

# MXene 基复合薄膜的制备及应用综述

杨 熾<sup>1</sup>, 陈 科<sup>2,\*</sup>

(1.华北电力大学环境科学与工程学院, 北京市, 100000; 2.北京航空航天大学化学学院, 北京市, 100000;

\* 通讯作者, chenke0119@buaa.edu.cn)

**摘 要:** MXene ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ) 因其卓越的导电性 ( $20\,000\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )、抗拉强度 (570 MPa) 以及可调控的表面化学特性, 在储能、电磁干扰 (EMI) 屏蔽、透明导电电极及水净化等领域展现出广阔的应用前景。本文系统综述了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  基薄膜的制备方法, 包括真空辅助过滤 (VAF)、喷涂、电沉积等, 并详细对比了各方法在薄膜质量、厚度均匀性及可扩展性方面的优劣。此外, 文章探讨了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜的关键性能及其优化策略, 如提高电化学稳定性、减少层间堆叠、引入间隔物、表面修饰及构建三维多孔结构, 以增强其在能量存储和屏蔽应用中的性能表现。尽管  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜在多个领域展现出巨大潜力, 但其在大规模制备、氧化稳定性、结构膨胀及环境耐久性等方面仍面临挑战。因此, 未来研究应聚焦于优化合成工艺、提升长期稳定性, 并探索新型应用领域, 以推动  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜在高性能器件中的实际应用, 并加速其商业化进程。

**关键词:** MXene ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ); 高导电性; 表面化学可调控; 储能; 电磁干扰 (EMI) 屏蔽; 水净化; 薄膜制备方法

## 引言

过去几十年来, 纳米材料领域取得了惊人的进步, 其中一类新兴的二维层状材料过渡金属碳化物和/或氮化物 (MXenes), 自 2011 年德雷塞尔大学的研究人员首次报道以来, 便吸引了全球科学家的广泛关注[1]。它们不仅继承了传统二维材料的优良特性, 更凭借独特的结构和表面化学, 在多个领域展现出令人瞩目的应用潜力。

MXenes 的合成是通过选择性蚀刻 A 族元素 (通常是 13-14 族元素, 如 Al), 从其三维前驱体 MAX 相精准剥离出超薄的二维层 (图 1a)。它们的基本化学通式可表示为  $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$  ( $n=1-5$ ), 其中 M 是早期过渡金属 (如 Ti、Zr、V、Nb、Ta 或 Mo), X 代表碳和/或氮, 而  $\text{T}_x$  则指代蚀刻过程中产生的表面官能团, 如 -OH、=O、-F 和 -Cl。这使得 MXenes 拥有高度可调控的化学性质。例如, 广受研究的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ , 其独特的结构赋予了它诸多优异性能 (图 1b)。

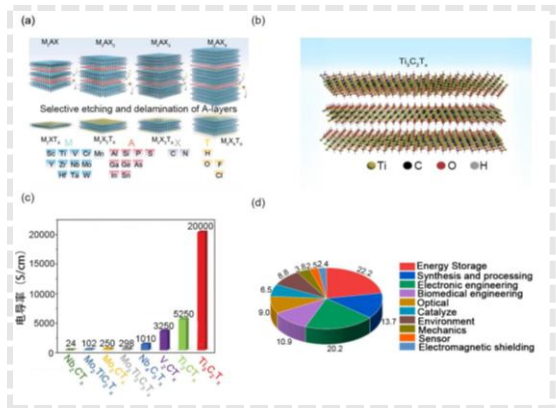


图 1 (a) MAX 相剥离刻蚀为 MXene 示意图[1]； (b) 单层  $Ti_3C_2T_x$  分子结构模型； (c) 各种不同的 MXene 电导率汇总[2]； (d) MXene 在不同领域的应用汇总[3]

作为后起之秀, MXenes 迅速在二维材料的世界里占据了一席之地。与石墨烯等经典二维材料相比, MXenes 具备更优越的金属导电性[4]( $20,000 S \cdot cm^{-1}$ )、(如图 1c)良好的热导性[5]以及极高的机械柔韧性[6](570 MPa)。这些特性使其在电容器技术[2]、电磁屏蔽[7]、储能[8, 9]、航空航天[10]、信息、交通等各个领域大放异彩。无论是高性能电池的突破, 还是智能传感器的创新, MXenes 都展现出令人兴奋的应用前景。迄今, 研究者们已通过实验合成了 70 多种不同的 MXenes, 包括  $Ti_3C_2T_x$ [11],  $Mo_2CT_x$ [12],  $Ti_2CT_x$  等。其中  $Ti_3C_2T_x$  具有其较高的电导率 ( $20,000 S \cdot cm^{-1}$ ) [13]低离子扩散势场、溶液中的负表面电荷 (水中为 -40 mV)、[14]低工作电压、[15]机械灵活性、[16]和环境友好性, 是被探索最多的。[17, 18]这也表明了  $Ti_3C_2T_x$  在许多领域的应用潜力。尽管关于  $Ti_3C_2T_x$  基薄膜的研究不断带来重大的技术进步, 但在材料的应用过程中仍然存在一些挑战需要克服。在本综述中我们首先概述  $Ti_3C_2T_x$  制备方法[19], 其次我们阐明了薄膜的竞争优势, 并介绍其关键性能指标及工程优化策略。最后我们特别关注  $Ti_3C_2T_x$  薄膜的主要应用, 包括电磁屏蔽、储能、水净化等。(图 1d)

# 1 $Ti_3C_2T_x$ MXene 薄膜材料的制备

## 1.1 $Ti_3C_2T_x$ MXene 原料的制备

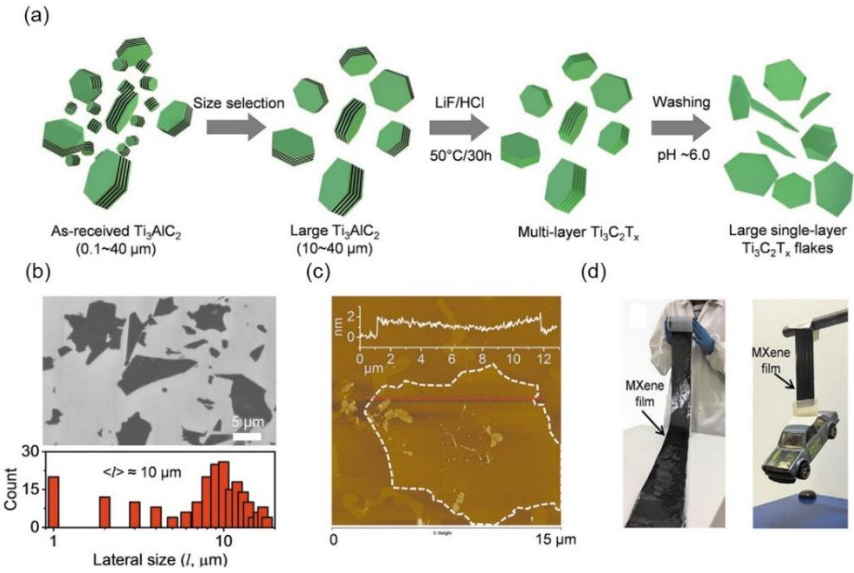


图 2 (a) MXene 制备流程示意[16]； (b) 单层  $Ti_3C_2T_x$  分子结构模型； (c) 各种不同的 MXene 电导率汇总[2]； (d) MXene 在不同领域的应用汇总[3]

MXene 材料的合成路线主要分为两大类[20]: “自上而下”的元素置换反应法和“自下而上”的一步合成法, 即基于大晶体直接剥离的自上而下方法, 以及基于分子或原子合成的自下而上方法。

自上而下方法主要依赖于 MAX 相前驱体的刻蚀工艺[21], 目前是 MXene 材料的主流制备路线。根据刻蚀过程中是否涉及氟元素, 该方法可进一步分为含氟刻蚀法和无氟刻蚀法。其中, 含氟刻蚀法因其卓越的刻蚀效果和广泛的应用前景而备受关注, 常见技术包括 HF 刻蚀法、原位生成 HF 刻蚀法以及含氟熔融盐刻蚀法等。自下而上方法<sup>[21]</sup>则通过分子或原子级别的合成策略构建 MXene 材料, 而无氟刻蚀法也可归类于此, 包括电化学刻蚀法、碱刻蚀法和路易斯熔融盐刻蚀法等。

