$Ti_3C_2T_x$包覆钛酸锂电极的电化学性能研究

刘敬敬[1],袁志成[2]*

(1.商丘职业技术学院,河南 商丘 476000;2.同济大学,上海 200092)

摘　要:为改善钛酸锂(LTO)电极的导电性和倍率性能,采用化学气相沉积(CVD)与表面接枝改性相结合的方法,制备不同质量分数MXene($Ti_3C_2T_x$)包覆的LTO复合电极。X射线衍射(XRD)与场发射透射电子显微镜(TEM)结果表明,MXene以二维片层均匀包覆于LTO颗粒表面,未改变尖晶石相结构,同时构建了连续导电网络。循环后扫描电子显微镜(SEM)形貌显示,MXene包覆显著抑制颗粒开裂并增强结构完整性。热重分析(TG)显示,包覆有效抑制LTO的逐步热分解,同时提升残留率。热逸走分析(TR)表明,包覆降低材料的起始分解温度。电化学测试结果显示,4%的MXene包覆的LTO复合电极具有最佳综合性能,其电荷转移电阻(R_{ct})由158.22 Ω降至86.31 Ω,锂离子扩散系数(D_{Li^+})提升至4.56×10^{-15} cm^2/s,库仑效率(CE)提高至63.91%。在1.0 C倍率下容量保持率达94.07%,远高于未包覆样品的69.95%。MXene包覆显著提升循环稳定性和倍率性能。MXene包覆通过构建稳定的电子、离子协同传输通道和增强界面结合,实现LTO电极在结构稳定性、导电性及循环性能上的综合优化。研究为高功率锂离子电池中的高性能负极材料的设计提供新思路。

关键词:钛酸锂;$Ti_3C_2T_x$包覆;电化学性能;晶体结构变化

中图分类号:TQ323.6　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)08-0036-07

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.007

Study on Electrochemical Property of Lithium Titanate Electrode Coated with $Ti_3C_2T_x$

LIU Jingjing[1], YUAN Zhicheng[2]*

(1. Shangqiu Professional Training College, Shangqiu 476000, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To improve the electrical conductivity and rate performance of lithium titanate (LTO) electrodes, LTO composite electrodes coated with different mass fractions of MXene ($Ti_3C_2T_x$) were prepared by combining chemical vapor deposition (CVD) with surface grafting modification. X-ray diffraction (XRD) and field emission transmission electron microscopy (TEM) results showed that MXene uniformly coated the LTO particle surfaces as two-dimensional sheets without altering the spinel phase structure, while simultaneously constructing a continuous conductive network. Post-cycling scanning electron microscopy (SEM) morphology revealed that MXene coating significantly inhibited particle cracking and enhanced structural integrity. Thermogravimetric (TG) analysis showed that the coating effectively suppressed the stepwise thermal decomposition of LTO and increased the residual mass. Thermal runaway (TR) analysis indicated that the coating lowered the initial decomposition temperature of the material. Electrochemical test results demonstrated that the LTO composite electrode with 4% MXene coating exhibited the best overall performance, with its charge transfer resistance (R_{ct}) reduced from 158.22 Ω to 86.31 Ω, lithium-ion diffusion coefficient (D_{Li^+}) increased to 4.56×10^{-15} cm^2/s, and coulombic efficiency (CE) improved to 63.91%. The capacity retention reached 94.07% at 1.0 C, significantly higher than the 69.95% of the uncoated sample. MXene coating significantly enhanced the cycling stability and rate performance. By constructing stable electron/ion synergistic transport channels and enhancing interfacial bonding, MXene coating achieved comprehensive optimization of LTO electrodes in terms of structural stability, conductivity, and cycling performance. The study provides new insights for the design of high-performance anode materials in high-power lithium-ion batteries.

Keywords: Lithium titanate; $Ti_3C_2T_x$ coating; Electrochemical property; Changes in crystal structure

收稿日期Submitted date 2025-10-20;修回日期Revised date 2025-11-25;录用日期Accepted date 2025-12-11

基金项目:中央高校基本科研业务专项经费项目(22120250275);同济大学沈祖炎专项基金项目(2024CPCCE-K01)

*联系人,zhicheng_yuan@tongji.ed.cn

引用本文:刘敬敬,袁志成.$Ti_3C_2T_x$包覆钛酸锂电极的电化学性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):36-42.

Citation: LIU J J, YUAN Z C. Study on electrochemical property of lithium titanate electrode coated with $Ti_3C_2T_x$[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 36-42.

