

Ce³⁺离子修饰Ti₃C₂T_x二维材料及其超级电容器性能研究

管 朕

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月17日

摘 要

二维Ti₃C₂T_x有着独特的二维结构、高导电性、亲水性、可调层间结构与丰富的活性位点, 能够实现高比电容, 有着优异的倍率性能与循环稳定性。然而, 二维纳米片层易发生堆叠, 限制电容性能的发挥, 在强酸性电解液中表面官能团易发生氧化, 结构易坍塌, 影响其化学性能。本文通过Ce³⁺离子嵌入对Ti₃C₂T_x表面进行界面工程调控, 提高其倍率性能。采用碱处理和离子交换实现Ce³⁺离子嵌入, 使得Ti₃C₂T_x电极在电流密度1 A·g⁻¹时显示出322 F·g⁻¹的高比电容, 在10 A·g⁻¹电流密度下经过30,000次恒流充放电循环后仍保持优异的电化学稳定性, 证明Ce³⁺修饰是提升Ti₃C₂T_x二维材料超级电容器负极性能的有效手段。

关键词

超级电容器, 倍率性能, 离子嵌入

Ce³⁺-Modified Ti₃C₂T_x 2D Material for Supercapacitors

Zhen Guan

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: February 10, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 17, 2026

Abstract

Two-dimensional Ti₃C₂T_x possesses a unique 2D structure, high electrical conductivity, good hydrophilicity, tunable interlayer structure, and abundant active sites, enabling high specific capacitance as well as excellent rate capability and cycling stability. However, the 2D nanosheets are prone to restacking, which limits the capacitive performance. Moreover, the surface functional groups are

easily oxidized and the structure tends to collapse in strongly acidic electrolytes, thus impairing its electrochemical properties. In this work, interface engineering of $Ti_3C_2T_x$ was carried out via Ce^{3+} ion intercalation to improve its rate capability. Alkali treatment and ion exchange were employed to achieve Ce^{3+} intercalation. The resulting $Ti_3C_2T_x$ electrode delivered a high specific capacitance of $322\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ and retained outstanding electrochemical stability after 30,000 galvanostatic charge-discharge cycles at $10\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$. These results demonstrate that Ce^{3+} modification is an effective strategy to enhance the performance of $Ti_3C_2T_x$ as an anode material for 2D material-based supercapacitors.

Keywords

Supercapacitors, Rate Capability, Ion Intercalation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球能源转型与可持续发展的迫切需求下，清洁能源替代与高效能源存储技术已成为破解能源危机与环境问题的核心抓手。随着新能源汽车、便携式电子设备及智能电网等领域的快速迭代[1]-[3]，对能源存储与转换系统的性能提出了更高要求——既需要二次电池的高能量密度[4] [5]，也追求超级电容器的高功率输出，同时还需兼顾长循环稳定性与环境兼容性[6]-[8]。然而，传统电极材料普遍面临瓶颈：电池类材料功率密度不足、超级电容器能量密度偏低，且电极结构易在反复充放电中失效，难以满足多场景的严苛需求[9]-[12]。

作为一类关键的能量存储器件，超级电容器凭借超快充放电速率、超长循环寿命及高安全性[13] [14]，在启停电源、应急储能等领域具有不可替代的作用，但低能量密度的短板严重限制了其应用边界[15]。这一核心痛点的根源在于电极材料的性能局限：传统碳基电极(如活性炭、石墨烯)主要依赖双电层电容存储电荷，容量提升空间有限[16]-[18]；而过渡金属氧化物、导电聚合物等赝电容材料虽能提供更高容量，却存在导电性差、循环稳定性不足等问题[19] [20]。因此，开发兼具高比表面积、优异导电性、丰富活性位点与结构稳定性的新型电极材料，成为突破超级电容器性能瓶颈、推动其与二次电池互补协同的关键。

