

Research elaboration on silicon oxygen anode materials of lithium ion battery

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 wide application of lithium-ion batteries, silicon-oxygen cathode materials have attracted much attention because of their high capacity and good electrochemical performance. This paper summarizes the progress of the structural characteristics and modification methods of silica anode materials in batteries. First, the basic characteristics of silicon oxide materials and the expansion problems and cycle stability challenges are introduced. Then, the strategy of modifying the silicon oxygen anode by nanometer, carbon coating and doping to improve the conductivity and expansion resistance. The study shows that the modified silicon-oxygen composites have significant advantages in improving the cycle life and capacity density of the cells. Finally, this paper discusses the future research direction and technical innovation of silica-oxygen anode materials, and provides theoretical basis and technical support for the performance optimization of lithium-ion batteries.

Keywords

silicon oxygen cathode material; modification technology; cycle stability

锂离子电池硅氧负极材料相关研究阐述

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

随着锂离子电池的广泛应用, 硅氧负极材料因其高容量和良好的电化学性能备受关注。本文综述了硅氧负极材料的研究进展, 重点分析了硅氧复合材料的结构特性、改性方法及其在电池中的应用表现。首先, 介绍了硅氧负极材料的基础特性以及面临的膨胀问题和循环稳定性挑战。接着, 讨论了通过纳米化、碳包覆, 以及掺杂等技术对硅氧负极进行改性的策略, 以提高其电导率和抗膨胀性能。研究表明, 改性后的硅氧复合材料在提升电池的循环寿命和容量密度方面具有显著优势。最后, 本文展望了未来硅氧负极材料的研究方向和技术创新, 为锂离子电池的性能优化提供理论依据和技术支持。

关键词

硅氧负极材料; 改性技术; 循环稳定性

1 引言

锂离子电池作为主要的能源技术, 其石墨负极材料存在能量密度和稳定性瓶颈。因此, 硅氧复合材料以高比容量成为新型负极材料的研究焦点, 但充放电过程中的体积膨胀问题严重影响循环稳定性。为此, 学者提出了纳米化、碳包覆、掺杂等, 提高电导率、稳定性和抗膨胀性能, 但膨胀问题的解决仍是难题。本文旨在概述硅氧负极材料的研究进展, 讨论不同改性方法的效果, 并展望其在锂离子电池中的应用前景。

【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。

2 硅氧负极材料的基础特性与挑战

2.1 硅氧负极材料的基本性质

硅氧负极材料因其在锂离子电池中的应用前景而备受关注, 其基本性质对性能的影响尤为关键^[1]。硅氧材料的理论比容量高达 4200mAh/g, 是传统石墨负极材料的十倍以上, 这为电池容量的提升提供了巨大潜力。硅氧负极材料在循环过程中会发生大幅度的体积变化, 影响其结构完整性和循环稳定性。硅氧材料内部的硅元素具有优良的储锂能力, 而氧化物部分则在某种程度上提高了材料的结构稳定性和化学稳定性。硅氧复合材料通过合理的结构设计及组分调整可以在兼顾高容量和稳定性的克服材料在循环过程中的膨胀和粉化等问题。材料的导电性较低是硅氧负极材料的另一劣势, 通过改善导电网络可以部分缓解这一问题。硅氧材料

的比表面积较大，在一定程度上增加了与电解液的副反应，进而影响电池的库伦效率。全面理解硅氧负极材料的这些基本性质，对于其在实际应用中的表现优化和技术提升具有指导意义。

2.2 硅氧负极材料的电化学性能

硅氧负极材料因其优异的电化学性能受到广泛关注。其理论比容量约为 4200 mAh/g，显著高于传统石墨负极。硅氧材料在充放电过程中会发生体积膨胀，这对其电化学性能提出了挑战。锂离子在硅氧负极中的嵌入和脱出过程复杂，通常伴随显著的体积变化，导致材料结构的不可逆损伤和导电通道的断裂，从而影响电池的循环稳定性和寿命。硅氧材料的循环性能受到材料构成与微观结构的显著影响，通过改善材料的导电路径和结构稳定性，可以在一定程度上提高其循环性能。硅氧负极表现出优异的倍率性能，这与其良好的离子扩散特性有关，也是其作为高性能锂离子电池负极材料的重要原因之一。研究其电化学性能对于提升锂离子电池整体性能至关重要，也是学术界和工业界关注的重点方向^[2]。

2.3 硅氧负极材料的膨胀问题与循环稳定性挑战

硅氧负极材料在锂离子电池应用中面临显著的膨胀和循环稳定性挑战。充放电过程中，硅氧材料因锂的嵌入和脱出诱发体积膨胀，最大可达 300% 以上。如此剧烈的体积变化易引发电极材料粉化、导电网络破坏，最终导致电池容量快速衰减和循环寿命缩短。硅氧负极在电化学反应过程中，形成的不稳定固体电解质界面膜（SEI 膜）会持续消耗电解质，影响电池的长效性能。研究表明，抑制体积膨胀和优化 SEI 膜结构是改善硅氧负极材料循环稳定性的关键所在，仍需持续探索创新技术加以解决。