随着全球对清洁能源和高性能储能设备需求的不断增长，锂离子电池作为一种高效、环保的能量存储装置，得到广泛关注。钛酸锂(LTO)因其零应变结构、优异的循环稳定性与安全性能，被视为下一代电动车和大型储能系统的重要电极材料。然而，LTO电子导电性较差，Li^+扩散速率有限，严重制约其倍率性能和能量密度的提升[1]。为突破这一瓶颈，表面包覆导电材料已成为提高LTO电极材料性能的有效途径。碳包覆、金属氧化物修饰以及导电聚合物包覆均取得显著效果[2]。然而，传统包覆材料在导电性和结构稳定性方面仍存在不足。

近年来，二维过渡金属碳氮化物(MXene)材料因其优异的导电性、丰富的表面官能团以及层状结构，成为电极材料改性研究的热点。特别是$Ti_3C_2T_x$以其高导电率和良好的机械柔韧性，被广泛应用于Li^+电池电极、超级电容器和催化领域[3]。研究表明，MXene包覆可有效提升活性材料的电荷转移速率和界面稳定性，促进Li^+的快速嵌入和脱嵌[4-6]。NUNNA等[7]研究表明，将二维碳化钛/氮化钒@碳(Ti_3C_2MXene-VN@C)复合材料应用于Li^+电池负极，在较高电流密度(逆倍率)下仍能够保持较高比容量，显示出复合网络结构对电子-离子传导的显著促进作用。BAO等[8]指出，$Ti_3C_2T_x$等MXene在高电流密度运作下导电性强，二维层状结构提供快扩散通道，这些特性使其非常适用于高功率密度电池与快速充电。

近年来，LTO材料的改性研究已成为研究热点。WANG等[9]通过原位生长法制备$Li_4Ti_5O_{12}$-$Ti_3C_2T_x$复合材料。结果表明：在1 C倍率下该复合材料展现出约98%的优异容量保持率，证明MXene在提升循环寿命方面的潜力。TIAN等[10]制备MXene涂覆LTO负极，实现更低的界面阻抗和更优的电化学稳定性。ZHANG等[11]结合MXene的层状结构，优化了LTO电极的离子扩散路径，促进了快速充放电反应。然而，目前研究均采用溶液蚀刻法制备MXene，工艺涉及强腐蚀性试剂，MXene与LTO的复合多依赖溶液法过程中的原位反应或物理混合。

本研究基于化学气相沉积(CVD)与表面接枝改性制备MXene——$Ti_3C_2T_x$纳米片，将其与LTO复合。该方法通过氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)表面嫁接人为构建高效的界面桥梁。在此基础上，系统性地研究$Ti_3C_2T_x$包覆对LTO晶体结构、热稳定性、界面电荷转移及离子扩散动力学的综合影响，旨在从机理层面揭示MXene作为包覆层的作用本质，为高性能LTO电极设计提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

四氯化钛($TiCl_4$)，质量分数≥99.9%，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；甲烷(CH_4)，体积分数≥99.99%，广东华特气体股份有限公司；氢气(H_2)，体积分数≥99.999%，法国液化空气集团；APTES，质量分数≥98%，西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司；氮气(N_2)，体积分数≥99.999%，法国液化空气集团；钛酸四丁酯(TBT)，质量分数≥98%，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；二水合醋酸锂、无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；超纯水，电阻率≥1.82×10^5 Ω·m，实验室自制。

1.2 仪器与设备

场发射透射电子显微镜(TEM)，JEM-2100F，日本JEOL公司；能谱系统(EDS)，INCA，英国Oxford仪器公司；X射线衍射仪(XRD)，D8 Advance，美国Bruker公司；同步热分析仪(STA)，STA 449 F3，德国Netzsch公司；电化学工作站，CHI 760E，上海辰华仪器有限公司；电池测试系统，CT2001A，武汉蓝电有限公司；氩气保护手套箱，H_2O、O_2体积分数<0.1×10^{-6}，德国MBRAUN公司；扣式电池外壳CR2025，MTI公司；隔膜，Celgard 2400，美国Celgard公司；铝箔集流体，深圳斯诺实业有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 $Ti_3C_2T_x$纳米片的制备

采用CVD合成$Ti_3C_2T_x$。以$TiCl_4$和流速10 mL/min的CH_4为前驱体，以流速300 mL/min的H_2为载气，以流速2 000 mL/min的N_2为保护气，在管式炉中于1 200 ℃下反应3 h，系统压力0.1 MPa。将系统降温至300 ℃，引入APTES作为$Ti_3C_2T_x$表面接枝改性剂及Si源，通入APTES蒸气，载气为流速50 mL/min的N_2，进行表面接枝改性2 h，最终得到$Ti_3C_2T_x$纳米片[12]。

1.3.2 LTO@*X*%MXene电极材料的制备

以TBT为钛源，以二水合醋酸锂为锂源，制备LTO，其中Li与Ti的物质的量之比为6∶5[13]。按设计质量分数(*X*%)分别为1%、2%、3%、4%、5%称取自制$Ti_3C_2T_x$纳米片，共同分散于无水乙醇中。混合物在功率500 W下超声处理30 min，使其充分混合后，于60 ℃水浴中以500 r/min磁力搅拌30 min，静置水解6 h。将所得混合物在80 ℃下干燥12 h，研磨成前驱体粉末。将其装入100 mL聚四氟乙烯内衬的不锈钢高压反应釜中，填充度≤60%，密封后通入N_2，排氧3 min，保持釜内微正压，表压为0.2 MPa。以10 ℃/min的升温速率程序升温至600 ℃，保温8 h进行晶化，釜内最高压力约1.8 MPa。反应结束后，自然冷却至室温。将冷却后的产物研磨并过300目筛，即得最终产物，记为LTO@*X*%MXene[14-15]。