二维(2D)材料凭借其独特的层状结构、高比表面积与优异的电子传输特性[21]，成为突破性能局限的关键方向。从石墨烯的兴起引发二维材料研究热潮，到过渡金属硫族化合物、层状氢氧化物等的深入探索，科研界持续致力于发掘兼具高导电性、丰富活性位点与结构稳定性的新型电极材料[22]。2011年MXene(无机金属碳化物、氮化物及碳氮化物)的发现，为能源材料领域带来了革命性突破[26]。作为二维材料家族的“后起之秀”，MXene通过MAX相前驱体的选择性刻蚀制备而成，兼具金属级导电性、可调谐的层间间距与丰富的表面官能团(-F、-OH、-O等)，其独特的结构使其在电荷存储、离子传输与界面反应中展现出不可替代的优势[26]。尤为重要的是，MXene可通过掺杂(如N、S、P等)进一步优化电子结构、扩大层间间距并增加活性位点，显著提升其在二次电池、超级电容器及电催化等能源领域的应用潜力，成为连接高效能源存储与转换技术的核心材料之一[27]。

本文对超级电容器负极材料 $Ti_3C_2T_x$ 进行优化，通过 LiF/HCl 混合溶液刻蚀 Ti_3AlC_2 制备 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜，并经 KOH 预处理后引入 Ce^{3+} ，在 40°C 下反应制备 $Ti_3C_2T_x-Ce$ 复合薄膜。 Ce^{3+} 成功嵌入 $Ti_3C_2T_x$ 层间且元素分布均匀，复合薄膜保持规整层状结构且致密度提升，使得 $Ti_3C_2T_x-Ce$ 在 $3\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 电解

液中表现出更优异的比电容与倍率性能,其电荷转移电阻更低,该复合薄膜在电流密度为 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时显示出 $322 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高比电容,在 $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下经 30,000 次循环仍保持稳定性能,为 MXene 基超级电容器电极材料的性能提升提供了新思路。

2. 实验部分

2.1. 试剂

实验使用主要化学试剂: 碳铝钛(Ti_3AlC_2)、氟化锂(LiF)、氯化锂(LiCl)、盐酸(HCl)、氢氧化钾(KOH)、水和氯化铯($\text{CeCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)、去离子(DI)水。

2.2. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的制备

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜可通过氯化锂与氟化锂混合溶液对碳铝钛进行刻蚀制得。将 1.56 g LiF 粉末溶于 20 mL HCl 溶液中,磁力搅拌至均一透明溶液,向均匀溶液中加入 1 g Ti_3AlC_2 粉末, 40°C 恒温条件下搅拌 48 h,反应结束后,依次用 HCl、LiCl 溶液和去离子水对产物进行多次离心洗涤后,离心反复收集上清液。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 分散液通过真空抽滤法在滤膜上组装成柔性 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜。

2.3. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的制备

配置 8 M KOH 溶液,取 5 mL 溶液与 75 mg $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 相混合,缓慢搅拌 3 h,去离子水洗涤多次后,加入 25 mg $\text{CeCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, 40°C 恒温条件下均匀搅拌 48 h,将所得样品经真空抽滤处理,得到柔性 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜。

2.4. 材料的表征和电化学测试

为分析 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的微观形貌、化学组成以及其超级电容器性能,对其进行测试评估。

采用扫描电子显微镜(SEM, SU70, 日立, 日本),观察样品形貌以及片层结构;为对样品组分及晶面特征进行分析了解,采用 X 射线衍射仪器(XRD; D/max2600, 日本)进行测试,同时,采用 X 射线光电子能谱(XPS)对材料表面组成、化学价态及官能团种类进行精准表征,揭示材料表面化学特性。

为评估样品电化学行为,电化学性能测试均在 VMP3 型电化学工作站完成。采用三电极测试体系进行测试,以 Ag/AgCl 作为参比电极,碳棒作为对电极, $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 作为电解液。实验所用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜均裁成 $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ 的电极片,作为超级电容器工作电极。在 $-0.2 \text{ V} \sim 0.8 \text{ V}$ 电压窗口内设置不同扫描速率进行循环伏安测试(CV),探究电极的氧化还原特性、电容特性及倍率性能;通过恒流充放电测试(GCD)分析不同电流密度下电极的充放电时间、比电容及循环稳定性,直观评价电极的实际放电能力与储能性能;同时,为分析材料的电化学特性和电化学阻抗(EIS),在频率范围内 $0.01 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$, 10 mV 的交流电压下进行阻抗测试。