3 硅氧负极材料的改性技术

3.1 纳米化改性技术

锂离子电池中硅氧负极材料的应用面临膨胀和循环稳定性的问题，纳米化改性技术成为关键。纳米化通过将材料尺寸缩小至纳米尺度，有助于缓解由于锂离子嵌入和脱出过程中出现的体积变化。纳米级材料具有更大的表面积和更短的锂离子扩散路径，这不但提升了导电性，也有效地减轻了内部应力，从而提高了循环性能和结构稳定性。纳米结构还能改善与电解液的接触，促进电化学反应速率的提升。研究中发现，通过控制硅氧材料的纳米尺寸和形貌，如纳米颗粒、纳米线或纳米薄膜结构，能够显著提高电池的能量密度和倍率性能。纳米化也带来了材料制备复杂、成本较高以及首次不可逆容量损失增加等新挑战。优化纳米化技术以提升材料性能和工艺经济性是未来研究的重要方向。在锂离子电池应用中，纳米化改性技术为硅氧负极材料的优化提供了有效途径，推动了其实际应用的进程。

3.2 碳包覆技术

碳包覆技术已成为改善硅氧负极材料性能的重要策略

之一，主要通过硅氧颗粒表面包覆一层导电碳材料，以增强其电导率和结构稳定性。碳包覆能够有效缓解硅氧材料在充放电过程中体积膨胀所带来的机械应力，从而提高材料的循环稳定性。研究表明，碳包覆的硅氧负极材料在电化学性能上表现出显著提升，表现为更高的比容量和优良的循环寿命。包覆层的导电网络为锂离子和电子运输提供了便捷通道，减小了界面阻抗。常用的碳包覆方法包括化学气相沉积（CVD）、溶液浸渍以及热解等。这些技术不仅能够硅氧颗粒表面形成均匀的碳层，还可以通过调节工艺参数来改变碳层的厚度和结构。这些调整对提升负极材料的整体电化学性能至关重要，为硅氧复合材料在高性能锂离子电池中的广泛应用奠定了基础。

3.3 掺杂技术及其他改性方法

掺杂技术作为硅氧负极材料改性的重要手段，通过引入外部元素改变硅氧结构的电化学性质，从而优化其性能。常见掺杂元素包括碳、氮、磷等，它们可通过形成杂质能级降低材料的能带隙，提高导电性并改善循环性能。掺杂元素还可与硅氧基体发生化学反应，形成稳定的化合物，提高材料的抗膨胀能力和结构稳定性。其他改性方法如表面改性与合金化也在研究中，意在提升硅氧负极材料的整体性能，为锂离子电池的长寿命与高效能应用提供支持。

4 硅氧复合材料在锂离子电池中的应用表现

4.1 循环性能与容量密度

硅氧复合材料在锂离子电池中的应用表现极为突出，其循环性能与容量密度是评估材料实用性的重要指标^[3]。纳米结构的硅氧材料由于其高体积比表面积，使得材料具有更大的活性面积，并对锂离子的扩散路径进行优化，从而提升了循环性能。硅氧材料在充放电过程中易发生较大体积膨胀，导致活性材料的机械完整性受到影响，进而影响循环寿命。在提升循环性能方面，碳包覆成为一种有效方法。通过碳包覆，能够有效缓解硅氧负极在充放电过程中的体积变化，从而提高循环稳定性。掺杂技术被广泛应用于改善硅氧复合材料的电导率和机械稳定性，从而实现更高的容量保持率和更为优异的循环稳定性。硅氧复合材料的制作工艺对其性能表现也具有显著影响，通过精细控制材料的合成条件，可以实现容量和循环寿命的同步提升。在优化能量密度的同时确保材料的高循环性能，为锂离子电池的持续发展提供了坚实的材料基础。

4.2 高倍率性能与能量效率

硅氧复合材料在锂离子电池的应用中，其高倍率性能和能量效率显著影响电池的整体性能。高倍率性能关系到电池在快速充放电过程中的能力，而能量效率则涉及电池在此过程中损失的最小化。硅氧负极材料具有高理论比容量，但较差的导电性和体积膨胀问题限制了其在高倍率下的表现。通过纳米化及碳包覆，可显著改善材料的导电路径，从而提

高高倍率性能。掺杂技术通过引入其他元素改变硅氧的结构和表面特性，以增强其导电性和结构稳定性。调控复合材料中的界面特性，可以有效降低界面阻抗，提高能量转化效率。研究表明，经过特定改性的硅氧复合材料在保持高能量密度的实现了更加优异的高倍率性能，使其在实际应用中，特别是快速充电设备中具有广阔的应用前景。