1.4 性能测试与表征

XRD测试：扫描范围为5°~80°，步长为0.02°，扫描速率5 (°)/min，用于判断$Ti_3C_2T_x$包覆是否改变LTO的尖晶石结构及不同含量样品的结晶状况。

形貌与元素分别测试：利用所配备的EDS进行元素分布分析，以确定$Ti_3C_2T_x$在$Li_4Ti_5O_{12}$表面的包覆均匀性以及N、Li、Ti和Si的元素组成。为评估长循环结构稳定性，对循环200次后的样品进行SEM观察，对比循环前后颗粒形貌的变化。

热稳定性测试：称取约10 mg样品，置于Al_2O_3坩埚

中，在N_2气氛(流速为50 mL/min)中，以10 ℃/min从室温升至800 ℃。热逸走分析(TR)按照GB/T 25788—2010进行测试，用于评估包覆对材料热安全性的影响。热重分析(TG)用于研究材料热分解行为及残留质量。

电化学性能测试：在扣式电池体系中进行测试。电极由质量比8∶1∶1的活性物质、乙炔黑和聚偏氟乙烯混合制成浆料，涂覆于铝箔集流体上。电池在惰性气氛手套箱中组装，以金属锂片为对电极，将1 mol/L $LiPF_6$溶于体积比1∶1的碳酸乙烯酯/碳酸二乙酯溶液作为电解液，使用商用聚丙烯隔膜。在1.0~2.5 V电压范围内以0.1 mV/s扫描速率进行循环伏安(CV)测试。按照GB/T 31484—2015进行恒流充放电测试，倍率为0.1 C，电压范围为1.0~2.5 V。电化学阻抗谱(EIS)测试频率范围为1.00×10^5~0.01 Hz，扰动幅度5 mV，使用ZSimpWin软件对EIS进行等效电路拟合。

2 结果与讨论

2.1 XRD分析

图1为MXene和LTO@*X*%MXene的XRD谱图。从图1可以看出，LTO对照组在18.6°、35.5°和42.5°处出现明显的晶面衍射峰，分别对应111、311和400，表明其主体晶体结构保持完好[16]。随着MXene质量分数从1%逐步升高至5%，样品仍保持LTO本征相结构，未出现杂相峰，说明MXene包覆未破坏LTO晶体骨架，样品中7.53°、24.7°和29.7°处出现的弱峰可归因于MXene的层状结构。LTO@4%MXene与LTO@5%MXene样品衍射峰更为清晰，表明晶体结晶度略有改善，包覆层与LTO界面结合较好[17-18]。

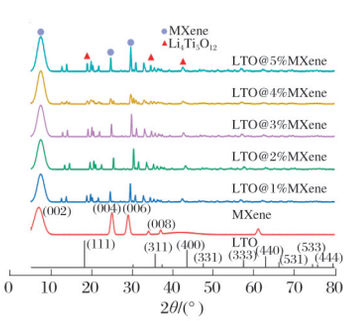


图1 MXene和LTO@*X*%MXene的XRD谱图

Fig.1 XRD patterns of MXene and LTO@*X*%MXene

2.2 微观形貌分析

图2为LTO@1%MXene的TEM照片。从图2可以看出，纳米颗粒在合成过程中表面被一层均匀覆盖的片状结构所包覆，该包覆层具有典型的层状折叠特征。结合前期XRD分析，可归因于MXene纳米片[19]。该层状结构在LTO颗粒表面表现出良好的界面适配性和紧密附着特征，未见明显团聚现象，说明MXene在材料表面形成连续且均匀的导电网络，构建稳定的“纳米骨架-活性材料”协同结构[20]。

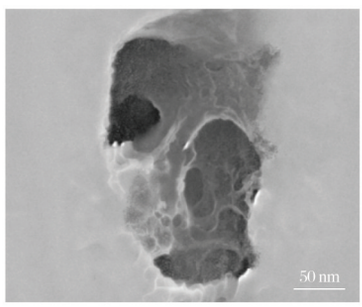


图2 LTO@1%MXene的TEM照片(200 000×)

Fig.2 TEM image of LTO@1%MXene (200 000×)

图3为LTO@1%MXene的EDS照片。从图3可以看出，Ti、Li元素在LTO主材中均匀分布，而LTO@1%MXene片层结构中的Si、N等特征元素则主要分布于LTO颗粒的边缘与包覆层区域。MXene纳米片在LTO表面形成完整且均匀的包覆层，该复合材料中MXene以连续、致密的方式包覆并嵌入LTO颗粒表面。

