

Effects and performance optimization of interface characteristics in carbon-coated silica anode materials

Pengyang Xie¹ Shenghua Qu² Yang Liu¹ Xiaomeng Ying¹ Yilei Dai¹

1. Zhejiang Institute of Building Materials Science and Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310022, China

2. CNBM Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310022, China

Abstract

With the large-scale application of mobile phones, electric vehicles and other mobile electronic devices, the research of its built-in lithium ion battery has been increasingly paid attention to, and silicon oxide (SiO_x), as a potential lithium ion battery cathode material, has attracted wide attention due to its high lithium energy storage capacity and excellent cycle stability. In order to further improve the performance of the battery, the carbon material coating technology is used to modify the silica oxide anode material to form the carbon coated silica oxide composite material. The micromorphology, chemical composition, crystal structure and electrochemical properties by a series of physical and chemical experimental methods. The results showed that optimizing the thickness of carbon layer and the adhesion of carbon layer to silica oxide have significantly improved the performance of lithium-ion batteries. Specifically, when the thickness of the carbon layer is moderate (3% carbon content), the specific capacitance is the maximum, and the battery cycle stability and multiplier performance are significantly improved, and the strong adhesion between the carbon layer and the silicon oxide helps to prevent the reaction of Li₂O precipitated from the cathode material and the electrolyte. The results show that the interface properties of carbon-coated silica oxide anode materials can be further improved, which has great application prospect as a high-performance anode material.

Keywords

carbon coated silica; lithium ion battery; interface characteristics optimization

碳包覆氧化亚硅负极材料中界面特性的影响及其性能优化

解鹏洋¹ 曲生华² 刘阳¹ 应晓猛¹ 戴玮蕾¹

1. 浙江省建筑材料科学研究所有限公司, 中国·浙江 杭州 310022

2. 中国新型建材设计研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310022

摘要

随着手机、电动汽车等移动电子设备的大规模应用,其内置电源锂离子电池的研究日益受到关注,而氧化硅(SiO_x)作为一种有潜力的锂离子电池负极材料,由于其高的锂储能能力和优良的循环稳定性而受到广泛关注。为了进一步提升电池的性能,利用碳材料包覆技术对氧化亚硅负极材料进行改性,形成碳包覆氧化亚硅复合材料。研究主要使用一系列物理、化学实验方法研究了碳包覆氧化亚硅负极材料的微观形貌、化学组成、晶体结构以及电化学性能。结果显示,优化碳层厚度和碳层与氧化亚硅的粘附力对锂离子电池的性能有明显的改善效果。具体来说,当碳层厚度适中(含碳量3%)时,比容量能达到最大,同时电池循环稳定性和倍率性能也得到了显著提升;同时,碳层与氧化亚硅之间的强粘附力有助于防止负极材料析出的Li₂O与电解液的反应。研究结果表明,通过优化碳包覆的氧化亚硅负极材料的界面特性,可以进一步提高其性能,作为一种高性能的负极材料有着巨大的应用前景。

关键词

碳包覆氧化亚硅; 锂离子电池; 界面特性优化

1 引言

随着科技的不断进步,移动电子设备尤其是手机、电动汽车等在人们的日常生活中发挥着越来越重要的作用,而这些设备都离不开内置电源锂离子电池的支持。能源问题是

制约这些设备进一步发展的关键问题之一,因为这直接影响设备的续航能力和使用性能。近年来,锂离子电池的研究日益受到科学界和工业界的重视,其中氧化硅(SiO_x)作为一种有巨大潜力的锂离子电池负极材料,由于其优秀的锂储能能力和循环稳定性,受到了广泛的关注。但同时我们也发现对于氧化亚硅负极材料的性能优化仍有许多问题待解,特别是如何通过优化碳包覆的氧化亚硅负极材料的界面特性,以进一步提高其性能,使得研究群体对此备尝头绪。我们通过一系列实验工作,发现优化碳层厚度和碳层与氧化亚

