

DOI:10.11918/202508077

MXene 材料在交通领域的应用进展

徐慧宁¹, 黎杰¹, 崔志刚², 李滨杉³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省交通运输厅, 哈尔滨 150090;
3. 交通运输部科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为推动二维过渡金属碳氮化物 MXene 材料在交通领域的应用, 文中系统梳理了 MXene 的制备方法、材料分类及其在交通领域的研究进展, 详细介绍了氢氟酸刻蚀法、原位生成氢氟酸刻蚀法、熔融盐刻蚀法、电化学刻蚀法, 以及碱刻蚀法等在内的多种合成手段, 深入探讨了多孔凝胶结构、薄膜、织物与球形颗粒等构型设计策略对材料多功能协同的调控机制, 全面总结了 MXene 材料在开发高效光热除冰道路涂层、提升交通基础设施防腐性能以及构建轻质高性能电磁屏蔽交通材料等方面的突破性应用。研究表明: MXene 材料通过多维结构设计, 可实现 73.1% 的超高光热除冰效率、金属腐蚀速率下降 2 个数量级、电磁屏蔽效能突破 $10^5 \text{ dB} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 但其在交通领域的规模化应用仍面临绿色制备成本高、长期稳定性不足, 以及缺乏智能响应的难题, 未来研究可聚焦智能响应与自适应功能的开发, 以推动 MXene 材料从实验室阶段迈向实际工程应用。本研究可为推动交通基础设施智能化升级与绿色可持续发展提供系统性的理论参考与技术支撑。

关键词: MXene 材料; 制备方法; 材料构型; 交通基础设施; 工程化

中图分类号: TB303

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)12-0141-15

Advances in the application of MXene materials for the transportation field

XU Huining¹, LI Jie¹, CUI Zhigang², LI Binshan³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Heilongjiang Provincial Department of Transportation, Harbin 150090, China; 3. Scientific Research
Institute of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To promote the application of two-dimensional transition metal carbides/nitrides MXene materials in the transportation field, this research reviews the preparation procedures, material classifications, and recent applications progress related to the transportation-engineering. Various synthesis techniques are introduced, including hydrofluoric acid etching, in-situ hydrofluoric acid etching, molten salt etching, electrochemical etching, and alkali etching. The mechanisms underlying the formation and control of porous gels, films, fabrics, and spherical particles, and their impact on the multifunctional performance of MXene-based materials, are discussed thoroughly. Key breakthroughs in MXene materials applications are summarized, highlighting their roles in developing efficient photothermal de-icing coatings for roads, improving the corrosion resistance of transportation infrastructure, and constructing lightweight, high-performance electromagnetic shielding materials for transport systems. Results show that, MXene materials can achieve ultra-high photothermal de-icing efficiency of 73.1%, reduce metal corrosion rates by two orders of magnitude, and attain electromagnetic interference shielding effectiveness exceeding $10^5 \text{ dB} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. However, their large-scale application in the transportation sector still faces challenges such as high costs of green preparation, poor long-term stability, and a lack of intelligent response. Future research should focus on developing intelligent response and adaptive functionalities to facilitate the transition of MXene materials from laboratory research to practical engineering applications. This literature review can provide the theoretical references and technical support for promoting the intelligent upgrading and green sustainable development of transportation infrastructure.

Keywords: MXene materials; preparation procedures; material configuration; transportation infrastructure; engineering

随着全球交通系统向智能化、低碳化深度变革,
突破交通基础设施长效防护材料升级、智慧交通传

感网络抗多频段电磁干扰等关键技术瓶颈, 其核心
在于材料基体的性能边界拓展。新型交通材料的研

收稿日期: 2025-08-30; 录用日期: 2025-10-22; 网络首发日期: 2025-12-01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251201.1526.004>

基金项目: 黑龙江省交通运输厅科技项目(HJK2024B001)

作者简介: 徐慧宁(1983—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 徐慧宁, xuhn@hit.edu.cn

发将直接影响基础设施全生命周期的成本控制能力,并支撑其承载智慧感知功能所需的可靠性与稳定性。除此之外,具有颠覆性特质的交通新材料可同步实现轻量化带来的能源效率提升、长寿命带来的资源消耗降低,以及多功能集成带来的系统复杂度简化,这种“一材多效”的特性对降低交通系统全链条碳排放具有乘数效应。

二维过渡金属碳氮化物 MXene 具有类石墨烯层状结构,因其丰富的表面功能位点、超高比表面积,以及梯度孔隙结构已成为前沿纳米材料研究的重要方向^[1-3]。通过精准调控过渡金属元素配比、碳氮比例及表面官能团类型,可有效增强其在电化学性能、结构强度与环境稳定性方面的综合表现。目前,已有超过 30 种结构明确的 MXene 晶体类型被成功制备,且多种新型构型在理论层面已获得模拟验证。 $Ti_3C_2T_x$ 作为初代 MXene 典型材料,通过铝层的选择性刻蚀工艺已实现可控规模化制备,其层间结构使得材料展现出优异的导电-介电调控能力与出色的界面匹配性能,在储能、催化、电磁调控等技术领域展现出显著潜力。近年来,研究重心逐步由基本性能机制向多功能材料集成与应用拓展转移。MXene 材料凭借其出色的材料特性,在道路冰雪防护、交通新型防腐蚀涂层设计以及基础设施电磁防护关键领域展现出广阔的工程应用前景。

因此,系统梳理 MXene 基复合材料在交通领域的研究进展,对于推动其从基础研究向工程化应用的转化具有重要的理论价值与实践意义。本文详细介绍了氢氟酸直接刻蚀法、原位生成氢氟酸刻蚀法、熔融盐刻蚀法、电化学刻蚀法,以及碱刻蚀法等材料制备工艺,重点阐释了多孔凝胶、薄膜、织物与球形颗粒等构型设计策略对材料多功能协同的调控机制,全面总结了 MXene 材料在开发高效光热除冰道路涂层、增强交通基础设施与载具金属部件的防腐蚀性能及设计轻量化高性能交通电磁屏蔽材料等领域的创新应用,同时剖析了材料规模化制备过程中面临的绿色制备成本高、长期稳定性不足及智能响应等挑战,并进一步结合多学科交叉发展趋势,对 MXene 材料在智能响应与自适应功能方面的发展趋势进行了展望。

1 MXene 材料的制备

MXene 材料主要通过 MAX 相前驱体中“A”层元素的选择性刻蚀进行制备,其本质源自 M-A

键与 M-X 键的化学活性差异,这一键能差异为“A”层优先脱除提供了热力学基础。本文将系统评述典型刻蚀方法。

1.1 氢氟酸直接刻蚀法

氢氟酸直接刻蚀法是最早用于制备 MXene 材料的方法,也是目前合成 MXene 的主要途径之一^[4]。通过使用氢氟酸对 MAX 相前驱体中的“A”层元素进行选择性的移除,仅保留过渡金属与碳/氮原子层,从而获得具有典型二维结构的 MXene 材料。氢氟酸直接刻蚀法的关键在于对氢氟酸的质量分数、反应温度以及刻蚀时间的调控,这些因素直接影响到 MXene 成品的质量和性能:氢氟酸质量分数直接影响刻蚀效果与表面官能团分布,10% 的质量分数通常适用于多数 MAX 相的刻蚀,但高原子序数 M 元素需更高质量分数的酸以破坏 M-A 键,同时也会因过量 -F 基团的生成而降低 MXene 的表面亲水性和电导率,并影响化学稳定性^[5-7];反应温度超过 800 °C 可能导致过渡金属氧化或结构坍塌^[8-10],同时也会增加反应体系的腐蚀性,对实验设备耐腐蚀性能的要求更高;刻蚀时间需精准匹配 MAX 相特性, Ti_3AlC_2 材料 15 ~ 24 h 可实现“A”层完全溶解并形成无明显副产物的褶皱结构,过长则会导致过渡金属层过度腐蚀,产生纳米级孔洞等缺陷,显著损害 MXene 的电化学性能与力学性能^[7,11]。氢氟酸直接刻蚀法具有操作相对简单、反应效率高优点,但安全防护和环保处理大幅提高了制备的综合成本:该方法所采用的氢氟酸试剂具有很强的腐蚀性和毒性,存在严重的环境与安全风险;同时,刻蚀过程中产生的氟化物气体和废液处理过程复杂且成本高昂,限制了该工艺的大规模推广应用。

1.2 原位生成氢氟酸刻蚀法

为降低氢氟酸在 MXene 制备过程中因强腐蚀性和高毒性带来的影响,研究人员提出了开发基于“氟化物+强酸”复合体系的原位生成氢氟酸策略。研究发现, $LiF + HCl$ 混合溶液可在刻蚀过程中缓慢释放低质量分数的氢氟酸,既保留了刻蚀动力学效率又显著降低操作风险^[12-13]。在此类“金属氟盐+强酸”复合体系中,由于阳离子的引入可产生双重效应^[14-15]:一方面,阳离子通过静电作用吸附于带负电的 MXene 表面而削弱层间范德华力;另一方面,其插层作用能够增大片层间距从而有效抑制其自堆积现象的发生。后续研究进一步拓展了刻蚀剂的选择范围,例如以 CsF、KF、NaF、CaF₂,以及四丁基氟

化铵等替代 LiF,或采用 H_2SO_4 替代 HCl,可根据不同的 MAX 相前驱体灵活调控阳离子种类以及氢氟酸的生成速率^[16]。类似的,还可以采用 NH_4F 水解产生氢氟酸的方式从 Ti_3AlC_2 中除去 Al 元素^[17],这种方法制得的 MXene 材料表面官能团与氢氟酸刻蚀得到的相似,主要为—F、—O 和—OH 官能团。原位生成氢氟酸刻蚀法原材料稍贵于氢氟酸直接刻蚀法,但综合成本更低,安全性和环境友好性显著提升,已成为制备 MXene 最具应用潜力和可规模化的工艺途径。

1.3 熔融盐刻蚀法

熔融盐刻蚀法摆脱了对氢氟酸体系的依赖,其核心制备机理是通过熔融盐中的路易斯酸性阳离子置换 MAX 相中的 Al 等“A”层原子,实现层间蚀刻并形成可控表面终端的新型 MXene 材料^[18-19]。该方法不仅避免了传统氢氟酸刻蚀法的安全与环境风险,还能可控地调节表面端基类型从而赋予材料优异的结构有序性和潜在电化学稳定性。同时,该技术展现出良好的普适性,推广到了更多的 MAX 相前驱体(Ti_3AlCN 、 Nb_2AlC 、 Ta_2AlC 、 Ti_3ZnC_2 等)和路易斯酸熔融盐体系(CdCl_2 、 FeCl_2 、 CoCl_2 、 CuCl_2 、 AgCl 、 NiCl_2 等)^[20]。然而,该技术仍面临两大问题:1) 尽管该方法原料便宜,但在进行刻蚀时需要高温高压条件,这对能源的消耗以及制备过程设备的维护成本提出了更高的要求;2) 产物多呈现层间范德华力增强的类手风琴结构,单层纳米片的得率仍不足 40%,这严重制约其在工业生产中的推广应用^[21]。

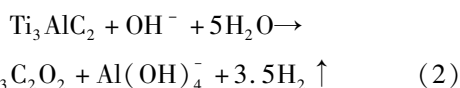
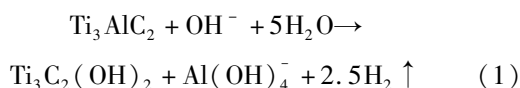
1.4 电化学刻蚀法

