



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：木质素纳米颗粒 - MXene - Ag 复合电极材料的构建及其在锂离子电池中的应用
作者：冯金龙, 江闯, 祖文跃, 贾明, 侯庆喜, 刘苇
DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250012
收稿日期: 2025-01-15
网络首发日期: 2026-01-29
引用格式: 冯金龙, 江闯, 祖文跃, 贾明, 侯庆喜, 刘苇. 木质素纳米颗粒 - MXene - Ag 复合电极材料的构建及其在锂离子电池中的应用[J/OL]. 天津科技大学学报. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250012>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250012

木质素纳米颗粒-MXene-Ag 复合电极材料的构建及其在锂离子电池中的应用

冯金龙, 江 闯, 祖文跃, 贾 明, 侯庆喜, 刘 苇
(天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津市制浆造纸重点实验室, 天津 300457)

摘要: 本研究通过溶剂交换法将碱木质素转化为木质素纳米颗粒(lignin nanoparticles, LNPs)。利用超声处理将 LNPs 负载于 MXene 纳米片表面, 并通过 LNPs 的还原性, 将 Ag^+ 还原成 Ag 单质, 成功制备了 LNPs-MXene-Ag 复合材料。该复合材料在锂离子电池负极材料中的应用展现出优异的电化学性能, 在 1.6 A/g 电流密度下, 其比容量达到 216.54 mA h/g, 且在 3000 次充放电循环后, 比容量仍保持在 85.71 mA h/g, 显示出良好的循环稳定性和倍率性能。本研究为木质素在锂离子电池领域的应用提供了新途径, 并为高性能电池的负极材料的研发提供了新思路。

关键词: 木质素纳米颗粒; MXene; 锂离子电池; 负极材料

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)00-0000-00

Construction of Lignin Nanoparticles-MXene-Ag Composite Electrode Material and Its Application in Lithium-Ion Batteries

FENG Jinlong, JIANG Chuang, ZU Wenyue, JIA Ming, HOU Qingxi, LIU Wei
(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: This study converted alkaline lignin into lignin nanoparticles (LNPs) through solvent exchange method. Meanwhile, LNPs were loaded onto the surface of MXene nanosheets using ultrasonic treatment, and Ag^+ was reduced to elemental Ag through the reducibility of LNPs, successfully preparing LNPs-MXene-Ag composite materials. As anode material of lithium-ion batteries, the LNPs-MXene-Ag exhibits an excellent electrochemical performance. Its specific capacity reaches 216.54 mA h/g at a current density of 1.6 A/g, and the specific capacity remains at 85.71 mA h/g after 3000 charge-discharge cycles, which demonstrated a good cycle stability and rate performance. This work provides a new approach for the application of lignin in the field of lithium-ion batteries and offers a new idea for the research and development of anode materials in high-performance battery.

Key words: lignin nanoparticles; MXene; lithium-ion battery; anode material

自 1991 年问世以来, 锂离子电池(lithium-ion batteries, LIBs)已成为电化学储能领域的主流, 占据了市场的主导地位^[1]。然而, 传统锂金属负极的商业应用受到枝晶、析氢、腐蚀、体积变化等问题的严重限制^[2-3]。石墨是 LIBs 中常用的负极材料,

但其存储容量已接近饱和, 这限制了电池能量密度的进一步提升^[4-5]; 硅基负极材料因其高比容量和环保特性被视为是有潜力的替代品, 但其商业化面临导电性差、循环性能差和体积膨胀等问题^[3, 6-7]。因

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2026-01-06

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(22JCZDJC00560)

作者简介: 冯金龙(2000—), 男, 山西人, 硕士研究生; 通讯作者: 刘苇, 教授, weiliu@tust.edu.cn

此, 寻找新型高容量、高循环性能的锂电池负极材料成为研究热点。

二维过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXenes)作为一种新型的二维材料, 以其优异的导电性、高表面积和高锂化电位、低工作电压、良好的亲水性、丰富的表面官能团($-OH$)以及优异的机械性能等特点受到了广泛的关注。MXene 在提高锂离子电池负极材料的倍率性能和循环稳定性方面展现了巨大的潜力, 有望突破现有材料的限制^[8], 可以通过“自上而下”或“自下而上”的方法制备 MXene^[9-10]。Cui 等^[11]通过刻蚀方法制备的 $s-Ti_2CT_x$ 材料, 未经任何改性便展现出了卓越的倍率性能, 在高达 10 A/g 的高电流密度下, 比容量可达到 155 mA h/g; 经过 1000 次充放电循环后, 仍保持了良好的容量保持率。但是, $Ti_3C_2T_x$ MXene 作为负极材料, 其理论容量相对较低, 仅为 320 mA h/g。在重复的充放电过程中, MXene 对锂离子的嵌入与脱出的相容性不佳, 这容易导致枝晶的形成, 制约了其电化学性能。此外, 这也限制了 MXene 在高倍率条件下的应用潜力^[12]。金属银常被用于电化学储能装置中电极材料的改性, 以提升电极的电子传输效率, 进而加速锂离子的嵌入与脱出^[13]。同时, 银与锂之间良好的相互作用有利于促进锂离子的均匀沉积, 有效减少了锂枝晶的形成, 从而提升了电池的循环稳定性和容量^[14-17]。尽管将银与 MXene 复合能够增强其导电性, 但在较高的电位下, 银可能会发生氧化反应, 这不仅会降低电极材料性能, 还会降低理论容量^[18]。因此, 抑制银在电极上的氧化反应至关重要。