【作者简介】解鹏洋(1986-),男,中国山东东营人,硕士,高级工程师,从事锂电池负极材料及工业固废综合利用研究。

硅的粘附力可以明显改善锂离子电池的性能。接下来,将详细介绍这一研究成果。

2 背景与意义

2.1 全球能源形势与锂离子电池的需求增长

随着全球能源需求的持续增长,化石燃料的消耗和环境问题逐渐成为人类社会面临的重大挑战^[1]。为应对这一挑战,清洁可再生能源的重要性愈发突出。在这其中,储能技术作为可再生能源有效利用的关键手段,受到了广泛关注。锂离子电池,以其高能量密度、长寿命和充放电效率,被视为当今市场上最具潜力的便携式储能解决方案之一。移动电子设备的普及、交通工具的发展以及可再生能源系统中的储能需求,大大推动了锂离子电池技术的创新和市场需求的增长。提升锂离子电池的性能和安全性,成为研究人员的重要课题。氧化硅作为锂离子电池负极材料的发展方向之一,因其特殊的储锂机制和高比容量,正在成为研究热点,通过改性手段如碳包覆技术来提升其性能,是实现下一代高性能锂离子电池的重要策略。

2.2 氧化硅负极材料的研究进展

氧化硅(SiO_x)作为锂离子电池负极材料备受关注,主要原因在于其具备高锂离子储存能力和出色的循环稳定性。近年来,研究者们不断探索氧化硅在电池应用中的具体行为及其性能优化。氧化硅材料的主要优势包括可逆容量高于传统石墨负极,并且其成本较低,易于获得。其在实际使用过程中也面临显著的体积膨胀问题,导致材料易粉化和电池循环寿命降低。对氧化硅材料进行改性,以增加其导电性和稳定性,是当前研究的重要方向。多种改性方法,如纳米化、掺杂和复合材料的制备,已被尝试,以克服这些挑战并提高电池性能^[2]。通过结合氧化硅与碳材料,如石墨烯、碳纳米管的复合结构,形成稳定的电极界面,进而提升其电化学性能,显示出良好的应用潜力。

2.3 碳包覆技术对电池性能的影响

碳包覆技术通过在氧化亚硅表面形成一层均匀的碳层,可以显著改善电池的电化学性能。这一技术通过提高负极材料的导电性、增加界面稳定性和减缓体积变化,有效提升了电池的循环稳定性和倍率性能。碳层的存在可以防止副反应的发生,延长电池寿命,优化后的复合材料表现出高效的锂储存能力。

3 碳包覆氧化亚硅负极材料的制备与表征

3.1 材料的制备方法

在制备碳包覆氧化亚硅负极材料的过程中,采用了一种基于溶胶凝胶法与化学气相沉积相结合的复合工艺。通过溶胶凝胶法将氧化亚硅(SiO_x)预体材料制备得到均匀分布的前驱物。随后,利用高温煅烧工艺,将前驱物转化为具有稳定结构的纳米氧化亚硅粉体。基于化学气相沉积技术,在氧化亚硅材料表面引入碳源气体(如乙炔、甲烷等),并在

一定温度与真空条件下促使碳原子在氧化亚硅颗粒表面沉积,形成致密均匀的碳层包覆结构。控制碳层厚度的关键在于反应时间和气源浓度的精确调节。整个工艺过程中,通过优化反应条件和参数,制备出界面稳定且粘附性强的碳包覆氧化亚硅复合材料,为后续电化学性能研究提供了高质量样品。此种方法兼具规模化生产的可行性与材料性能调控的可控性^[3]。