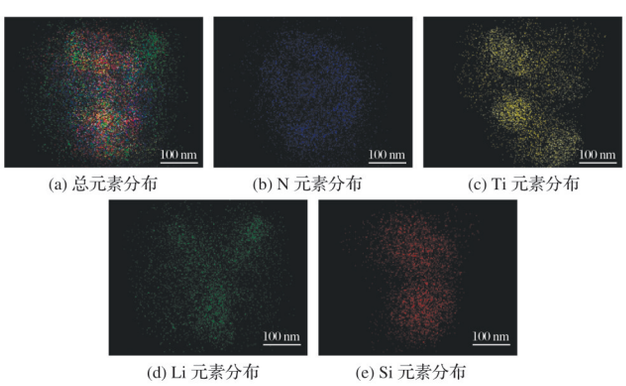


图3 LTO@1%MXene的EDS照片

Fig.3 EDS images of LTO@1%MXene

图4为200次循环后LTO@*X*%MXene的SEM照片。从图4可以看出，未包覆的LTO样品经历200次循环后，表面出现明显的裂纹和孔洞，颗粒之间存在较大分离，表明其结构在长循环过程中发生严重破坏。相比之下，随着MXene质量分数从1%增加至4%，样品表面的裂纹和孔洞逐渐减少，尤其是LTO@4%MXene表面较为完整、致密且相对光滑，显示出良好的结构稳定性。然而，当MXene质量分数增加至5%时，样品表面出现明显的堆积现象，局部区域出现团聚结构和明显的孔隙，可能导致电子传导路径不均匀，进而使电化学性能劣化。

2.3 EIS分析

图5为LTO@*X*%MXene的EIS谱图。通过拟合阻抗数据，提取溶液电阻(R_s)、电荷转移电阻(R_{ct})、Warburg因子(σ)及锂离子扩散系数(D_{Li^+})等关键参数，揭示复合材料的离子扩散行为及界面稳定性。从图5a可以看出，半圆弧半径随MXene含量的增加而逐渐缩小，表明R_{ct}持续降低。图5b的线性拟合用于计算σ与D_{Li^+}，验证了LTO@*X*%MXene层间通道可显著促进Li^+扩散。

图6为等效电路，其中W_1为第一个Warburg阻抗，

CPE_1为第一个常相位角元件。等效电路模型进一步说明阻抗变化来源于界面结构优化。因此，EIS分析直接反映MXene包覆对电子传导与Li^+动力学的协同增强作用。

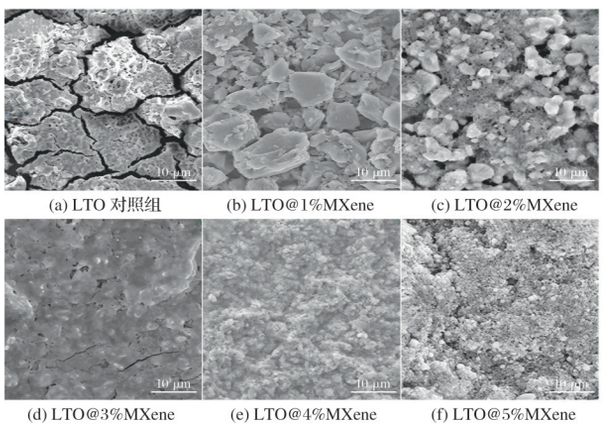
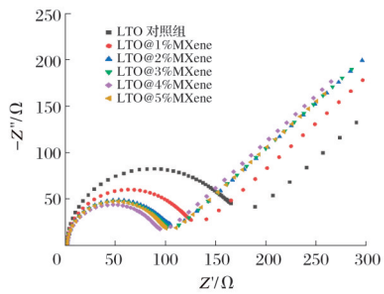


图4　200次循环后LTO@*X*%MXene的SEM照片(5 000×)

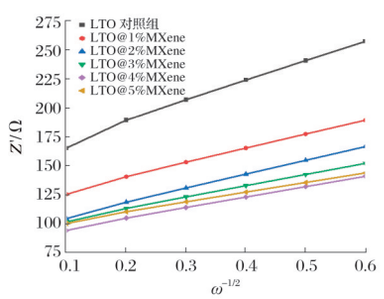
Fig.4 SEM images of LTO@*X*%MXene after 200 cycles (5 000×)

表1为LTO@*X*%MXene拟合后的关键数据。从表1可以看出，LTO@4%MXene表现最佳，R_{ct}降至86.31 Ω，σ为88.36 Ω/$s^{0.5}$，D_{Li^+}达到4.56×10^{-15} cm^2/s，说明$Ti_3C_2T_x$片层在LTO颗粒表面形成二维导电骨架，层间通道缩短Li^+扩散路径，降低界面极化和电荷转移阻抗，从而显著提升材料的电荷转移速率[21]。虽然LTO@5%MXene的σ降低至81.84 Ω/$s^{0.5}$，D_{Li^+}达到最高值5.32×10^{-15} cm^2s，但R_{ct}略回升至93.15 Ω，表明MXene过量可能引起电极界面结构紊乱，阻碍电子和离子传输[22]。