迪肯大学 zhang[19]等制备了优异的 MXene 薄片。如图 (2b) 研究表明,  $Ti_3C_2T_x$  的电导率受其形态和结构特征的显著影响。[22]一般来说, 低缺陷和大片层会得到更高的电导率[19], 这意味着较温和的蚀刻剂 (与 HF 相比) 和最小强度的层脱层 (MILD) 可能是  $Ti_3C_2T_x$  的最佳合成方法, 能获得更高的电导率。[19, 22]采用改进方法制备的  $Ti_3C_2T_x$  薄片尺寸较大 (可达  $15\mu m$  见图 (2b)), 视觉上无孔, 边缘清晰清晰。结果表明, 改进方法制备的  $Ti_3C_2T_x$  薄片的电导率为  $4600 \pm 1100 S \cdot cm^{-1}$ , 而原直接使用 HF 法制备的  $Ti_3C_2T_x$  薄片的电导率约为  $1500 S \cdot cm^{-1}$ 。当用 MILD 方法制备的  $Ti_3C_2T_x$  薄片经过过滤形成 MXene 薄膜时, 通过精确控制粉末粒度和表面形态, 有效过滤掉了较小的 MAX 粉末, 确保了更大尺寸 MXene 的获得通过这种方式合成的 MXene 具有更大的均匀性和附加的结构稳定性, 这使得它们在实际应用中表现出更好的性能。与传统的超声波剥离方法相比, 这些更大尺寸的薄片约  $15\mu m$  可以提供更良好的导电通路, 从而增强了 MXene 薄膜的导电性和机械强度。特别是在电子器件、传感器和储能设备等领域, 更大尺寸的 MXene 能够显著提升器件的性能和持续性。此外, 该方法还具有更高的可控性和可重复性, 能够为 MXene 材料的工业化生产提供新的思路和方法。

## 1.2 真空辅助过滤法制备 MXene 薄膜

均匀且受控的 MXene 薄膜在能源存储、转换和光电应用等领域具有重要用途。实现均匀 MXene 薄膜的最简单方法是真空辅助过滤 (VAF)。该方法首先制备稳定的 MXene 分散液, 并利用抽吸过滤装置进行过滤。过滤后, MXene 会粘附在多孔膜的表面, 形成厚层。薄膜的厚度取决于 MXene 的浓度, 而由于过滤是自限性现象, 因此薄膜在滤膜上的均匀性自我调节的[23]。此外, 范德华力也有助于 MXene 在滤膜表面聚集。随后, 需要将形成的厚 MXene 层从滤膜上剥离, 以用于不同应用。影响薄膜形成的因素包括滤膜类型、抽吸速度、溶剂以及 MXene 浓度。尽管 VAF 方法易于操作, 但制备薄膜耗时且能耗较高。为加快这一过程, 研究人员在  $Ti_3C_2$  MXene 过滤前加入少量碱性物质, 使过滤时间缩短至几十秒, [24]较厚的 MXene 层更容易从滤膜上剥离, 并且可以通过激光切割进行图案化, 以拓展其在可穿戴传感器和电磁干扰屏蔽等领域的应用[25]。

## 1.3 电力雾化与电泳沉积制备 MXene 薄膜

电流体动力雾化技术 (EHAT) 已被用于形成不同材料的薄膜。EHAT 可通过两种方式进行: 静电喷雾 (electrospraying) 和静电纺丝 (electrospinning) [26]。在典型的 EHAT 过程中, 当将分散良好的液体倒入喷嘴时, 会形成液滴。在施加强电场的情况下, 这些液滴带电, 并且喷嘴末端的液滴会形成锥形喷雾模式。带电的液体射流落在收集器上, 该收集器要么带有与液滴相反的电荷, 要么接地。通过调整电压以及收集器与液滴喷雾之间的距离, 该技术可用于形成纳米颗粒或纤维[27]。

## 1.4 旋涂法 (SCM)

旋涂 (Spin Coating) 是一种标准的薄膜制备技术, 适用于多种材料[28]。在该技术中, 将液体溶液滴加到基底表面, 随后基底以高速旋转, 在离心力和液体表面张力的作用下, 溶液均匀分布在基底表面。溶剂蒸发后, 可以形成厚度从纳米级到微米级的薄膜。MXene 薄膜也可采用旋涂法 (SCM, Spin Coating Method) 制备, 基底的类型取决于 MXene 料的具体应用。例如, 在太阳能电池的制备中, 通常使用 ITO (铟锡氧化物)、FTO (氟掺杂氧化锡) 及其他柔性基底进行 MXene 的旋涂工艺。

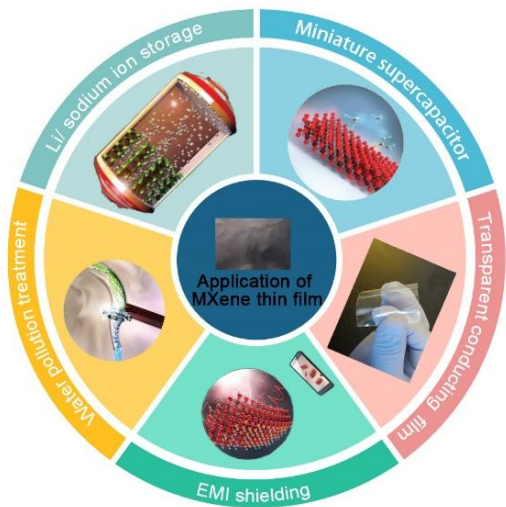


图 3 MXene 薄膜的应用场景

旋涂过程可以采用两种方式：直接将 MXene 溶液浇注到旋转基底上；先在静止基底上滴加溶液，再进行旋转。影响 MXene 薄膜旋涂工艺的关键因素主要包括：旋转速度和 MXene 浓度，转速越高，涂膜的覆盖面积越小，薄膜厚度降低。如果转速逐渐升高，则 MXene 薄膜的厚度会进一步降低。需要达到最佳升速（ramping speed），才能获得均匀的超薄层。高浓度的 MXene 溶液能够在基底上覆盖更大的面积，并形成均匀的薄膜。较低浓度的溶液可能会导致薄膜厚度不足或不均匀。通过调整上述参数，可以精确控制 SCM 法制备的 MXene 薄膜厚度。此外，还可通过 SCM 叠加多层，制备多层结构薄膜。

## 2 Ti3C2Tx MXene 薄膜材料的应用场景

MXene 基薄膜具有卓越的性能。近年来取得的成果斐然，其超薄的二维层状结构赋予了其优异的导电性、高比表面积以及丰富的表面官能团，使其在储能、催化、传感、电子器件和环境治理等方面展现出巨大潜力。MXene 凭借其高电子迁移率和快速离子扩散通道，成为锂/钠离子[29]电池和超级电容器电极材料的理想选择，大幅提升了能量存储和功率输出性能。因 MXene 的高导电性和柔性特性使其成为透明导电薄膜[30]等的重要材料。在电磁屏蔽领域，MXene 的电磁屏蔽效果良好，使其在电磁屏蔽[31]和隐身材料方面展现出独特优势。在环境治理方面，MXene 的丰富表面活性位点和可调控的结构使其在水净化、气体吸附和催化降解污染物方面表现优异。例如，MXene 可作为高效吸附剂去除重金属离子和有机污染物，同时也可作为催化剂载体促进污染物的分解，为绿色环保技术提供了新的解决方案。尽管 MXene 在多个领域取得了突破性的进展，但其实际应用仍面临诸多挑战，如环境稳定性不足、批量制备工艺尚待优化等。未来的研究将聚焦于材料稳定性提升、功能化改性及规模化制备等方向，以推动 MXene 基薄膜更广泛的应用，并加速其在实际场景中的落地。

### 2.1 Ti3C2Tx MXene 薄膜材料在电磁屏蔽领域的应用

随着电子技术的高速发展，无可避免的释放出电磁辐射，现如今电磁污染已成为了继大气污染，水污染，噪声污染后的第四大污染。电磁污染会导致电子元器件之间的相互干扰，进而引发电磁信息泄露，并对人体的健康造成威胁，如记忆衰退、头痛等[32]健康问题，研究和应用 EMI 屏蔽材料对解决这一问题至关重要。