3. 结果与讨论

图 1 为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的平面及截面扫描电镜 SEM 图像。“图 1(a)”为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的平面图像,表现出典型的少层 MXene 二维层状结构,片层边缘薄而平整,表明真空抽滤过程未对少层结构造成明显破坏;“图 1(b)”可以观察到,片层连续堆叠,褶皱明显,表面相对平整,未观察到明显颗粒团聚,对其截面进行观察如“图 1(c)”片层紧密排列,层间距均一,整体结构规整。如“图 1(d)”所示, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜表面出现少量不规则颗粒,这可能由于氢氧化钾的处理所引起的,如“图 1(e)”所示,薄膜片层褶皱程度明显,表面较之略微粗糙,这可能是 Ce 颗粒附着导致。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜截面如“图 1(f)”

所示,层状堆叠结构清晰可见,更加致密,层间距略有减小。为进一步分析 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的组成分布,对样品进行 EDS 表征,如“图 2”所示,其中可以清楚地观察到 Ti、C、O 和 Ce 四种元素均匀分布,Ce 元素与在片层中均匀分布,且未破坏 MXene 的二维层状结构,为材料电化学性能的提升提供了可靠的结构和成分基础。

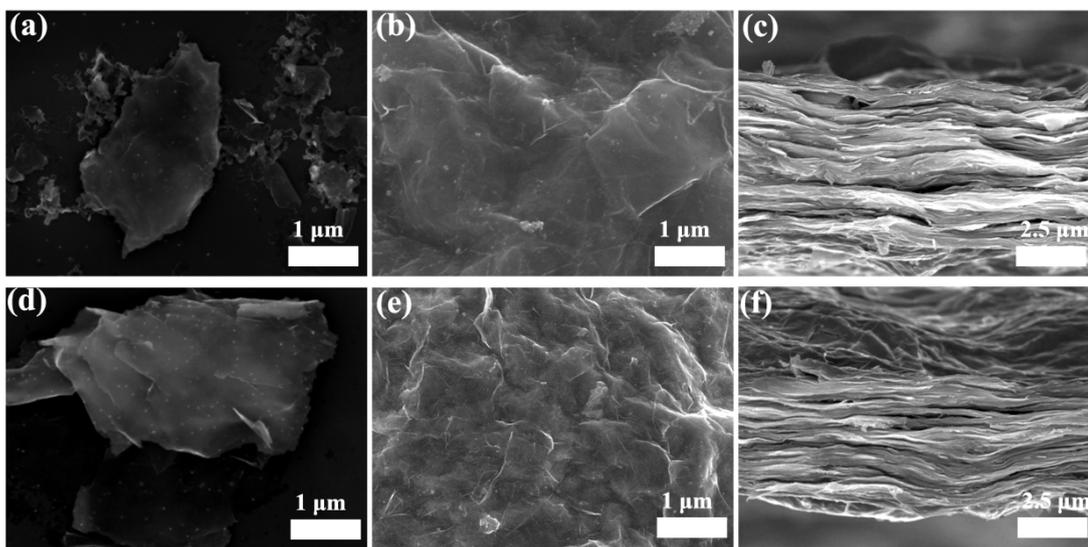


Figure 1. (a) (b) (c) cross-sectional and Top view of SEM image of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ film; (d) (e) (f) cross-sectional and Top view of SEM image of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ film

图 1. (a) (b) (c) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 平面和截面的 SEM 图像 (d) (e) (f) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 平面和截面的 SEM 图像