木质素纳米颗粒(lignin nanoparticles, LNPs)不仅保留了木质素的芳香骨架和基本结构单元, 而且具有高比表面积和多表面官能团等优点。由于其表面富含活性官能团, LNPs 可用作绿色还原剂, 减少电极材料的氧化反应, 提高电极的稳定性。此外, LNPs 还能够提升金属纳米粒子的分散性、稳定性、反应活性和可回收性, 这些对于增强电池的循环稳定性和理论容量均大有裨益^[19]。与传统还原剂(如硅基、石墨基、锡基材料)相比, LNPs 具有来源广泛、成本低廉、可生物降解、易于制备等优点^[20]。此外, 通过化学改性可以在 LNPs 中引入不同的官能团, 从而赋予材料额外的特性, 例如更高的电导率或更好的力学性能。相比之下, 传统还原剂不仅成本高昂, 而且生产过程可能产生污染物, 引发环境问题^[21-22]。

本文以木质素为原料, 通过溶剂交换法制备了 LNPs, 利用超声辅助的处理方法通过氢键作用将 LNPs 负载于 MXene 表面, 进而借助 LNPs 的还原性将 Ag^+ 还原成 Ag 单质负载于 MXene 表面, 制备了 LNPs-MXene-Ag(LMAG)复合材料; 探索了该复合材料用作锂离子电池负极材料的性能。该研究不仅为木质素的高值化利用开辟了新路径, 也为锂离子电池负极材料的研发提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

碱木质素(alkali lignin, AL), 山东某公司提供; $Ti_3C_2T_x$ MXene, 江苏先丰纳米材料科技有限公司; 乙炔黑、聚偏二氟乙烯(PVDF)、N-甲基-2-吡咯烷酮、高纯锂片, 山西力之源电池材料有限公司。

1.2 实验仪器

SK06GT 型超声波清洗器, 上海科导超声仪器有限公司; RCT basic 型磁力搅拌器, 天津科诺仪器设备有限公司; Lab2000 型真空手套箱, 伊特克斯惰性气体系统(北京)有限公司; CT2001A 型电池检测系统, 武汉蓝电电子股份有限公司; MSK-110 型封装机、T07 型冲片机, 合肥科晶材料技术有限公司; OTG 型工字涂布器, 天津永利达材料试验机有限公司; CHI660E 型电化学工作站, 上海辰华仪器有限公司; VOS-30A 型真空干燥箱, 施都凯仪器设备(上海)有限公司; JSM-IT300LV 型扫描电子显微镜(SEM), 日本电子公司; D8-Focus 型 X 射线衍射仪(XRD), 德国布鲁克公司; X-MaxN20 型 X 射线光电子能谱仪(XPS), 英国牛津仪器; FTIR-650 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 天津港东科技发展股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 LMAg 复合材料的制备

采用溶剂交换法制备 LNPs: 配制体积分数为 70% 的乙醇溶液; 取 30 mg 碱木质素加入已配制的乙醇溶液中, 搅拌至碱木质素完全分散; 向该分散系中加入去离子水, 调节乙醇体积分数至 13%, 持续搅拌 30 min 即可得到 LNPs 的悬浮液。

将 30 mg MXene 加入 LNPs 悬浮液, 冰浴条件下超声处理 30 min, 得到含有 LNPs 的 MXene 悬浊液。向 LNPs-MXene 悬浊液中加入 1.5 mg $AgNO_3$, 室温下搅拌 10 min。使用无水乙醇对悬浊液进行反复洗涤, 去除 15 mg 多余 LNPs。将样品烘干, 得到 LNPs-MXene-Ag(LMAG)复合物, 其中 LNPs、MXene

和 Ag 的质量比为 5:10:1。

1.3.2 锂离子纽扣电池的制备

电极片的制备: 将 MXene 和 LMAg 复合材料放在 120 °C 真空烘箱中干燥 12 h, 作为活性物质供后续使用。将活性物质、乙炔黑(导电剂)和 PVDF(黏结剂)按质量比 8:1:1 的比例放入研钵中进行研磨, 滴加 N-甲基-1-吡咯烷酮将其调制成浆液状态, 均匀、快速地涂抹在铜箔(厚度 10 μm)上, 置于真空干燥器中 80 °C 干燥 12 h 后取出。用冲片机将涂抹有活性物质的干燥铜箔切割成直径为 14 mm 的圆片作为测试电极, 最后进行电池组装。

纽扣电池的组装: 在充满氩气的手套箱中将切

割好的电极片组装成半电池, 将 1 mol/L 六氟磷酸锂溶解在碳酸甲乙酯、碳酸乙烯酯和碳酸二乙酯的混合溶液(体积比 1:1:1)中, 配制成电解液。采用直径为 14 mm 的锂片作为对电极, Celgard 2400 型聚丙烯微孔膜、作为电池隔膜。组装时, 依次将弹片、垫片、锂片、隔膜、电解液、电极片放入电池壳中, 保证弹片、垫片、锂片、隔膜和电极片均在电池壳中心位置。组装好的纽扣电池用封装机封装成 CR2032 型纽扣电池, 随后置于室温下, 24 h 后进行电化学测试。LMAg 复合电极材料的制备流程如图 1 所示。