电化学刻蚀法作为 MXene 材料制备领域的创新技术,自提出以来已迅速成为替代传统氢氟酸刻蚀法的重要绿色合成策略。该方法利用电化学反应的定向选择性,通过外加电压驱动 MAX 相材料中“A”层元素的氧化剥离,同时引入可控的表面官能团,避免了传统氢氟酸刻蚀法产生的强结合—F 基团对材料性能的负面影响,且制得的 MXene 平均横向尺寸更大、刻蚀时间更短^[22-24]。研究表明,施加电压、电解液组成和反应温度是影响最终 MXene 材料结构和性能的关键参数^[25-28];适当提高电压,可加速刻蚀过程,但电压过高会导致过渡金属层过度氧化或刻蚀;电解液中 Cl^- 的质量分数和 Li^+ 的协同作用则直接影响表面端基的类型和分布;反应温度会影响刻蚀速率与 MXene 层状结构的完整性。该方法原料低廉、环境友好,且可实现对刻蚀过程的精

确调控,产品层间可直接获得良好的剥离效果。然而,其前期设备投入相对较高,且在反应效率与规模化可行性方面仍存在一定局限,亟需进一步优化与改进。

1.5 碱刻蚀法

水热碱刻蚀法作为 MXene 材料制备技术的一种非氟方法,因其环境友好性和结构可控性备受关注。该技术通过强碱性介质在高温高压水热环境下实现 Al 基 MAX 前驱体的制备,其核心机理在于:当碱质量分数与温度达到临界条件时, Ti_3AlC_2 等 MAX 相中的 Al 原子层发生选择性脱嵌反应,同时表面形成羟基终端基团,从而实现 MXene 的定向合成^[29-30]。



如上述反应方程(1)、(2)所示,该过程本质上是层间 Al 元素的脱嵌反应与表面羟基化修饰的过程。研究显示,Al 的氧化剥离需克服表面氧化铝或氢氧化铝的钝化层阻力,而高温环境和高 pH 可有效促进层间脱铝反应并抑制 Ti 骨架的氧化降解。该技术已成功拓展应用于 Mo 基 MAX 材料的刻蚀。研究表明:相较于 LiOH、KOH 等碱液,采用 NaOH 可更高效制备 Mo_2CT_x 产物,且刻蚀剂的质量分数与反应效率呈正相关^[31-33]。该方法在现有主流制备工艺中成本最低,兼具原料易得、成本低廉、工艺简便及环境友好等优势。然而,其对“A”层元素的去除选择性不足,往往导致产物伴随结构缺陷和表面杂质,整体工艺的成熟度与普适性仍有待进一步探索和完善。

1.6 其他制备方法

除上述方法外,研究人员还探索了其他无氟体系刻蚀路线。化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)技术通过气相前驱体在高温基底的表面反应实现原子尺度可控合成,目前 Ti_2CCl_2 、 Ti_2NCl_2 、 Zr_2CCl_2 等 MXene 品种已通过该工艺成功制备^[34],该工艺展现出 ± 2 nm 级薄膜厚度控制与厘米级连续薄膜制备的优势,其原子级表面平整度和边缘规整性为构筑高性能电子器件提供了理想材料平台;紫外诱导刻蚀技术主要是利用紫外光子能量超越 MAX 相中 M—A 键的解离能,选择性氧化“A”层原子并保留过渡金属碳/氮化物骨架,实现常

温常压下非接触微米图案化 MXene 制备,避免了高毒性与高能耗。目前该技术已在 Mo_2C MXene^[35]、 Mo_2CT_x ^[36] 制备中取得成功,但其适用对象仍主要局限于紫外响应较敏感的材料体系,在其他类型 MXene 的合成研究中相关成果相对较少,且工艺的稳定性与可重复性仍有待验证。此外,在氨基协同刻蚀体系研究中,Zhu 等^[37] 利用 NH_4Cl -DMSO 复合体系在对 $\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{C}$ MAX 相刻蚀的过程中同步构筑表面 MoS_2 /体相 Mo_2CT_x 异质结;在溴基复合刻蚀体系研究中,Wang 等^[38] 发现使用纯 HBr 、 $\text{LiBr} + \text{HBr}$ 、 $\text{NaBr} + \text{HBr}$ 、 $\text{NH}_4\text{Br} + \text{HBr}$ 等溶液作为刻蚀介质也可以成功制备出 Mo_2CT_x 。

2 MXene 材料的分类

2.1 多孔凝胶结构

MXene 纳米片在实际应用中由于范德华力的作用容易产生层间堆叠现象,导致比表面积降低以及离子传输通道受限,不利于其实际应用性能的充分发挥。构建多孔凝胶结构不仅可以显著提升材料的比表面积,暴露更多活性位点,还能形成三维互联通道以加快离子与电子的传输。多孔 MXene 凝胶主要分为气凝胶和水凝胶两类。

MXene 气凝胶是一种以二维 MXene 材料为基础构建的多孔三维网络结构,具有高孔隙率、低密度和结构可调节的优点。然而,凝胶网络在被压缩时容易塌陷,需复合其他材料增强结构的机械性能。例如,在 CNF-MXene 复合气凝胶制备中,纤维素纳米纤维与 MXene 片层通过强氢键相互作用自组装成为较为稳定结构,外覆 TPU/SiAPP 涂层进一步提升了机械稳定性与阻燃性能,使其在多次压缩循环后仍能恢复原始厚度^[39]。原位发泡技术是制备 MXene 多孔结构的主要方法。Su 等^[40] 采用胍诱导发泡技术结合纤维素纳米纤维增强策略,通过真空过滤制备 MXene/CNF 复合薄膜后经胍蒸气热膨胀形成层间距显著扩大的多级孔泡沫结构(图 1)。与此同时,Cheng 等^[41] 也通过胍诱导发泡技术实现了 MXene 气凝胶的快速制备,如图 2 所示详细描述了这一过程:首先将 MXene 纳米片溶液与 CNF 混合均匀,真空过滤该溶液得到二维层状的 MXene/CNF 复合薄膜;然后置于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的水合胍密闭环境中发泡,复合膜因气体的产生快速膨胀,内部成孔,转化为三维多孔 MXene 气凝胶;其中 CNF 由于具有良好的热稳定性和机械强度插入到 MXene 气凝胶层

间,增强了气体发泡效果。然而,由于发泡法在制备过程中受到反应时间、温度和压力等限制,气泡的生成和稳定性很难精确控制,难以在高精度和高稳定性下实现大规模多孔 MXene 的制备。

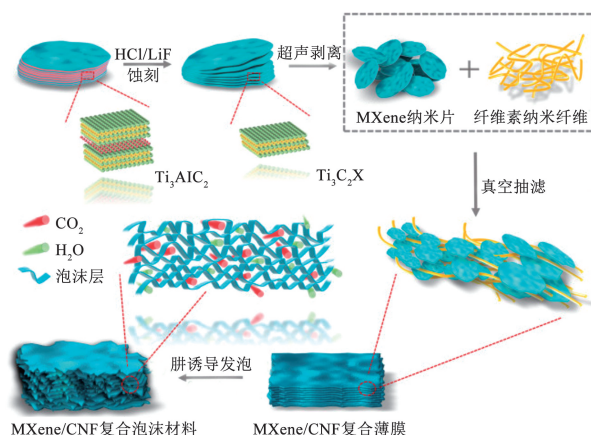


图 1 MXene/CNF-泡沫的制备程序^[40]

Fig. 1 Preparation procedure of MXene/CNF-foam^[40]

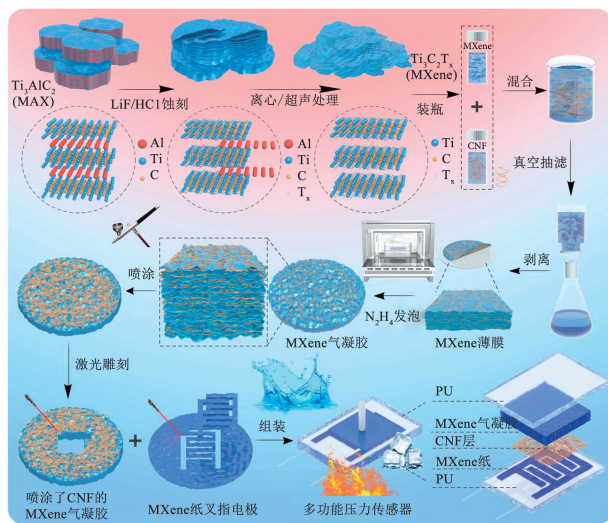


图 2 MXene 气凝胶水合胍气体发泡制备工艺^[41]

Fig. 2 MXene aerogel hydrazine hydrate gas foaming preparation process^[41]

MXene 水凝胶是一类由二维过渡金属碳化物或氮化物纳米片交联组装而成的三维多孔网络材料。其片层结构与石墨烯相似,表面分布着—OH、—F、—O 等官能团,这些基团不仅赋予 MXene 优异的亲水性,还为其与聚合物基体的结合提供了足够的化学锚点。MXene 水凝胶通常采用诱导复合、化学交联的方式制备^[42-43]。在交联作用下,MXene 片层与水凝胶基体形成稳定的空间网络:片层通过堆叠或有序排列建立导电通路,聚合物骨架则起到力学支撑和稳定环境的作用。在此基础上,研究发现通过调节冷冻速率、单体质量分数、交联密度等参数,可以进一步优化 MXene 水凝胶的微观结构^[44-46]。

在功能化研究方面,现有试验通常引入金属纳米颗粒、导电高分子或生物分子以提升其性能,例如利用苯基硼酸与羟基的可逆结合实现自修复,或在 SiO_2 表面包覆聚多巴胺增强韧性^[47-51]。

2.2 薄膜结构

MXene 材料的层状结构源于其二维过渡金属碳/氮化物晶体构型,通过选择性蚀刻 MAX 相前驱体中的“A”层原子而获得,这种化学剥离过程使材料保留高度有序的原子层堆叠特征且层间距可调。其单层结构由 Ti、V 等过渡金属与碳/氮原子形成的紧密六方晶格构成,表面的一OH、—F 等官能团不仅赋予材料亲水性,还通过氢键等相互作用影响层间自组装行为。当通过真空抽滤、旋涂或 Langmuir-Blodgett 等方法将 MXene 纳米片组装成薄膜时,纳米片间的堆叠会形成具有定向排列特征的宏观结构,这种多级有序性使薄膜在保持高导电性的同时,展现出优异的力学柔性和透光性^[52-54]。

薄膜中纳米片的边缘效应和缺陷分布情况会显著影响离子传输路径。通过有机分子交联以及不同维度纳米材料的插层设计,可有效调控 MXene 层状膜的传输通道,在膜内构建由“微腔-面内孔-层间通道”组成的 3 级传质网络,为高功率储能和精密分离器件提供新的设计思路^[55]。在有机分子交联研究方面,利用官能团的定向键合作用于 MXene 表面,可形成稳定的亚纳米通道:甘氨酸(Gly)的羧基与 MXene 表面羟基通过氢键组装可形成致密网络,采用两者制备的 Gly-3@MX-3 膜在保持 $7.50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 通量的同时可实现 86.28% 的 Na_2SO_4 截留率^[56];将聚多巴胺(Polydopamine, PDA)与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片交联,通过真空辅助过滤法制备的复合膜在施加 -1.1 V 电压及引入 Mg^{2+} 调控下,其 K^+ 传输开关比高达 9.9, K^+/Li^+ 选择性达到 40.9,性能远超 electrically gated 膜^[57]。在插层改性方面,不同维度的纳米材料可进一步强化 3 级传质网络:采用零维 Ag 颗粒填充微腔区域,可使局部电导率提高 210%,实现 $354.29 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 的超高通量(图 3)^[58];一维碳纳米管 CNTs 贯穿层间,形成低迂曲度的直通孔道,使水通量提升至 $1270 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,并实现 100% 的 CV 染料截留率(图 4)^[59];二维 COF 纳米片与 MXene 交替堆叠可构建面内异质界面,通过尺寸排阻与静电排斥的共同作用提升分离精度(图 5)^[60]。这些改性方法通过多级通道共同作用表现出显著优势:微腔可储存电解液、扩大离子接触面积;面内孔可缩短垂直

