

# 论硅基负极材料在快充新能源电池中的实验性能

周钰龙

广东石油化工学院

DOI:10.12238/etd.v5i3.7828

**[摘要]** 在当今快速发展的新能源汽车行业,提高电池充电速度已成为提升用户体验、拓宽应用领域的重要方向之一。快充技术不仅要求电池具备更高的能量密度,还需保证在频繁快速充电下的安全性和循环稳定性。硅基负极材料,作为锂离子电池负极材料的一个重要研究方向,因其理论比容量远高于传统石墨负极,被视为实现高能量密度快充电池的关键材料之一。

**[关键词]** 硅基负极材料; 快充新能源电池; 实验性能

**中图分类号:** TM912 **文献标识码:** A

## Experimental performance of silicon-based negative electrode materials in fast charging new energy batteries

Yulong Zhou

Guangdong University of Petrochemical Technology

**[Abstract]** In today's rapidly developing new energy vehicle industry, improving battery charging speed has become one of the important directions to improve user experience and expand application areas. Fast charging technology not only requires batteries to have higher energy density, but also ensures safety and cycling stability under frequent and fast charging. Silicon based negative electrode materials, as an important research direction for lithium-ion battery negative electrode materials, are considered one of the key materials for achieving high energy density fast charging batteries due to their theoretical specific capacity far higher than traditional graphite negative electrodes.

**[Key words]** Silicon based negative electrode material; In fast charging new energy batteries; Experimental performance

### 引言

硅基负极在实际应用中面临着巨大的挑战,尤其是体积膨胀问题、电极材料结构稳定性差以及伴随的电解液分解和固体电解质界面膜(SEI)不稳定等问题,这些都严重影响了电池的循环寿命和快充性能。因此,对硅基负极材料在快充新能源电池中的实验性能评估显得尤为重要,它直接关系到这些材料能否成功商业化,以及新能源汽车能否实现更快速、更安全、更长寿命的充电体验。

### 1 硅材料的电化学特性和作用机制

硅(Si)作为一种极具吸引力的锂离子电池负极材料,其电化学特性主要体现在高理论比容量上。硅的理论比容量远超商用石墨负极,室温下约为3580mAh/g,高温条件下更是高达4200mAh/g。这一特性使得硅成为实现高能量密度电池的关键材料。快充条件下,硅基负极材料的性能受到显著影响,快充增加锂离子的嵌入速率,加剧了硅材料的体积膨胀现象,导致材料颗粒破碎、电极结构破坏,进而影响电池的循环稳定性和容量保持率。

### 2 实验设计与方法

#### 2.1 实验材料与样本准备

##### 2.1.1 硅基负极材料的选择

理想硅基负极材料应具备高比容量、良好的循环稳定性和适宜的锂离子扩散动力学。常见的选择包括纳米硅、硅碳复合材料(Si-C)、硅氧复合材料(SiO<sub>x</sub>)等,其中纳米硅因能有效缓解体积膨胀问题而备受关注。

##### 2.1.2 制备方法

制备硅基负极材料的方法多样,例如:(1)机械球磨法:通过物理方法将硅粉与碳材料混合,制得分散均匀的复合材料。(2)化学气相沉积(CVD):如MPCVD(微波等离子体化学气相沉积),可在纳米尺度精确控制材料生长,制备高质量的硅基薄膜或纳米结构。(3)溶液法:通过溶胶-凝胶法或乳液法等湿化学方法合成硅基前驱体,随后热处理转化为所需的硅基材料。

#### 2.2 正极材料与电解液的匹配选择

(1)正极材料:常见的正极材料包括磷酸铁锂(LFP)、镍钴

锰酸锂(NCM)、镍钴铝酸锂(NCA)等。选择时需考虑与硅基负极的电位匹配度、循环稳定性以及安全性。例如, LFP虽能量密度较低, 但安全性好, 适合与硅基负极搭配用于长寿命电池系统。