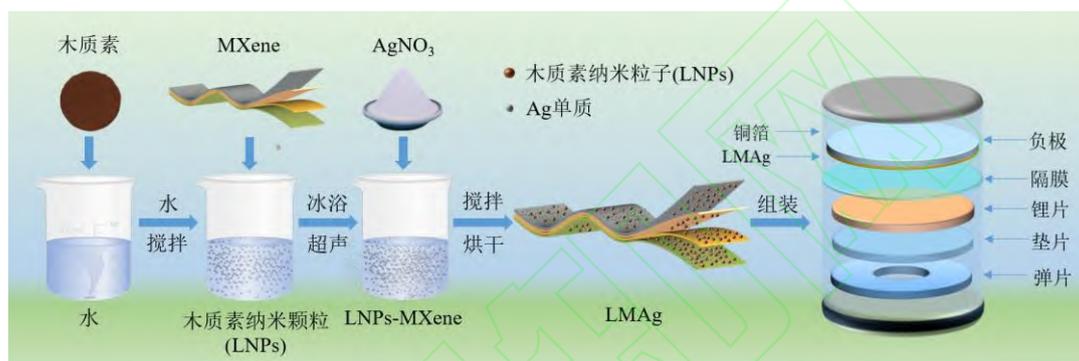


图 1 LMAg 复合电极材料的制备流程

Fig. 1 Preparation process of LMAg composite electrode material

1.4 分析与表征

1.4.1 LNPs 和 MXene 的表征

利用傅里叶变换红外光谱仪分析木质素的结构特征; 使用激光粒度分析仪对 LNPs 的粒径及分布进行分析; 采用扫描电子显微镜观察样品的表面形貌; 采用 X 射线衍射仪对样品的成分、晶体结构和结晶度进行分析; 利用 X 射线光电子能谱分析材料的化学组成和价态。

1.4.2 纽扣电池的电化学性能表征

使用 CHI660E 电化学工作站, 在不同电流密度(基于材料 320 mA h/g 的比容量, 1 C 对应电流密度为 0.32 A/g)和电压范围(0.01~3.00 V)下对电池进行恒流充放电(GCD)测试。

使用 CHI660E 电化学工作站对纽扣电池进行循环伏安测试(CV), 测试条件: 扫描速率 0.5 mV/s, 电压 0.01~3.00 V。

使用 CHI660E 电化学工作站, 测量电化学阻抗谱(EIS), 测试条件: 频率 0.01~100 kHz, 交流振幅 5 mV。

2 结果与讨论

2.1 木质素的理化特性分析

为了研究木质素结构的特性, 先对木质素的主要化学组分进行分析, 结果见表 1。此外, 对木质素的相对分子质量及 Zeta 电位进行测定, 结果如下: 重均相对分子质量(M_w) 3258, 数均相对分子质量(M_n)2260, 分散性(M_w/M_n)1.44, Zeta 电位-33.5mV。

表 1 木质素的主要化学组分

Tab. 1 Main chemical compositions of the lignin

化学组分	质量分数/%	化学组分	质量分数/%
总木质素	94.42	聚葡萄糖	0.32
酸不溶木质素	90.81	聚木糖	0.13
酸溶木质素	3.61	灰分	2.16
碳水化合物	0.63		

采用 FTIR 对木质素结构进行分析, 结果如图 2 所示。1324 cm^{-1} 和 1218 cm^{-1} 处的吸收峰归属于木质素分子中 C—O—C 键的不对称伸展振动, 这些峰是

木质素结构的重要特征峰之一。1413 cm^{-1} 处的吸收峰与 C—C 键的伸缩振动有关, 该峰的存在表明木质素分子中存在 S 结构, 即紫丁香基单元。紫丁香基单元是木质素分子中的重要组成部分。1450 cm^{-1} 和 1405 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 C—O 键的伸缩振动, 这些峰与木质素分子中酚羟基和醚键的 C—O 键相关。在木质素的化学结构中, C—O 键是重要的连接键, 醚键在木质素大分子结构中的重要性不可忽视。1710 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 C=O 键的伸缩振动。在木质素中, C=O 基团通常存在于酮类或酯类结构中。该峰的存在表明碱木质素中存在共轭羰基结构。2935 cm^{-1} 和 2854 cm^{-1} 处的吸收峰归属于木质素中甲基和亚甲基中 C—H 键的伸缩振动, 这些峰的强度反映了木质素中饱和烃基的存在程度。1604 cm^{-1} 处的吸收峰是木质素芳香环骨架伸缩振动的特征峰表明碱木质素保留了典型的木质素芳香结构。

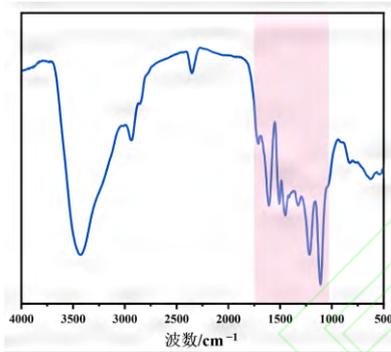
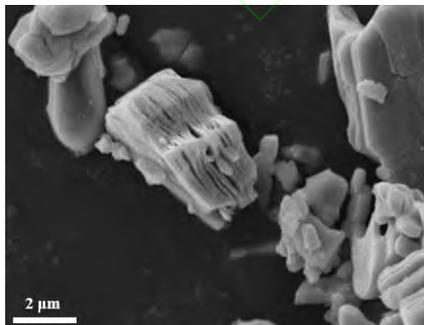