扩散路径;层间通道则结合尺寸筛分与 Donnan 效应,实现对离子的精确选择。

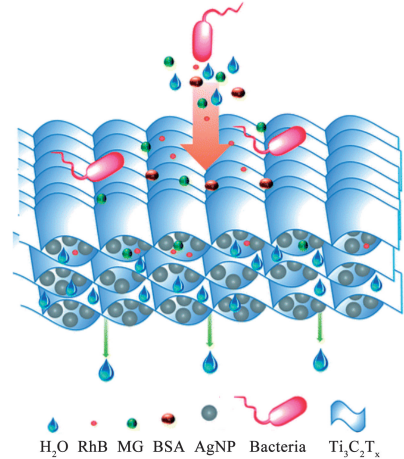


图 3 Ag@MXene 复合膜的结构示意^[58]

Fig. 3 Structure of Ag@MXene composite membrane^[58]

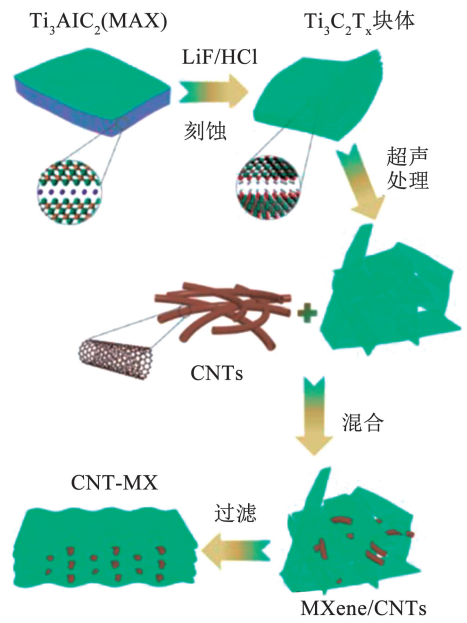


图 4 异质结构 CNT-MX 膜的制备示意^[59]

Fig. 4 Preparation of CNT-MX film with heterogeneous structure^[59]

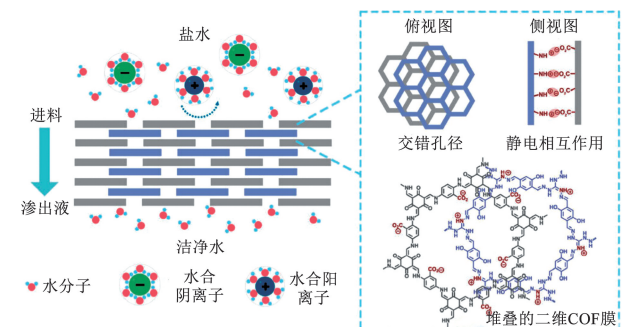


图 5 分子与离子高效筛分的紧密交错堆叠二维 COF 膜示意^[60]

Fig. 5 Tightly staggered stacked two-dimensional COF membranes for efficient molecular and ionic sieving^[60]

2.3 织物结构

MXene 材料织物结构的设计策略在于将 MXene 晶体构型与纺织基底的表面特征相结合,形成多级功能化网络。常用的制备方法包括湿法纺丝、离子交联及原位化学还原技术,其关键在于将 MXene 纳米片与石墨烯、金属氧化物或聚合物复合形成多级异质纤维体系,可显著提升纤维的机械强度和电化学活性。Xie 等^[61]采用微流控辅助湿法纺丝技术,如图 6 所示,通过在变径微通道中引导 MXene 与氧化石墨烯纳米片轴向定向排列,成功构建出三维有序、比表面积达 $50.14 \text{ m}^2/\text{g}$ 的 rGO/MXene 复合纤维,并以此为基础组装了柔性锌离子混合超级电容器,为精准调控纳米片排布提供了重要技术突破。MXene 织物保留了普通织物的柔软可弯曲特性,同时具备优异的导电性、电化学活性和环境稳定性,在可穿戴电子、柔性储能等领域展现出广阔的应用潜力。作为应变传感器佩戴于手腕时, MXene 织物能够精准、稳定地捕捉细微的脉搏信号,即便在拉伸或弯曲状态下也能保持灵敏响应^[62];作为超级电容器电极时,其超过 $1000 \text{ F}/\text{cm}^3$ 高体积电容和循环稳定性使其成为柔性电子设备的理想电源^[63];在电磁波吸收方面,通过调控导电率与异质界面结构, MXene 织物能够实现宽频段的高效吸收,为复杂环境下电子设备提供可靠的电磁防护^[64]。

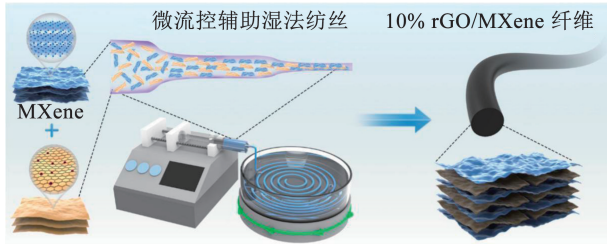


图 6 rGO/MXene 复合纤维制备工艺^[61]

Fig. 6 Preparation process of rGO/MXene composite fiber^[61]

MXene 织物的性能优势主要源于以下两部分:一方面, MXene 纳米片具备高导电性以及丰富的表面官能团,这种特性为多种功能的开发与集成提供了基础;另一方面,纤维内部构建的机械互锁网络与异质结构能够有效分散应力,大幅提升材料的抗疲劳性和环境稳定性。随着界面化学调控和器件集成技术逐渐成熟, MXene 织物已经在自供电传感系统中实现机械能-电能转换^[65],并有望在更多领域实现技术革新。

2.4 球形/颗粒结构

MXene 材料的球形/颗粒结构是 MXene 研究领域的重要创新方向。通过物化方法将二维 MXene 纳米片重新排列成三维球状或颗粒状形态,不仅保

留了 MXene 出色的导电性、表面化学活性和机械强度,还通过构建三维传输网络显著提升了材料的比表面积、离子传输效率以及环境稳定性。

MXene 材料的球形或颗粒结构设计,正成为突破其二维片层固有限制的关键途径。该结构通常采用模板法进行制备,通过引入可牺牲的聚合物微球作为模板,依靠静电作用或氢键吸引使 MXene 自发包裹在模板表面形成复合物,再通过高温退火或溶剂溶解去除模板,即可获得具有空心结构的 MXene 球体。Zhao 等^[66]通过将 PMMA 微球与 MXene 分散液混合形成 PMMA@MXene 复合物,经退火分解 PMMA 后成功制备出 MXene 空心球。Yang 等^[67]创新性采用超声喷雾热解技术将 MXene 与聚苯乙烯微球共混后在高温下形成多孔褶皱球(图 7),该一步法工艺相较于传统制备方法更加简便高效,同时还能够精确调控球体尺寸和孔隙率。Wu 等^[68]进一步拓展复合结构设计,通过 PDDA 修饰的 PS 模板静电自组装 MXene 纳米片,再包覆 ZIF67 金属有机框架,高温碳化后获得中空 MXene/多壁碳纳米管@C-Co 微球(图 8)。该结构中 C-Co 外骨架提供机械支撑,内向生长的碳纳米管形成导电网络,使材料在 2.04 mm 厚度下的有效吸收带宽达到 5.67 GHz ,最小反射损耗降至 -70.70 dB 。

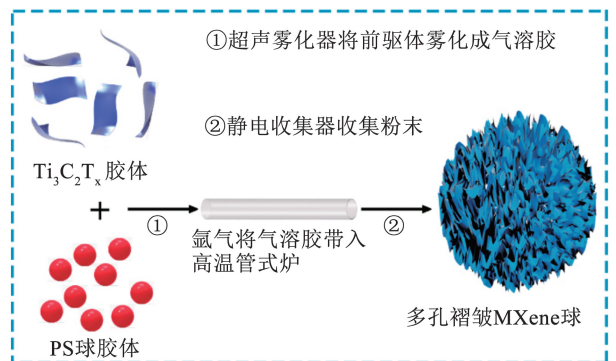


图 7 多孔皱缩 MXene 球体的合成过程示意^[67]

Fig. 7 Synthesis process of porous shrunk MXene spheres^[67]

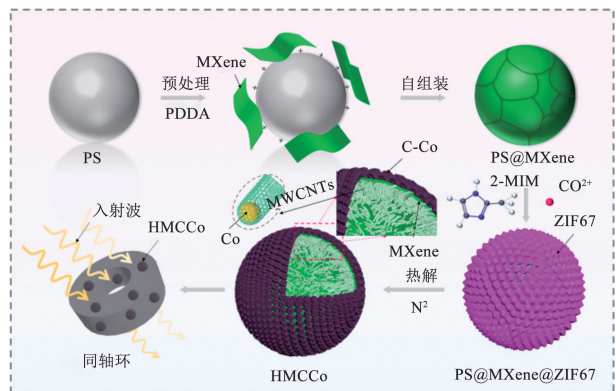


图 8 HMCCo 吸波材料合成过程示意^[68]

Fig. 8 Schematic diagram of the synthesis process of HMCCo absorbing material^[68]

综上所述, MXene 球形/颗粒结构的性能优势主要源自以下方面: 1) 多孔网络结构能够显著增大比表面积, 为各种化学反应提供更多的活性位点, 从而提高电化学反应效率; 2) 三维排列结构有助于优化离子传输路径, 以此来降低扩散的阻力; 3) 球形/颗粒结构的尺寸、壁厚和孔隙率都可以按照实际需要调节, 方便根据不同应用场景进行有针对性地优化。

3 MXene 材料在交通领域的应用

3.1 在道路防/除冰方面的应用

在冬季低温或高寒地区, 道路表面常因接触 0 °C 以下的过冷水滴、雪雾或湿气而迅速结冰, 形成一层光滑的冰膜。这种冰层会显著降低轮胎与路面的摩擦力, 不仅延长制动距离, 还容易引发转向失控

和侧滑, 大大增加交通事故风险。此外, 冰层的反复生成与融化还会在交通基础设施中累积结构应力, 加速路面和构件的老化与损坏。传统的道路防/除冰方法主要依赖化学融雪剂、机械刮除设备或电加热系统^[69], 但这些技术普遍存在效率低、能耗高、污染环境 and 腐蚀设备等问题。因此, 开发兼具高效性与环保性的全新防/除冰技术, 已成为确保道路冬季安全通行、减轻环境负担并延长基础设施使用寿命的迫切需求。

研究发现, MXene 相较于氧化石墨烯、碳纳米管等传统光热转换材料具有更出色的光热转换能力, 能够直接吸收太阳光并将其转化为热能实现防/除冰^[70-71], 表 1 对比了 MXene 与常见典型二维光热转换材料的关键特性。

表 1 MXene 与常见光热转化材料特性对比

Tab. 1 Comparison of properties between MXene and common photothermal conversion materials