4.3 改性硅氧负极的长寿命表现

改性硅氧负极材料在锂离子电池中的长寿命表现得到了广泛研究与认可。通过纳米化处理，硅氧材料的体积膨胀得以有效抑制，增强了循环稳定性；碳包覆技术则改善了材料的电导率，提高了其循环寿命。掺杂技术通过引入第三元素，进一步提高了材料的结构稳定性和电化学性能。改性后的硅氧复合材料在多次循环后，容量衰减速度显著降低，长寿命特性得以体现。这些改性策略为硅氧负极材料在下一代高性能锂离子电池中的应用奠定了基础，具有重要的实际价值。

5 硅氧负极材料的未来发展方向与技术创新

5.1 新型材料与复合体系的探索

硅氧负极材料的未来发展方向中，新型材料与复合体系的探索是关键环节之一，这些研究将有助于突破现有技术瓶颈并开发出性能更优的电池材料。最近的研究集中在开发新型硅氧复合材料，以增强其电化学性能和循环稳定性。高分子基体的引入，如聚合物电解质，可以通过形成互穿网络结构（IPN）实现对硅氧颗粒的有效包覆，从而缓解在充放电过程中的体积膨胀问题。另一方面，通过制备具有纳米多孔结构的硅氧材料，不仅可以提供足够的空间以容纳膨胀，还能够显著增加电极与电解质的接触面积，从而提升材料的反应速率与电导率。将硅氧材料与其他活性材料如硫或磷复合，可以通过材料间的协同效应进一步提高电池的容量密度和循环寿命。这些先进材料和复合体系的开发，为未来高性能锂离子电池的设计提供了新的方向和技术支持，也为电动汽车和储能系统的发展奠定了坚实的基础。探索新型硅氧材料和复合体系的进一步研究，将在提升电池整体性能与可靠性方面发挥重要作用。

5.2 改性技术的优化与挑战

在锂离子电池的发展过程中，硅氧负极材料的改性技术起着至关重要的作用。这些技术在实际应用和性能提升方面仍面临挑战。纳米化、碳包覆和掺杂技术在提高电导率和抑制体积膨胀方面已经展示出显著成效，但进一步优化这些方法仍需克服一系列技术瓶颈。纳米化技术由于颗粒尺寸的

减小可能导致不可逆电容损失，而碳包覆技术则需在导电性与重量之间取得平衡，避免影响电池的能量密度。掺杂技术虽然有效改善电化学性能，但选择合适的掺杂物质和浓度仍是一个复杂的优化过程。深入理解硅氧材料在动态循环中的结构演变，以及进一步开发更具针对性的改性手段，对实现硅氧负极材料的最佳性能至关重要。

5.3 硅氧负极材料在未来电池技术中的潜力与前景

硅氧负极材料在未来电池技术中展现出巨大的潜力。随着新能源产业的发展，下一代储能设备对高能量密度、高功率密度和长循环寿命的需求愈发迫切。硅氧负极材料因其优异的比容量和可调控的复合结构特点，成为高性能锂离子电池的核心研究方向之一。通过与固态电解质、全固态电池等新兴技术的结合，硅氧材料有望解决传统电解质与负极界面不稳定的问题，从而提升安全性和稳定性。硅氧负极材料可主动适配于柔性电池、快充电池等新型电池体系，推动其规模化应用。结合智能化制造技术和绿色化加工过程，硅氧负极材料将在实现可持续发展目标方面发挥重要作用，为未来能源存储技术提供重要支持。

6 结语

本文综述了锂离子电池中硅氧负极材料的研究进展，重点分析了硅氧复合材料的结构特性、改性方法及其在电池中的应用表现。通过对当前硅氧负极材料的性能、存在问题及改性策略的讨论，揭示了改性技术在提升材料电导率、抗膨胀性能及电池循环寿命等方面的潜力，进一步促进了硅氧负极材料的性能提升。然而，尽管改性后的硅氧负极材料在多方面表现出色，但仍存在一定的局限性。例如，材料的膨胀问题在高倍率充放电过程中仍未得到完全解决，且材料的长期稳定性仍需进一步提高。此外，纳米化、碳包覆及掺杂等改性技术虽然能够有效提升性能，但其生产成本及可操作性仍是制约大规模应用的因素。未来的研究可进一步探讨新的改性方法和复合材料体系，如多重功能化复合材料，或者探索通过新的电池设计与管理策略来应对硅氧负极材料的挑战。同时，在改善电池性能的同时，提升材料的可持续性与环保性也是未来研究的重要方向。

参考文献

- [1] 杜子胜,王江林,任晴晴.锂离子电池硅负极材料的改性研究进展[J].浙江冶金,2021,(02):1-4.
- [2] 杨乐之,刘志宽,方自力,石润锋.锂离子电池硅氧负极材料的研究进展[J].电池,2021,51(03):315-318.
- [3] 欧阳嘉华.锂离子电池硅负极材料研究进展[J].电子制作,2020,28(18):18-20.