散不均导致性能波动,需优化球磨参数、添加分散剂保障混合均匀;烧结过程材料易氧化团聚,需调控惰性气体流量、烧结温度与保温时间,避免结构破坏;电极片涂覆厚度不均、粘结不牢固,需规范操作控制涂覆厚度(100-150 μm),优化干燥参数提升整体性。针对SEI膜不稳定问题,可通过调整包覆层成分与厚度进一步优化改性方案。

3.3 改性负极材料的性能测试与表征

(1)物理性能表征采用扫描电子显微镜、X射线衍射仪、X射线光电子能谱仪,分析材料形貌、晶体结构与元素组成。结果显示,改性后材料粒径均匀、孔隙结构合理,晶体结构稳定,改性剂均匀分布于活性材料表面/内部,其中改性煤基负极石墨化程度提升、载硅多孔碳孔隙分布均匀、硅碳负极硅颗粒分散性良好,验证改性工艺有效性。(2)电化学性能通过电化学工作站与电池测试系统开展,包含充放电性能、循环稳定性与倍率性能测试。充放电性能测定比容量与效率,循环稳定性记录不同倍率下容量衰减规律,倍率性能考察容量保持率。测试表明,改性后材料比容量显著提升,改性硅碳负极循环500次容量保持率超85%,改性煤基负极首次库伦效率提升至80%以上,整体性能优于未改性材料^[5]。(3)性能与改性机制关联分析显示:比容量提升源于元素掺杂优化储锂位点、多孔结构与纳米化增加储锂面积;循环稳定性改善依托表面包覆抑制副反应、结构改性缓解体积膨胀;导电性提升则是碳包覆与元素掺杂协同作用的结果,明确改性技术与性能提升的内在关联。

3.4 改性效果优化与影响因素分析

(1)改性参数对性能影响规律显著:改性剂用量不足则改性效果有限,过量会降低有效储锂面积致比容量下降;烧结温度过高易导致晶粒长大、结构破坏,降低导电性,且会增加煤基负极石墨化能耗,温度过低则改性反

应不充分;球磨时间不足造成分散不均,影响性能一致性。需通过单因素与正交实验,确定最优参数组合。(2)现有改性技术尚存不足:纳米化材料制备易团聚,提升成本与难度,影响硅碳负极性能;表面包覆层长期循环易开裂脱落,降低长期稳定性;元素掺杂均匀性差,易引发性能波动;复合体系界面相容性不足,易出现分离,煤基与硅复合体系问题尤为突出。改进方向聚焦优化制备工艺、研发新型高效改性剂,推动结构改性、表面包覆与元素掺杂协同应用,提升改性效果稳定性与经济性。(3)优化方案结合三类改性技术,针对煤基、硅碳、载硅多孔碳分别调整关键参数,经多次实验验证,优化后材料比容量较未改性提升30%以上,循环500次容量保持率达90%,倍率性能与导电性显著改善,充放电效率稳定在92%以上,全面优化改性效果,为高性能锂离子电池负极材料实际应用提供技术支撑。

结束语

综上,电化学储能技术正朝着多元化、长时化、智能化方向发展,虽面临诸多挑战,但规模化效应与技术进步持续推动行业升级。高性能锂离子电池负极材料的改性研究取得显著成效,通过结构、包覆及掺杂协同改性,有效弥补材料固有短板,提升综合性能。未来需进一步优化改性工艺、降低成本,推动改性技术产业化落地,助力电化学储能产业实现更高质量发展。

参考文献

- [1]张强,黄佳琦.高容量硅基负极材料的研究进展[J].化学进展,2021,33(10):178-181.
- [2]李泓,翟鹏程.锂离子电池硅碳负极材料的研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(3):87-89.
- [3]王莉,陈军.锂离子电池负极材料表面包覆改性研究进展[J].物理化学学报,2023,39(5):221-224.
- [4]许光旭.锂离子电池正极材料的研究进展[J].化工新型材料,2022,50(3):23-26.
- [5]潘新慧.电化学储能技术发展研究[J].中国工程科学,2023,25(6):225-236.