材料类型	光热转换效率/%	消光系数/($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$)	材料特点	文献
MXene	最高可超过 97	最高可达 43.5	比表面积大、设计灵活性强, 复合后可实现超疏水、多重防冰机制	[72-74]
石墨烯基材料(GO, RGO)	20~45	20.0~30.0	强度高、导电导热性优异	[75-76]
黑磷	25~40	2.0~20.0	具有良好的热导率, 面临体积膨胀、环境稳定性差的问题	[76-77]
过渡金属硫族化合物 (Ta_2NiS_5 , SnS , $MoSe_2$)	20~50	8.0~30.0	机械强度优异, 热导率高, 面临体积膨胀与结构粉化的问题	[76, 78-79]

MXene 光热涂层主要通过被动防冰和主动除冰两种机制实现防/除冰: 被动防冰依靠其超疏水表面低表面能的特性, 让水滴难以附着, 从而降低路面结冰率; 主动除冰则利用 MXene 的光热效应, 在光照下快速升温, 将已经形成的冰层高效融化。两种机制协同调控, 使材料即使在严寒高湿的环境中, 也能保持持久的防冰性能, 并显著缩短除冰时间。近年来, 研究发现可通过引入等离子体金属纳米颗粒或构建三维多孔网络结构增强材料对太阳光的捕获能力。Wang 等^[80]开发的 $fSiO_2/MXene@Au-WPU$ 涂层(图 9)利用金纳米颗粒的局域表面等离子体共振效应, 将光吸收范围扩展至近红外波段, 在低温和高湿度条件下依然具有 1 053 s 的超长防冰时间, 除冰效率高达 73.1%, 同时能抵抗 pH 1 ~ pH 13 的腐蚀性液体。此外, 还可以采用聚合物复合 MXene 提升其防/除冰能力。如图 10 所示, Xue 等^[81]设计的 MXene/PEI 复合薄膜在 PEI 基底上构建微柱阵列, 复合 MXene 纳米材料, 使得水滴冻结时间延长 7 倍,

同时, 在近红外光照下可从 10 s 内使温度从 20 °C 升高到 90 °C, 19 s 内完全融化表面冰滴。

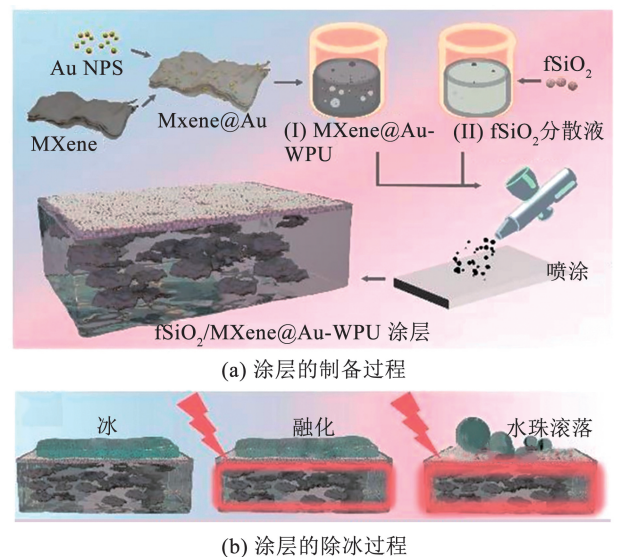


图 9 $fSiO_2/MXene@Au-WPU$ 涂层制备及其除冰性能示意^[80]
Fig. 9 Preparation processes of $fSiO_2/MXene@Au-WPU$ coating and its de-icing performance^[80]

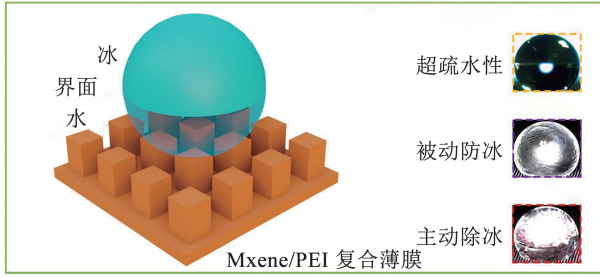


图 10 MXene/PEI 薄膜防/除冰示意^[81]

Fig. 10 Anti-icing/de-icing schematic diagram of MXene/PEI film^[81]

MXene 在道路防/除冰领域主要以光热超疏水涂层形式应用,尤其是在隧道出入口、桥梁、急弯陡坡等关键易结冰路段的防护方面具有广阔的应用前景,然而其实际用于道路环境时仍面临多重挑战。当前研究的重点在于提升复合涂层的耐久性和环境适应性,以应对实际使用中可能出现的光照不足、机械磨损以及长期暴露于复杂气象条件下的化学稳定性问题。研究发现可通过调控 MXene 纳米片层的堆叠结构、引入多级微纳复合保护层或构筑自修复功能层等方法^[82-84]来提升涂层在反复冻融循环、车辆轮胎摩擦及紫外线辐射环境中的服役寿命。与此同时,开发低能耗的 MXene 宏量制备工艺、探索废旧涂层的可回收再利用途径以及评估全生命周期内的环境效益,亦是实现该技术绿色化、规模化落地的关键环节。

3.2 在交通防腐蚀方面的应用

在交通领域,交通设施材料腐蚀问题始终是影响使用寿命的重要因素。传统环氧煤焦沥青防腐蚀涂层、生漆、富锌环氧涂层在高盐雾、高湿度环境下防腐蚀能力下降明显,平均寿命仅 2 ~ 5 a^[85-87]。而 MXene 凭借其纳米级“双层屏障 + 电化学协同保护”机制,可显著提升涂层的防护性能与耐久性:MXene 二维层状结构可形成致密屏障,有效降低腐蚀介质的扩散速率;丰富的表面官能团可以与金属基体或复合材料基体形成强结合,提高整体结构的稳定性。此外,部分氧化生成的 TiO₂ 颗粒可进一步阻滞腐蚀进程,而其类金属导电性则有助于提升电化学保护效果。凭借这些特性, MXene 成为应对交通设施腐蚀问题的理想材料,尤其在车辆金属部件、轨道交通和海洋交通工具等面临严苛运行环境的领域中具有重要应用价值。

在车辆金属部件防腐蚀方面的研究,Wang 等^[88]采用两步电沉积法制备了厚度约为 11 μm 的 MXene/壳聚糖复合涂层,通过致密多级网络结构显著抑制酸性介质渗透,防腐蚀机理见图 11。制备的涂层腐蚀电流密度降低至 7.046×10^{-6} A/cm²,比

未涂层铝合金降低了约 180 倍,同时该涂层磨损率低至 1.147×10^{-2} mm³N⁻¹m⁻¹,不仅有效实现了物理阻隔,同时还增强了材料表面耐磨性能,为新能源汽车的电池组外壳、底盘支架等部件提供轻量化与防腐性能保障。在轨道交通领域,Cai 等^[89]开发了 ZRE-Ti₃C₂T_x@PDA 功能化树脂涂料(图 12),通过化学键合与物理互锁表面改性技术,有效解决了 MXene 在树脂中分散不均且稳定性差的问题,所制备的涂层在 $w(\text{NaCl}) = 3.5\%$ 溶液中浸泡 4 周后低频阻抗值达到 $3.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$,是纯富锌环氧涂层的 3 倍,且电荷转移电阻值比纯富锌环氧涂层高约 1 个数量级,可显著提升材料的耐腐蚀性和使用寿命,可应用于高速列车和桥梁等重大装备防腐养护。综上所述, MXene 复合涂层凭借其优异的防腐蚀性能,可有效保护车辆和轨道交通部件免受酸雨、盐雾及工业废气等腐蚀性介质的侵蚀,为提升设备耐久性和使用寿命提供了一种切实可行的新路径。

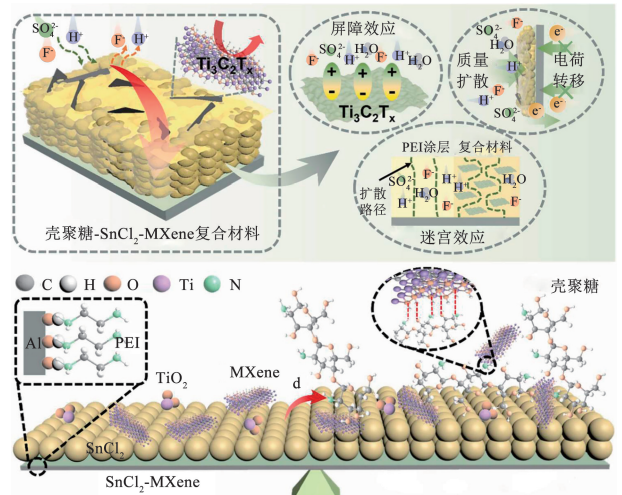


图 11 MXene/壳聚糖复合涂层防腐蚀机理示意^[88]

Fig. 11 Anticorrosion mechanism diagram of MXene/chitosan composite coating^[88]

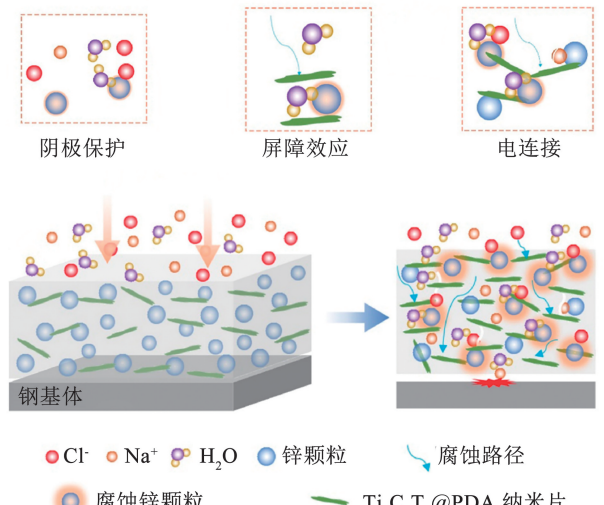


图 12 ZRE-Ti₃C₂T_x@PDA 防腐蚀机制示意^[89]

Fig. 12 ZRE-Ti₃C₂T_x@PDA anticorrosion mechanism diagram^[89]

海洋交通工具防腐蚀是 MXene 材料应用的另一重要领域。海洋环境中的高盐度、高湿度以及氯离子侵蚀对船舶和海上平台金属结构造成了严重威胁。吴洪杰等^[90]通过将亲油型 MXene 与熟桐油、生漆复合,制备出适用于海洋环境的复合涂层,当改性剂添加量的质量分数为 3% 时,腐蚀速率下降 2 个数量级, MXene 的二维层状结构和表面官能团使其能够有效阻隔海水中的腐蚀离子,同时与生漆等传统防腐蚀材料的协同作用进一步增强了涂层的耐盐雾和耐老化性能;曹美文等^[91]通过在金属表面硅烷膜中引入 MXene 纳米颗粒进行杂化,制备了具有超疏水和光催化抗菌功能的金属表面防护涂层,该涂层利用低表面能硅烷膜物理隔绝与粗糙结构捕获空气层的双重阻隔机制提升金属耐腐蚀性,同时借助 MXene 在光照下产生的单线态氧高效抑制生物腐蚀。尽管 MXene 在交通防腐蚀领域的应用已取得显著进展,但仍面临规模化制备成本高、界面相容性不足,以及长期稳定性等问题。

