

石墨烯在锂离子电池负极材料中的应用

邵浩明

湖南省地质实验测试中心, 湖南 长沙 410007

DOI:10.61369/ME.2025120062

摘要 : 在储能产业持续发展的推动下, 提升锂离子电池负极材料性能稳定性成为行业主要研究方向。基于此, 文章分析了石墨烯用作锂离子电池负极材料的优势, 并重点探讨其作为负极主体、导电添加成分、活性材料协同组分以及外层包覆材料的多种应用方式, 阐明石墨烯在参与锂离子存储、辅助电流传导、分散充放电应力及稳定界面结构方面的作用原理。研究认为, 将石墨烯用作锂离子电池负极材料可以提升锂离子电池性能。

关键词 : 石墨烯; 锂离子电池; 负极材料

Application of Graphene in Lithium-Ion Battery Anode Materials

Shao Haoming

Hunan Geological Experimental Testing Center, Changsha, Hunan 410007

Abstract : Driven by the continuous development of the energy storage industry, improving the performance stability of lithium-ion battery anode materials has become the main research direction in the industry. Based on this, this article analyzes the advantages of using graphene as a lithium-ion battery anode material, and focuses on discussing its various application methods as the main body of the anode, a conductive additive component, a synergistic component of active materials, and an outer coating material. It clarifies the principle of graphene's role in participating in lithium-ion storage, assisting in current transmission, dispersing charging and discharging stress, and stabilizing interface structure. The research suggests that using graphene as a lithium-ion battery anode material can enhance the performance of lithium-ion batteries.

Keywords : **graphene; lithium-ion battery; anode materials**

引言

在“双碳”目标与新能源汽车产业高质量发展的背景下, 提升锂离子电池性能已成为行业关注的主要话题。工业和信息化部发布的《锂离子电池行业规范条件(2024年本)》提出, 锂离子电池行业要提升材料性能与制造水平, 推动锂离子电池朝着高能量密度高安全性方向迈进。工业和信息化部启动汽车动力电池碳足迹申报工作, 释放以标准化核算与数据核查倒逼供应链低碳化、可追溯化的政策信号, 进一步强化对电池材料性能稳定性与应用可靠性的严苛要求。《产业结构调整指导目录(2024年本)》同样将高性能电池材料纳入重点支持范畴, 体现关键材料对于新能源汽车产业链的支撑作用。在这样的政策导向下, 探讨石墨烯在锂离子电池负极材料中的应用, 具备扎实的现实基础。

一、石墨烯用作锂离子电池负极材料的优势

(一) 导电性能突出

锂离子电池负极的电子传输效率关系电极极化程度, 石墨烯拥有连续的二维共轭结构, 其碳原子以杂化方式排布, 可支撑电子在片层内快速迁移, 具备优异的导电特性。相比传统石墨颗粒主要依靠“点一点”接触的导电模式, 石墨烯用作负极材料更易形成片层搭接的导电网络, 在电极内部形成连续且低阻抗的电子传输通道。石墨烯优异的导电连续性, 能够维持电极在循环过程

中的稳定导电状态, 为负极材料在较高电流密度下稳定工作提供可靠的电子传输保障^[1]。

(二) 储锂空间充足

石墨烯用作锂离子电池负极的储锂优势, 源于其独特的二维片层结构。石墨烯作为一种新型的单原子层二维碳材料, 具有超大的比表面积, 优异的导热、导电、力学性能以及化学稳定性等。这让石墨烯的锂离子存储摆脱传统层间嵌入的单一途径, 在片层表面、缺陷位点以及局部无序区域完成储锂, 由此拓展储锂空间。化学还原或热还原法制备的石墨烯负极, 可逆比容量普遍

超过石墨372mAh/g，部分薄层石墨烯材料在初始循环阶段还能展现出更优异的锂存储能力。这一现象与石墨烯片层中丰富的边缘结构、缺陷位点以及未完全恢复的层间距密切相关。石墨烯片层堆叠形成的微孔结构，还能助力电解液充分浸润电极内部，有效利用更多储锂位点。

