

·综述·

MXene 典型特性及其在碳纤维复合材料中应用的研究进展

崔美荣^{1,2} 吕雅玲^{1,2} 钱鑫^{2*} 郝梦圆² 张永刚² 沈江南¹

(1. 浙江工业大学化学工程学院, 杭州 310014; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所,
碳纤维制备技术国家工程实验室, 宁波 315201)

摘要: MXene 作为一种新型二维 (2D) 过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物, 具有优异的物理结构和优异的机械性能、导电性和磁学性能等, 因此在电化学储能、微波吸收、电磁屏蔽等不同领域广泛应用。碳纤维 (CF) 经过热处理和高温氧化制备而成, 导致表面光滑且缺乏活性基团, 不利于碳纤维与基体间的粘附性, 从而影响碳纤维复合材料的界面性能, 通常引入纳米颗粒对 CF 表面改性, 从而改善其粗糙度及赋予活性基团。因此, 可以将 MXene 通过其范德华力或氢键、离子键和共价键引入 CF 表面, 提高 CF 与基体的机械联锁效应, 使复合材料的界面性质增强或实现功能化应用。本文总结了 MXene 的各种合成方法、结构特征和属性, 讨论了采用不同技术在 CF 表面引入 MXene 进行改性增强复合材料界面性能及功能性应用的研究进展, 最后提出了 MXene 面临的挑战和在碳纤维复合材料中应用的发展前景。

关键词: 碳纤维; MXene; 复合材料; 应用

Research Progress on Typical Characteristic of MXene and Its Application in Carbon Fiber Composites

CUI Mei-rong^{1,2}, LV Ya-ling^{1,2}, QIAN Xin^{2*}, HAO Meng-yuan², ZHANG Yong-gang², SHEN Jiang-nan¹

(1. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. National Engineering Laboratory for Carbon Fiber Preparation Technology, Ningbo Institute of
Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: As a new type of two-dimensional (2D) transition metal carbide, nitride or carbon nitride, MXene has excellent physical structure and excellent mechanical properties, electrical conductivity and magnetic properties, so it is widely used in different fields, such as electrochemical energy storage, microwave absorption, electromagnetic shielding. Carbon fiber (CF) is prepared by heat treatment and high temperature oxidation, resulting in smooth surface and lack of active groups, which is not conducive to the adhesion between carbon fiber and matrix, resulting in the interface properties of carbon fiber composite materials. Nano particles are usually introduced to modify the surface of carbon fiber to improve its roughness and give active groups. Therefore, MXene is introduced into CF surface through its van der Waals force or hydrogen, ionic and covalent bonds to improve the mechanical interlocking effect between CF and matrix, thereby improving the interface properties of the composite materials or enabling functional applications. In this review, various synthesis methods, structural characteristics and properties of MXene are summarized, and the research progress of introducing MXene into carbon fiber surface modification by different technologies to enhance the interface properties and functional applications of composites are discussed. Finally, the challenges faced by MXene and the development prospect of its application in carbon fiber composites are put forward.

2024-08-10 收稿, 2024-09-25 录用, 2024-11-15 网络出版

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(基金号 2023M733598), 浙江省自然科学基金(基金号 Q24E030047)。

* 通信联系人: 钱鑫, E-mail: qx3023@nimte.ac.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.231

Keywords: Carbon fiber; MXene; Composites; Application

引用: 崔美荣, 吕雅玲, 钱鑫, 郝梦圆, 张永刚, 沈江南. MXene 典型特性及其在碳纤维复合材料中应用的研究进展. 高分子通报, 2025, 38(1), 58–74.

Citation: Cui, M. R.; Lv, Y. L.; Qian, X. Hao, M. Y.; Zhang, Y. G. A.; Shen, J. N. Research progress on typical characteristic of Mxene and its application in carbon fiber composites. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(1), 58–74.