总体而言, MXene 在交通防腐蚀领域主要是制成防腐涂层材料进行应用,尤其是在海上风电塔筒与桩基^[92]、油气运输高温输油管道^[93]、船舶壳体,以及桥梁隧道钢构件^[94-95]等重大基础设施的防护方面具有重要的应用价值和前景。随着研究的深入和技术的进步, MXene 有望为交通基础设施的长效防腐蚀提供更先进的解决方案。

3.3 在基础设施电磁屏蔽方面的应用

在现代交通体系中,随着电子设备的大规模集成,电磁干扰已成为影响交通基础设施可靠性的重要因素。交通信号控制系统、通信基站、轨道监测设备,以及智能路侧单元等关键基础设施长期暴露于复杂电磁环境中,易受 5G 基站、雷达系统等外部高频电磁场的干扰,导致信号传输失真、设备误触发甚至系统瘫痪。通过高效电磁屏蔽技术抑制电磁干扰,不仅能保障交通控制系统的稳定运行,还能提升路网通信的精确性与响应速度,为智能交通管理提供技术保障。

传统电磁屏蔽材料多以金属涂层为主,在现代交通应用中面临严峻挑战:在 GHz 级高频环境下, Cu-Ni/Cu-Zn 涂层若要维持有效的屏蔽性能,通常需要增加涂层厚度,这直接带来质量增加和结构厚度问题^[96]; Cu 涂层在应用于弯曲结构或复杂几何连接器时与基底的结合力较弱,结构适配性有限,且其抗氧化与耐湿性能较弱,在湿热循环或盐雾环

境中易发生性能衰减,最终导致屏蔽效率大幅下降^[97-98]。MXene 凭借其超高电导率、独特的二维层状结构及可化学修饰的特性,通过表层自由电子形成的感应电流可将 99% 以上电磁波转化为热能耗散,是一种颇具发展前景的电磁屏蔽材料。Shahzad 等^[99]于 2016 年制备的 $Ti_3C_2T_x$ MXene 薄膜在 X 波段其电磁屏蔽效能可达到 92 dB,使得该材料在电磁屏蔽领域受到广泛关注;后续该团队通过氮原子取代制得了一种 Ti_3CNT_x MXene 薄膜,在 X 波段的总屏蔽效能高达 116 dB,显著高于同等厚度下的 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜^[100]。MXene 薄膜的优异电磁屏蔽性能主要来源于其超高的导电性和层状堆叠的纳米片结构,其电磁屏蔽机理可以解释为:当电磁波入射到 MXene 薄膜表面时,由于高导电性 MXene 表面有丰富的自由电子,会引起与空气界面处的高度阻抗失配,大多数电磁波被反射;剩余的电磁波会穿过 MXene 晶格结构,与 MXene 相互作用产生高电子密度的涡流,导致欧姆损耗,从而衰减电磁能量;残存的电磁波依次进入下一层纳米片结构,重复上述吸收与反射过程,直至能量被逐层削弱并最终耗散。此外, MXene 表面官能团在交变电磁场作用下,产生局部偶极子引起偶极化也可以衰减电磁能量。

为拓宽 MXene 薄膜的工程适用性,可通过结构设计创新与界面强化技术开发兼具高强韧性与高效电磁屏蔽的复合材料:Shao 等^[101]通过剪切诱导原位成纤与真空辅助过滤技术,构建了屏蔽效能高达 $10\ 421.3\ dB \cdot cm^2 \cdot g^{-1}$ 的 PTFE-CNT- Fe_3O_4 /MXene Janus 复合膜(图 13),其中采用厚度 $59.2\ \mu m$ 的蚕丝状 PTFE-CNT- Fe_3O_4 层作为柔性支撑体, $25.7\ \mu m$ 的致密 MXene 层作为导电屏蔽层,二者通过氢键与范德华力紧密结合,使复合膜拉伸强度提升至传统 MXene 薄膜的 5 倍且弯曲循环后屏蔽效能保持稳定;Liu 等^[102]采用分层冷冻干燥技术制备了 (MXene@Ni/PNF)-(MXene/PNF) 气凝胶(图 14),其中 MXene@Ni/PNF 作为吸收层, MXene/PNF 作为反射层,形成“吸收-反射-再吸收”机制,这种非对称结构在实现 71.00 dB 高屏蔽效能的同时抗压强度达 1.20 MPa,解决了传统 MXene 气凝胶易坍塌的问题;唐婕等^[103]利用细菌纤维素纳米纤维为模板,原位聚合聚吡咯形成 $PPy@BC$ 柔性导电网络后与 MXene 通过氢键组装,以此抑制堆叠并分散应力使复合薄膜拉伸强度达 24.73 MPa,较纯 MXene 提升 10 倍同时保持 63.89 dB 的屏蔽效能。

这些研究通过异质层状构建、纳米纤维桥接及界面相互作用优化,实现了力学性能与电磁屏蔽性能的有效平衡。

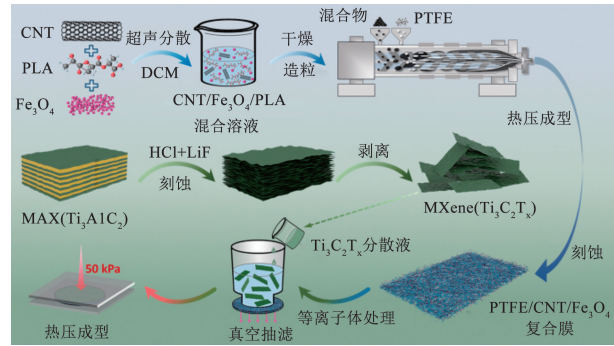


图 13 PTFE-CNT-Fe₃O₄/MXene Janus 复合膜剪切诱导原位成纤和真空辅助过滤技术制备流程示意^[101]

Fig. 13 PTFE-CNT-Fe₃O₄/MXene Janus composite membrane shear induced in situ fiber formation and vacuum assisted filtration technology preparation process diagram^[101]

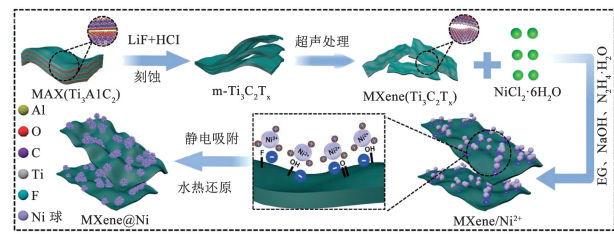


图 14 (MXene@Ni/PNF)-(MXene/PNF) 气凝胶分层冷冻干燥技术制备示意^[102]

Fig. 14 (MXene@Ni/PNF)-(MXene/PNF) aerogel layered freeze-drying preparation schematic diagram^[102]

近年来, MXene 材料在电磁屏蔽领域的轻量化研究取得了显著进展,其核心在于通过结构设计、材料复合和界面调控等手段,在降低材料密度的同时保持甚至提升屏蔽效能。Wang 等^[104]开发的空心蛋壳结构 MXene 复合膜(图 15)通过引入多孔框架减少材料用量,将 12.4 GHz 频率下的屏蔽效能提升至 69.19 dB,同时密度仅为 0.82 g/cm³ 远低于传统金属屏蔽材料,为车载电子设备的轻量化防护提供了新思路。类似地, Pan 等^[105]受多孔生物结构启发,制备的 MXene 基仿生泡沫材料(图 16)展现出 109 152.4 dB·cm²·g⁻¹ 的超高屏蔽效能,其密度仅为 35.2 mg/cm³ 且具备抗褶皱和超薄特性,适用于智能网联汽车的毫米波雷达和 5G 通信模块的电磁防护。在超轻量级材料方向, Zeng 等^[106]制备的 MXene/CNF 气凝胶(图 17)通过定向细胞壁设计实现了 8.0 mg/cm³ 的超低密度与 74.60 dB 的 EMI 屏蔽效能。这种气凝胶结合了纤维素纳米纤维的结构导向作用与 MXene 的导电优势,通过单向冰

样冷冻干燥法形成各向异性蜂窝状结构,既解决了 MXene 易团聚的问题,又通过孔隙率调控优化了电磁波的多重反射与吸收。此外, Ghaffarkhah 等^[107]采用丝状结构液体界面组装与可控模板技术,制备了 Ti₃C₂T_x/氧化石墨烯冷冻凝胶(图 18),密度仅为 3~7 mg/cm³,无需化学还原即可实现 33 000~50 000 dB·cm²·g⁻¹ 的屏蔽效能,为交通系统在复杂电磁环境下的超轻量化防护提供了新方案。

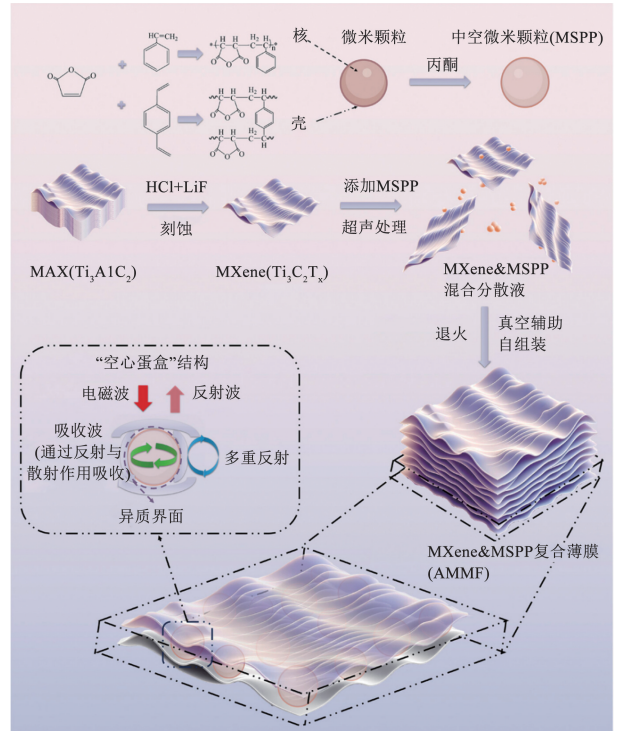


图 15 MSPP、MXene 和 AMMF 复合膜制备过程示意^[104]

Fig. 15 A schematic diagram of the preparation process of MSPP, MXene and AMMF composite membranes^[104]

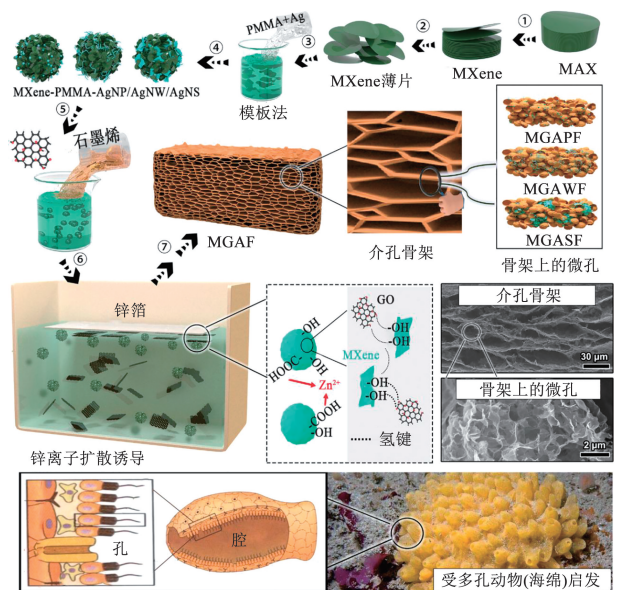


图 16 MXene 基仿生泡沫材料 MGAF 制备过程示意^[105]

Fig. 16 Schematic diagram of the preparation process of MXene-based biomimetic foam material MGAF^[105]