（三）延缓充放电变形

充放电过程中的体积变化是影响负极材料服役时长的主要因素，石墨烯的单层或少层片状结构兼具较高力学强度与良好柔韧性，能够在电极内部形成连续分布的二维支撑单元。当活性材料在嵌锂脱锂过程中出现体积膨胀或收缩时，石墨烯片层可凭借自身形变分散局部应力，避免应力集中作用于活性颗粒，进而缓解颗粒破裂。石墨烯包裹金属氧化物或硅基负极材料时，其片层结构可以对活性颗粒形成约束作用，把体积变化限制在更小尺度内，助力维持电极整体结构稳定。石墨烯形成的柔性网络能在多次循环过程中保持电极结构完整，降低活性材料因反复变形出现的粉化脱落风险。这种兼具强度与韧性的结构特性，正是石墨烯在负极材料中展现出延缓充放电体积变形优势的原因。

（四）应用搭配范围广

石墨烯具备较宽的应用搭配范围，与其良好的化学惰性相关，这种特性使其不易与常见电解液环境与工作电位区间发生副反应，能够与多种负极活性材料共存且不增加额外反应风险。从材料形态来看，石墨烯可以片层形态分散于电极内部，也能用作包覆层，适配不同需求。石墨烯已被广泛应用于石墨类、金属氧化物类以及硅基负极材料，通常充当导电网络或是活性颗粒承载基底。石墨烯用作锂离子电池负极时，无需大幅调整原有电极制备流程，正因如此石墨烯展现出较为突出的应用搭配优势^[2]。

二、石墨烯在锂离子电池负极材料中的主要应用方式

（一）直接用作负极，参与锂离子存储

将石墨烯直接作为新能源汽车锂离子电池负极材料进行应用是最简单和直接的一种方式，即将石墨烯粉体直接与导电剂和黏

表1. 锂离子电池负极各成分占比

材料类别	材料示例	占比	主要功能说明
负极活性材料	人造石墨/天然石墨、硅碳复合材料等	92%-96%	存储锂离子的主体材料，石墨烯不替代该部分。
	石墨烯（粉体或浆料）	0.5%-3%	构成成长程导电网络，增强电极整体导电性；用量过高可能导致浆料分散困难或成本增加。
导电添加剂	传统导电炭黑（如 SuperP）	1%-3%	提供颗粒间点对点接触的导电通路，与石墨烯形成互补。
黏结剂	SBR、CMC、PVDF等	1.5%-3%	固定活性材料与导电剂，保障电极结构完整性，用量需兼顾黏结性与柔韧性。
溶剂（湿法配料）	去离子水（水系）或 NMP（油系）	根据需要调节	分散材料形成均匀浆料，干燥后挥发，不计入干基质量。

配料阶段不能以石墨烯替代主体负极材料，需协同使用其与传统导电炭材，石墨烯的作用是补充原有导电网络的不足，在不改变原有材料结构的前提下优化电极内部电子流动路径。配制料浆时分批次加入石墨烯，可以确保其均匀分布于负极浆料中，避免局部团聚影响导电连续性。随着涂布和辊压工序的完成，石墨烯片层被固定在活性材料颗粒之间，与集流体共同形成多点连接

结剂混合制成立极浆料，并涂布在铜箔上制成负极片。石墨烯直接用作负极介于储锂行为时，锂离子与材料的相互作用发生在石墨烯自身结构之中。由此石墨烯在电极中的功能定位更加清晰明确，充分体现出自身作为负极材料的独立性。在实际应用层面，该路径多用于评估材料潜力，能够为优化锂离子电池负极设计提供有力参考依据。

石墨烯直接用作负极材料，通常围绕材料制备、电极成型和储锂行为三个层面展开。先采取化学还原或热还原制备少层或薄层石墨烯粉体，并在控制片层厚度的前提下，将其作为主要活性物质加入负极配方。电极制备阶段石墨烯占比较高，与黏结剂共同构成完整负极结构，在电极中独立承担储锂功能。行业关注的重点为凭借分散工艺让石墨烯片层连续覆盖集流体表面，避免过度团聚导致有效储锂界面减少。这种处理方式使锂离子在充放电过程中直接吸附于石墨烯片层表面、边缘区域及局部无序结构，实现多路径的储锂。电池运行中，石墨烯直接参与锂离子存储，使电子传输和锂离子扩散发生于同一材料内部，减少界面转换环节，有助于保持充放电过程中电极反应的一致性，使负极在反复循环中维持相对稳定的工作状态^[3]。