XRD和TEM、EDS结果证实了MXene以二维纳米片形态均匀包覆于LTO表面，形成高导电骨架结构以促进电子传导。同时MXene丰富的表面活性位点和良好的界面结合加快Li^+的扩散速率。EIS结果进一步显示，包覆显著减小LTO@*X*%MXene的R_{ct}和界面阻抗，提升D_{Li^+}，实现电极结构与电化学性能的协同优化。然而，过高的MXene含量可能导致界面拥堵及导电网络破坏，抑制电荷与离子传输。与LI[23]的研究结果一致，即在较低电流密度下可获得较高比容量与循环稳定性。这是因为MXene纳米片与碳点构成的导电网络有效降低电子-离子传输阻抗。



(a) Nyquist阻抗谱图



(b) Z'和$\omega^{-1/2}$的线性拟合

图5　LTO@*X*%MXene的EIS谱图

Fig.5 EIS spectra of LTO@X%MXene

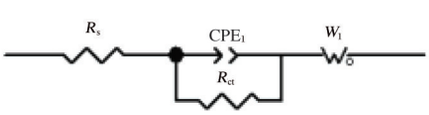


图6　等效电路

Fig.6 Equivalent circuit

表1　LTO@*X*%MXene拟合后的关键数据

Tab.1 Key data of LTO@*X*%MXene after fitting

样品编号	R_s/Ω	R_{ct}/Ω	σ/(Ω·$s^{-0.5}$)	D_{Li^+}/(cm^2·s^{-1})
LTO对照组	2.01	158.22	164.17	1.32×10^{-15}
LTO@1%MXene	2.02	116.86	118.68	2.53×10^{-15}
LTO@2%MXene	2.18	94.79	117.27	2.59×10^{-15}
LTO@3%MXene	2.12	93.57	95.02	3.94×10^{-15}
LTO@4%MXene	2.18	86.31	88.36	4.56×10^{-15}
LTO@5%MXene	2.13	93.15	81.84	5.32×10^{-15}

2.4　TR分析

图7为LTO@X%MXene的TR曲线。从图7可以看出，MXene包覆对LTO电极材料的热失稳行为具有显著影响。未包覆的LTO对照组在287.9 ℃开始发生明显的热逸走反应，峰值温度达到346.6 ℃。TR起始时间为3 510 s。随着MXene含量的增加，LTO@*X*%MXene的TR起始温度和峰值温度呈现下降趋势。LTO@1%MXene的起始温度下降至273.6 ℃，峰值温度为364.7 ℃；LTO@4%MXene的起始温度降至210.9 ℃，峰值温度降至247.2 ℃，起始时间也提前至2 908 s。LTO@4%MXene展现出优异的热稳定

性。在MXene适量(≤4%)时，MXene形成致密包覆层，主要发挥物理屏障和促进热扩散的积极作用。而MXene过量(≥5%)可能导致层间堆积，局部热传导不均，削弱整体热稳定性[24]。

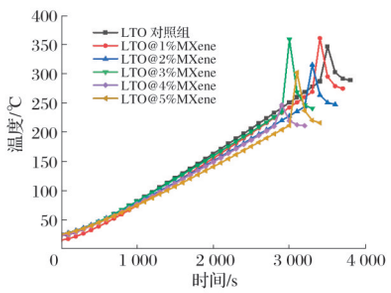


图7 LTO@*X*%MXene的TR曲线

Fig.7 TR curves of LTO@*X*%MXene

2.5 TG分析

图8为LTO@X%MXene的TG曲线。从图8可以看出，LTO对照组的初始分解温度(t_d)为317.2 ℃，最高分解温度(t_{max})为474.3 ℃，300 ℃质量保留率为94.12%，400 ℃质量保留率降至79.33%，600 ℃和800 ℃质量保留率分别为28.99%和26.52%。LTO@4%MXene的热稳定性显著增强，t_d提升至427.1 ℃，t_{max}达到497.2 ℃，300 ℃质量保留率高达99.18%，400 ℃质量保留率仍保持91.57%，600 ℃和800 ℃质量保留率分别为47.19%和47.12%，均明显优于对照组。4%的MXene有效抑制了LTO的热分解，MXene的高热导率与结构稳定性增强了材料的热阻抗和结构完整性。LTO@5%MXene的热稳定性略低于LTO@4%MXene，但仍显著优于对照组。原因是过量的MXene引起的层间堆积和界面结合不均，影响了热传导路径与结构协同效应，从而限制热稳定性的进一步提升。