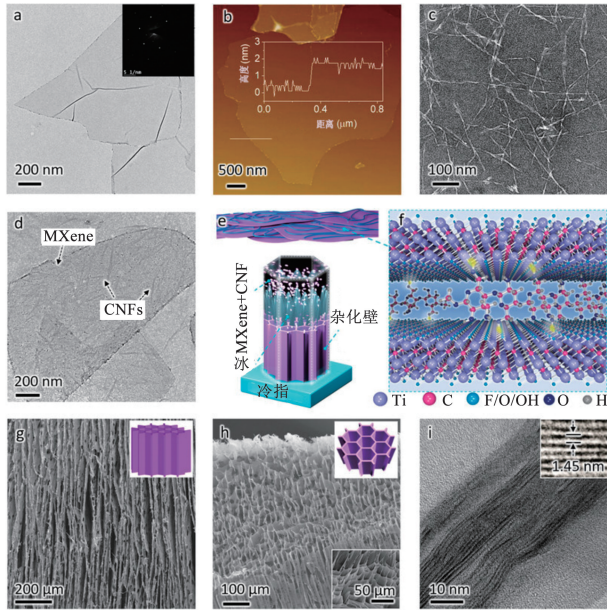


图 17 MXene/CNF 仿生杂化气凝胶结构图^[106]

Fig. 17 Structure diagram of MXene/CNF biomimetic hybrid aerogel^[106]

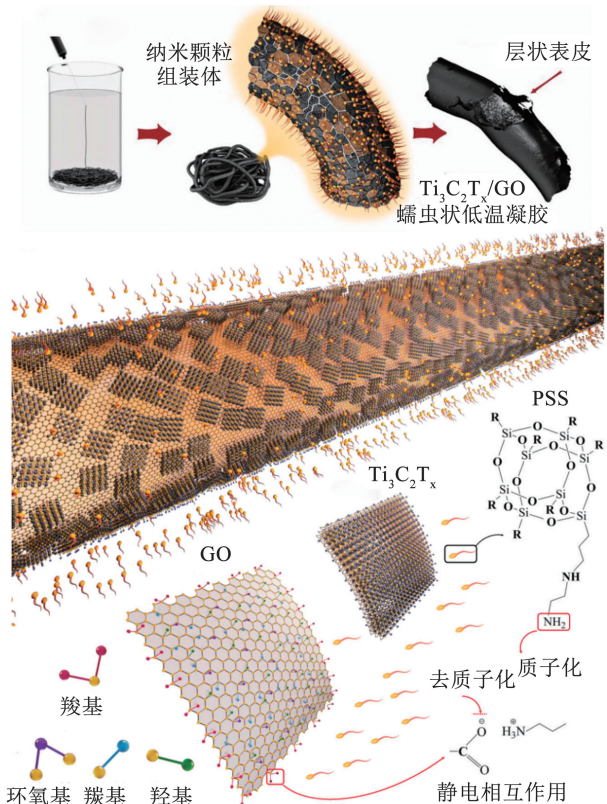


图 18 $Ti_3C_2T_x/GO$ 液态纤维合成及粒子-配体相互作用示意^[107]

Fig. 18 $Ti_3C_2T_x/GO$ liquid fiber synthesis process and particle-ligand interaction schematic diagram^[107]

综上所述, MXene 在交通基础设施电磁屏蔽中的应用主要体现在以下方面: 其复合材料可用于制造轻质、高效的电磁屏蔽涂层或薄膜, 应用于交通通信系统中可有效提升抗电磁干扰能力, 避免设备故障与系统瘫痪; 针对交通基础设施配套的数据管理

需求, 数据中心可借助 MXene 动态屏蔽技术, 实现对电磁环境的灵活管理; 通过异质结构设计, MXene 还可增强电磁波吸收能力, 适用于雷达吸波与隐身技术, 在军用交通设施的隐身需求上展现出重要的应用潜力。

4 结 论

本文主要综述了 MXene 的制备方法及其近年来在交通领域中的应用进展。从道路防/除冰技术的创新, 到交通防腐防护及基础设施电磁屏蔽材料的轻量化设计, MXene 为解决现代交通系统中日益复杂的材料需求提供了全新的技术路径, 其高比表面积、多维结构设计、优异的光热转换效率, 以及与多种材料体系的兼容性, 使其成为连接基础研究与工程应用的关键桥梁。本文的主要结论如下:

1) 制备方法多样化, 但绿色化与规模化仍是核心挑战。MXene 的制备已从最初的氢氟酸直接刻蚀法, 发展到原位生成氢氟酸刻蚀法、熔融盐刻蚀法、电化学刻蚀法, 以及碱刻蚀法等多种路线, 不同方法在终端基团调控、产物纯度及安全性上各有优劣。然而, 当前多数方法依赖高腐蚀性试剂或高温高压条件, 使得设备维护与废液处理面临高额费用, 且材料成品得率普遍较低, 不利于材料的大规模生产。

2) 多维结构设计是性能突破的关键。通过构建多孔凝胶、薄膜、织物, 以及球形颗粒等多维结构, 可有效抑制 MXene 纳米片的再堆叠, 显著提升其比表面积、暴露更多活性位点, 并优化离子/电子传输路径, 最高可实现 100% 的材料截留率。然而, 在极端温度、高湿或复杂电磁环境中如何保持 MXene 材料性能的持久性仍然是当前研究重点, 其长期稳定性、机械强度, 以及环境适应性都有待通过界面调控、结构优化等技术进一步提升。

3) 在交通领域展现出巨大的应用潜力, 但距工程化落地仍有距离。MXene 材料在高效光热除冰道路涂层、交通基础设施与载具的防腐涂层, 以及轻质高性能电磁屏蔽材料三大方向的应用研究已取得突破性进展, 可实现 73.1% 的超高光热除冰效率、金属腐蚀速率下降 2 个数量级、电磁屏蔽效能突破 $10^5 \text{ dB} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 证明了其“一材多效”的特性。然而, 这些成果目前多局限于实验室环境, 其室外长期耐久性尚未得到充分验证, 且在实际交通应用场景中缺乏成熟的智能响应机制, 亟需开发能够实时感知环境变化并动态调整材料结构与性能的技术, 以确保其在复杂工况下依然能够持续稳定运行。

4) 未来研究可聚焦于开发材料的智能响应与

自适应功能。研发具有环境自感知能力的 MXene 复合材料,使其能够实时感知温度、湿度、荷载与冰雪覆盖等外部环境变化,并通过本征功能自响应机制在感知环境信号后启动微观结构重构与宏观性能调节,从而提升材料在极端温度、机械应力及电磁干扰等动态环境下的适应性与稳定性。

参考文献

- [1] LUKATSKAYA M R, KOTA S, LIN Zifeng, et al. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides [J]. *Nature Energy*, 2017, 2: 17105. DOI: 10.1038/nenergy.2017.105
- [2] ZHANG Chuanfang, NICOLOSI V. Graphene and MXene-based transparent conductive electrodes and supercapacitors [J]. *Energy Storage Materials*, 2019, 16: 102. DOI: 10.1016/j.ensm.2018.05.003
- [3] TANG Qing, ZHOU Zhen, SHEN Panwen. Are MXenes promising anode materials for Li ion batteries? computational studies on electronic properties and Li storage capability of Ti_3C_2 and $Ti_3C_2X_2$ ($X = F, OH$) monolayer [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(40): 16909. DOI: 10.1021/ja308463r
- [4] NAGUIB M, UNOCIC R R, ARMSTRONG B L, et al. Large-scale delamination of multi-layers transition metal carbides and carbonitrides "MXenes" [J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(20): 9353. DOI: 10.1039/C5DT01247C
- [5] 叶家铭, 胡专. MXene 的制备及其在锂离子电池中的应用研究进展 [J]. *河南化工*, 2025, 42(3): 5
YE Jiaming, HU Zhuan. The preparation of MXene and its application research progress in lithium ion battery [J]. *Henan Chemical Industry*, 2025, 42(3): 5. DOI: 10.14173/j.cnki.hnhg.2025.03.015
- [6] ANAYEE M, WANG Ruocun, DOWNES M, et al. Layer-by-layer mechanism of the MAX phase to MXene transformation [J]. *Matter*, 2025, 8(6): 102092. DOI: 10.1016/j.matt.2025.102092
- [7] NAGUIB M, MOCHALIN V N, BARSOUM M W, et al. 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(7): 992. DOI: 10.1002/adma.201304138
- [8] BARSOUM M W, GOLCZEWSKI J, SEIFERT H J, et al. Fabrication and electrical and thermal properties of Ti_2InC , Hf_2InC and $(Ti, Hf)_2InC$ [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, 340(1/2): 173. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00107-X
- [9] 薛茂权. Ti_3AlC_2 在氢氟酸溶液中的低温腐蚀行为 [J]. *材料保护*, 2019, 52(9): 25
XUE Maoquan. Corrosion behavior of Ti_3AlC_2 in hydrofluoric acid solution at low temperature [J]. *Material Protection*, 2019, 52(9): 25. DOI: 10.16577/j.cnki.42-1215/th.2019.09.004
- [10] 马亚楠, 张传坤, 罗啸, 等. 新型二维层状材料 MXene 的制备方法研究 [J]. *材料科学*, 2017, 7(4): 463
MA Yanan, ZHANG Chuankun, LUO Xiao, et al. Synthesis of a novel two dimensional material; MXene [J]. *Material Sciences*, 2017, 7(4): 463. DOI: 10.12677/MS.2017.74061
- [11] ZHANG Xinyue, ZHANG Wu, ZHAO Haitao. Comparative study on fabrication and energy storage performance of $Ti_3C_2T_x$ MXene by using hydrofluoric acid and in situ forming of hydrofluoric acid-based approaches [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(11): 15559. DOI: 10.1002/er.8252
- [12] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, et al. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene) [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(18): 7633. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b02847
- [13] GURZĘDA B, BOULANGER N, NORDENSTRÖM A, et al. Pristine MXene: in situ XRD study of MAX phase etching with HCl + LiF solution. [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(48): 2408448. DOI: 10.1002/advs.202408448
- [14] GHIDIU M, KOTA S, HALIM J, et al. Alkylammonium cation intercalation into Ti_3C_2 (MXene): effects on properties and ion-exchange capacity estimation [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(3): 1099. DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b04234
- [15] GHIDIU M, KOTA S, DROZD V, et al. Pressure-induced shear and interlayer expansion in Ti_3C_2 MXene in the presence of water [J]. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaa06850. DOI: 10.1126/sciadv.aaa06850
- [16] GHIDIU M, LUKATSKAYA M R, ZHAO Mengqiang, et al. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance [J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 78. DOI: 10.1038/nature13970
- [17] WANG Libo, ZHANG Heng, WANG Bo, et al. Synthesis and electrochemical performance of $Ti_3C_2T_x$ with hydrothermal process [J]. *Electronic Materials Letters*, 2016, 12(5): 702. DOI: 10.1007/s13391-016-6088-z
- [18] URBANKOWSKI P, ANASORI B, MAKARYAN T, et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene) [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(22): 11385. DOI: 10.1039/C6NR02253G
- [19] LI Mian, LU Jun, LUO Kan, et al. Element replacement approach by reaction with Lewis acidic molten salts to synthesize nanolaminated MAX phases and MXenes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(11): 4730. DOI: 10.1021/jacs.9b00574
- [20] LI Youbing, SHAO Hui, LIN Zifeng, 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. DOI: 10.1038/s41563-020-0657-0
- [21] 盛杰. 基于 MXene 的酶-金属级联催化体系构建及其在绿色手性合成与有机磷降解中的应用研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2025
SHENG Jie. Construction of enzyme-metal cascade catalytic system based on MXene and its application in green chiral synthesis and organophosphorus degradation [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2025. DOI: 10.27312/d.cnki.gshsu.2025.000010
- [22] ÖPER M, YORULMAZ U, SEVIK C, et al. Controlled CVD growth of ultrathin Mo_2C (MXene) flakes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(2): 025304. DOI: 10.1063/5.0067970
- [23] RAVURI S, WROBEL P S, GORANTLA S, et al. High yield and wide lateral size growth of α - Mo_2C : exploring the boundaries of CVD growth of bare MXene analogues [J]. *Nanotechnology*, 2024, 35(15): 155601. DOI: 10.1088/1361-6528/ad1c97
- [24] MA Guoliang, SHAO Hui, XU Jin, et al. Li-ion storage properties of two-dimensional titanium-carbide synthesized via fast one-pot method in air atmosphere [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5085. DOI: 10.1038/s41467-021-25306-y
- [25] YANG Sheng, ZHANG Panpan, WANG Faxing, et al. Fluoride-free synthesis of two-dimensional titanium carbide (MXene) using a binary aqueous system [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(47): 15491. DOI: 10.1002/anie.201809662
- [26] YANG Sheng, RICCIARDULLI A G, LIU Shaohua, et al. Ultrafast delamination of graphite into high-quality graphene using alternating currents [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2017, 56(23): 6669. DOI: 10.1002/anie.201702076
- [27] LUKATSKAYA M R, HALIM J, DYATKIN B, et al. Room-temperature carbide-derived carbon synthesis by electrochemical