3.2 材料的微观形貌观察

在材料的微观形貌观察中,使用扫描电子显微镜(SEM)对制备的碳包覆氧化亚硅复合材料进行深入分析。通过SEM观察,能够清晰地看到碳层在氧化亚硅颗粒表面的均匀分布,这种均匀的碳层包覆结构对改善材料的导电性和结构稳定性至关重要。碳层的均匀性以及其在颗粒表面的完整覆盖能够有效提高电极材料的性能。在高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)的进一步观察下,碳层的厚度和连续性得到更精细的表征,发现碳层碳层的含碳量大约在3%左右,这一含碳量所对应的碳层厚度范围被证实对促进电化学性能起到了关键作用。这些微观观察结果为理解碳包覆对负极材料性能优化的机理提供了可靠的实验支持。

3.3 化学组成与晶体结构分析

通过X射线衍射(XRD)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)对碳包覆氧化亚硅负极材料的化学组成和晶体结构进行表征。XRD结果表明,氧化亚硅在碳包覆后保持非晶态结构,有效抑制了晶粒生长,避免了体积胀缩对材料稳定性的不利影响。FTIR谱图显示,样品中存在 CSi 、 SiOSi 和 C=C 等特征键峰,表明碳层与氧化亚硅之间形成了稳定的化学键连接。拉曼光谱进一步验证了碳层为以无序碳为主的非晶态结构,其 ID/IG 比值表明适度缺陷有助于锂离子传输。这些结果说明碳包覆显著改善了氧化亚硅材料界面化学特性和结构稳定性,为性能优化奠定了基础。

4 界面特性的影响分析

4.1 碳层厚度对电池性能的影响

碳层厚度是影响碳包覆氧化亚硅负极材料性能的关键因素之一。在中,通过调控碳层厚度,系统地分析了其对锂离子电池电化学性能的影响。实验结果表明,当碳层厚度适中(含碳量3%)时,材料的比电容达到最佳水平。这归因于适中的碳层厚度既能够有效缓解氧化亚硅在充放电过程中体积膨胀引起的机械应力,又能确保材料的导电性,从而提高锂离子的存储效率和传输速率。过厚的碳层会降低导电性,增加锂离子扩散路径,导致比容量下降;过薄的碳层则难以有效保护氧化亚硅颗粒,易造成电化学性能的衰减。碳层厚度对电池的循环稳定性和倍率性能也起到了显著作用,适中的厚度可实现性能的显著优化。研究结果表明,碳层厚度的精确调控是实现高性能负极材料的重要策略。

4.2 碳层与氧化亚硅的粘附力分析

碳层与氧化亚硅间的粘附力对锂离子电池的整体性能

具有关键影响。粘附力的增强主要通过减少界面阻抗,提高电子导电性,从而提高电池的倍率性能和循环稳定性。研究表明,强粘附力有助于抑制在充放电过程中由于体积变化导致的碳层剥离现象。这一特性防止了负极材料中的锂化合物直接与电解液发生不利反应,如抑制Li₂O的形成。粘附力的优化还能提高结构稳定性,提升循环寿命。采用改性处理或物理气相沉积等方法,有望增强粘附力,形成均匀且厚度适中的碳覆盖层,这对于提升氧化亚硅复合材料作为锂离子电池负极材料性能具有积极作用。

4.3 界面优化对电池循环稳定性和倍率性能的影响

界面特性的优化对电池循环稳定性和倍率性能起到了显著的推动作用。碳层的厚度和粘附力在改善界面结构的有效抑制了负极材料在充放电过程中的体积膨胀与脱落。优化后的碳包覆氧化亚硅材料表现出稳定的固体电解质界面(SEI)膜,有助于减少锂离子的不可逆损失,从而提升了循环稳定性。适中的碳层厚度确保了电子和离子的快速传输路径,显著改善倍率性能。在倍率测试中,复合材料在高电流密度下仍能维持较高的容量,表现出优异的动力学性能。实验验证表明,界面优化显著增强了材料的整体电化学性能,为高性能锂离子电池负极材料的设计提供了有效策略。