近年来，许多碳材料（如石墨烯、还原氧化石墨烯（rGO）和炭黑）被报道用于 EMI 屏蔽应用。[33, 34]然而，二维 MXenes 显示出优越的 EMI 屏蔽性能，基于 MXene 基超高的电导率（足以媲美石墨烯），MXene 的薄膜在电磁干扰（EMI）屏蔽表现出了卓越的性能。具体而言，Ti3C2Tx 片层提供的优异电导率和珍珠层状（或层状）结构中的多次内部反射，展现了卓越的电导率和机械柔韧性，使得 Ti3C2Tx 薄膜具有出色的 EMI 屏蔽效果（例如，45 微米厚的薄膜屏蔽效果可达 92 dB 见图 4a[19]）是目前已知的同类厚度的合成材料中最

高的。其屏蔽机制如下：当电磁波撞击  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄片表面时，部分波会因  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  中的丰富自由电子而立即被反射。剩余的电磁波穿过  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的第一层后，会到达下一个  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  片层，形成屏障层，电磁波衰减现象重复发生（见图 4f）。因此，层状结构使得  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  具有多级屏蔽能力，相比没有反射层的材料具有巨大优势。当  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  作为导电填料加入到聚合物薄膜中时，能有效的提升整体结构的屏蔽性能，SA（海藻酸钠）本身电导率较低远低于 ( $1 \text{ S cm}^{-1}$ ) 随着  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量的增加，电导率从 ( $0.5 \text{ S cm}^{-1}$ ) 提升到 ( $4665 \text{ S cm}^{-1}$ ) (图 4b) 复合薄膜的电导率迅速提升，当  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量达到 60% 时  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -SA 复合薄膜的整体性能最佳电磁屏蔽性能达到 40db，同时我们搜集了，其他二维材料作为导电填料如石墨烯，碳纳米管，碳纤维等加入复合体系中厚度与电磁屏蔽性能的对比 (图 4c)，进一步证明了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  在提高聚合物复合材料电导率方面的有效性。

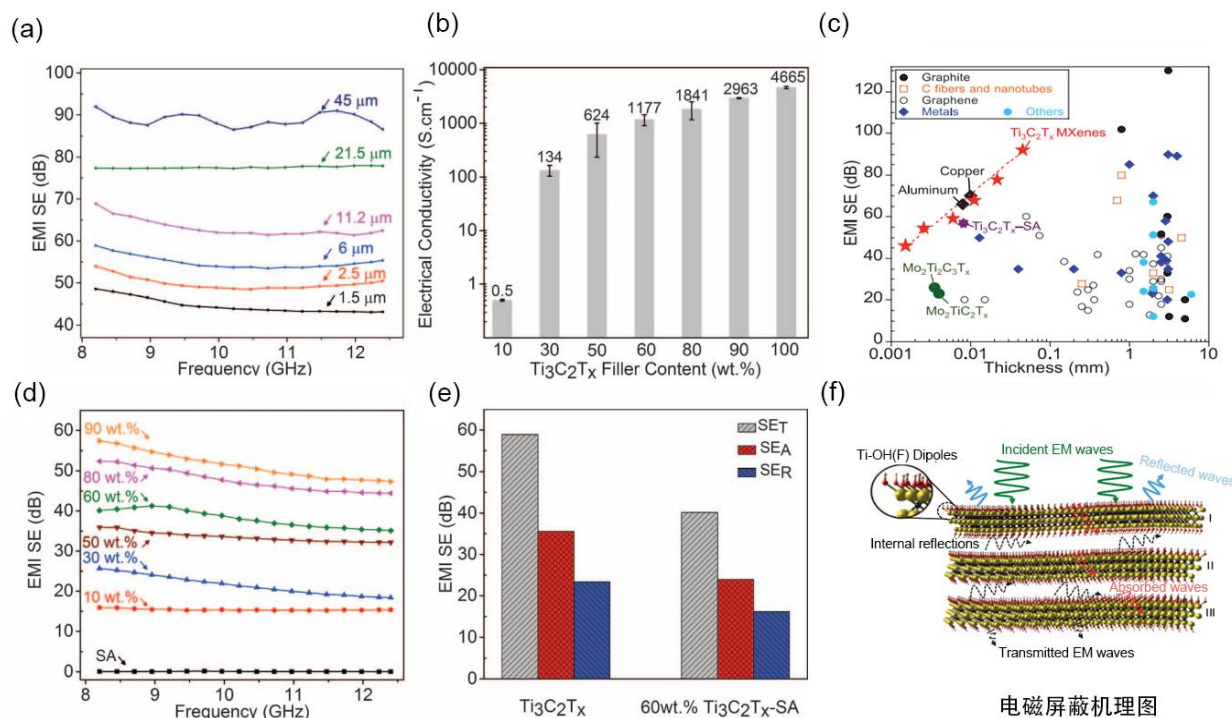


图 4 (a) 不同厚度下  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的 EMI SE 性能；(b) 不同  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量的电导率；(c) EMI SE 不同二维与厚度的关系；(d) 不同  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量的复合薄膜电磁屏蔽性能；(e) 最佳  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  含量 SA 复合膜的 EMI SE 性能；(f)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜电磁屏蔽机理图

Liang 等[35]人制备的 MC-3L 薄膜的 EMI 屏蔽效能达到 66.8 dB (见图 5a)，远超同类材料，在  $300^\circ\text{C}$  和  $-196^\circ\text{C}$  (液氮) 处理后仍保持稳定 EMI 屏蔽性能。在  $\text{pH}=1$  的盐酸中浸泡 2 小时后 EMI 屏蔽性能几乎未变。抗拉强度达 26.7 MPa，在空气中放置 1 个月后 EMI 屏蔽性能无明显衰减。PI-MXene-MWCNT 三明治梯度导电纳米复合膜，在保持轻量化和柔性的同时，显著提高了 EMI 屏蔽性能 (66.8 dB) 并具有出色的环境稳定性、力学性能、热学性能和阻燃性能。这一策略为高性能 EMI 屏蔽材料的开发提供了一种简单而高效的方法，解决了 MXene 易氧化及力学性能问题。随后的研究中，Zhou 等人通过简单的钙离子交联 SA 分子，制备了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /海藻酸钙 (CA) 气凝胶薄膜，并赋予其海绵状结构[36]。得益于这种结构和形态特性， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /CA 气凝胶薄膜展现出了优异的电磁干扰 (EMI) 屏蔽性能 (在 26  $\mu\text{m}$  厚度下为 54.3dB)，这一性能远高于纯  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /SA 薄膜在相同条件下的表现[36]。