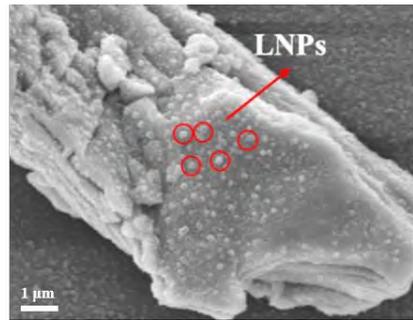
图2 木质素的 FTIR 光谱图
Fig. 2 FTIR spectra of lignin

2.2 LMAg 复合物的性能分析

MXene 及 LNP-MXene 复合材料的微观形貌如图 3 所示。多层 MXene 纳米片表面光滑; LNP 经超声复合处理得到的 LNP-MXene, 在 MXene 纳米片表面上附着了大量的 LNP。



(a) MXene



(b) LNP-MXene

图3 MXene 及 LNP-MXene 复合材料的微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of MXene and LNP

MXene composites

LNP 的粒径分布如图 4 所示, LNP 直径主要分布在 60~110 nm, 平均直径约为 100 nm, 大小分布均匀, 这为其在 MXene 金属表面还原 Ag^+ 、原位生长 Ag 单质提供了反应条件。对 LMAg 复合物进行能谱扫描, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, Ag 单质在 LMAg 复合材料中的含量约为 10%, 这主要是由于 LNP 具有较强的还原性, 能将 Ag^+ 还原成 Ag 单质, 从而附着在 MXene 表面。

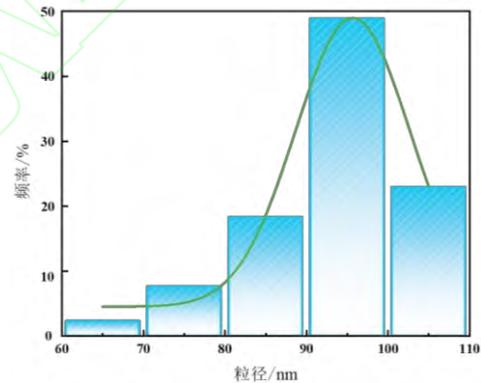


图4 LNP 的粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of LNP

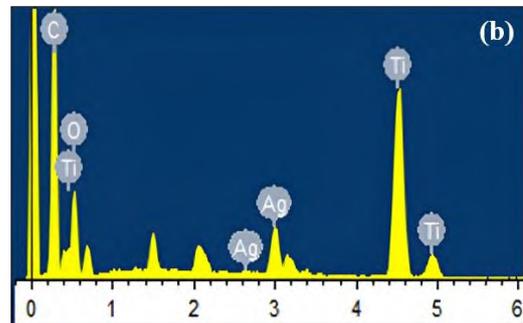


图5 LMAg 复合物的能谱分析图

Fig. 5 Energy spectrum analysis of LMAg complex

MXene 和 LMAg 复合物的 XRD 图谱如图 6 所示。

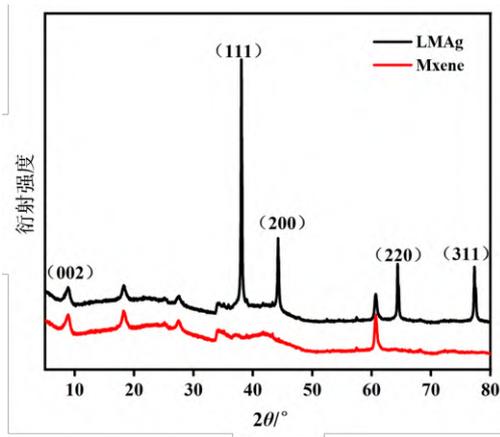


图 6 MXene 和 LMAg 复合物的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of MXene and LMAg composite

从图 6 可以看出, LMAg 复合物表现出 MXene 的标志性衍射峰。LMAg 复合物的衍射图谱中能清晰观察到 Ag 的面心立方晶格(111)、(200)、(220)和(311)晶面的 4 个主要衍射峰, 证实 Ag⁺成功还原为 Ag 单质, 并均匀地负载在 MXene 纳米片表面。Ag 特征峰较窄且强度更高, 表明生成的 Ag 具有较高结晶度。通过计算得出的晶格常数为 0.409 nm, 与已有研究^[23]相吻合。值得注意的是, 在 LMAg 复合物中, MXene 的(002)峰位置保持不变, 表明 MXene 层间的距离未发生显著增大。这些结果显示了复合材料具有结构稳定性。