（二）作为添加成分，辅助电流传导

石墨烯作为添加成分应用于锂离子电池负极时，其在电极中的位置和用量具有明确限定，不承担主要储锂功能，仅以少量形式分散分布于电极结构内部。这种应用方式下，石墨烯参与电极内部的电流传导过程，在活性材料颗粒之间发挥连接补充作用。在不改变原有负极材料主体组成的前提下，让电极内部形成更连续的电子传输通路，进而改善电极的整体运行状态。相比直接作为负极材料使用的模式，这一应用路径突出“辅助而非替代”的定位，功能指向也更为清晰。

石墨烯作为添加成分应用于锂离子电池负极时，并不是简单地“多加一种材料”，会围绕电极内部电流传导路径采取有针对性的设计。一般在负极配方中加入少量石墨烯，与原有负极活性材料、导电剂和黏结剂共同构成浆料（如表1所示）。

的电子传导通道。充放电过程中，电子沿着石墨烯片层形成的通路流动，进而降低电极内部的传导阻力。传导方式的转变，有助于缓解高倍率工作条件下的电流集中现象，让电极反应保持更均匀的状态。结合实际使用效果分析，石墨烯作为添加成分应用于负极，能够在不显著增加材料用量的前提下，改善电极循环过程中的电流分布状态，这种应用方式尤其适用于对倍率性能较高的

锂离子电池负极。

(三) 结合活性材料, 分散充放电应力

石墨烯结合活性材料时, 主要服务于硅、锡等合金类或转换反应类高容量负极活性材料。这些材料在锂离子嵌入和脱出过程中会发生剧烈的体积膨胀收缩, 易导致电极粉化失效, 石墨烯在其中承担缓冲功能, 形成兼具导电性与机械柔韧性的三维网络, 用以包裹活性材料颗粒。在充放电过程中, 石墨烯凭借其优异的力学性能, 分散活性材料内部的应力变化, 抑制颗粒破裂团聚, 同时维持电极整体导电网络稳定。

石墨烯与体积变化较大的负极活性材料结合时, 优先参与锂离子电池负极制备流程, 在液相剥离法下展开片层, 并与活性颗粒接触。液相剥离法是一种从石墨中直接制备单层石墨烯的方法, 使用不同的液体溶剂和物理手段分散和剥离石墨层。混合过程中, 工作人员需控制混合时间, 使石墨烯片层一部分贴附在活性颗粒表面, 另一部分跨越相邻颗粒形成连接, 避免单颗粒在后续充放电中孤立承受形变。随后进入粉体处理阶段, 常采用喷雾干燥方式, 让石墨烯与活性材料固化为结构更稳定的复合颗粒。这一过程并非简单聚合, 需要石墨烯在颗粒内部形成连续的柔性支撑网络, 使复合颗粒具有适应体积变化的能力。在锂离子电池充放电过程中, 活性材料发生嵌锂和脱锂反应, 石墨烯片层的弯曲、滑移和褶皱吸收体积变化, 使应力不再集中作用于颗粒本体。与此同时, 跨颗粒分布的石墨烯片层在出现局部微裂纹时仍能维持颗粒连通, 避免裂纹迅速扩展为贯穿性破坏。石墨烯结合活性材料, 使充放电应力“多点分散”, 电极内部的反应区域保持相对稳定。

(四) 包裹传统材料, 延长使用寿命

在锂离子电池的各组成部分中, 电极材料是其关键与核心, 它直接决定了电池的容量、能量密度、循环寿命和抗负荷能力等多项主要性能。把石墨烯制备成保护性包覆层应用到传统负极材料表面, 能够提升锂离子电池负极长期循环过程中的界面稳定性与结构完整性, 而非大幅提高材料的比容量。包裹形式就是在活性颗粒表面形成一层极薄致密且具备导电性能的石墨烯外壳, 这层外壳首先可充当物理屏障, 减少活性材料与电解液的直接接触, 进而抑制副反应。石墨烯本身具备的高机械强度, 能够为内部材料提供额外径向约束, 缓冲颗粒在锂离子反复嵌入脱出过程中产生的微体积变化^[4]。