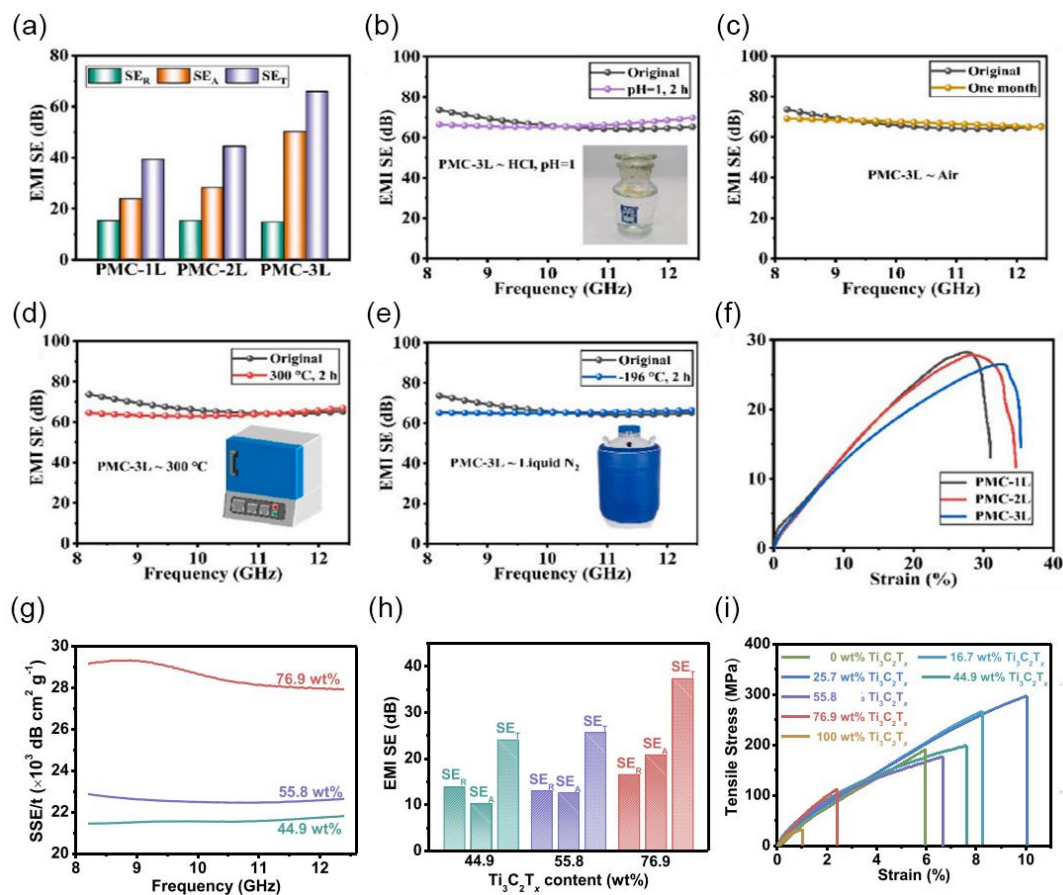


图5 (a) PMC-3L 薄膜的电磁屏蔽性能, (b) PMC-3L 在 PH=1 环境下的电磁屏蔽性能, (c) PMC-3L 在空气中一个月后的性能, (d) ePMC-3L 在高低温下的电磁屏蔽性能; (f) PMC-3L 复合膜力学性能; (g, h)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{BC}$  复合膜在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  不同含量下的 EMI SE; (i)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{BC}$  复合膜在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  不同含量下的拉伸性

## 2.2 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 薄膜材料在水处理领域的应用

PFAS (全氟和多氟烷基物质) 被誉为“永恒的化学物质”, 因其具有极强的疏水性、疏油性和化学稳定性, PFAS 极难降解, 它们在环境中长期存在并积累于生物体内, 其解离能超过 530 kJ/mol, 展现出强大的抗降解能力, 进一步加剧了其对环境和健康的危害给生态环境和生物健康, 尤其是哺乳动物, 带来了极大的威胁。PFAS 的去除方法多种多样, 其中膜过滤技术因其高效性而脱颖而出, 能够去除包括阴离子型、阳离子型和两性离子型在内的各种 PFAS, 去除效率超过 99%。[37, 38]。MXene 的出现彻底改变了水处理技术。MXene 基膜因其多元素结构以及能够容纳多种表面功能基团的能力, 在 PFAS 去除方面展现出巨大的潜力。MXenes 的亲水性、分散性和固有的坚固性, 以及其表面功能基团, 在膜性能中发挥着重要作用[39]。研究人员制备了一种 MXene-聚苯胺 (PANI) 膜用于从水环境中去除全氟辛酸 (PFOA) [40]。首先, 采用原位 HF 蚀刻制 MXene 纳米片, 并将其分散于 HCl 溶液中, 随后加入苯胺单体, 在超声作用下进行原位聚合。在另一个烧杯中, 用 HCl 溶液中溶解过硫酸铵 (APS), 然后将其加入到第一溶液中作为氧化剂以完成聚合, 最终采用 VAF 技术制备成膜。采用循环伏安法 (cyclic voltammetry) 评估 MXene-PANI 和 MXene 膜的电吸附性能, 研究发现掺杂 PANI 显著提高了 PFOA 的去除效果。

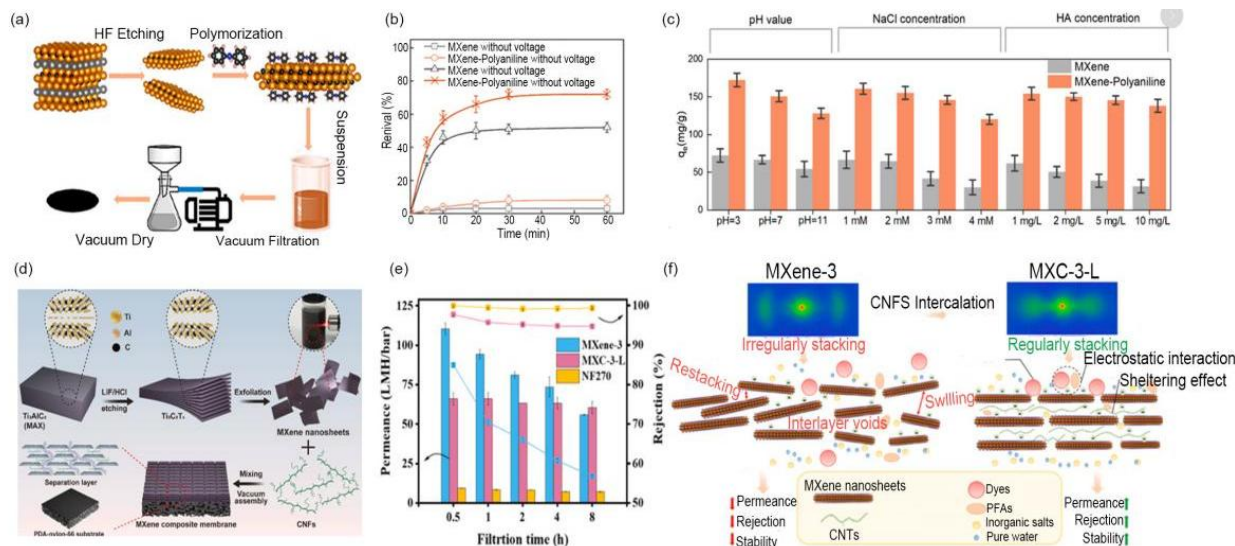


图6 (a) MXene-聚苯胺(MXene-PANI)电催化膜的合成过程[42]; (b) MXene和MXene-PANI膜对全氟辛酸(PFOA)电吸附的动力学; (d) MXene复合膜的制备过程示意图; (e) MXene-3、MXC-3-L和NF270膜分别对PFOA的渗透性和截留率; (f) MXene/CNFs复合膜的分子筛分机理示意图

此外,研究人员通过交变电压( $\pm 1.0$  V)循环20次,验证了MXene-PANI膜的长期稳定性,结果表明其吸附-解吸能力较强,而MXene膜的长期稳定性较低。从(图6.a)可以看出,在有无电压的条件下,MXene-PANI膜的吸附性能均明显优于MXene膜(图6.b),这表明MXene自身对PFOA的吸附能力较低,而外加电压在提高吸附能力方面起到了关键作用。而且,研究还进一步探讨了其他污染物对PFOA去除效率的影响。其中,腐殖酸(HA)可能与PFOA竞争吸附位点,而氯化钠(NaCl)则可能影响双电层的压缩效应。实验结果表明,MXene-PANI膜在复杂污染环境中仍能选择性去除PFOA,但随着NaCl或HA浓度的增加,其去除效率有所下降。同时在不同pH条件下的测试发现,酸性环境有助于提高PFOA的去除率,而碱性条件则显著降低了去除效率(见图6.c)。尽管在最优条件下,PFOA的去除率未能突破75%,但该研究证明,掺入导电聚合物(如PANI)不仅能有效抑制MXene的氧化和层间重叠问题,还可通过调节层间距增强其吸附能力。PANI作为桥联分子,与MXene纳米片形成稳定的相互作用,从而防止其在水环境中发生团聚,为提高吸附性能提供了新的策略。

在另一项研究中, Ma等人制备了三种不同端基(氯、氟和氧)修饰的MXene(通过路易斯酸或HF蚀刻法)用于去除PFAS[41]。在后续步骤中,这些MXene被涂覆在疏水性尼龙膜上,形成导电催化层,其中疏水支撑层有助于增加污染物在膜表面的吸附。实验使用两种类型的PFCA(全氟羧酸): PFOA(C8)和PFBA(C4)来监测MXene基膜的电吸附、解吸和降解动力学。结果表明, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>具有最低的界面电荷转移电阻(约1.5 $\Omega$ ),同时显示出对PFBA和PFOA最高的吸附能力(215.9 mg/g)。