MXene 与 LMAg 复合物的 XPS 谱图如图 7 所示。

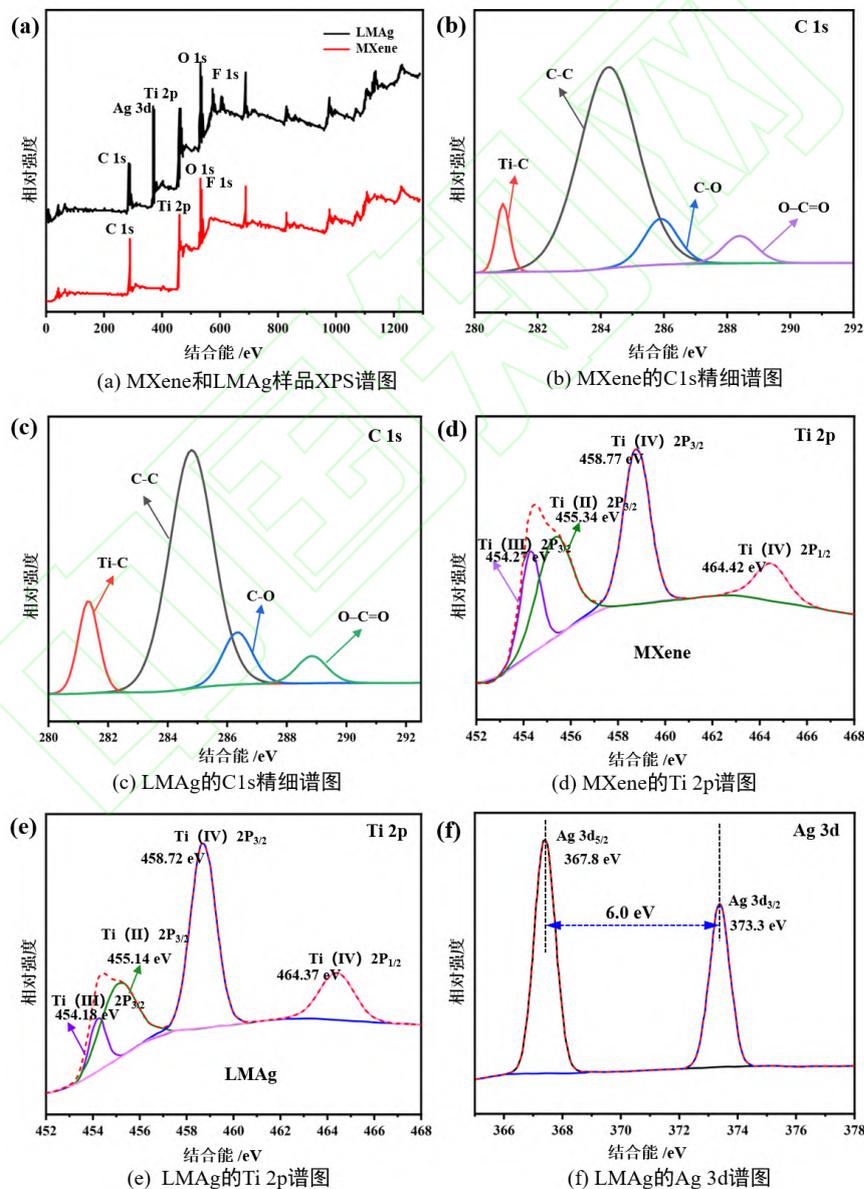


图 7 MXene 与 LMAg 复合物的 XPS 谱图

Fig. 7 XPS spectra of MXene and LMAg composites

在未负载 LNP 的情况下, MXene 的 C 1s 精细

谱图在 280.9 eV、284.8 eV、285.9 eV 和 288.4 eV

处拟合了 4 个特征峰, 分别归属于 Ti—C、C—C、C—O 和 O—C=O 键。当 LNPs 成功负载于 MXene 上后, C1s 谱图中的特征峰发生了显著变化。Ti—C、C—C、C—O 和 O—C=O 的峰值分别位移至 281.4 eV、284.8 eV、286.4 eV 和 288.9 eV, 结合能有所提高。这种峰位的移动表明, LNPs 的负载引起了 MXene 表面化学环境的变化, 主要归因于 LNPs 表面的含氧官能团与 MXene 之间发生了电子相互作用, 改变了 MXene 表面的电子环境。MXene 谱图在 458.77 eV 处的峰值归属于 Ti (IV) 2p_{3/2} 轨道; 在 454.27 eV 和 455.34 eV 处的峰值分别归属于 Ti (III) 2p_{3/2} 和 Ti (II) 2p_{3/2} 轨道。LMAg 复合物和 MXene 的谱图中, Ti 2p 峰出现的位置基本一致, 说明在复合制备 MXene/Ag 的反应中, MXene 没有发生变化; 同时发现 LMAg 复合物中低价 Ti 的比例有所减少, 高价 Ti 的比例有所增加, 这可能是在实验过程中有一部分低价 Ti 参与了氧化还原反应, 转变成了高价 Ti。此外, 可以看到两个明显的电子能级 Ag 3d_{5/2} 和 Ag 3d_{3/2}, 这两个能级的位置分别为 367.8 和 373.8 eV 处, 这是 Ag 的特征电子, 这表明 LNPs 成功将 Ag⁺ 还原成 Ag 单质。

2.3 纽扣电池的电化学性能分析

循环伏安法是解析电极反应可逆性及动力学的重要手段, MXene、MXene-Ag⁺ 与 LMAg 复合物

的循环伏安曲线如图 8 所示。图 8 展示了 MXene、MXene-Ag⁺ 及 LMAg 复合物在 0~3.0 V 电压窗口 (扫描速率 0.5 mV/s) 的电化学行为差异。MXene 与 MXene-Ag⁺ 的循环伏安特征高度吻合, 包括峰形、峰位及电流响应, 证实 Ag⁺ 的引入未改变材料固有反应路径及活性位点。与之形成对比的是, LMAg 复合物在 2.5 V 处呈现特征还原峰, 这源于木质素纳米颗粒原位还原 Ag⁺ 生成 Ag 单质, 形成独特的 LMAg 结构。该过程虽未引入新氧化还原反应, 但 Ag 单质的引入显著优化了界面电子结构: 一方面作为高效电子导体降低 Li⁺ 脱嵌活化能, 另一方面其催化活性促进 Li⁺ 表面迁移, 形成协同反应机制, 这与已有文献[24]相符。