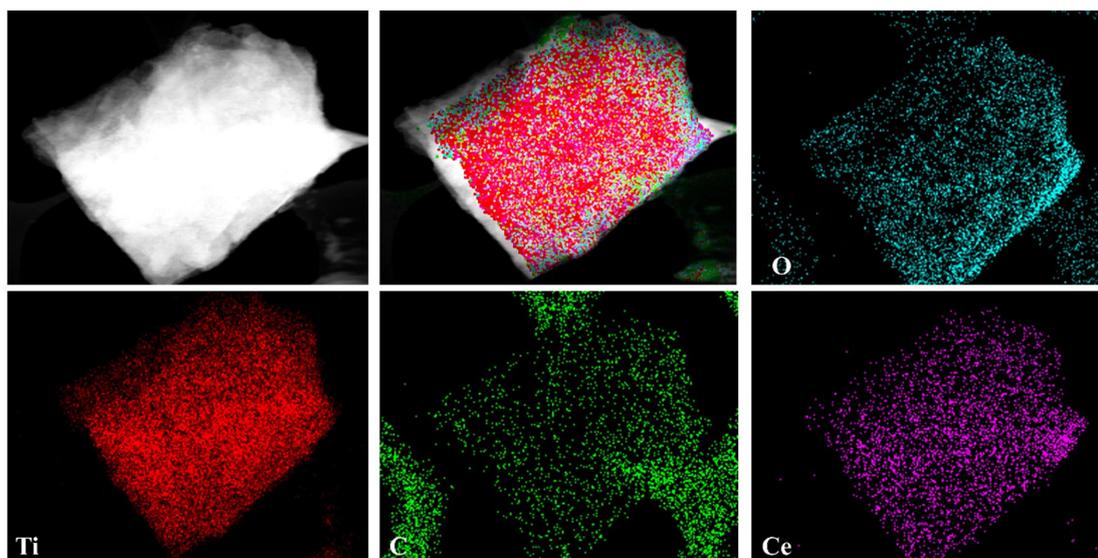


Figure 2. EDS image of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ film

图 2. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 的 EDS 图像

“图 3(a)”为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的 X 射线衍射谱图样,图中可以看到 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的 XRD 图像出现这高度有序的特征峰,在 6.2° 出现典型的(002)峰,经过碱处理和离子嵌入后, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的(002)峰向高角度偏移,根据布拉格公式 $2d\sin\theta = n\lambda$,层间距减小,由于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 经 KOH 处理后,

K 离子与其表面负电官能团之间存在静电吸引力，同时镧系金属离子独特的配位作用对层间结构进行了调整，所以层间距发生减小，片层之间的电子耦合增强，电导率提高。同时也表明 Ce^{3+} 离子的成功嵌入，在静电力的作用下，层间距发生变化。“图 3(b)”为 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜和 $Ti_3C_2T_x-Ce$ 薄膜的高分辨 X 射线光电谱(XPS)。 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜检测到了 Ti、C、O、F、Cl 元素，其中 F 元素和 Cl 元素来自刻蚀过程中残留的端基，O 1s 来自羟基或表面氧化， $Ti_3C_2T_x-Ce$ 薄膜出现明显的 Ce 3d 特征峰，证明 Ce 元素已经成功引入到 $Ti_3C_2T_x$ 中。

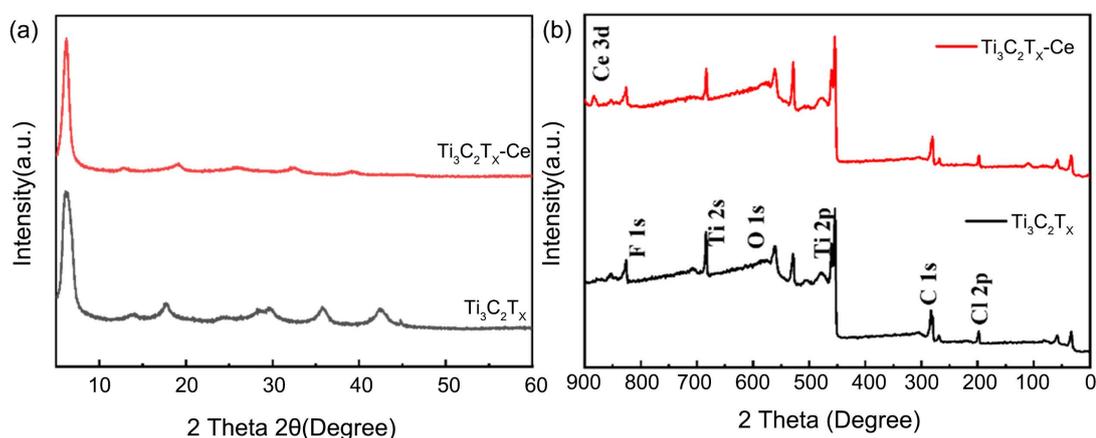


Figure 3. (a) XRD pattern and (b) High resolution spectrum of $Ti_3C_2T_x-Ce$
图 3. $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x-Ce$ 的 (a) XRD 图谱和 (b) 高分辨率 XPS 图谱