- etching of MAX phases [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(19): 4877. DOI: 10.1002/anie.201402513
- [28] CHAN K C, GUAN Xiang, ZHANG Teng, et al. The fabrication of Ti_3C_2 and Ti_3CN MXenes by electrochemical etching[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(37): 25165. DOI: 10.1039/D4TA03457K
- [29] LATIF F E A, KHALID M, NUMAN A, et al. Microwave-assisted hydrothermal synthesis of $Ti_3C_2T_x$ MXene: a sustainable and scalable approach using alkaline etchant [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2025, 1329: 141407. DOI: 10.1016/j.molstruc.2025.141407
- [30] LI Tengfei, YAO Lulu, LIU Qinglei, et al. Fluorine-free synthesis of high-purity $Ti_3C_2T_x$ ($T = OH, O$) via alkali treatment [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(21): 6115. DOI: 10.1002/anie.201800887
- [31] UNNIKRISHNAN B, WU C W, SANGILI A, et al. Synthesis and in situ sulfidation of molybdenum carbide MXene using fluorine-free etchant for electrocatalytic hydrogen evolution reactions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 628: 849. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.07.176
- [32] GUO Yitong, ZHANG Xin, JIN Sen, et al. Synthesis of Mo_2C MXene with high electrochemical performance by alkali hydrothermal etching[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, 12(10): 1889. DOI: 10.26599/jac.2023.9220795
- [33] ZHANG Qingxiao, HE Jing, FU Xueli, et al. Fluorine-free strategy for hydroxylated Ti_3C_2/Ti_3AlC_2 catalysts with enhanced aerobic oxidative desulfurization and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132950. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132950
- [34] WANG Di, ZHOU Chenkun, FILATOV A S, et al. Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes[J]. *Science*, 2023, 379(6638): 1242. DOI: 10.1126/science.add9204
- [35] MEI Jun, AYOKO G A, HU Chunfeng, et al. Two-dimensional fluorine-free mesoporous Mo_2C MXene via UV-induced selective etching of Mo_2Ga_2C for energy storage [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, 25: e00156. DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00156
- [36] THOMAS T, PUSHPAN S, AGUILAR MARTÍNEZ J A, et al. UV-assisted safe etching route for the synthesis of Mo_2CT_x MXene from Mo-In-C non-MAX phase [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(24): 35384. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.08.342
- [37] ZHU Shuang, WANG Changda, SHOU Hongwei, et al. In situ architecting endogenous heterojunction of MoS_2 coupling with Mo_2CT_x MXenes for optimized Li^+ storage [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(5): 2270036. DOI: 10.1002/adma.202270036
- [38] WANG Fengling, JIN Sen, DU Yaqiong, et al. Preparation of Mo_2CT_x MXene as co-catalyst for H_2 production by etching of pure/mixed HBr solution [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 136: 109922. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.109922
- [39] WANG Hengrui, JIANG Yue, MA Zhewen, et al. Hyperelastic, robust, fire-safe multifunctional MXene aerogels with unprecedented electromagnetic interference shielding efficiency [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(49): 2306884. DOI: 10.1002/adfm.202306884
- [40] SU Tuoyi, LIU Nishuang, GAO Yihua, et al. MXene/cellulose nanofiber-foam based high performance degradable piezoresistive sensor with greatly expanded interlayer distances[J]. *Nano Energy*, 2021, 87: 106151. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106151
- [41] CHENG Yongfa, LI Li, LIU Zunyu, et al. 3D porous MXene aerogel through gas foaming for multifunctional pressure sensor[J]. *Research*, 2022, 2022: 9843268. DOI: 10.34133/2022/9843268
- [42] CHEN Hongwu, MA Hongyun, ZHANG Panpan, et al. Pristine titanium carbide MXene hydrogel matrix [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10471. DOI: 10.1021/acsnano.0c04379
- [43] ZHANG Boya, WU Zhitan, LI Fangbing, et al. Unlocking unprecedented gravimetric capacitance in thick electrodes through conformal densification of robust MXene hydrogels [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(48): 2511313. DOI: 10.1002/adfm.202511313
- [44] HU Chen, LIU Ji, LI Changjun, et al. Anisotropic MXene/poly (vinyl alcohol) composite hydrogels with vertically oriented channels and modulated surface topography for efficient solar-driven water evaporation and purification [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(10): 13060. DOI: 10.1021/acsmi.3c18661
- [45] LIU Ying, TIAN Guoxing, DU Yingjie, et al. Highly stretchable, low-hysteresis, and adhesive TA@MXene-composited organohydrogels for durable wearable sensors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(30): 2315813. DOI: 10.1002/adfm.202315813
- [46] 杨晓玲, 王秋萍, 黄文俊, 等. 多功能双网络复合水凝胶及其制备方法与应用: CN118852818B [P]. 2025-10-24
- [47] WANG Haoyu, HAN Ping, YU Ying, et al. Multifunctional flexible MXene/TA@CNC electronic hydrogel patch with robust adhesion and self-healing properties for wearable electronics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160329. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160329
- [48] GE Gang, ZHANG Yizhou, ZHANG Wenli, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene-activated fast gelation of stretchable and self-healing hydrogels: a molecular approach [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2): 2698. DOI: 10.1021/acsnano.0c07998
- [49] LIU Yicheng, ZOU Xiang, LUO Bin, et al. Cascaded MXene/Metal-Organic framework system enables rapid gelation of ultrastretchable and high-toughness conductive hydrogels for multifunctional wearable electronics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 503: 158288. DOI: 10.1016/j.cej.2024.158288
- [50] LIU Ji, MCKEON L, GARCIA J, et al. Additive manufacturing of Ti_3C_2 -MXene-functionalized conductive polymer hydrogels for electromagnetic - interference shielding [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(5): 2106253. DOI: 10.1002/adma.202106253
- [51] 董昊, 范雨新, 张旭, 等. 生物基导电水凝胶及其在柔性电子器件的应用 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1): 104
- DONG Hao, FAN Yuxin, ZHANG Xu, et al. Bio-based conductive hydrogels and their application to flexible electronic devices [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(1): 104. DOI: 10.13801/j.cnki.hfclxb.20240604.005
- [52] 王伟, 王恩会, 杨涛, 等. 自支撑二维 $Ti_3C_2T_x$ (MXene) 薄膜电学性能 [J]. *工程科学学报*, 2021, 43(6): 808
- WU Wei, WANG EnHui, YANG Tao, et al. Electrochemical performance of self-assembled two-dimensional $Ti_3C_2T_x$ (MXene) thin films [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(6): 808. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.12.05.001
- [53] VAHIDMOHAMMADI A, ROSEN J, GOGOTSI Y. The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes) [J]. *Science*, 2021, 372(6547): eabf1581. DOI: 10.1126/science.abf1581
- [54] 刘俊杰, 杨雯杰, 杨伟, 等. MXene 基薄膜的有序组装及其在储能和电磁干扰屏蔽中的应用 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(8): 2404
- LIU Junjie, YANG Wenjie, YANG Wei, et al. Ordered assembly of MXene based composite films and their applications in energy storage and electromagnetic interference shielding [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2404. DOI: 10.13801/j.cnki.hfclxb.20210408.001
- [55] 刘荣, 徐泽海, 张国亮. 面向分子筛分的 MXene 层状纳滤膜的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(5): 2457