在首次锂化过程中, MXene 与 LMAg 均呈现两个不可逆还原峰(1.66 V 和 0.62 V), 这是因为 Li⁺ 嵌入引发固体电解质界面膜(SEI)形成导致的电解液损耗。相应地, 1.96 V 和 2.44 V 的宽阳极峰对应 Li⁺ 的脱出过程。值得注意的是, LMAg 在 0.37 V 处新增还原峰, 反映 Ag 单质加速 Li⁺ 嵌入/脱出的协同效应, 而木质素提供的额外活性位点则显著提升可逆容量。这种结构优势使 LMAg 复合物展现出优于原始 MXene 的电化学性能, 与已有文献[25]相符。

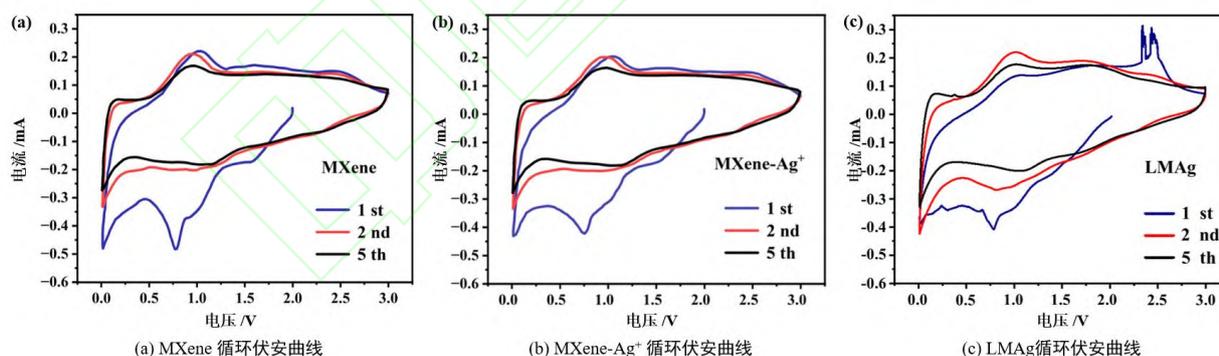


图 8 MXene、MXene-Ag⁺ 与 LMAg 复合物的循环伏安曲线

Fig. 8 Cyclic voltammograms of MXene, MXene-Ag⁺ and LMAg complexes

MXene 与 LMAg 复合物的电化学性能测试结果如图 9 所示。为了进一步评估 LMAg 复合物的电化学性能, 在 0.01~3.00 V 的电压范围内, 以 0.32 A/g 的电流密度进行了恒流充放电测试 (图 9(a))。在首次放电循环中, LMAg 复合物的比容量达到 441.10 mA h/g, 而充电时的比容量为 287.73 mA h/g, 初始库仑效率为 65.23%。这与文献[26]中报道的首次恒定电流循环中约 105.00 mA h/g 的比容量相比, 显示

出明显的优势。然而, 在第二次循环时, 放电和充电比容量分别降至 298.44 mA h/g 和 204.93 mA h/g。但经过 200 次循环后, LMAg 复合物的充放电曲线趋于重叠, 表明该电极材料展现出优异的稳定性以及在高循环次数下的长循环寿命和较高容量(216.54 mA h/g)。首次循环后的电容量损失是不可逆的, 这主要归因于电极表面 SEI 膜的形成、MXene 与 Li⁺ 之间的不可逆反应, 以及电池中电解质的分解。通

过在 MXene 表面形成银单质,显著提高了 LMAg 复合物的机械强度,提供了快速的电子运输通道,进而增强了其在锂电池中的性能表现。同时, LNPs 可以提供更多的活性位点,从而增加可逆容量。

为了深入解析复合材料的电化学机制,对以 MXene 和 LMAg 复合物为负极材料进行 EIS 测试,结果如图 9 (b)所示。典型的奈奎斯特图可分为两个

区域:高、中频区的半圆和低频区的直线。高、中频区半圆的直径代表了电荷转移电阻,直径越小,电荷转移电阻越小;低频区的直线则与 Li^+ 在电极材料中的扩散行为相关。LMAg 复合物的半圆直径更小,表明它具有更小的电荷转移电阻,从而加速电化学反应的进行。这进一步证明了银单质有助于 LMAg 复合物在电解液中的电荷转移。