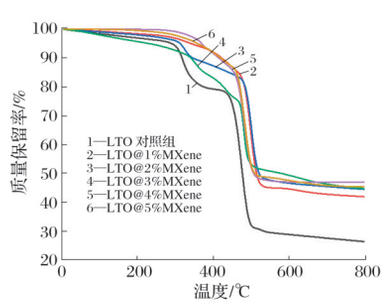


图8 LTO@X%MXene的TG曲线

Fig.8 TG curves of LTO@X%MXene

2.6 初始GCD分析

图9为LTO@*X*%MXene的初始GCD曲线。从图9可以看出，LTO对照组首次放电比容量为306 mAh/g，充电比容量为480 mAh/g，库仑效率(CE)为63.75%。其中，首次放电/充电比容量=(放电/充电测试时设定的恒定电流×恒流放电/充电所持续的时间)/极片中活性物质(LTO或LTO/MXene复合材料)的实际质量；而首次充放电库仑效率为首次放电比容量占首次充电比容量的百分比。随着MXene含量的增加，复合材料的首次比容量逐渐提高，电化学活性增强趋势明显。其中，LTO@4%MXene性能最优，放电比容量高达312 mAh/g，充电比容量高达488 mAh/g，CE提高至63.91%。这一提升可归因于适量的MXene在LTO颗粒表面形成均匀、致密的二维导电网络，有效增强电子传导路径，改善界面稳定性，促进电荷转移及Li^+的嵌入、脱嵌反应，从而提高储能反应的可逆性和电化学动力学[25]。然而，当MXene的质量分数增至5%时，LTO@5%MXene的放电和充电比容量仍继续上升至312 mAh/g和492 mAh/g，CE下降至63.63%。可能是过量MXene导致界面微结构紊乱和内部应力积累，干扰Li^+均匀扩散，增加电极的界面阻抗，降低电荷转移效率，最终影响电化学反应的整体效率[26]。

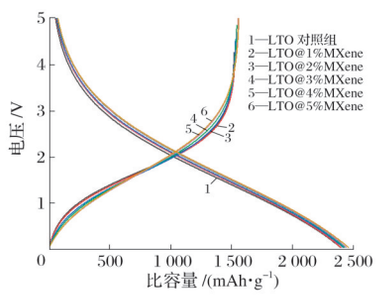


图9 LTO@*X*%MXene的初始GCD曲线

Fig.9 Initial GCD curves of LTO@*X*%MXene

2.7 CV分析

图10为LTO@*X*%MXene的CV曲线。从图10可以看出，LTO在脱锂过程中的氧化峰电压为1 676 mV，在嵌锂过程中的还原峰电压为1 466 mV。随着MXene含量的增加，电极表面出现新的弱峰，可能与APTES残留或Ti-Si界面反应相关[27]。LTO@4%MXene的氧化峰降至1 579 mV，还原峰升至1 537 mV，峰电流最大，电化学性能最优，表明电极可逆性与反应动力学得到显著改善，CE提高。这是因为MXene的二维导电结构能够促进电子传导和界面反应的活性，降低电荷转移阻抗。LTO@5%MXene表现出相似的峰位位移，其峰电流低于LTO@4%MXene，表明过量MXene可能导致界面结构拥堵，阻碍Li^+扩散，增加阻抗，不利于反应动力学和电极性能的进一步提升。

2.8 倍率性能与循环性能分析

图11为LTO@*X*%MXene的倍率性能。从图11可以看出，LTO对照组在0.1 C时的比容量为193 mAh/g，随着电流密度的增加，比容量明显下降，1.0 C时为135 mAh/g，5.0 C时为123 mAh/g，10.0 C时仅为36 mAh/g，倍率性能和容量保持能力劣化。LTO@4%MXene在0.1 C时比容量达到253 mAh/g，较对照组提升约31%，在高倍率下仍表现优异，1.0 C时比容量为244 mAh/g，5.0 C时为220 mAh/g，10.0 C时保持63 mAh/g，容量保持率分别达到94.07%(1.0 C)和83.79%(5.0 C)，显著优于对照组。LTO@5%MXene在低倍率(0.1 C，240 mAh/g)和中倍率(1.0 C，

225 mAh/g)下性能低于LTO@4%MXene,但在5.0 C和10.0 C下仍保持较高比容量(分别为193 mAh/g和56 mAh/g),容量保持率为77.92%(5.0 C)和89.17%(1.0 C),高倍率适应性相对较差。