杨等开发了一种具有抗膨胀性和长期稳定性的MXene基膜,用于去除PFOA和PFOS[42]。在实验中,研究人员通过引入一维碳纳米纤维(CNFs),形成混合维度复合结构(见图13a)。CNFs的引入有效调控了MXene纳米片的堆积方式,提高了PFAS去除率和水通量。杨等人选择了两种常见的PFAS化合物评估了MXC-3-L膜去除PFAS的可行性,并与市售NF膜(NF270)进行了比较。结果表明,NF270、MXene-3和MXene-3-L膜对PFOA的过滤效果与PFOS相似,这可能与PFOA和PFOS的结构相似性有关(见图5h-i)。在过滤过程中,MXene-3膜在初期表现出较高的渗透性,但随着过滤时间的延长,渗透率逐渐下降。同时,PFOA和PFOS的排斥率也在过滤过程中呈下降趋势。MXene-3膜排斥率的降低可能源于2D纳米片在水中的膨胀和不规则堆叠,而渗透率下降则可解释为长期运行中纳米片的压实。类似现象曾在先前研究中报道过[43],该研究发现,纯GO膜在过滤MB染料6小时后,其通透性下降了1-2倍,且截留率由99%降至64%,这主要是由于溶胀和重新堆叠的问题。与此相比,MXC-L-3膜和NF270膜在长达8小时的过滤过程中保持了稳定的渗透通量,表明CNF-L的掺入有效地克服了MXene纳米片的膨胀和重新堆叠问题,更重要的是,MXC-3-L

膜在 PFAS 的截留率(>95%)方面与商用 NF270 膜相当,但其渗透性提高了近 8 倍。这表明 MXene/CNF 复合膜在 PFAS 去除方面具有良好的可行性和前景。

其机制如下图(图 6.i):MXC-3-L 膜相较于 MXene-3 膜具有更宽的传输通道,但其分离性能更为出色,主要得益于以下几个因素。MXene-3 膜的堆叠结构较为不规则,且容易在水中膨胀,这导致其对染料和 PFAS 分子的排斥率较低。通过氢键作用将 CNFs 嵌入 MXene 纳米片的表面,有效抑制了纳米片的聚集,并改善了其面对面堆叠方式,从而形成了更加稳定和规则的堆叠结构,这种规则堆叠的结构不仅增强了膜的致密性,形成了纳米限域的分层,还显著提升了空间位阻效应带来的截留能力[44]。此外,CNF 的“一维”特性在其中起到了“穿线”和“缝合”的关键作用,有效屏蔽了相邻 MXene 纳米片之间的缺陷,进一步提升了分离效率。同时,富含负电荷含氧官能团的 1D CNFs-L 的掺入,增强了膜的电负性,进而增强了对带负电荷的染料和 PFAS 分子的静电排斥力。

## 2.3 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 薄膜材料在储能领域的应用

近年来,MXene 因其优异的性能,在锂/钠离子存储领域崭露头角[45-47]。相比于 MXene 粉末,MXene 基薄膜在电极应用中更加便捷,无需额外的加工步骤和添加剂。然而,由于 MXene 纳米片的堆叠效应,阻碍了电解质的渗透,从而影响离子传输,导致其电化学性能下降。例如,纯  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜在锂离子存储和钠离子存储中的容量分别约为  $160 \text{ mAh g}^{-1}$ [48]和  $25 \text{ mAh g}^{-1}$ [49]。在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  基薄膜的合成和制备过程中仍然存在多个瓶颈。为更好地利用 MXene 基薄膜进行储能研究,科学家们开发了一系列策略,以防止 MXene 纳米片的堆叠。其中,入层间隔物是一种直接且有效的方法,它可以有效防止 MXene 纳米片的重叠,并促进电解质的传输及离子在电极中的渗透。目前,已有报道的层间间隔物包括表面活性剂[50]、碳纳米管(CNTs)[51]、聚合物[52]和还原氧化石墨烯(rGO)[53]。例如 Luo 等人[54]将带正电的一维碳纳米管(CNTs)和还原氧化石墨烯(rGO)作为间隔物,制备了 MXene/CNT/rGO

(MCG)复合薄膜电极,通过引入 CNTs 和 rGO(图 7a),形成稳定的插层结构,扩大了 MXene 层间距,并创建了多向离子传输通道,使更多的离子可达活性位点暴露(图 7b, c),提高储能能力。MCG 薄膜的比电容高达  $463.5 \text{ F/g}$  ( $1 \text{ A/g}$ )。以 MCG 作为负极、 $\text{MnO}_2$ 作为正极组装的不对称超级电容器(ASC),实现了  $1.7 \text{ V}$  的电压窗口,并在  $814.8 \text{ W/kg}$  的功率密度下,达到  $33.95 \text{ Wh/kg}$ (图 7d)的能量密度。此外,在  $3 \text{ A/g}$  的电流密度下,经过 8000 次循环后,电容保持率仍高达 92.9%,展现出优异的循环稳定性。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米片在组装成薄膜时易发生面-面紧密堆叠,限制了其离子和电子传输能力。此外,在富含氧或高湿度的大气环境中,特别是室温以上的条件下,该材料的稳定性不尽如人意,容易发生物理化学性质的严重劣化,限制了其进一步的应用。[45]为解决这一问题,关[55]等团队提出了一种三维(3D)空心 MXene 管(HTCTs)结构,并通过表面改性去除-F 端基,引入更多-O 端基,以提高  $\text{K}^+$ 和  $\text{Li}^+$ 的存储能力和离子传输效率,通过改性后  $\text{K}^+$ 初始可逆比容量达到  $633.2 \text{ mAh/g}$  ( $0.1 \text{ A/g}$ ),循环 200 次后仍保持  $586 \text{ mAh/g}$ ,650 次循环后( $1.0 \text{ A/g}$ )仍具有  $402.3 \text{ mAh/g}$  的高容量; $\text{Li}^+$ 初始可逆比容量达到  $228.5 \text{ mAh/g}$  ( $0.1 \text{ A/g}$ ),300 次循环后仍保持  $199.2 \text{ mAh/g}$ ,350 次循环后( $0.2 \text{ A/g}$ )仍能保持  $122.0 \text{ mAh/g}$ ,证实 3D HTCTs 在 LIBs 和 PIBs 中的优越储能性能。此外,引入具有高锂/钠离子存储容量的材料[56]作为层间间隔物,有助于进一步提升电极的比容量。Tian 等人采用真空过滤法,在高导电性的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 片层网络上共价锚定硅(Si)纳米球(图 7e)。<sup>[56]</sup>这一独特的层状结构不仅能够有效缓冲硅纳米颗粒在循环过程中的体积膨胀,还能提升复合材料的导电性,并提供额外的活性位点,由于硅本身具有超高的比容量,再结合优化后的层状结构, $\text{Si/Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合薄膜在  $0.2 \text{ A g}^{-1}$  电流密度下循环 100 次后,仍能保持  $2118 \text{ mAh g}^{-1}$ 的高稳定容量。即使在  $5 \text{ A g}^{-1}$ 的高电流密度下,容量保持率仍可达到 51.33%(图 7f)。相较之下,纯硅负极在相同条件下容量迅速衰减(图 7g)。研究表明,该复合材料目前在自由立式电极领域展现出最高的锂离子存储容量,具有广阔的实际应用潜力。另一种防止 MXene 纳米片堆叠的有效策略是构建 3D 多孔结构的 MXene 基薄膜。例如, Ma 等人通过电解质诱导自组装方法成功制备了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{rGO}$  复合多孔薄膜(图 8a)。<sup>[57]</sup>在这一过程中, $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ 作为电解质,将原本致密堆叠的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜转化为 3D 多孔结构。具体而言, $\text{NH}_4^+$ 破坏了 MXene 和 GO 片层之间的静电平衡,促使  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -GO 微团簇的形成,并在真空过滤脱水过程中逐步交联,最终构建出 3D 多孔网络(图 8b-c)。这一结构显著提升了电解质在薄膜电极中的扩散性能。作为锂离子存储的负极材料, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{rGO}$  复合薄膜在  $0.05 \text{ A g}^{-1}$ 的电流密度下实现了  $335.5 \text{ mAh g}^{-1}$ (图 8d)的高比

容量, 并表现出优异的长循环稳定性。[57]其 3D 多孔结构不仅赋予材料更优异的倍率性能, 还使比容量高于纯  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜和纯 rGO 薄膜, 充分证明了 3D 多孔结构在提升电化学性能方面的显著优势。采用共晶蚀除法 (eutectic etching approach), 引入羟基硼烯 (hydroxylated borophene, B) 作为三功能介质, 构建 MXene/B 自组装薄膜电极 (图 8e), 以提升 MXene 的化学稳定性并抑制层间自堆叠。[58]羟基硼烯通过强界面结合提高 MXene 的稳定性, 同时优化储能界面 (图 8f-g)。密度泛函理论 (DFT) 计算和实验结果表明, 该材料可增强 Ti—O 键的热力学稳定性, 抑制 MXene 的不可逆降解。MXene/B 电极表现出优异的电化学性能: 在  $0.2 \text{ mA/cm}^2$  电流密度下, 比电容达  $537.9 \text{ mF/cm}^2$ , 在  $1 \text{ mA/cm}^2$  时仍保持  $347.1 \text{ mF/cm}^2$  (见图 8h-i)。此外, 该电极展现出超长循环稳定性, 在  $1 \text{ mA/cm}^2$  下经过 40,000 次循环后, 电容保持率高达 99.64%, 远超大多数 MXene 研究报道 (见图 8j)