2011 年, Naguib 等^[1]使用刻蚀法从前驱体 MAX 相成功合成了名为“MXene”的材料, MXene 是一系列新颖的二维层状结构纳米材料, 目前已发现和预测了 200 多种不同的组合。其结构式一般表示为 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1\sim4$), 其中 M 代表过渡金属, 包括 Ti、V、Nb、Ta、Cr、Mo 等; X 代表碳或氮, T_x 是指表面基团(通常为 $-O$ 、 $-OH$ 、 $-F$ 等), 如图 1 所示^[2-4]。M-X 键的共价特性和离子特性不仅使 MXene 具有优异的层间键合能力, 还使其表现出优异的机械性能、电学和磁学性能等, 极性基团的存在不仅增强了它们的化学反应性, 还赋予了它们特殊的表面特性, 如优异的亲水性和生物相容性, 因此在能源储存、光学、电学、电磁屏蔽及吸波与传感器等许多领域得到了实际应用^[5]。2015 年, Anasori 等^[6]证明了有序的双过渡金属 MXene 的存在, 如 $Mo_2Ti_2C_3T_x$ 、 $Cr_2TiC_xT_x$ 、

$Mo_2TiC_2T_x$ 等。他们发现结构化的双过渡金属 MXene 计算上已经预期了许多结构化稳定相, 但由于合成过程复杂, 可用的实验和表征研究有限^[7-9]。然而, 研究最广泛且技术成熟的仍是单过渡金属 MXene, 因此, 本文主要阐述单过渡金属 MXene。

碳纤维(CF)作为一种高性能纤维材料, 具有高强度、高模量、耐腐蚀、耐疲劳等优异性质, 通常用作各种先进复合材料的增强体, 被广泛应用于航空航天、汽车等各种领域^[10-12]。但 CF 经过高温处理(如碳化、石墨化等)制备而成^[13], 使 CF 表面光滑且缺乏活性官能团, 导致复合材料的性能较差^[14], 目前, 开发了多种对 CF 表面改性的方法以解决这个问题。经诸多研究证实, 将碳纳米管^[15]、石墨烯^[16]、纳米二氧化硅^[17]等性能优异的纳米材料引入到纤维表面, 可增加 CF 表面的活性

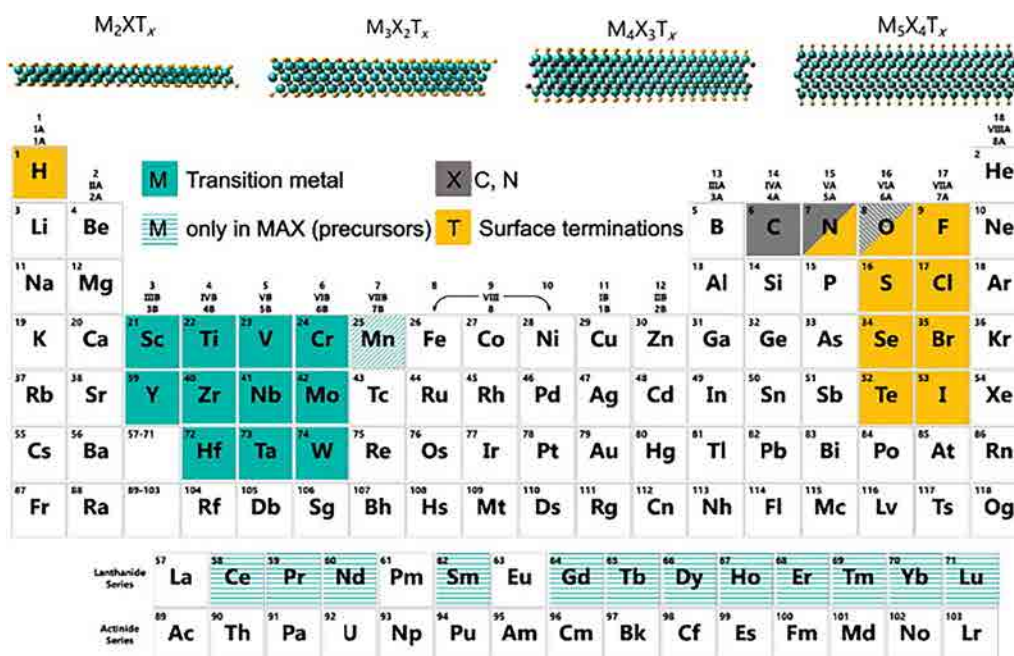


图 1 用于表示 MXene 的元素周期表(“M”表示金属元素(亮绿色背景);“X”表示非金属元素(灰色背景);“ T_x ”表示终端组元素(深黄色背景))^[4] (2024 Elsevier B.V. 版权许可)

Figure 1 The periodic table used to represent the MXenes. “M” represents the metal elements (green background); “X” represents the nonmetal elements (gray background); “ T_x ” means the terminal group elements (dark yellow background) (Reprinted with permission from Ref.[4]; Copyright 2024 Elsevier B.V.)