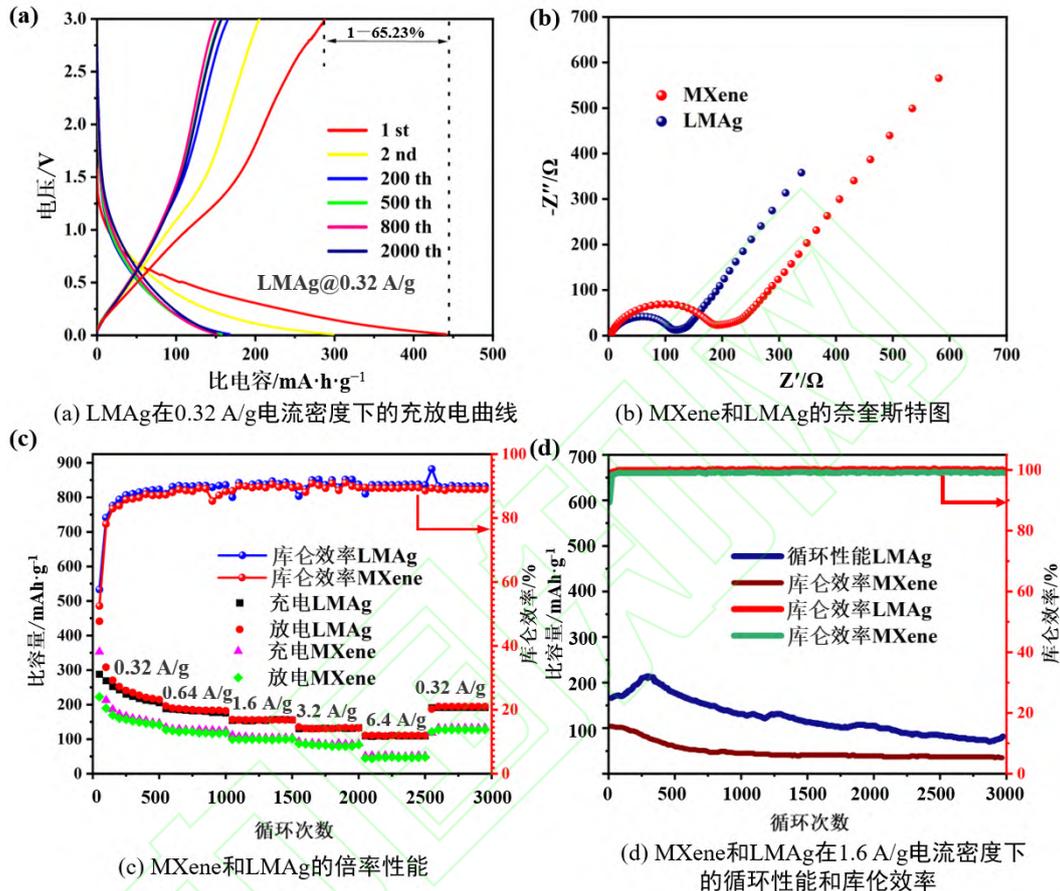


图 9 MXene 与 LMAg 复合物的电化学性能测试结果

Fig. 9 Electrochemical performance test results of MXene and LMAg composites

对 MXene 和 LMAg 复合物在不同电流密度下的倍率性能进行评估,结果如图 9 (c)所示。在 0.32 A/g、0.64 A/g、1.6 A/g、3.2 A/g 和 6.4 A/g 的电流密度下进行测试。LMAg 复合物在不同电流密度下均保持了较高的比容量,并且在电流密度恢复到 0.32 A/g 时,其比容量能够回升至 194.26 mA h/g。这表明得益于 LMAg 复合物表面附着的银单质提供了快速的电子运输通道,在大电流密度下,其能够促进离子与电子的快速交换,使得更多的锂离子可以从 LMAg 复合物中嵌入/嵌出。

为了探究 LMAg 复合物在长循环性能,在 1.6 A/g 的电流密度下进行了 3000 次充放电循环测试,结果如图 9 (d)所示。从图 9 (d)中可以观察到, MXene 在首次和第 3000 次充放电循环中的比容量分别为

111.23 mA h/g 和 36.60 mA h/g。相比之下, LMAg 复合物在 1.6 A/g 电流密度下的比容量呈现出先增大后减小的趋势,其最高比容量和第 3000 次充放电循环的比容量分别为 216.54 mA h/g 和 85.71 mA h/g,远高于 MXene。此外,与文献报道的 Ni-HHTP 电极在 800 次循环后的放电比容量 65.70 mA h/g 相比,本文的 LMAg 电极显示出更长的循环寿命(3000 次)^[27-30]。发生这种现象有两种原因:一是银单质改善了 LMAg 复合物的导电性,从而使得在充放电过程中增加了锂离子的嵌入/嵌出能力;二是 LMAg 复合物表面附着的银单质能够在一定程度上缓冲 LMAg 复合物在嵌锂脱锂中的由于结构堆叠引起的锂离子传输路径受阻,从而影响其倍率性能和循环稳定性。

3 结 论

以碱木质素为原料,采用溶剂交换法成功制备了LNPs。通过将制备的LNPs负载于多层MXene表面,并引入AgNO₃,利用LNPs的还原性,在MXene表面原位生长银单质,从而制得LMAg复合物。将其作为锂离子电池负极材料进行电化学性能测试。LMAg复合物作为电极展现出优异的稳定性,在高充放电循环次数下具有超长的循环寿命和较大的容量;在1.6 A/g电流密度下,LMAg复合物的比容量呈现出先增大后减小的趋势,其最高比容量和第3000次充放电循环的比容量分别达到216.54 mA h/g和85.71 mA h/g。综上所述,LMAg复合物作为一种高效的锂离子电池负极材料,在高倍率充放电条件下不仅展现出卓越的循环稳定性,还保持了较高的比容量,显示出其在高性能电池领域的巨大潜力。

声明:稿件撰写与修改过程中有限度使用了AI辅助工具(DeepSeek-V3.2),主要用于语言层面的润色与表达优化。针对AI润色的文本内容,作者进行了人工核对和必要的修改。作者对论文的全部内容(包括AI润色后经人工审校的文字)承担完全责任。

参考文献:

