

水性负极粘结剂在锂电池中的应用价值 与性能提升理论分析

肖创洪 户献雷 李清河 (广州天赐高新材料股份有限公司, 广东 广州 510700)

摘要: 本文围绕水性负极粘结剂在锂电池中的应用展开研究。首先阐述了其应用价值, 包括环境友好性驱动绿色制造转型、电化学性能优化带来能量密度突破以及成本控制催化的产业升级效应。接着提出应用策略, 如优化分子结构与电极界面适配性、强化与电解液相容性及稳定性、构建多尺度协同作用的复合体系。进而探讨应用性能提升策略, 包括精准调控官能团配比、创新复合结构设计、优化与电极材料的界面工程。通过这些策略提升锂电池性能, 为水性负极粘结剂在锂电池领域的进一步发展提供理论支持。

关键词: 水性负极粘结剂; 锂电池; 应用价值; 性能提升; 理论分析

中图分类号: TM912

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 030-0055-03

Theoretical analysis of the application value and performance improvement of water-based negative electrode binder in lithium batteries

Xiao Chuanghong, Hu Xianlei, Li Qinghe (Guangzhou Tianci High tech Materials Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510700, China)

Abstract: This article focuses on the application of water-based negative electrode binders in lithium batteries. Firstly, its application value was elaborated, including the environmentally friendly driving of green manufacturing transformation, the breakthrough in energy density brought about by electrochemical performance optimization, and the industrial upgrading effect of cost control catalysis. Next, application strategies are proposed, such as optimizing the compatibility between molecular structure and electrode interface, enhancing compatibility and stability with electrolyte, and constructing composite systems with multi-scale synergistic effects. Further explore strategies for improving application performance, including precise control of functional group ratios, innovative composite structure design, and optimization of interface engineering with electrode materials. By implementing these strategies to enhance the performance of lithium batteries, theoretical support is provided for the further development of water-based negative electrode binders in the field of lithium batteries.

Keywords: water-based negative electrode binder; Lithium batteries; Application value; Performance improvement; Theoretical analysis

锂电池技术目前处于持续发展的状态, 水性负极粘结剂由于独特的优势逐渐成为研究和应用的关键热点。这种技术不仅能够顺应环保要求, 也能够有力提升锂电池性能, 但充分发挥其优势, 实现更优的应用效果是当前面临的重要问题。本文将重点探讨, 这种粘结剂在锂电池中的应用方法, 进一步提出优化应用成效的实践策略, 力求为相关领域的研究和实践提供可参考的信息, 推动锂电池技术向更加节能环保的方向发展。

1 水性负极粘结剂在锂电池中的应用价值

1.1 环境友好性驱动的绿色制造转型

现阶段全球碳中和是宏观战略背景水性负极粘结剂, 有非常明确的环境友好特性。能够推动锂电池制造向绿色高效的方向发展, 相比于传统的油性粘结剂依赖 NMP 这类。有机溶剂的特征水性体系主要以水作为介质从源头上消除了有毒溶剂的排放。风险在生

产过程中这种试剂的应用也能够降低挥发性有机物的排放量。对于改善车间作业环境减少环保设备投入有非常重要的价值。大部分电池企业在用这种试剂替代传统的试剂后, 废气系统的运行成本都得到了有效控制。同时质量标准认证周期也有所缩短, 这种转型一方面符合欧盟的相关法规要求, 另一方面也为重力电池与国际供应扫清了障碍。从根本上来说, 只有具备环境友好性的锂电池才有良好的应用前景, 也才能够持续稳定的发挥作用。技术人员以及电池生产商也都非常注重, 引入新型的锂电池生产制造技术力求体现出其环境友好性价值。

1.2 电化学性能优化带来的能量密度突破

水性粘结剂通过独特的分子结构设计, 对于提升电极材料的电化学性能而言, 有非常重要的优势现阶段粘结剂大都为复合体系形式, 这种体系以网络结构为主导, 在活性物质颗粒间会形成导电通路, 且这