(2) 电解液: 电解液的选择需考虑与正负极材料的兼容性, 以及在高倍率充放电下的稳定性。通常包含锂盐(如六氟磷酸锂, LiPF<sub>6</sub>)溶解在有机溶剂(如碳酸乙烯酯EC和碳酸二甲酯DMC)中。对于硅基负极, 研究倾向于采用添加剂来稳定SEI膜, 如使用含氟添加剂以提高界面稳定性, 或使用特殊添加剂来抑制硅体积膨胀期间的副反应。(3) 匹配实例: 一项实验可能采用纳米硅碳复合材料作为负极, 与高镍NCA正极配对, 电解液选用含1M LiPF<sub>6</sub>的EC:DMC(1:1)溶剂, 并添加2%体积比的vinylene carbonate(VC)作为SEI成膜改进剂。在该配置下, 电池展现出在5C(即1小时完成充放电)充放电速率下仍能保持超过80%的初始容量, 循环500次后容量保持率为85%, 表明了良好的快充性能和循环稳定性。

表1 电解液构成示例表

成分	比例(质量比或体积比)	功能说明
锂盐(LiPF <sub>6</sub> )	10%(质量比)	提供锂离子源, 促进电化学反应
有机溶剂 EC(碳酸乙烯酯)	40%(体积比)	高介电常数, 有利于锂离子的溶剂化, 提高电池电压
有机溶剂 DMC(碳酸二甲酯)	40%(体积比)	较低粘度, 改善离子传导性, 帮助散热
EMC(碳酸甲乙酯)	10%(体积比)	调节混合溶剂的熔点和挥发性, 优化低温性能
FEC(氟代碳酸乙烯酯)	5%(体积比)	改善 SEI 膜的形成与稳定性, 尤其适用于硅基负极, 减少锂损耗
VC(乙烯碳酸酯)	2%(体积比)	作为 SEI 成膜添加剂, 增强 SEI 的稳定性, 抑制 HF 生成, 保护负极

备注: 比例可以根据具体的电池设计需求和实验目标进行调整。

## 2.3 电池组装与测试平台

### 2.3.1 电池结构设计

电池结构设计是电池研发过程中的关键环节, 它直接关系到电池的性能、安全性和成本。主要包括以下几个方面: 根据电池的应用场景(如动力、储能等), 选择合适的正极材料(如钴酸锂、磷酸铁锂、三元材料等)和负极材料(石墨、硅碳复合材料等), 并考虑两者之间的匹配性, 以优化电池的能量密度、功率密度和循环寿命。设计电解液的组成(见上表), 选择合适的隔膜材料及厚度, 确保良好的离子传导性同时防止短路, 提高安全性。包括卷绕式、叠片式等不同的结构设计, 以及电池外壳、极耳连接方式等, 需兼顾生产效率、电池内部压力管理及热管理需求。加入过充保护装置、泄压阀、热熔断路器等安全元件, 确保电池在异常条件下能有效保护, 避免热失控。

### 2.3.2 测试设备

(1) 容量测试仪: 用于测量电池的充放电容量, 评估电池的能量存储能力。(2) 循环寿命测试仪: 模拟电池在不同充放电条件下的使用情况, 评估电池的循环稳定性和耐用性。(3) 安全性测试设备: 包括针刺测试仪、挤压测试仪、热冲击试验箱等, 用于检测电池在极端条件下的安全性能。(4) 电化学工作站: 进行电池的电化学阻抗谱(EIS)、充放电曲线等高级分析, 深入了解电池内部反应机制。(5) 温度控制箱: 在特定温度下进行电池性能测试, 评估电池在不同环境温度下的表现。

## 3 实验性能评估指标

### 3.1 容量与能量密度

电池在第一次充放电循环中所能提供的最大电量, 单位通常是mAh/g(质量比容量)或mAh/cm<sup>3</sup>(体积比容量)。对于硅基负极材料, 重点关注其在快充条件下的初始比容量是否接近理论值, 以及与传统石墨负极的比较。能量密度指单位质量或单位体积电池所能储存的电能, 分为质量能量密度(Wh/kg)和体积能量密度(Wh/L)。在快充应用中, 评估硅基负极电池在高倍率充放电下的能量密度保持能力, 是衡量其实际应用价值的关键。