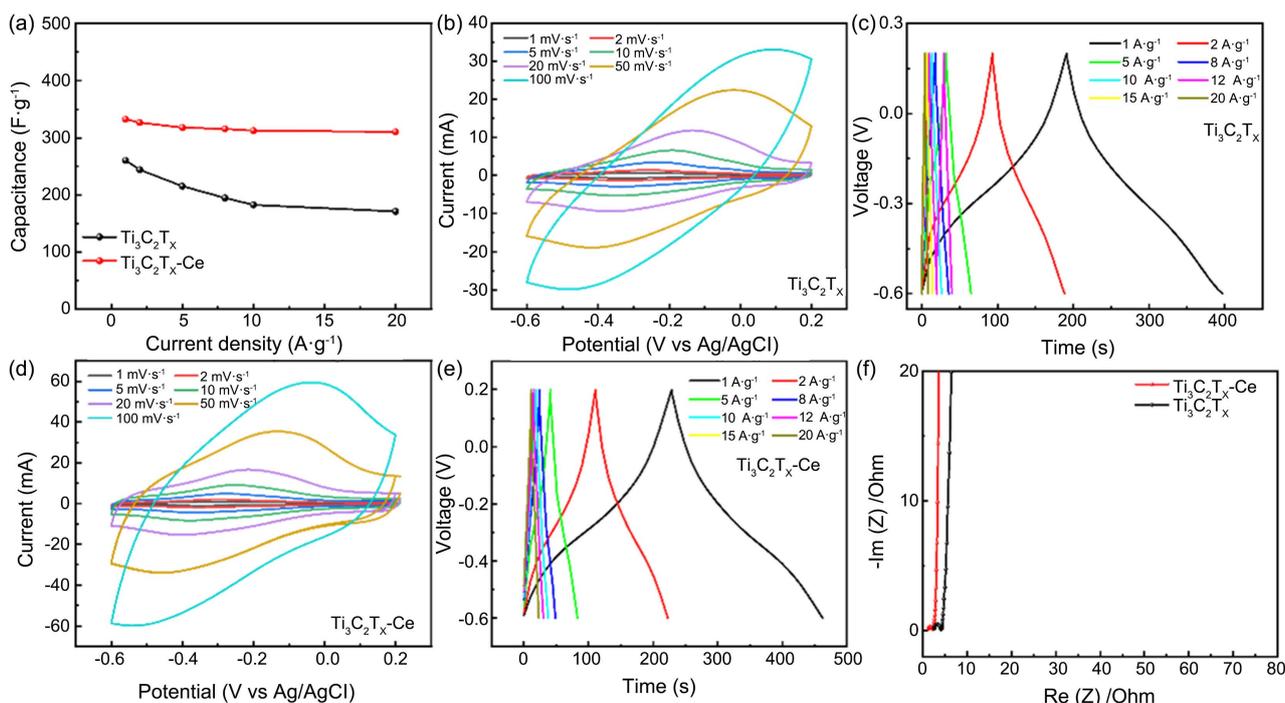


Figure 4. (a) Specific capacitance versus at different current densities of $Ti_3C_2T_x$ - and $Ti_3C_2T_x-Ce$ samples prepared in different proportions (b) (c) CV curves and GCD curves of $Ti_3C_2T_x$ (d) (e) CV curves and GCD curves of $Ti_3C_2T_x-Ce$ (f) EIS spectrums and (g) cycling performance of $Ti_3C_2T_x-Ce$ electrodes at a current density of $10 A \cdot g^{-1}$

图 4. (a) $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x-Ce$ 不同电流密度下的比电容对比关系 (b) (c) $Ti_3C_2T_x$ 电极的 CV 曲线和 GCD 曲线 (d) (e) $Ti_3C_2T_x-Ce$ 电极的 CV 曲线和 GCD 曲线 $Ti_3C_2T_x-Ce$ (f) EIS 谱