- [1] Li Zhen, Wang Li, Huang Xiaodong, et al. Unveiling the mystery of LiF within solid electrolyte interphase in lithium batteries[J]. *Small*, 2024, 20(22): 2305429.
- [2] Jiang Xiaomei, Chen Yanjun, Meng Xiaokai, et al. The impact of electrode with carbon materials on safety performance of lithium-ion batteries: a review[J]. *Carbon*, 2022, 191: 448-470.
- [3] Li Yifei, Li Qingmeng, Chai Jiali, et al. Si-based anode lithium-ion batteries: a comprehensive review of recent progress[J]. *ACS Materials Letters*, 2023, 5(11): 2948-2970.
- [4] Liu Chuanbang, Sun Jichang, Zheng Penglun, et al. Recent advances of non-lithium metal anode materials for solid-state lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(32): 16761-16778.
- [5] Prajapati A K, Bhatnagar A. A review on anode materials for lithium/sodium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 83: 509-540.
- [6] Yang Shujie, Min Xin, Fan Hui, et al. In situ characterization of lithium-metal anodes[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(35): 17917-17947.
- [7] Chen Jingwei, ADIT G, Li Lun, et al. Optimization strategies toward functional sodium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental materials*, 2023, 6(4): e12633.
- [8] Aghamohammadi H, Eslami-Farsani R, Castillo-Martinez E. Recent trends in the development of MXenes and MXene-based composites as anode materials for Li-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 47: 103572.
- [9] Shahzad F, Iqbal A, Kim H, et al. 2D transition metal carbides (MXenes): applications as an electrically conducting material[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(51): 2002159.
- [10] LOH K P. MXenes are still hot[J]. *Chemistry of Materials*, 2023, 35(21): 8771-8773.
- [11] Cui Cong, Dai Ruqiao, Zhang Chao, et al. Submicron Ti₂CT_x MXene particulates as high-rate intercalation anode materials for Li-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(29): 15474-15484.
- [12] 林静. Si@MXene 复合材料的制备及其作为锂离子电池负极的电化学性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 13.
- [13] Xu Wangqiong, Li Qiling, Xia Shubiao, et al. In situ formed Ag nanoparticle decorated LiMn₂O₄ cathodes with outstanding electrochemical performance[J]. *Dalton Transactions*, 2025, 54(16): 6613-6622.
- [14] Li Yu, Zhou Xingzhen, Bai Ying, et al. Building an electronic bridge via Ag decoration to enhance kinetics of iron fluoride cathode in lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(23): 19852-19860.
- [15] Krajewski M, Hamankiewicz B, Czerwiński A. Voltammetric and impedance characterization of Li₄Ti₅O₁₂/n-Ag composite for lithium-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 219: 277-283.
- [16] TAY S F, JOHAN M R. Synthesis, structure, and electrochemistry of Ag-modified LiMn₂O₄ cathode materials for lithium-ion batteries[J]. *Ionics*, 2010, 16(9): 859-863.
- [17] Yang Chunpeng, Yao Yonggang, He Shuaiming, et al. Ultrafine silver nanoparticles for seeded lithium deposition toward stable lithium metal anode[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(38): 1702714.
- [18] 尹珊珊. 硅银碳纳米杂化锂离子电池负极材料的制备及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2017: 14.
- [19] 储晶晶, 张莉莉, 王志国. 木质素基金属纳米粒子复合材料的制备及其应用研究进展[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2657-2673.

- [20] Liu Wei, Ning Chenxi, Sang Ranran, et al. Lignin-derived graphene quantum dots from phosphous acid-assisted hydrothermal pretreatment and their application in photocatalysis[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 171: 113963.
- [21] 陈雨鑫. Si/C@石墨烯负极材料的制备及其稳定储锂性能研究[D]. 贵阳:贵州民族大学,2024:16.
- [22] 张妮妮,任娟,罗澜茜,等. Be掺杂石墨双炔作为锂离子电池负极材料的第一性原理研究[J]. *物理学报*,2024,73(21):236-250.
- [23] Kuruganti T, Joshi P K, Goswami M. Simulation of two nanoparticle melting to understand the conductivity drop of 3D-printed silver nanowires[J]. *Materials & Design*, 2023, 236: 112502.
- [24] Ni Kun, Chen Liang, Lu Gongxuan. Synthesis of silver nanowires with different aspect ratios as alcohol-tolerant catalysts for oxygen electroreduction[J]. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10(7): 1027-1030.
- [25] Liu Yu, Wang Wei, Ying Yulong, et al. Binder-free layered $Ti_3C_2/CNTs$ nanocomposite anodes with enhanced capacity and long-cycle life for lithium-ion batteries[J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(16): 7123-7126.
- [26] Koriukina T, Kotronia A, Halim J, et al. On the use of $Ti_3C_2T_x$ MXene as a negative electrode material for lithium-ion batteries[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(45): 41696-41710.
- [27] Wu Liquan, Li Wenjie, Yin Yutao, et al. In-situ construction of $Ti_3C_2T_x/Ni$ -HHTP heterostructure as anode for lithium-ion batteries[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108160.
- [28] Wang Dan, Ma Qun, Li Xiao, et al. Coupling ultrafine SiO_2 nanoparticles with three-dimensional porous $Ti_3C_2T_x$ MXene as anode materials for high-performance lithium-ion batteries[J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 139: 110379.
- [29] Qureshi Z A, Quddus K A, Tariq H A, et al. Enhancing lithium-ion battery anode performance via heterogeneous nucleation of silver within Ti_3C_2 -MXene frameworks[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1008: 176521.
- [30] Zhang Xunpeng, Zhang Tianze, Zhang Chi, et al. Ag nanoparticles grafted vanadium carbide MXene as a superior anode material for lithium-ion battery: High capacity and long-term cycle capability[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 909: 164730.