应用石墨烯包裹传统负极材料时, 应优先选取人造石墨或天然石墨这类成熟负极颗粒作为包覆对象。这类材料性能稳定且工艺适配性强, 适合在不改变材料本身属性的前提下进行外层包覆处理。工作人员应以让石墨烯均匀铺覆颗粒表面为起点, 先将石墨烯或更便于分散的氧化石墨烯调配成稳定分散液, 再向其中投入石墨颗粒, 借助高速分散、湿法混合或剪切搅拌等工艺, 促使

参考文献

- [1] 张弛. 石墨烯复合材料在锂离子电池负极中的导电性 [J]. 唐山师范学院学报, 2025, 47(03): 14-19.
- [2] 赵露, 奕应科, 袁国辉, 李子坤, 王朝阳, 李云. 锂离子电池石墨烯/硅负极材料的制备及电化学性能研究 [J]. 当代化工研究, 2024, (23): 1-3.
- [3] 秦圆, 赵春玲. 锂离子电池硅/石墨烯负极材料制备技术研究进展 [J]. 广州化工, 2024, 52(02): 1-3+9.
- [4] 李东霖, 杨万亮, 曹锐, 杨雪, 徐梅松. 球型 Si 基碳包覆锂离子电池负极材料研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(21): 50-60.

石墨烯片层贴附颗粒表面。后续采取过滤干燥、喷雾干燥或轻度热处理的方式, 把片层固定在颗粒外层, 形成连续或半连续的包覆结构(如图1所示)。

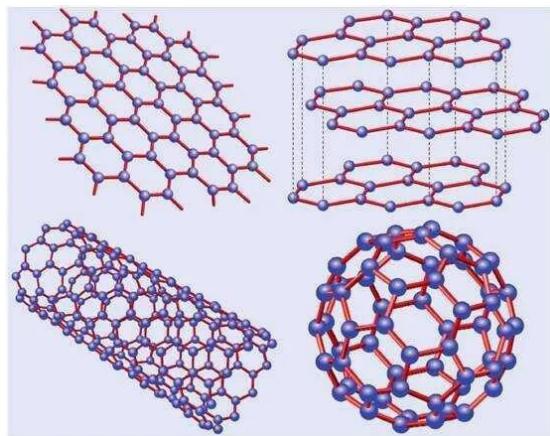


图1. 不同形状的石墨烯纳米材料示意图

该过程的要点在于让包覆层完整覆盖颗粒外表面, 又不会堵塞颗粒间的孔隙, 以此保障顺利推进后续工序。进入电极制造环节后, 按照常规工艺混合经过包覆处理的石墨粉体与黏结剂、导电剂, 再涂布到铜箔表面并辊压定型。由于石墨烯本身就附着在颗粒外层, 它在电极内部处于颗粒与电解液接触界面附近, 能够在充放电全程持续调控表层反应环境。石墨烯外层能够减少电解液对石墨表面的冲刷, 让界面反应集中发生在稳定区域, 固态电解质界面膜形成的均匀覆盖层, 降低因膜层反复增厚造成的活性锂消耗。石墨颗粒循环会引发表面应力变化, 石墨烯片层具备一定柔性, 可随颗粒表面形变发生微滑移, 减轻固态电解质界面膜因脆性破裂而反复再生的倾向。其次石墨烯形成的包覆层还能连通颗粒, 当局部颗粒的接触状态因长期循环出现松动时, 相互搭接的石墨烯片层可维持颗粒间的电子传输通路, 避免电极内部因局部失联出现反应不均。这种包覆处理下, 石墨烯可以调节电极长期工作状态, 最终实现提升界面稳定性的应用效果。

结束语: 石墨烯用作锂离子电池负极材料的价值, 体现为适配不同应用场景的能力。无论是直接充当负极主体, 或是作为功能性添加成分, 又或是以搭配、包覆的方式参与, 石墨烯都能够表现出优良性能。这种角色灵活可变、作用精准可控的材料特性, 让石墨烯成为衔接基础研究与工程应用的纽带。虽然石墨烯材料的优点确实很多, 但是它的缺点也是极其明显, 首先便是, 作为一种可多次循环使用的材料, 它具有以下缺陷: 目前石墨烯还没达到实用化阶段, 离大批量生产还有很长的路要走。随着制备工艺的成熟, 石墨烯有望在满足负极材料高性能使用需求的同时, 更好地服务于锂离子电池长期安全可靠运行。