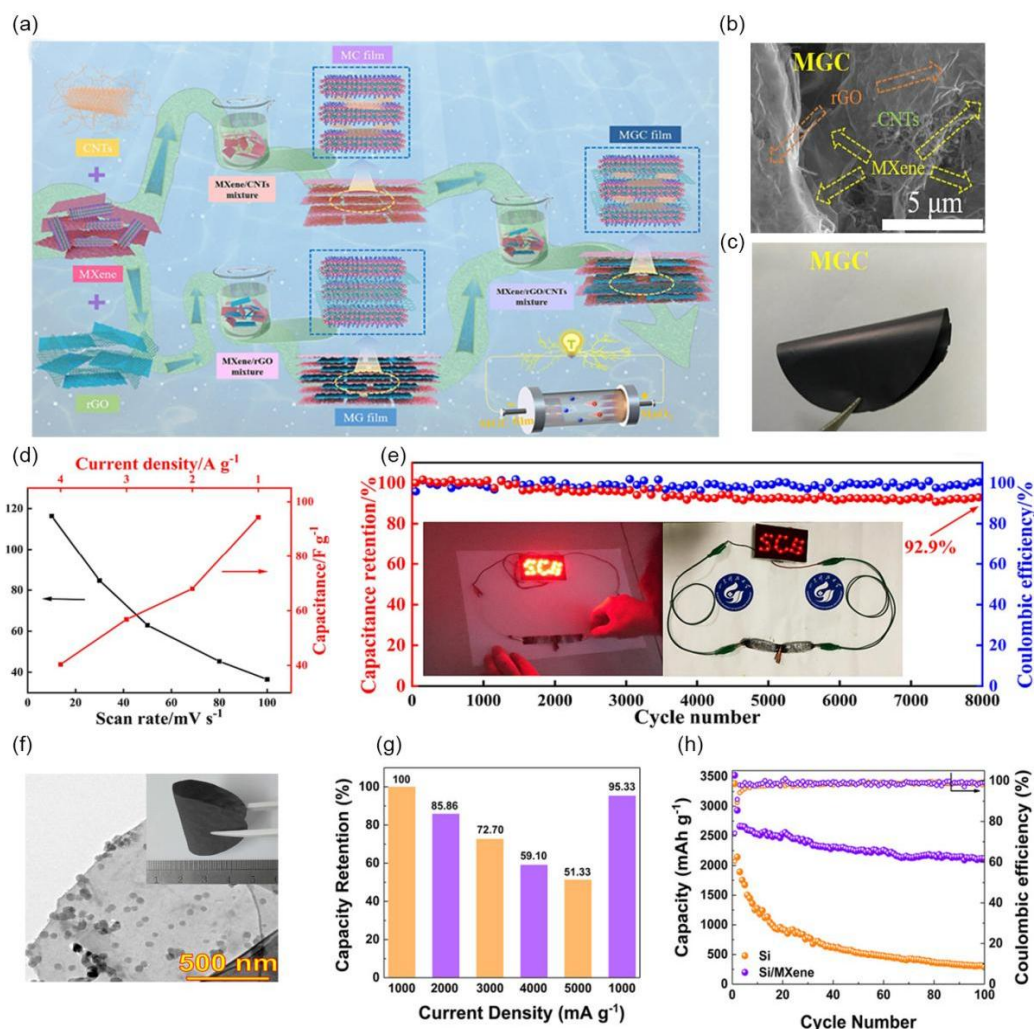


图 7 (a) MGC 复合薄膜示意图[59]; (b-c) MGC 复合薄膜的电镜图及实物图; (d) 重量电容随扫描速率和电流密度的变化曲线; (e) ASC 在  $3 \text{ ag}^{-1}$  下 8000 次充放电循环后的循环稳定性和库仑效率; (f) Si/MXene 薄膜形态和结构的表征; (g) 电流密度从  $1\text{--}5 \text{ Ag}^{-1}$  下 Si/MXene 薄膜阳极容量; (h) 纯 Si 和 Si/MXene 薄膜阳极在  $0.2 \text{ Ag}^{-1}$  下循环 100 次的稳定性

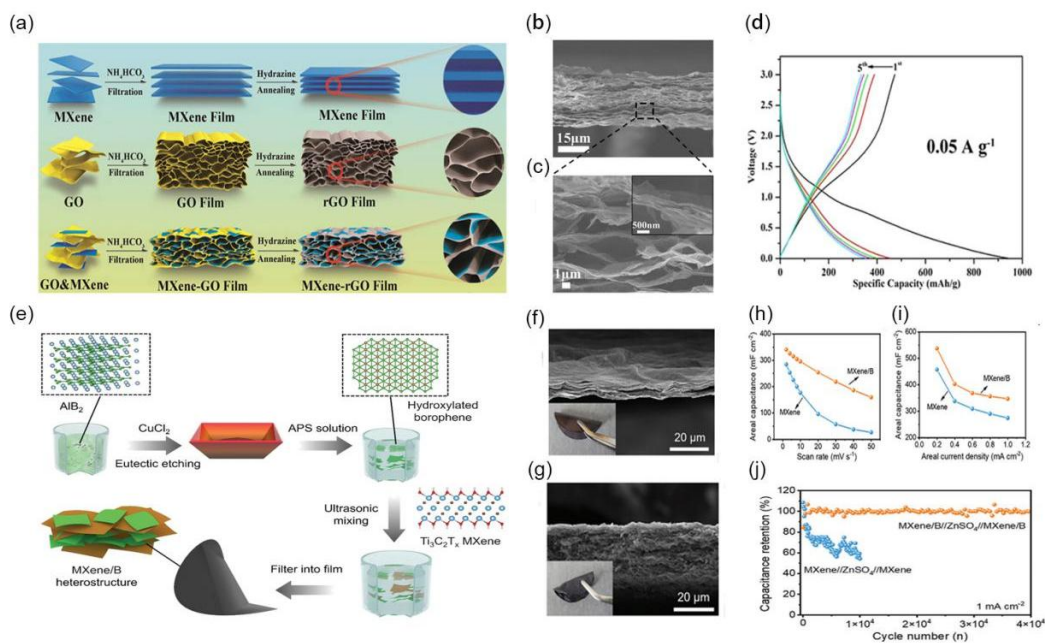


图 8. (a) MXene-rGO 复合薄膜示意图[56]; (b-c) MXene-rGO 复合薄膜的电镜图; (d) 在 0.05 A g<sup>-1</sup> 条件下 MXene-rGO 薄膜电极在前 5 次循环中的充放电曲线; (e) .MXene/B 薄膜电极制备示意图; (f-g) MXene/B 薄膜结构的表征; (h) 不同扫描速率下, 通过相应的 cv 测量比电容; (i) 不同电流密度下的面电容; (j) 在 1A g<sup>-1</sup> 下的循环稳定性

### 3 结论及 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>基薄膜的展望与未来

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>基薄膜作为 MXene 家族中最具代表性的成员, 凭借其高导电性、优异的机械性能以及可调控的表面化学特性, 在储能、透明导电电极、电磁干扰 (EMI) 屏蔽等领域展现出广阔的应用前景。然而, 尽管近年来取得了显著进展[60, 61], Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>薄膜的实际应用仍面临诸多挑战。

合成工艺仍需优化。现有的 LiF-HCl 刻蚀方法相较于 HF 刻蚀法更安全且能制备出缺陷较少的 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片层, 但层间残留的水分子和阳离子可能影响材料的本征性能。此外, 多层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的剥离和单层化仍然存在挑战, 而单层或少层片层对于提升薄膜性能至关重要。因此, 未来研究应聚焦于优化刻蚀和剥离工艺, 以获得低缺陷、高质量的 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片层, 并提高薄膜的均匀性和可控性。