在 $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 电解液中对样品 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜电化学性能进行评估。“图 4(a)”为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜在不同电流密度下的比电容曲线，在不同电流密度下 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 比电容明显高于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ，随着电流密度的增大， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 比电容衰减更加平缓，表现出优异的倍率性能。证明 Ce^{3+} 离子的嵌入使材料的电容性能得到显著提升。“图 4(b)”为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 在不同扫速下的循环伏安特性曲线，在 $-0.2 \text{ V}\sim 0.6 \text{ V}$ 的电位范围内， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜在 -0.4 V 和 0 V 出有一对氧化还原峰，证明其为赝电容电荷存储机制。“图 4(d)”为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜在不同扫速下的伏安特性曲线，其 CV 面积明显大于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜，并表现出明显的氧化还原峰，表明 Ce 的嵌入使材料性能更加优异。“图 4(c)” $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的 GCD 曲线，呈现近似对称的三角形， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的充放电曲线对称性以及放电时间如“图 4(e)”明显优于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜，有着更高的比电容，并且在大电流密度下仍能保持良好的对称性，进一步证明了优异的倍率性能。

在 $0.01 \text{ Hz}\sim 100 \text{ kHz}$ 的频率范围内进行 EIS 测试和分析，“如图 4(f)”，可以观察到 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜的半圆直径明显小于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜，说明其电荷转移电阻更低，电荷转移动力学更优。对 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜进行 30,000 次循环的 GCD 测试，如图 5 所示，循环多次后， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 薄膜仍保持着稳定的倍率性能，证明 Ce 的引入大大提高了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的倍率性能。

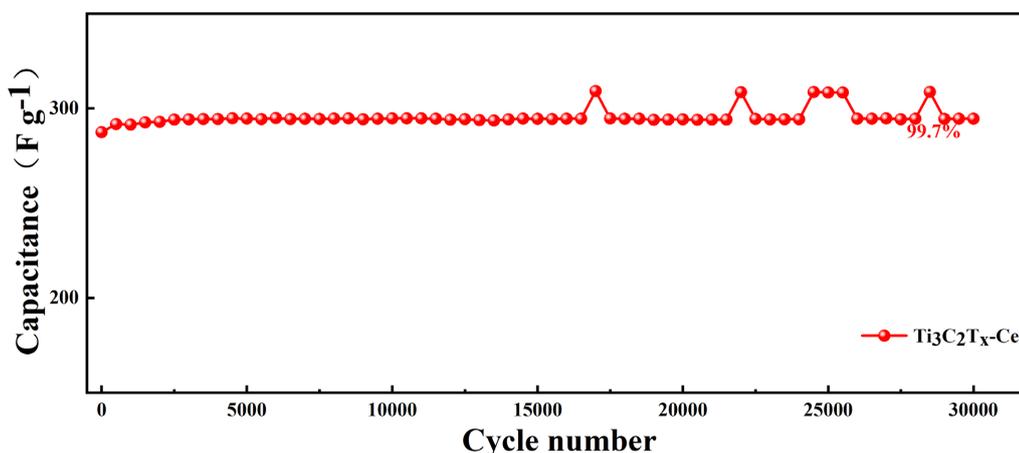


Figure 5. (g) Cycling performance of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ electrodes at a current density of $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$
图 5. (g) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 电极在 $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下的循环性能

4. 结论

综上所述，通过离子交换，实现了金属离子 Ce^{3+} 对 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜的修饰，使得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-Ce}$ 电极材料在强酸条件下，电流密度 $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 时显示出 $322 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高比电容，高电流密度下仍然保持稳定的比容量，经多次循环后，仍然保持着优异的倍率性能，证明通过离子调控，能够使材料倍率性能获得提升，为 MXene 基超级电容器电极材料的性能提升提供了新思路。