种导电通路具有三维特征,相对于传统的运行体系而言,更能保证循环应用的膨胀率得到降低。另外在石墨负极的应用中,这种粘结剂可利用氢键的化学作用增强极片的柔韧性,使得电极玻璃的强度全部提升,进一步抑制充放电过程中的体积变化效应。

1.3 成本控制催化的产业升级效应

水性粘结剂在成本控制方面也有一定的优势,这也使得锂电池的产业竞争格局得到了有效重塑。从原材料的成本控制方面来讲,水性体系的单位质量价格相对更低,能够配合其更高的固含量特性,一些单瓦时电池的材料成本也有非常显著的控制效果。在部分企业的应用中,水性工艺引入后粘结剂的成本下降比例非常显著。这是企业提升毛利率的重要途径,更需要强调水性体系和干法电极制造工艺实现协同创新,能够保证在这种粘结剂纤维化的过程中实现定向排列,制备出厚度更加均匀的电极膜层,使干法工艺良品率得到进一步的突破,省去传统工艺的能耗同时控制成本。

2 水性负极粘结剂在锂电池中的应用策略

2.1 优化粘结剂分子结构与电极界面适配性

在锂电池构建中,水性负极粘结剂分子与电极界面的契合状况,对电池电化学性能起着关键作用。从分子设计角度,要精准把控粘结剂的官能团类型、分子量范围以及链段弹性等关键要素。以石墨作为主要负极材料的情况为例,在粘结剂分子中引入特定数量的羧基($-\text{COOH}$)与羟基($-\text{OH}$)官能团,这些官能团能和石墨表面含氧基团产生氢键作用,进而增强粘结剂与活性物质的结合力。经实际测试,当羧基质量分数处于3-5%、羟基质量分数在2-4%时,粘结剂与石墨的界面粘结强度能提高15-20%,降低电极充放电时粉化脱落的可能性。此外,合理规划分子量范围十分关键。分子量过低,粘结剂分散性好但机械强度欠佳;分子量过高,体系粘度大,影响涂布。实践表明,重均分子量在50-100万之间,可兼顾涂布性能与电极结构稳定。在链段弹性上,引入聚醚等柔性链段,当其质量分数为10-15%时,能减少电极循环时体积变化对粘结剂的破坏,延长电池循环寿命。

2.2 强化粘结剂与电解液的相容性及稳定性

水性负极粘结剂和电解液的相容性和稳定性对于保障锂电池长期稳定的运行而言,是关键性因素。电解液中的溶剂和锂盐成分可能会和粘结剂发生相互作用,影响粘结剂的性能,进一步导致电极结构受到破坏,电池性能也会衰减。因此,需要针对粘结剂的化学结构进行优化,提升其电解液相容性。具体来讲,可以选择化学稳定性相对更好的聚合物作为基础体。

现阶段。聚丙烯酸材料就是比较常用的材料。这种物质的分子结构中,羧酸基团的存在和常见的碳酸酯类电解液溶剂能够更好的相溶的优势。实验对比结果也发现,这种材料的电解液膨胀率和膨胀状态也能得到一定的控制,相比于未改良的粘结溶胀率能够降低30-40%,这也意味着粘结剂炎症所导致的电极体积变化的性能下降问题,能够得到解决。另外,粘结剂中还会加入一些功能性添加剂,增强其与电解液界面稳定性离子液体就可作为添加剂发挥作用。这种液体具有良好的导电性和化学稳定性,能够在粘结剂与电解液之间形成稳定的界面,减少界面的阻抗。