和粗糙度,从而提高纤维与基体之间的界面相互作用^[18]。MXene具有良好的层间成键性,并表现出比石墨烯和碳纳米管更优异的力学性质,比纳米二氧化硅更高的导电性和磁性以及相比金属纳米粒子更良好的亲水性,然而,将MXene通过采用不同技术引入到CF表面改性的研究备受关注。此外,MXene表面含有大量的富氧基团可以形成不同的键相互作用,如范德华力、氢键、离子键和共价键,这种键与键之间的相互作用会产生不同的键合作用和键合机制。因此,基于MXene的优异性能,引入CF表面来制备复合材料,不仅可以增强碳纤维复合材料界面性质,还可以将复合材料功能化适用于多领域。

本文首先系统总结了MXene常见的合成方法,包括氢氟酸蚀刻、原位氢氟酸蚀刻、熔盐蚀刻、电化学蚀刻和化学气相沉积法,分析了各种合成方法的优缺点;然后介绍了MXene的典型特征,并总结了MXene在碳纤维复合材料领域中的应用,最后阐述了MXene目前面临的挑战和展望以及在碳纤维复合材料应用中存在的问题和发展前景。

1 MXene常见的合成方法

随着对MXene合成方法的探索,已经开发了各种用于蚀刻MAX相的合成工艺,目前合成MXene最流行的方法是通过蚀刻剂将MAX相中的A层选择性去除,得到多层MXene,然后通过剥离形成单独的MXene薄片。除蚀刻剥离法外,还开发了新颖的化学气相沉积法等非蚀刻方法,本节将详细阐述MXene常见的合成方法。

1.1 氢氟酸蚀刻

使用氢氟酸(HF)蚀刻MAX相是合成MXene的第一种方法,它是通过使用HF作为腐蚀剂,蚀刻除掉 Ti_3AlC_2 上的Al原子层,由于Al层与F离子具有较高的反应活性,从而产生 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene。Gogotsi等^[1]首次使用HF选择性地蚀刻 Ti_3AlC_2 中的Al原子层,合成了呈手风琴结构的二维纳米材料 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$,生成具有 $-\text{OH}$ 、 $-\text{O}$ 或者 $-\text{F}$ 表面基团的 Ti_3C_2 ,图2为 Ti_3AlC_2 经HF处理前后的扫描电镜图(SEM),采用HF合成MXene的示意图如图3(a)所示^[19]。目前,HF蚀刻法已经成功用于合成更多的MXene家族,不同MAX相M-A键能的差异导致蚀刻条件的显著差异。该方

法还成功合成了 $\text{Mo}_x\text{V}_{4-x}\text{C}_3$ ^[20]、 Mo_2TiC_2 ^[21]等。该方法主要优点是HF蚀刻简单高效,但是HF是一种危险的腐蚀剂,因此,需要额外的安全防护措施。

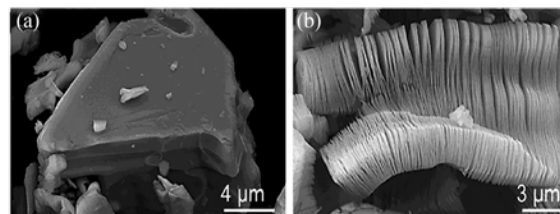


图2 (a) 处理前的 Ti_3AlC_2 颗粒,MAX相;(b) HF处理后的 Ti_3AlC_2 的SEM图^[19] (2012 American Chemical Society 版权许可)

Figure 2 (a) Ti_3AlC_2 particle before treatment, which is typical of unreacted MAX phases; (b) Ti_3AlC_2 after HF treatment (Reprinted with permission from Ref.[19]; Copyright 2012 American Chemical Society)