参考文献

- [1] Mathew, S. and Devi, K.R.S. (2024) Rationally Designed CeO_2 Decorated Ti_3C_2 MXenes Interface for Efficient Water Splitting and Enhanced Supercapacitor Performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **684**, Article ID: 133170. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133170>
- [2] Luo, W., Wei, Y., Zhuang, Z., Lin, Z., Li, X., Hou, C., et al. (2022) Fabrication of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes/Polyaniline Composite Films with Adjustable Thickness for High-Performance Flexible All-Solid-State Symmetric Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **406**, Article ID: 139871. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.139871>

- [3] Öztürk, O. and Gür, E. (2024) Layered Transition Metal Sulfides for Supercapacitor Applications. *ChemElectroChem*, **11**, e202300575. <https://doi.org/10.1002/celec.202300575>
- [4] Zhao, C., Tong, X., Yang, Y., Guo, H., Gao, W., Li, M., *et al.* (2024) Loofah Sponge-Derived 3D Flexible Porous Carbon Electrode for High Performance Supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, **78**, Article ID: 110295. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110295>
- [5] Zhang, C., Anasori, B., Seral-Ascaso, A., Park, S., McEvoy, N., Shmeliov, A., *et al.* (2017) Transparent, Flexible, and Conductive 2D Titanium Carbide (MXene) Films with High Volumetric Capacitance. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1702678. <https://doi.org/10.1002/adma.201702678>
- [6] Thirumal, V., Rajkumar, P., Babu, B., Kim, J. and Yoo, K. (2024) Performance of Asymmetric Hybrid Supercapacitor Device Based on Antimony-Titanium Carbide MXenes Composite. *Journal of Alloys and Compounds*, **982**, Article ID: 173598. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173598>
- [7] Navarro-Suárez, A.M., Van Aken, K.L., Mathis, T., Makaryan, T., Yan, J., Carretero-González, J., *et al.* (2018) Development of Asymmetric Supercapacitors with Titanium Carbide-Reduced Graphene Oxide Couples as Electrodes. *Electrochimica Acta*, **259**, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.125>
- [8] Guo, X., Xie, X., Choi, S., Zhao, Y., Liu, H., Wang, C., *et al.* (2017) Sb₂O₃/MXene (Ti₃C₂T_x) Hybrid Anode Materials with Enhanced Performance for Sodium-Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 12445-12452. <https://doi.org/10.1039/c7ta02689g>
- [9] Chen, H., Lyu, Y., Fang, A., Lee, G., Karuppasamy, L., Wu, J.J., *et al.* (2020) The Design of ZnO Nanorod Arrays Coated with MnO_x for High Electrochemical Stability of a Pseudocapacitor Electrode. *Nanomaterials*, **10**, Article No. 475. <https://doi.org/10.3390/nano10030475>
- [10] Boota, M., Anasori, B., Voigt, C., Zhao, M., Barsoum, M.W. and Gogotsi, Y. (2015) Pseudocapacitive Electrodes Produced by Oxidant-free Polymerization of Pyrrole between the Layers of 2D Titanium Carbide (MXene). *Advanced Materials*, **28**, 1517-1522. <https://doi.org/10.1002/adma.201504705>
- [11] Wei, J., Hu, F., Pan, Y., Lv, C., Bian, L. and Ouyang, Q. (2024) Design Strategy for Metal-Organic Framework Assembled on Modifications of MXenes Layers for Advanced Supercapacitor Electrodes. *Chemical Engineering Journal*, **481**, Article ID: 148793. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148793>
- [12] Shariq, M., Alshehri, K., Mohammed Bouzgarrou, S., Kashif Ali, S., Alqurashi, Y., Hassan, K.F., *et al.* (2024) Progress in Development of MXenes-Based Nanocomposites for Supercapacitor Application—A Review. *FlatChem*, **44**, Article ID: 100609. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100609>
- [13] Acerce, M., Voiry, D. and Chhowalla, M. (2015) Metallic 1T Phase MoS₂ Nanosheets as Supercapacitor Electrode Materials. *Nature Nanotechnology*, **10**, 313-318. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.40>
- [14] Yu, Y., Zhang, H., Xie, Y., Jiang, F., Gao, X., Bai, H., *et al.* (2024) Vertically Aligned Graphene-MXenes Nanosheets Based Electrodes for High Electrochemical Performance Asymmetric Supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*, **482**, Article ID: 149063. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149063>
- [15] Huang, Y. and Bian, S. (2021) Vacuum-filtration Assisted Layer-by-Layer Strategy to Design MXene/Carbon Nanotube@MnO₂ All-in-One Supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 21347-21356. <https://doi.org/10.1039/d1ta06089a>
- [16] Kadam, S.A., Jose, L.M., George, N.S., Sreehari, S., Nayana, D.A., Van Pham, D., *et al.* (2024) Recent Progress in Transition Metal Nitride Electrodes for Supercapacitor, Water Splitting, and Battery Applications. *Journal of Alloys and Compounds*, **976**, Article ID: 173083. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173083>
- [17] Li, K., Zhang, P., Soomro, R.A. and Xu, B. (2022) Alkali-Induced Porous MXene/Carbon Nanotube-Based Film Electrodes for Supercapacitors. *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 4180-4186. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00109>
- [18] Prabhakar Vattikuti, S.V., Shim, J., Rosaiah, P., Mauger, A. and Julien, C.M. (2023) Recent Advances and Strategies in MXene-Based Electrodes for Supercapacitors: Applications, Challenges and Future Prospects. *Nanomaterials*, **14**, Article No. 62. <https://doi.org/10.3390/nano14010062>
- [19] Ren, F., Lu, Z., Liu, X., Wang, T., Huang, X., Dou, J., *et al.* (2024) Lewis Acid-Etched MXene Self-Assembled with Reduced Graphene Oxide for Symmetrical Supercapacitors with Liquid/Solid Electrolytes. *Journal of Alloys and Compounds*, **978**, Article ID: 173480. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173480>
- [20] Shuck, C.E., Sarycheva, A., Anayee, M., Levitt, A., Zhu, Y., Uzun, S., *et al.* (2020) Scalable Synthesis of Ti₃C₂T_x MXene. *Advanced Engineering Materials*, **22**, Article ID: 1901241. <https://doi.org/10.1002/adem.201901241>
- [21] Liu, X., Liu, L., Wu, Y., Wang, Y., Yang, J. and Wang, Z. (2019) Rosette-Like MoS₂ Nanoflowers as Highly Active and Stable Electrodes for Hydrogen Evolution Reactions and Supercapacitors. *RSC Advances*, **9**, 13820-13828. <https://doi.org/10.1039/c9ra01111k>
- [22] Zhan, C., Naguib, M., Lukatskaya, M., Kent, P.R.C., Gogotsi, Y. and Jiang, D. (2018) Understanding the MXene Pseudocapacitance. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **9**, 1223-1228. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.8b00200>