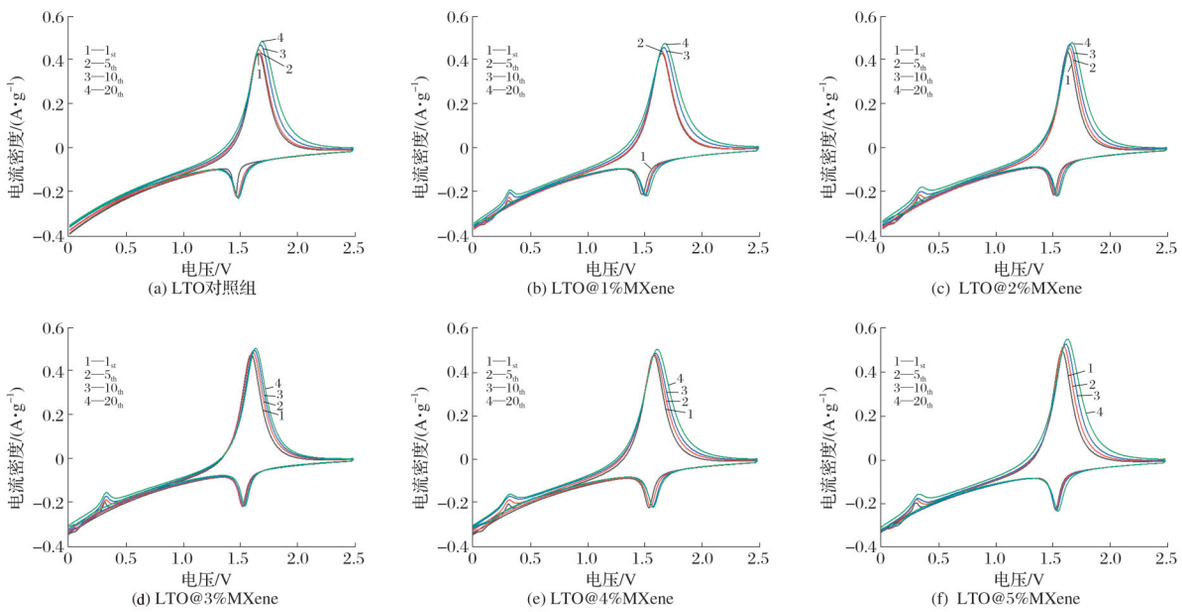


图10 LTO@*X*%MXene的CV曲线

Fig.10 CV curves of LTO@*X*%MXene

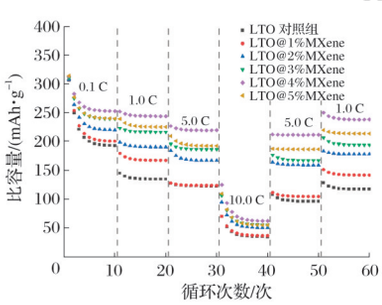


图11 LTO@*X*%MXene的倍率性能

Fig.11 Rate performance of LTO@*X*%MXene

图12为LTO@*X*%MXene的循环性能。从图12可以看出,LTO对照组在200次循环后比容量为125 mAh/g,表明纯LTO材料在长循环过程中存在明显的结构和界面劣化。引入不同含量的MXene,电极性能显著提升,LTO@1%MXene的比容量增至177 mAh/g,说明少量MXene包覆可以有效改善电子导电性。随着MXene质量分数增至2%、3%、4%,比容量分别达到199、208、241 mAh/g,LTO@5%MXene的比容量为228 mAh/g,较LTO@4%MXene有所下降,表明过量包覆反而抑制容量发挥。

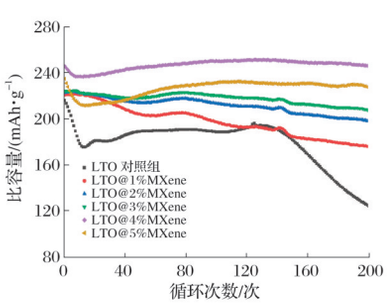


图12 LTO@*X*%MXene的循环性能

Fig.12 Cycling performance of LTO@*X*%MXene

3 结论

本文采用非原位复合策略制备MXene($Ti_3C_2T_x$)包覆的LTO复合电极。在不破坏尖晶石晶体结构的前提下,MXene构建了高效的电子、离子协同传输通道,增强界面稳定性,从而改善循环稳定性和倍率性能。实验表明,LTO@*X*%MXene质量分数为4%时效果最佳。LTO@4%MXene表现出最低的R_{ct}、最高的D_{Li^+}及较高的CE。在1.0 C下容量保持率高达94.07%,远超未包覆样品。热分析显示,MXene包覆对LTO的热稳定性具有双重效应。

适量包覆可凭借高导热性和致密结构延缓热分解,提高残留率,但过量包覆可能导致局部热传导不均,降低热安全性。MXene在颗粒表面形成均匀包覆层,缓解循环过程中颗粒开裂与结构退化,增强电极整体完整性。研究为高稳定性、高导电性的Li^+电池负极设计提供参考。

参考文献

[1] 马勇, 陈品德, 秦龙威, 等. 锂离子电池材料钛酸锂的研究进展[J]. 电源技术, 2024, 48(1): 26-31.

[2] 李云凤, 武传宝, 王允威, 等. 钛酸锂的碳包覆、紫外辐照改性及电化学性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(3): 71-78.

[3] 王佳佳, 喻兰兰, 胡霞, 等. 二维纳米材料MXenes及其复合物在电催化领域中的应用研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(1): 43-55.

[4] 牛丽丽, 王培, 张丽, 等. $Ti_3C_2T_x$ MXene制备及在超级电容器中的应用研究进展[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(11): 2183-2191.