1.2 原位HF蚀刻

由于HF具有很强的腐蚀性,研究人员开发了通过酸和氟化物原位产生HF,采用这种HF进行A层靶向刻蚀以制备MXene^[22]。Ghidiu等^[23]首次展示了采用盐酸(HCl)和氟化锂(LiF)产生HF,使 Ti_3AlC_2 成功去除铝层,合成了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$,合成示意图如图3(b)所示^[24]。除LiF外,还报道了NaF、KF和 NH_4F 等不同氟盐均可作为刻蚀剂来刻蚀MAX相,在蚀刻过程中, NH_4^+ 、 Na^+ 或 K^+ 可以穿透MXene层间区域,增加层间距离,从而提高分层效率^[25]。通过采用原位HF蚀刻还成功制备了 V_2NT_x ^[26]、 Nb_2CT_x ^[27]、 Mo_2CT_x ^[28]等。该方法由于化学风险小、蚀刻过程能耗低,成为近年来制备MXene的首选方法。

1.3 熔盐蚀刻

熔融盐蚀刻是一种更安全的方法,通过使用Lewis酸盐可以合成难以制备的2D材料,扩大了MXene产品范围,并可使MXene的表面化学和性能得到调节。Wu等^[29]利用 SnCl_2 熔盐与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 反应,制备出的 $\text{Sn-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料,具有独特的夹层结构和较强的结构稳定性,合成示意图如图3(c)所示。Arole等^[30]采用 Nb_2AlC 与 SnF_2 加入反应,经熔盐蚀刻的 Nb_2CT_x 比酸蚀 Nb_2CT_x 具有更强的抗氧化稳定性。目前该方法尚未得到广泛应用,但它作为一种成本低的方法,有利于扩大MXene潜在应用。

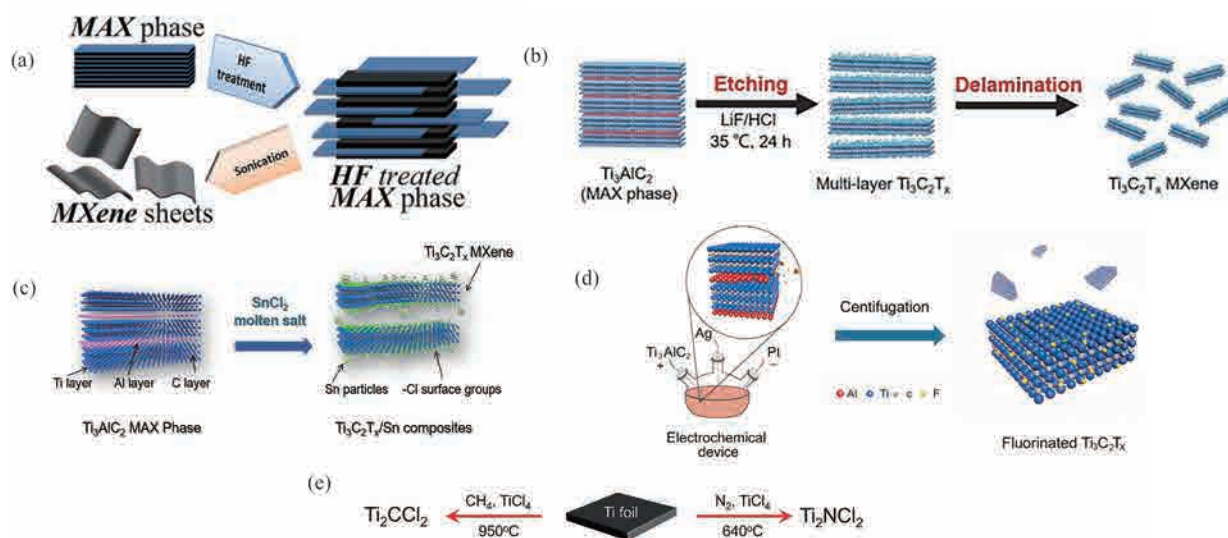


图3 (a) HF 刻蚀 MXene^[19] (2012 American Chemical Society 版权许可); (b) 原位 HF 刻蚀 MXene^[24] (2024 Elsevier Ltd. 版权许可); (c) 熔盐刻蚀 MXene^[29] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可); (d) 电化学刻蚀 MXene^[31] (2021 Elsevier Ltd. 版权许可) 和 (e) CVD 合成 MXene^[33] (2023 Science 版权许可) 示意图

Figure 3 Schematic diagram of (a) HF etching MXene (Reprinted with permission from Ref.[19]; Copyright 2012 American Chemical Society); (b) *in-situ* HF etching MXene (Reprinted with permission from Ref.[24]; Copyright 2024 Elsevier Ltd.); (c) molten salt etching MXene (Reprinted with permission from Ref.[29]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.); (d) electrochemical etching MXene (Reprinted with permission from Ref.[31]; Copyright 2021 Elsevier Ltd.) and (e) CVD synthesis MXene (Reprinted with permission from Ref.[33]; Copyright 2023 Science)