-
- [23] Alhabeab, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., *et al.* (2017) Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene). *Chemistry of Materials*, **29**, 7633-7644. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>
- [24] Mustafa, M.N., Mohd Abdah, M.A.A., Mohamad Saidi, N., Wong, W.P., Tan, Y.S., Numan, A., *et al.* (2024) High-Performance Electrochromic Supercapacitor with Bimetallic Phosphate and Vanadium Carbide MXene. *Journal of Power Sources*, **595**, Article ID: 234079. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234079>
- [25] Xue, C., Wu, T., Zhao, W., Wei, Y., Lv, K., Li, X., *et al.* (2024) High-Rate Electrochimical Supercapacitor with Attractive Energy Density Assembling from Infused-Undaria-Pinnatifida-Based Activated Carbon. *Journal of Energy Storage*, **80**, Article ID: 110362. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110362>
- [26] Wang, Y., Chen, N., Liu, Y., Zhou, X., Pu, B., Qing, Y., *et al.* (2022) MXene/Graphdiyne Nanotube Composite Films for Free-Standing and Flexible Solid-State Supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*, **450**, Article ID: 138398. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138398>
- [27] Sankar, B.D., Sekar, S., Sathish, S., Dhanasekaran, S., Nirmala, R., Kim, D.Y., *et al.* (2024) Recent Advancements in MXene with Two-Dimensional Transition Metal Chalcogenides/Oxides Nanocomposites for Supercapacitor Application—A Topical Review. *Journal of Alloys and Compounds*, **978**, Article ID: 173481. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173481>