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>薄膜的环境稳定性仍需提升。尽管组装成薄膜可以一定程度上提高片层的抗氧化能力, 但在潮湿环境下, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>仍易发生氧化降解, 导致电导率和机械强度下降。针对这一问题, 可以通过化学修饰边缘和缺陷位点, 或利用抗氧化涂层来增强薄膜的耐久性, 同时保持其本征性能。此外, 进一步研究 MXene 的氧化机制, 有助于开发更加有效的防护策略。

自堆叠效应限制了薄膜的性能。Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片层在组装过程中容易发生层间堆叠, 降低电化学活性和离子/电子传输能力。目前, 许多研究已探索了抑制堆叠的方法, 如引入一维间隔物 (如 CNTs、MnO<sub>2</sub>纳米线) 或构建三维多孔结构。然而, 大多数研究仅关注面-面堆叠的减少, 而对薄膜内部横向交联以及可控构建垂直孔道的研究仍较少, 未来应进一步探索优化结构设计, 以提高薄膜的电化学性能。

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>薄膜在某些应用中的结构膨胀问题仍需解决。例如, 在膜分离和催化应用中, 由于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的亲水性, 其层间容易吸收水分和溶解盐, 导致结构膨胀, 削弱离子排斥能力并影响薄膜的稳定性。目前的应对策略包括聚合物共价交联和环氧树脂封装, 但这些方法可能影响 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的功能可及性。因此, 将 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片层嵌入互联多孔结构, 如石墨烯基支撑材料, 可能是一种更有效的缓解策略。

值得期待的是, Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>薄膜的应用潜力仍未被充分挖掘。例如, 其优异的离子传输性能和选择性使其在纳流体能源转换领域具有应用前景。此外, 在可穿戴电子器件中, 通过引入导电聚合物 (如 PANI), 可以在

提升机械柔韧性的同时优化电化学性能。与此同时,大规模制造仍是一个关键问题,未来需要进一步探索低成本、高效率的制备方法,以加速  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜从实验室走向产业化应用。

综上所述  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜虽然面临稳定性、堆叠效应和结构膨胀等挑战,但凭借其独特的性能,仍展现出巨大的应用潜力。通过优化合成工艺、提升环境稳定性、改善结构设计以及开发新型应用领域,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  薄膜有望在未来发挥更广泛的作用,并推动相关技术的发展。

## 参考文献

- [1] WYATT B C, ROSENKRANZ A, ANASORI B. 2D MXenes: Tunable Mechanical and Tribological Properties [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33 (17): 2007973. DOI: 10.1002/adma.202007973.
- [2] ZHAO Z, WANG S, WAN F, et al. Scalable 3D Self-Assembly of MXene Films for Flexible Sandwich and Microsized Supercapacitors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31 (23): 2101378. DOI: 10.1002/adfm.202101378.
- [3] GHANBARI R, WU D, HEYNDERICKX P M. Fabrication of MXene-based membranes and their application in per- and polyfluorinated substances removal: Comparison with commercial membranes, challenges, and future improvements [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 523: 215487. DOI: 10.1016/j.ccr.2025.215487.
- [4] PENG L, HAN Y, WANG M, et al. Multifunctional Macroassembled Graphene Nanofilms with High Crystallinity [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(49): 2104195. DOI:10.1002/adma.202104195.
- [5] WU H, LIU C, CHU S, et al. Integrated super-engineering polymeric electromagnetic interference shielding films withstanding the extreme environments [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 472: 144789. DOI: 10.1016/j.cej.2023.144789.
- [6] LI B, WU N, YANG Y, et al. Graphene Oxide-Assisted Multiple Cross-Linking of MXene for Large-Area, High-Strength, Oxidation-Resistant, and Multifunctional Films [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 33(11): 2113256. DOI:10.1002/adfm.202113256.
- [7] WAN Y J, ZHU P L, YU S H, et al. Graphene paper for exceptional EMI shielding performance using large-sized graphene oxide sheets and doping strategy [J]. *Carbon*, 2017, 122: 74-81. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.06.041.
- [8] ZHOU Z, LIU Y, LAN S, et al. Optimized energy storage performance in bilayer heterogeneous films [J]. *Scripta Materialia*, 2024, 243: 115987. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.115987.
- [9] DAS P, ZHANG L, ZHENG S, et al. Rapid fabrication of high-quality few-layer graphene through gel-phase electrochemical exfoliation of graphite for high-energy-density ionogel-based micro-supercapacitors [J]. *Carbon*, 2022, 196: 203-212. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.04.056.
- [10] XIE G, BAI H, MIAO G, et al. The Applications of Ultra-Thin Nanofilm for Aerospace Advanced Manufacturing Technology [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11 (12): 3245. DOI: 10.3390/nano11123245.
- [11] LI R, ZHANG L, SHI L, et al. MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ : An Effective 2D Light-to-Heat Conversion Material [J]. *ACS Nano*, 2017, 11 (4): 3752-3759. DOI: 10.1021/acsnano.6b08415.
- [12] Graphical Abstract: *Angew. Chem. Int. Ed.* 37/2024 [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63 (37): e202483711. DOI: 10.1002/anie.202483711.
- [13] MATHIS T S, MALESKI K, GOAD A, et al. Modified MAX Phase Synthesis for Environmentally Stable and Highly Conductive  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene [J]. *ACS Nano*, 2021, 15 (4): 6420-6429. DOI: 10.1021/acsnano.0c08357.
- [14] LING Z, REN C E, ZHAO M Q, et al. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111 (47): 16676-16681. DOI: 10.1073/pnas.1414215111.
- [15] CHAUDHARI N K, JIN H, KIM B, et al. MXene: an emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5 (47): 24564-24579. DOI: 10.1039/C7TA09094C.
- [16] ZHANG J, KONG N, UZUN S, et al. Scalable Manufacturing of Free-Standing, Strong  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene Films with Outstanding Conductivity [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32 (23): 2001093. DOI: 10.1002/adma.202001093.
- [17] ZANG X, WANG J, QIN Y, et al. Enhancing Capacitance Performance of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene as Electrode Materials of Supercapacitor: From Controlled Preparation to Composite Structure Construction [J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12 (1): 77. DOI: 10.1007/s40820-020-0411-9.
- [18] ZHOU J, YU J, SHI L, et al. A Conductive and Highly Deformable All-Pseudocapacitive Composite Paper as Supercapacitor Electrode with Improved Areal and Volumetric Capacitance [J]. *Small*, 2018, 14 (51): 1803786. DOI: 10.1002/smll.201803786.