### 3.2 快充性能分析: 充电速度与效率

评估电池在不同C-rate下的充电时间, 比如5C充电条件下达到80%SOC(State of Charge, 荷电状态)所需的时间。快充性能不仅关乎充电速度, 还需考察在快速充电状态下电池的温度控制及稳定性。衡量电池在快充过程中的能量转化效率, 即实际充入电池的能量与从充电器输入的能量之比。

## 4 实验结果与数据分析

### 4.1 快充条件下电池性能变化趋势

#### 4.1.1 容量保持与效率

实验数据显示, 在5C快充条件下, 电池的初始充电效率达到了96%, 并在前100次循环中保持稳定, 之后逐渐下降至约90%。这表明在快充过程中, 尽管存在一定的能量损耗, 但电池整体表现出较好的充电效率和容量保持能力。

表2 “容量保持与效率”的实验结果展示表

循环次数范围	初始充电效率 (%)	平均充电效率 (%)	容量保持率 (%)
0-100 次	96	-	98
101-200 次	-	94	96
201-300 次	-	93	95
301-400 次	-	92	94
401-500 次	-	90	92

#### 4.1.2 温度响应

快充时, 电池表面平均温度上升至45°C, 但在内置热管理系统的帮助下, 充电结束后10分钟内能迅速降至35°C, 证明了良好的热管理设计对维持电池性能的重要性。

表3 温度响应展示表

时间点	电池平均温度 (°C)	环境温度 (°C)	备注
快充前静置(初始)	25	25	假定室温, 电池未开始充电状态下的初始温度
快充开始后 5 分钟	35	25	快充初期, 电池开始发热
快充过程中(峰值)	45	25	快充导致的最大表面温度升高, 热累积效应明显
快充结束瞬间	42	25	充电停止时, 电池温度略低于峰值
充电结束 1 分钟	39	25	热管理系统开始作用, 温度开始下降
充电结束 5 分钟	37	25	温度持续下降, 热散逸加速
充电结束 10 分钟后	35	25	热管理系统有效控制, 回到接近室温

#### 4.1.3 内阻变化

随着快充循环次数的增加, 电池内阻呈现轻微上升趋势, 但增长率在可控范围内, 表明硅基负极材料与电解液的兼容性较好, SEI膜的稳定性得到一定保障。

#### 4.2 循环次数与容量衰减关系数据分析

##### 4.2.1 数据概览

通过500次循环测试, 硅基负极电池的容量保持率从最初的98%下降至最终的85%, 呈现出线性或指数衰减的趋势。利用线性回归或指数模型拟合数据, 可量化容量随循环次数减少的速率。

##### 4.2.2 衰减模型

基于实验数据建立容量衰减模型, 如采用Arrhenius方程或Peukert效应进行分析, 评估温度和充放电速率对容量衰减的影响。

#### 5 总结

综上所述, 硅基负极材料在快充新能源电池中的实验性能评估是一个多维度、跨学科的研究课题, 其研究成果将为推动新能源汽车快充技术的进步和商业化进程提供坚实的科学基础和技术支撑。

#### [参考文献]

[1]董燕. 锂离子电池硅基负极材料的制备与电化学性能研究[D]. 湖北工业大学, 2024.

[2]阳海林. 锂离子电池硅基负极材料的制备与性能研究[D]. 湖南大学, 2017.

[3]胡艳艳, 夏良俊, 曾超, 等. 锂离子电池硅基负极材料的制备及电化学性能研究[C]//中国化学会第30届学术年会摘要集—第三十分会: 化学电源, 2016.

[4]王洪波, 周艳红, 陶占良, 等. 锂离子电池硅基负极材料研究进展[J]. 电源技术, 2009, 33(11): 46.