2.3 构建多尺度协同作用的粘结剂复合体系

单一的水性负极粘结剂往往难以满足锂电池在高性能和长寿命方面的综合需求,因此构建多尺度协同作用的粘结剂复合体系成为一种有效的应用策略。多尺度协同作用包括不同类型粘结剂之间的协同、粘结剂与导电剂之间的协同以及粘结剂与活性物质颗粒之间的协同等多个层面。在粘结剂之间的协同方面,将具有高粘结强度的粘结剂与具有良好柔韧性的粘结剂进行复合。例如,将丁苯橡胶(SBR)与羧甲基纤维素(CMC)按一定比例复合使用,SBR能够提供较强的粘结力,而CMC则可以改善浆料的分散性和稳定性,同时增强电极的柔韧性。实验结果表明,当SBR与CMC的质量比为7:3时,电极的剥离强度可提高20-25%,且在循环过程中的体积变化适应性更好。在粘结剂与导电剂之间的协同方面,选择合适的导电剂与粘结剂进行匹配。例如,采用碳纳米管作为导电剂时,其与粘结剂的界面相互作用会影响导电网络的构建。通过表面改性处理,使碳纳米管表面带有一定的官能团,能够与粘结剂分子形成更好的结合。研究发现,经过表面处理的碳纳米管与特定粘结剂复合后,电极的导电率可提升10-15%,同时导电剂在电极中的分散均匀性也得到显著改善。

3 水性负极粘结剂在锂电池中的应用性能提升策略

3.1 精准调控粘结剂官能团配比,优化电化学环境

水性负极粘结剂与电解液的协同适配性是锂电池长效运行的核心保障。电解液溶剂分子及锂盐离子可能与粘结剂分子链产生氢键、范德华力等相互作用,直接影响粘结剂的溶胀特性、机械强度及界面稳定性。例如,聚丙烯酸(PAA)类粘结剂因分子链富含羧基($-\text{COOH}$),与碳酸酯类电解液溶剂形成动态交联网络,在硅基负极体系中可有效抑制体积膨胀导致的界面剥离。实验数据显示,采用PAA-PBI物理交联体系的硅负极,在400次循环后容量保持率达75%,较传统PVDF体系提升30%,其三维网络结构可缓冲6-12%

的体积变化应力。化学结构优化是提升相容性的关键策略。通过引入功能性单体进行共聚改性,可赋予粘结剂多重功能特性。如 PAA-GA 共聚物中双酰胺基与硅羟基形成可逆氢键,在循环过程中实现自修复功能,使硅碳复合电极在 0.2C 倍率下循环 285 次后容量保持率达 81%,较未改性体系提升 12%。离子液体添加剂的引入则可优化界面离子传输动力学,采用 [Py14+][DFOB-] 离子液体构建的电解液体系,在高压锂金属电池中形成富含 LiF 的 SEI 膜,使铝集流体腐蚀速率降低 80%,同时离子电导率提升 2 倍。界面稳定性测试需建立标准化评价体系。剥离强度测试采用 180° 剥离法,可直接反映电极真实粘接状况;附着力测试参照 GB/T 1720 标准,通过划痕法分级评估涂层结合强度。热稳定性分析需结合 TGA-DSC 同步测试,确定玻璃化转变温度 (T_g) 与热分解温度 (T_d)。针对硅基负极体系,需开发动态溶胀测试装置,模拟充放电过程中的体积变化应力,评估粘结剂的弹性回复率。

3.2 创新粘结剂复合结构设计,增强机械性能

在锂电池体系内,水性负极粘结剂的复合结构设计是提升电极机械强度的核心路径。通过引入交联网络、纳米增强相及动态共价键等多维度设计策略,可实现粘结剂机械性能的精准调控。例如,采用聚丙烯酸 (PAA) 与聚乙烯醇 (PVA) 的共混体系,利用氢键作用构建三维网络结构,使粘结剂的拉伸强度提升至 28MPa,较单一组分提升 35%。进一步引入纳米纤维素 (CNF) 作为增强相,利用 CNF 的高长径比特性形成机械互锁结构,使复合粘结剂的断裂伸长率达到 320%,有效缓解硅基负极在循环过程中的体积膨胀应力。实验数据显示,采用 PAA/PVA/CNF 复合粘结剂的硅碳负极,在 0.5C 倍率下循环 600 次后容量保持率高达 88%,较传统 PVDF 体系提升 28%。动态共价键的引入则赋予粘结剂自修复功能,在电极出现微裂纹时可实现自动修复,延长循环寿命。这种复合结构设计不仅提升了机械性能,还通过功能化改性实现了性能协同,为高比能锂电池的长期稳定运行提供了材料支撑。产业化应用中,通过优化共混比例与加工工艺,可实现复合粘结剂的规模化生产,满足动力电池对高性能粘结剂的需求,同时通过水性乳液聚合等绿色工艺降低环境影响。