1.4 电化学蚀刻

电化学刻蚀是一种在无氟溶液中合成 MXene 的方法, 通过以 MAX 相为电极, 在稀释的 HCl 水溶液中一定电压下去除 Al 层, 将 Ti_2AlC 刻蚀生成 Ti_2CT_x , 产生 $-O$ 、 $-Cl$ 和 $-OH$ 末端。Yin 等^[31] 通过采用离子液体的电化学蚀刻来控制 $Ti_3C_2F_x$ MXene 的氟化程度, 在电化学过程中 F^- 与 Al 原子发生反应实现剥离, 合成路线见图 3(d)。电化学刻蚀方法提供了精准控制刻蚀过程, 通过调节电化学参数可以控制蚀刻的选择性和速率, 该方法通常用于研究 MXene 属性定制化等领域。

除了上述常见蚀刻法以外, 近年来化学气相沉积法 (CVD) 也被证明可在各种衬底上制造 2D 纳米材料和薄膜^[32], 该方法对 MXene 也有一定适用性, 例如, Wang 等^[33] 将 CH_4 、 $TiCl_4$ 和 Ar 作为稀释剂, 采用 CVD 法在 Ti 表面成功生成 MXene, CVD 反应示意图见图 3(e), 衬底上完全覆盖了一层皱褶的 Ti_2CCl_2 , 这对于传统合成的 MXene 来说是很难实现的。CVD 法能够以最少的杂质生长高纯度的 MXene, 因此它特别适用于合成高质量的 MXene, 具有精确控制的组成和均匀性。

近年来, MXene 的合成方法取得了重大的发

展, 为后续实验提供了多种选择, 表 1 则详细对比了不同合成方法的表面性质及优缺点。基于目前的合成技术只限于在实验室完成小产量的生产, 限制了 MXene 的规模化批量生产。等离子体增强脉冲激光沉积、原子层沉积和模板法等新技术合成 MXene 的方法也相继出现, 这些方法制备的 MXene 结晶度优于化学蚀刻制备的 MXene, 并且允许合成具有不同化学计量和异质结构的 MXene。然而, 为制备出高质量 MXene 并实现商业化生产, 有必要开发出更高效、更绿色的合成方法。

2 MXene 的结构特征及属性

2.1 结构特征

在 MAX 相中, MX 层和 A 层具有六角形交替堆叠结构, 并有 A 层插入, 而 MXene 与其先驱体 MAX 相类似, 也具有六角形晶体形状。MAX 相的多样性为 MXene 结构和性能调控提供了可能性^[34]。MXene 在蚀刻过程中会留下表面末端, 导致 MXene 表面分布着 $-O$ 、 $-OH$ 和 $-F$ 等端粒, 因此难以确定它们的确切位置。通常通过理论计算来研究结构特征, Ajmal 等^[35] 根据严格的计算机

表1 MXene不同合成方法的表面性质及其优缺点

Table 1 Surface properties of different MXene synthesis methods and their advantages and disadvantages

合成方法	表面性质	优点	缺点
氢氟酸蚀刻法	较多的缺陷和较小的横向尺寸、手风琴结构	简单有效	毒性大
原位 HF 蚀刻法	较大的层间距, 较少的缺陷	风险小、能耗低	刻蚀时间长
熔盐蚀刻法	结构稳定, 表面性质可调控, 但缺陷多	成本低	温度要求高
电化学蚀刻法	晶体横向尺寸大	刻蚀时间短	有衍生物产生, 产率低
CVD 法	可精准控制组成和均匀性	高温高压下较稳定	温度要求高, 产量不足