[5] GUAN Q Y, YAN H J, CAI Y Q. Flatten the Li-ion activation in perfectly lattice-matched MXene and 1T-MoS_2 heterostructures via chemical functionalization[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(7): 2101838.

[6] KALSOOM U, KHAN S, KASHIF M, et al. MXene-based hybrid

composites for lithium-ion batteries: Advances in synthesis strategies and electrochemical performance[J]. Ionics, 2025, 31(10): 10053-10073.

[7] NUNNA G P, PITCHERI R, AL-ASBAHI BALI, et al. Ti_3C_2 MXene nanosheets/vanadium Nitride@Carbon composite electrodes for high-performance lithium-ion batteries[J]. International Journal of Energy Research, 2023, 2023(1): 8091900.

[8] BAO W Z, SHEN H, ZENG G Z, et al. Engineering the next generation of MXenes: Challenges and strategies for scalable production and enhanced performance[J]. Nanoscale, 2025, 17(11): 6204-6265.

[9] WANG J J, DONG S Y, LI H S, et al. Facile synthesis of layered $Li_4Ti_5O_{12}$-$Ti_3C_2T_x$ (MXene) composite for high-performance lithium ion battery[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2018, 810: 27-33.

[10] TIAN K D, HUI X B, WANG H Y, et al. *In situ* growth of $Li_4Ti_5O_{12}$ nanoparticles on $Ti_3C_2T_x$ MXene for efficient electron transfer as high-rate anode of Li ion battery[J]. Electrochimica Acta, 2022, 415: 140242.

[11] ZHANG C F, ZHAO W G, PARK S H, et al. Interconnected metallic membrane enabled by MXene inks toward high-rate anode and high-voltage cathode for Li-ion batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(14): 2213860.

[12] WANG D, ZHOU C K, FILATOV A S, et al. Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes[J]. Science, 2023, 379(6638): 1242-1247.

[13] YANG G J, PARK S J. The formation mechanism of $Li_4Ti_5O_{12}$-y solid solutions prepared by carbothermal reduction and the effect of Ti^{3+} on electrochemical performance[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 4774.

[14] 陈宏刚, 雷俊, 何巍, 等. $Ti_3C_2T_x$@CNTs/Ni 空心球复合材料的制备及其吸波性能研究[J]. 功能材料, 2025, 56(5): 5192-5198.

[15] LI Y B, SHAO H, LIN Z F, et al. A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte[J]. Nature Materials, 2020, 19(8): 894-899.

[16] 马晓燕, 陈安国. 活性炭掺杂对钛酸锂型锂离子电容器性能的影响[J]. 电源技术, 2021, 45(8): 1016-1017.

[17] LEE M, PARK J H, PARK D J, et al. A Ge/GeO_2/Titanate nanocomposite with high energy density and enhanced long-term stability for lithium-ion batteries[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2025, 346: 125256.

[18] RUFFO R, OSTROMAN I, VALLANA N, et al. (invited) MAX phase oxidation as a novel approach to highly reversible oxide nanocomposite electrodes for lithium-ion batteries[J]. ECS Meeting Abstracts, 2024, MA2024-01(2): 405.

[19] 钟晓晖, 李将渊, 陆玮, 等. 不同荷电区间钛酸锂电池循环容量衰减机制研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(8): 2960-2969.

[20] WANG Y S, LI Y Y, QIU Z P, et al. Fe_3O_4@Ti_3C_2MXene hybrids with ultrahigh volumetric capacity as an anode material for lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(24): 11189-11197.

[21] LI A D, WANG X T, CHEN J J, et al. Surface-termination groups' tuning to improve the lithium-ion-storage performance of $Ti_3C_2T_x$ MXene[J]. Coatings, 2022, 12(7): 1005.

[22] 邵晴, 王皓申, 罗凌虹, 等. 基于EIS和DRT的SOEC电解池阻抗贡献研究[J]. 陶瓷学报, 2025, 46(2): 376-386.

[23] LI Y, ZHANG W H, LAI C Y, et al. Ti_3C_2 MXene-derived $Li_4Ti_5O_{12}$ nanoplates with *in-situ* formed carbon quantum dots for metal-ion battery anodes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 629: 263-269.

[24] TENÓRIO E SILVA D C, SILVA M L MDA, DE FARIAS P H M, et al. Synthesis and characterization of polyaniline, sucrose octaacetate and chitosan blend for removal of remazol black by adsorption: Equilibrium, kinetics, and regeneration[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 289: 138863.

[25] 孔晶, 陈正件, 沈耿哲, 等. 钛酸锂电极材料制备工艺及其电化学性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(2): 11-14.

[26] 仇义, 吴启超. 长循环空腔三明治H-TiO_2/Fe_3O_4/C锂离子池负极材料[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(1): 161-168.

[27] ZHAO W L, LEI Y J, ZHU Y P, et al. Hierarchically structured $Ti_3C_2T_x$ MXene paper for Li-S batteries with high volumetric capacity[J]. Nano Energy, 2021, 86: 106120.