- LIU Rong, XU Zehai, ZHANG Guoliang. Development of MXene layered nanofiltration membrane for molecular sieving [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42 (5): 2457. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240821.003
- [56] LUO Haiyu, XU Nan, LI Yanan, et al. Amino acid-bonded $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanofiltration membranes with superior antifouling property for enhanced water purification [J]. *Journal of Membrane Science*, 2024, 693: 122384. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122384
- [57] WANG Xu, ZHANG Haiguang, WEI Gaoliang, et al. Comediation of voltage gating and ion charge in MXene membrane for controllable and selective monovalent cation separation [J]. *Science Advances*, 2024, 10(49): eado3998. DOI: 10.1126/sciadv.ado3998
- [58] PANDEY R P, RASOOL K, MADHAVAN V E, et al. Ultrahigh-flux and fouling-resistant membranes based on layered silver/MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) nanosheets [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(8): 3522. DOI: 10.1039/C7TA10888E
- [59] DING Mingmei, XU Hang, CHEN Wei, et al. Construction of a hierarchical carbon nanotube/MXene membrane with distinct fusiform channels for efficient molecular separation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(43): 22666. DOI: 10.1039/D0TA07354G
- [60] WANG Jingfeng, ZHANG Xiaoming, SHEN Ruichen, et al. Staggered-stacking two-dimensional covalent organic framework membranes for molecular and ionic sieving [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(51): 34698. DOI: 10.1021/acsnano.4c10274
- [61] XIE Fanyu, DU Yuan, CHU Menghan, et al. Microfluidic-oriented assembly of MXene composite fibers for flexible zinc ion supercapacitors with high energy density [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 513: 162864. DOI: 10.1016/j.cej.2025.162864
- [62] SEYEDIN S, UZUN S, LEVITT A, et al. MXene composite and coaxial fibers with high stretchability and conductivity for wearable strain sensing textiles [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(12): 1910504. DOI: 10.1002/adfm.201910504
- [63] LIANG Qidi, LIU Kun, XU Ting, et al. Interfacial modulation of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene by cellulose nanofibrils to construct hybrid fibers with high volumetric specific capacitance [J]. *Small*, 2024, 20(17): 2307344. DOI: 10.1002/smll.202307344
- [64] DU Jiani, LI Tian, LI Jiatong, et al. Design of flexible MXene/graphene-based fiber fabrics for broadband electromagnetic wave absorption [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2025, 7(3): 811. DOI: 10.1007/s42765-025-00523-y
- [65] FAN Jiacheng, YUAN Mengmeng, WANG Libo, et al. MXene supported by cotton fabric as electrode layer of triboelectric nanogenerators for flexible sensors [J]. *Nano Energy*, 2023, 105: 107973. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107973
- [66] ZHAO Mengqiang, XIE Xiuqiang, REN Change, et al. Hollow MXene spheres and 3D macroporous MXene frameworks for Na-ion storage [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(37): 1702410. DOI: 10.1002/adma.201702410
- [67] YANG Zijie, LV Siyuan, ZHANG Yueying, et al. Self-assembly 3D porous crumpled MXene spheres as efficient gas and pressure sensing material for transient all-MXene sensors [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 56. DOI: 10.1007/s40820-022-00796-7
- [68] WU Ze, TAN Xiuli, WANG Jianqiao, et al. MXene hollow spheres supported by a C-Co exoskeleton grow MWCNTs for efficient microwave absorption [J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 107. DOI: 10.1007/s40820-024-01326-3
- [69] 刘易龙, 李建龙, 姚运梅. 高速公路融雪除冰技术探析及展望 [J]. *中国交通信息化*, 2025(增刊1): 278
- LIU Yilong, LI Jianlong, YAO Yunmei. Analysis and prospect of snow melting and deicing technology on expressway [J]. *China ITS Journal*, 2025, (Sup 1): 278. DOI: 10.13439/j.cnki.itsc.2025.S1.071
- [70] RONG Kun, WEN Cuilian, WEN Jiansen, et al. Hierarchical $\text{MoS}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ heterostructure with excellent photothermal conversion performance for solar-driven vapor generation [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2025, 41(6): 100053. DOI: 10.1016/j.actphy.2025.100053
- [71] ZHAO Yushun, YAN Cheng, HOU Tianqi, et al. Multifunctional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-based composite coatings with superhydrophobic anti-icing and photothermal deicing properties [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(22): 26077. DOI: 10.1021/acsami.2c07087
- [72] XUE Rong, WANG Kaiyuan, ZHAO Zhongguo, et al. Composite phase change materials with efficient solar-thermal energy conversion, storage and superior shape stability by interfacial enhancement [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 334: 119863. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119863
- [73] TANG Xinfeng, ZHU Yanhua, DUAN Delong, et al. Anionic solid solution MXene for low-dosage NIR-II tumor photothermal therapy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(42): 2305965. DOI: 10.1002/adfm.202305965
- [74] IGHALO J O, SMITH M L, AL MAYYABI A, et al. MXenes: exploiting their unique properties for designing next-generation thermal catalysts and photocatalysts [J]. *2D Materials*, 2025, 12(2): 022001. DOI: 10.1088/2053-1583/ada042
- [75] LI Yangeng, SUN Keyan, KOU Yan, et al. One-step synthesis of graphene-based composite phase change materials with high solar-thermal conversion efficiency [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 429: 132439. DOI: 10.1016/j.cej.2021.132439
- [76] LIN Han, CHEN Yu, SHI Jianlin. Insights into 2D MXenes for versatile biomedical applications: current advances and challenges ahead [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(10): 1800518. DOI: 10.1002/advs.201800518
- [77] 蒋运才, 李雪梅, 吴兆贤, 等. 黑磷的制备及储能应用研究进展 [J]. *无机盐工业*, 2021, 53(6): 59
- JIANG Yuncai, LI Xuemei, WU Zhaoxian, et al. Research progress on preparation and application in energy storage of black phosphorus [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2021, 53(6): 59. DOI: 10.19964/j.issn.1006-4990.2021-0245
- [78] 孙兰, 张龙, 马飞. 过渡金属硫族化合物二维晶体基复合材料的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2017, 36(1): 40
- SUN Lan, ZHANG Long, MA Fei. Research progress of two-dimensional transition metal dichalcogenide-based composites [J]. *Materials China*, 2017, 36(1): 40. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.01.06
- [79] AN Yongling, TIAN Yuan, WEI Chuanliang, et al. Dealloying: an effective method for scalable fabrication of 0D, 1D, 2D, 3D materials and its application in energy storage [J]. *Nano Today*, 2021, 37: 101094. DOI: 10.1016/j.nantod.2021.101094
- [80] WANG Jiaying, LI Peihang, YU Peng, et al. Efficient photothermal deicing employing superhydrophobic plasmonic MXene composites [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(4): 3035. DOI: 10.1007/s42114-022-00549-5
- [81] XUE Yiqing, WANG Yubo, SUI Xin, et al. Superhydrophobic, photothermal, MXene/PEI composite film with anti-icing and deicing properties [J]. *Materials Letters*, 2023, 347: 134638. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.134638
- [82] MA Xiaoqing, GONG Baolong, WANG Tiange, et al. Toward self-healing two dimensional MXene coatings for corrosion protection on metals: design strategies and mechanisms [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2025, 335: 103340. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103340

- [83] ZHAO Liang, BI Lingyi, HU Jiayue, et al. Universal salt-assisted assembly of MXene from suspension on polymer substrates [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10027. DOI: 10.1038/s41467-024-53840-y
- [84] WANG Shuangyi, WEI Jiasheng, ZHAO Peiyu, et al. Preparation of layer-by-layer assembled MXene-lignin/polyacrylonitrile nanocomposite film and its electromagnetic interference shielding performance [EB/OL]. (2025-06-21). <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220000.000000>
- [85] 周陈亮. 舰船涂料发展趋势分析 [J]. *船舶工业技术经济信息*, 2001(3): 40
ZHOU Chenliang. Development trend analysis of ship coatings [J]. *Technology and Economy Information of Ship Buildings Industry*, 2001(3): 40
- [86] TSUJINO Y, SATOH Y, KURAMOTO N, et al. Effects of acid deposition on urushi lacquer in east asia [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 130(1): 1487. DOI: 10.1023/A:1013977300867
- [87] 江涛, 冯立维, 杨光. 水性环氧石墨烯富锌涂料在冷藏集装箱上的应用 [J]. *中国涂料*, 2024, 39(11): 26
JIANG Tao, FENG Liwei, YANG Guang. Application of waterborne epoxy graphene zinc-rich coatings on refrigerated containers [J]. *China Coatings*, 2024, 39(11): 26. DOI: 10.13531/j.cnki.china.coatings.2024.11.005
- [88] WANG Tiange, MA Xiaoqing, GONG Baolong, et al. Relocation of surface potential induced stable corrosion resistance of thin MXene/chitosan composite coating on Al alloy bipolar plates in PEMFC environments [J]. *Corrosion Science*, 2025, 249: 112854. DOI: 10.1016/j.corsci.2025.112854
- [89] CAI Meng, HE Can, LI Wen, et al. Polydopamine-modified $Ti_3C_2T_x$ to enhance anticorrosion of waterborne zinc-rich epoxy coating [J]. *Carbon*, 2023, 215: 118467. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118467
- [90] 吴洪杰, 黄宇坤, 郑笑笑, 等. 亲油 Ti_3C_2 /熟桐油/生漆复合涂层制备及性能研究 [J]. *中国生漆*, 2024, 43(1): 36
WU Hongjie, HUANG Yukun, ZHENG Xiaoxiao, et al. Preparation and properties of oleophilic Ti_3C_2 /refined tung oil/raw lacquer composite coatings [J]. *Journal of Chinese Lacquer*, 2024, 43(1): 36. DOI: 10.19334/j.cnki.issn.1000-7067.2024.01.009
- [91] 曹美文, 聂焱, 王栋. MXene 杂化硅烷膜制备超疏水/抗菌金属表面防护涂层 [J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(3): 19
CAO Meiwen, NIE Yan, WANG Dong. MXene-hybridized silane film for construction of superhydrophobic/antibacterial metal surface protective coatings [J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2022, 41(3): 19. DOI: 10.19927/j.cnki.syzt.2022.03.004
- [92] GONG Baolong, MA Xiaoqing, WANG Tiange, et al. Emerging two dimensional MXene for corrosion protection in new energy systems; design and mechanisms [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2025, 336: 103373. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103373
- [93] FAN Baomin, LI Hang, ZHAO Jingmao, et al. Thermostable and defect-repairable urushiol nanocomposite protective coating crosslinked by sodium tartrate-stabilized $Ti_3C_2T_x$ [J]. *Corrosion Science*, 2025: 113074. DOI: 10.1016/j.corsci.2025.113074
- [94] MOSHKRIZ A, DARVISHI R, BARATI A, et al. Enhanced anticorrosion waterbased polyurethane coating using Schiff base functionalized MXene [J]. *Results in Materials*, 2025, 26: 100687. DOI: 10.1016/j.rinma.2025.100687
- [95] 朱东明, 徐慰玉, 汪培庆, 等. 一种桥梁钢外表面防腐涂层体系: CN117025055A [P]. 2023-11-10
- [96] JANG Jongmin, LEE H S, SINGH J K. Electromagnetic shielding performance of different metallic coatings deposited by arc thermal spray process [J]. *Materials*, 2020, 13(24): 5776. DOI: 10.3390/ma13245776
- [97] PERIYASAMY A P, VENKATARAMAN M, MILITKY J. Effect of sol-gel treatment on physical, chemical and mechanical stability of copper-coated conductive fabrics; focus on EMI shielding effectiveness [J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(44): 20780. DOI: 10.1007/s10853-022-07896-0
- [98] AGHASIBEIG M, BENHALIMA A, YU K R. Polymer metallization by cold spray deposition of polyamide-copper composite coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, 33(4): 882. DOI: 10.1007/s11666-024-01719-1
- [99] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes) [J]. *Science*, 2016, 353(6304): 1137. DOI: 10.1126/science.aag2421
- [100] IQBAL A, SHAHZAD F, HANTANASIRISAKUL K, et al. Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti_3CNT_x (MXene) [J]. *Science*, 2020, 369(6502): 446. DOI: 10.1126/science.aba7977
- [101] SHAO Runze, WANG Guilong, CHAI Jialong, et al. Multifunctional Janus-structured polytetrafluoroethylene-carbon nanotube- Fe_3O_4 /MXene membranes for enhanced EMI shielding and thermal management [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 136. DOI: 10.1007/s40820-025-01647-x
- [102] LIU An, QIU Hua, LU Xinghan, et al. Asymmetric structural MXene/PBO aerogels for high-performance electromagnetic interference shielding with ultra-low reflection [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(5): 2414085. DOI: 10.1002/adma.202414085
- [103] 唐婕, 李翔. MXene/PPy@BC 复合薄膜的制备及其电磁屏蔽性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1): 395
TANG Jie, LI Xiang. Preparation of high-strength MXene/PPy@BC composite films and their electromagnetic shielding properties [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(1): 395. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240320.005
- [104] WANG Yijie, ZHAO Chenxiang, TIAN Yunze, et al. Lightweight MXene composite films with hollow egg-box structures; enhanced electromagnetic shielding performance beyond pure MXene [J]. *Advanced Science*, 2025, 12(10): 2411932. DOI: 10.1002/advs.202411932
- [105] PAN Fei, SHI Yuyang, YANG Yang, et al. Porifera-inspired lightweight, thin, wrinkle-resistance, and multifunctional MXene foam [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(14): 2311135. DOI: 10.1002/adma.202311135
- [106] ZENG Zhihui, WANG Changxian, SIQUEIRA G, et al. Nanocellulose-MXene biomimetic aerogels with orientation-tunable electromagnetic interference shielding performance [J]. *Advanced Science*, 2020, 7(15): 2000979. DOI: 10.1002/advs.202000979
- [107] GHAFKARHAH A, HASHEMI S A, ROSTAMI S, et al. Ultra-flyweight cryogels of MXene/graphene oxide for electromagnetic interference shielding [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(50): 2304748. DOI: 10.1002/adfm.202304748