3.3 优化粘结剂与电极材料的界面工程,提升离子传输效率

粘结剂与电极材料的界面特性直接影响锂离子传输效率,进而决定电池的倍率性能。通过界面工程优化,可显著降低界面阻抗,提升离子传输动力学。具体策略包括:在硅基负极表面引入功能化粘结剂层,

利用羧基、羟基等极性官能团与硅表面形成化学键合,构建稳定界面层,减少电解液与电极的直接接触,抑制副反应。调控粘结剂分子结构,如引入短链柔性链段,可降低界面层厚度,减少离子传输路径,使离子电导率提升 2.5 倍。原位聚合技术的应用则实现界面层的均匀覆盖与紧密结合,避免传统涂布工艺的界面缺陷。实验表明,采用界面工程优化的硅基负极,其电荷转移阻抗降低至 25Ω ,较未处理样品降低 60%,在 5C 高倍率下放电容量保持率达 82%。结合原子层沉积 (ALD) 构建超薄界面层,可进一步优化离子传输通道,提升功率性能。这种界面工程策略通过化学键合与物理阻隔的双重作用,增强电极长期稳定性,为高功率锂电池开发提供关键技术支撑。产业化层面,通过优化沉积参数与高通量筛选技术,可实现界面层的精准调控与快速开发,推动高性能锂电池的规模化应用。

4 结束语

综合本文分析可知,水性负极粘结剂应用于锂电池领域具有高度必要性,合理制定应用策略,能够提升这种技术的应用性能。另外,随着技术的不断更新和完善,锂电池的应用效能也会同步提升,电池的应用稳定性,电力资源的累积效果、应用状态都能够得到充分体现,只要积极应用水性负极粘结剂,并且不断采取措施优化其应用性能,才能够从根本上发挥这种先进技术的积极作用、优化技术应用成效。

参考文献:

- [1] 田萌,王路晗,罗旋,田艺,虎琳琳.用于锂离子电池石墨负极的新型水性乳液粘结剂研究[J].化工新型材料,2025,53(S1):184-189.
- [2] 苏琼.高比能、快充和高安全性锂电池用电解液研究进展[J].世界有色金属,2025,(01):205-207.
- [3] 王友昌,张晓静,朱宇薇,李筱璐,李宇航,沈志刚.石墨烯基水性导电油墨的制备及其在低温热管理中的应用[J].中国粉体技术,2024,30(06):15-26.
- [4] 赵艳芳,肖创洪,户献雷,李泽勇,李泓森,叶建山.一种水性粘结剂在锂离子电池石墨负极中的应用[J].化工新型材料,2023,51(S1):253-258+272.
- [5] 王守玲,昌杰,周智鹏,吴小说.以碱式碳酸铜为负极的水系锂离子电池的构筑及电化学性能研究[J].池州学院学报,2021,35(06):29-31.
- [6] 彭黎波,叶诚曦,童庆松,翁景峥.改性 PVDF 或替代 PVDF 粘结剂在锂电池中的应用研究进展[J].材料导报,2021,35(05):5174-5180.
- [7] 林凤采,毛海娟,陈相杨,陈基棚,郑笑笑,徐艳莲.漆多糖在锂离子电池硅碳负极粘结剂中的应用研究[J].中国生漆,2023,42(04):44-48.