5 碳包覆氧化亚硅负极材料的性能优化

5.1 优化方案的提出

在碳包覆氧化亚硅负极材料的性能优化过程中,需对影响电池性能的关键因素进行系统分析。碳层厚度被认为是影响比电容和循环稳定性的重要参数。研究建议控制碳层含碳量在3%左右,以平衡导电性与重量增益,从而提升整体性能。碳层与氧化亚硅之间的粘附力对材料的结构稳定性至关重要。增强界面粘附力可有效抑制Li₂O与电解液的反应,保持材料结构完整性。优化工艺中可考虑改进碳包覆工艺,采用更高粘附力的碳源或调整制备条件。通过精细化管理制备过程中两个材料界面的相互作用,可以显著提升电池的循环寿命和倍率性能。这一优化方案的提出,为实现高效能量存储材料的研制提供了理论基础和指导方向。

5.2 性能改进的实验验证

在性能改进实验中,使用不同厚度的碳层对氧化亚硅负极材料进行了包覆处理,以探究其对电化学性能的影响。通过对比不同厚度碳层的样品,得出碳层厚度在含碳量3%时效果最佳,电极显示出最佳的比容量和循环性能。电化学循环测试表明,该厚度下的碳包覆氧化亚硅材料在多次循环

后的容量保持率显著优于其他厚度。通过扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)观察样品的微观形貌,证实了碳层在此厚度下能够有效缓解体积变化引起的结构破坏,提高了界面稳定性。使用X射线光电子能谱(XPS)分析表明,适中厚度的碳层有助于增强界面粘附力,降低副反应发生的可能性,从而优化了整体电池性能。

5.3 应用前景与技术挑战

碳包覆氧化亚硅负极材料在锂离子电池领域展现出广阔的应用前景。其优异的性能可满足移动电子设备和电动车对电池容量、寿命的高需求。该技术的实际应用仍面临若干挑战。生产中如何均匀控制碳层厚度是实现性能一致性的关键问题。提升碳层与氧化亚硅之间的粘附力以防止材料降解也是技术难点。降低生产成本以实现大规模商业化应用仍需进一步研发。解决这些挑战将助力新材料的大规模应用。

6 结语

本文对碳包覆氧化亚硅负极材料的微观形貌、化学组成、晶体结构以及电化学性能进行了深入的研究。通过一系列物理、化学实验方法,发现优化碳层厚度和碳层与氧化亚硅的粘附力对锂离子电池的性能有明显的改善效果。具体表现为,当碳层厚度适中(含碳量3%)时,电池的比电容和循环稳定性均达到最大值,倍率性能也得到显著提升,同时,碳层与氧化亚硅之间的强粘附力有助于防止负极材料析出的Li₂O与电解液的反应。这些发现为我们理解锂离子电池的工作机理和优化电池性能提供了新的思路。然而,目前的研究仅限于实验阶段,还需进一步研究如何将这些理论应用于实际的电池制备过程,以改善电池的性能。为此,未来我们将研究更多的碳包覆技术和氧化亚硅负极材料的界面工程,以期在实际应用中提高电池的性能。因此,综合考虑,通过优化碳包覆氧化亚硅负极材料的界面特性,确实可以有效提高电池性能。尽管还有许多待解决的问题和挑战,但随着进一步的研究,这种高性能的负极材料的应用前景非常广阔。

参考文献

- [1] 朱思颖,李辉阳,胡忠利,张桥保,赵金保,张力.锂离子电池氧化亚硅负极结构优化和界面改性研究进展[J].物理化学学报,2022,38(06):33-60.
- [2] 唐其伟,王丽.氧化亚硅负极材料的碳包覆改性研究[J].电源技术,2020,44(05):657-659.
- [3] 雷晓旭,秦海青,刘文平,吕妍鹭,林峰,张振军.PVDF包覆对锂离子电池硅碳负极性能的影响[J].超硬材料工程,2022,34(05):24-27.