- [19] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electromagnetic Interference Shielding with 2D Transition Metal Carbides (MXenes) [J]. *Science*, 2016, 353 (6304): 1137-1140. DOI: 10.1126/science.aag2421.
- [20] 侯淑萍, 韩艺婷, 莫美新, 等. 二维材料 MXene 的制备方法、性能与应用探究 [J]. *纳米技术*, 2024, 14 (2): 23-36.
- [21] HOU S, HAN Y, MO M, et al. Study on preparation, properties and application of two-dimensional material MXene [J]. *Nanotechnology*, 2024, 14 (2): 23-36. (in Chinese).
- [22] 吴晓娜, 汪宜宇, 赵凯. MXene 基复合水凝胶在修复感染创面中的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(7): 3427-3441.
- [23] WU X, WANG Y, ZHAO K. Research progress of MXene-based composite hydrogels in the repair of infected wounds [J]. *Journal of Composites*, 2024, 41(07): 3427-3441. (in Chinese).
- [24] LIPATOV A, ALHABEB M, LUKATSKAYA M R, et al. Effect of Synthesis on Quality, Electronic Properties and Environmental Stability of Individual Monolayer Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene Flakes [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2 (12): 1600255. DOI: 10.1002/aelm.201600255.
- [25] WANG Y, WANG X, LI X, et al. Engineering 3D Ion Transport Channels for Flexible MXene Films with Superior Capacitive Performance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29 (14): 1900326. DOI: 10.1002/adfm.201900326.
- [26] WANG J, KANG H, MA H, et al. Super-Fast Fabrication of MXene Film through a Combination of Ion Induced Gelation and Vacuum-Assisted Filtration [J]. *Engineered Science*, 2021, 15: 57-66. DOI: 10.30919/es8d527.
- [27] KEDAMBAIMOOLE V, KUMAR N, SHIRHATTI V, et al. Laser-Induced Direct Patterning of Free-standing Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-MXene Films for Skin Conformal Tattoo Sensors [J]. *ACS Sensors*, 2020, 5 (7): 2086-2095. DOI: 10.1021/acssensors.0c00647.
- [28] XIE J, JIANG J, DAVOODI P, et al. Electrohydrodynamic Atomization: A Two-Decade Effort to Produce and Process Micro-/Nanoparticulate Materials [J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 125: 32-57. DOI: 10.1016/j.ces.2014.08.061.
- [29] WU Y, CLARK R L. Electrohydrodynamic Atomization: A Versatile Process for Preparing Materials for Biomedical Applications [J]. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2008, 19 (5): 573-601. DOI: 10.1163/156856208784522089.
- [30] CHERNIKOVA V, SHEKHAH O, EDDAOUDI M. Advanced Fabrication Method for the Preparation of MOF Thin Films: Liquid-Phase Epitaxy Approach Meets Spin Coating Method [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8 (31): 20459-20464. DOI: 10.1021/acsami.6b04858.
- [31] PHAM H Q, HUYNH T T. Applications of Doped-MXene-Based Materials for Electrochemical Energy Storage [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 517: 216039. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.216039.
- [32] ZHANG C, ANASORI B, SERAL-ASCASO A, et al. Transparent, Flexible, and Conductive 2D Titanium Carbide (MXene) Films with High Volumetric Capacitance [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29 (36): 1702678. DOI: 10.1002/adma.201702678.
- [33] YUN T, KIM H, IQBAL A, et al. Electromagnetic Shielding of Monolayer MXene Assemblies [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32 (9): 1906769. DOI: 10.1002/adma.201906769.
- [34] ZHANG M, WANG X X, CAO W Q, et al. Electromagnetic Functions of Patterned 2D Materials for Micro-Nano Devices Covering GHz, THz, and Optical Frequency [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7 (19): 1900689. DOI: 10.1002/adom.201900689.
- [35] SHEN B, ZHAI W, ZHENG W. Ultrathin Flexible Graphene Film: An Excellent Thermal Conducting Material with Efficient EMI Shielding [J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24 (28): 4542-4548. DOI: 10.1002/adfm.201400079.
- [36] KIM S, OH J S, KIM M G, et al. Electromagnetic Interference (EMI) Transparent Shielding of Reduced Graphene Oxide (RGO) Interleaved Structure Fabricated by Electrophoretic Deposition [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6 (20): 17647-17653. DOI: 10.1021/am503893v.
- [37] LIANG W, WU J, ZHANG S, et al. Construction of PI-MXene-MWCNT Nanocomposite Film Integrating Conductive Gradient with Sandwich Structure for High-Efficiency Electromagnetic Interference Shielding in Extreme Environments [J]. *Carbon*, 2024, 228: 119895. DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119895.
- [38] ZHOU Z, LIU J, ZHANG X, et al. Ultrathin MXene/Calcium Alginate Aerogel Film for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6 (6): 1802040. DOI: 10.1002/admi.201802040.
- [39] GREGER M, LANDBERG T. Removal of PFAS from Water by Aquatic Plants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119895. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.119895.
- [40] LEI X, LIAN Q, ZHANG X, et al. A review of PFAS adsorption from aqueous solutions: Current approaches, engineering applications, challenges, and opportunities [J]. *Environmental Pollution*, 2023, 321: 121138. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121138.

- [41] ZHANG W, JI X X, MA M G. Emerging MXene/cellulose composites: Design strategies and diverse applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 458: 141402. DOI: 10.1016/j.cej.2023.141402.
- [42] ZHAO J, FAN Y, ZHANG J, et al. Electrosorption approach removing PFOA from wastewater using a MXene-polyaniline film [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 62: 105415. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105415.
- [43] MA Q, GAO J, MOUSSA B, et al. Electrosorption, Desorption, and Oxidation of Perfluoroalkyl Carboxylic Acids (PFCAs) via MXene-Based Electrocatalytic Membranes [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15 (24): 29149-29159. DOI: 10.1021/acsami.3c04544.
- [44] YANG H, HAN M, ZHANG W, et al. High performance mixed-dimensional assembled MXene composite membranes for molecular sieving [J]. Journal of Membrane Science, 2024, 698: 122606. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122606.
- [45] SUN M, WANG X, WINTER L R, et al. Electrified Membranes for Water Treatment Applications [J]. ACS ES&T Engineering, 2021, 1 (4): 725-752. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00015.
- [46] XUE S, GAO J, LIU C, et al. Unveiling the potential of nanobubbles in water: Impacts on tomato's early growth and soil properties [J]. Science of The Total Environment, 2023, 903: 166499. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166499.
- [47] PENG L, FANG Z, ZHU Y, et al. Holey 2D Nanomaterials for Electrochemical Energy Storage [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8 (9): 1702179. DOI: 10.1002/aenm.201702179.
- [48] LI Q, LI H, XIA Q, et al. Extra storage capacity in transition metal oxide lithium-ion batteries revealed by in situ magnetometry [J]. Nature Materials, 2021, 20 (1): 76-83. DOI: 10.1038/s41563-020-00868-2.
- [49] LI H, HU Z, XIA Q, et al. Operando Magnetometry Probing the Charge Storage Mechanism of CoO Lithium-Ion Batteries [J]. Advanced Materials, 2021, 33 (12): 2006629. DOI: 10.1002/adma.202006629.
- [50] ZHAO Q, ZHU Q, MIAO J, et al. Flexible 3D Porous MXene Foam for High-Performance Lithium-Ion Batteries [J]. Small, 2019, 15 (51): 1904293. DOI: 10.1002/smll.201904293.
- [51] XIE X, ZHAO M Q, ANASORI B, et al. Porous heterostructured MXene/carbon nanotube composite paper with high volumetric capacity for sodium-based energy storage devices [J]. Nano Energy, 2016, 26: 513-523. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.06.005.
- [52] XU M, LEI S, QI J, et al. Opening Magnesium Storage Capability of Two-Dimensional MXene by Intercalation of Cationic Surfactant [J]. ACS Nano, 2018, 12 (4): 3733-3740. DOI: 10.1021/acsnano.8b00954.
- [53] ZHENG W, ZHANG P, CHEN J, et al. In situ synthesis of CNTs@Ti3C2 hybrid structures by microwave irradiation for high-performance anodes in lithium ion batteries [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6 (8): 3543-3551. DOI: 10.1039/C7TA10035H.
- [54] LIANG L, YAO C, YAN X, et al. High-efficiency electromagnetic interference shielding capability of magnetic Ti3C2Tx MXene/CNT composite film [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9 (43): 24560-24570. DOI: 10.1039/D1TA06614E.
- [55] YAN J, REN C E, MALESKI K, et al. Flexible MXene/Graphene Films for Ultrafast Supercapacitors with Outstanding Volumetric Capacitance [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27 (30): 1701264. DOI: 10.1002/adfm.201701264.
- [56] LUO W, LIU Q, ZHANG B, et al. Binder-free flexible Ti3C2Tx MXene/reduced graphene oxide/carbon nanotubes film as electrode for asymmetric supercapacitor [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145553. DOI: 10.1016/j.cej.2023.145553.
- [57] GUAN K, DONG L, XING Y, et al. Structure and surface modification of MXene for efficient Li/K-ion storage [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 75: 330-339. DOI: 10.1016/j.jechem.2022.08.020.
- [58] TIAN Y, AN Y, FENG J. Flexible and Freestanding Silicon/MXene Composite Papers for High-Performance Lithium-Ion Batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11 (10): 10004-10011. DOI: 10.1021/acsami.9b01233.
- [59] MA Z, ZHOU X, DENG W, et al. 3D Porous MXene (Ti3C2)/Reduced Graphene Oxide Hybrid Films for Advanced Lithium Storage [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10 (4): 3634-3643. DOI: 10.1021/acsami.7b17384.
- [60] YONG B, WANG Y, ZHAO H, et al. A Trifunctional Hydroxylated Borophene-Mediated MXene Enabled Super-Stable and Fast-Kinetics Interface Storage [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34 (32): 2401234. DOI: 10.1002/adfm.202401234.
- [61] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, et al. Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide (Ti3C2Tx MXene) [J]. Chemistry of Materials, 2017, 29 (18): 7633-7644. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b02847.
- [62] CHEN X, KONG Z, LI N, et al. Proposing the Prospects of Ti3CN Transition Metal Carbides (MXenes) as Anodes of Li-Ion Batteries: A DFT Study [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18 (48): 32937-32943. DOI: 10.1039/C6CP06018H.