建模和模拟, 认为MXene具有hcp结构, 并且预估MXene中的M原子位于hcp晶格位置, 而X原子位于八面体间隙。

在MXene的通式 $M_{n+1}X_n$ 中, 目前已经确定三种不同的MAX相类型, 若 $n=1$, 则MXene层由单个八面体块组成; 若 $n=2$, 它包含两个八面体块; 若 $n=3$, 那么它包含三个八面体块, 结构如图4所示^[36]。Tang等^[37]根据 $Ti_3C_2T_x$ MXene中T官能团的取向不同, 总结了MXene的三种可能结构, A取向的T基团位于三个相邻C原子之间的空心位点上方或直接指向Ti(2)原子, B取向的T官能团位于同侧的C原子上方。其中I型结构两侧为A取向, II型结构两侧为B取向, III型结构一侧为A取向, 另一侧为B取向。三种结构中, I型结构是最稳定的, II型结构稳定性最差, 因此, 大多数MXene倾向于I型结构, 并表明官能团在 $Ti_3C_2T_x$

两侧也是随机分布的, 各官能团之间没有特定的顺序, 也没有特定的联系。

2.2 属性

MXene具有优异的导电性、机械性能、磁性、光学性能等, 在各种应用中也具有较好的效果, 并且可以改变其成分、形态和晶体结构以及控制其表面末端来调整MXene的性质^[38]。随着新的合成途径的发展, MXene的结构和化学成分可能会发生改变, 从而可以快速探索新的特征, 将为开发在碳纤维复合材料领域的潜在应用和其他尖端组件铺平道路。

2.2.1 导电性

由于MXene的金属性质, 它们具有高导电性, 其导电性受外部因素的影响, 如MAX的前驱体、MXene的合成条件、蚀刻后处理、超声处理等。根据蚀刻和分层条件的不同, $Ti_3C_2T_x$ 的测量

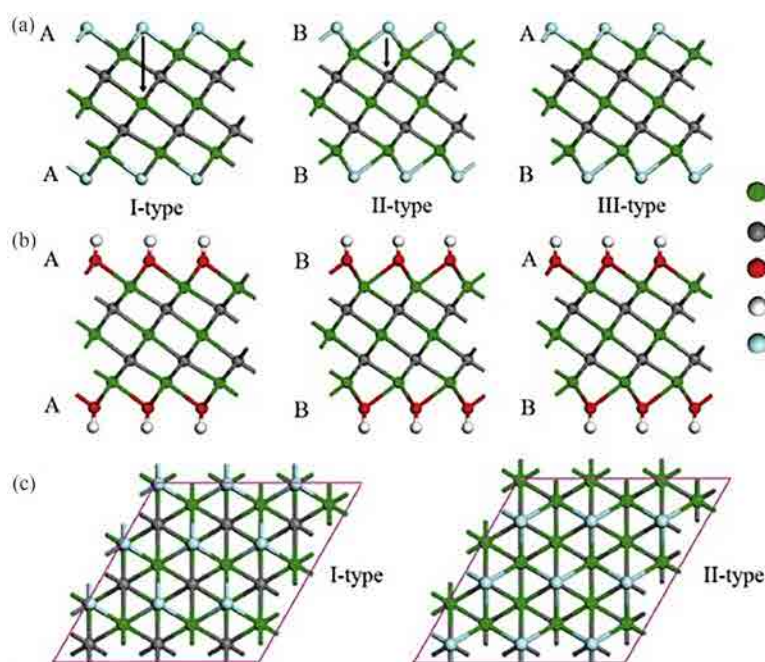


图4 (a) F-端和(b) OH-端 Ti_3C_2 ; (c) F端 I型和II型 Ti_3C_2 的俯视图^[36] (2017 Elsevier B.V. 版权许可)

Figure 4 Side view of (a) F-terminated and (b) OH-terminated Ti_3C_2 ; (c) Top view of F terminated I-type and II-type Ti_3C_2 (Reprinted with permission from Ref.[36]; Copyright 2017 Elsevier B.V.)

电导率范围从 $1000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 到大于 $20000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 使 MXene 比石墨烯具有更高的导电性^[39]; 同样, 在 $\sim 100 \text{ nm}$ 厚度范围内, MXene 薄膜的电阻率为 $3.4 \times 10^{-4} \Omega$ ^[40]。在 Shuck 等^[41]的研究中发现, 碳源对 MXene 的导电性有一定的影响, 石墨基前驱体生成的薄膜具有最高的导电性 ($\sim 4400 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$), TiC 生产的 MXene 具有相当的导电性 ($\sim 3480 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$), 炭黑生产的 MXene 具有最低的导电性 ($\sim 1020 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。因此, 在需要高导电性应用设计 MXene 时, 必须仔细调控影响因素。

MXene 的费米能级 (EF) 附近的电子密度非常高^[42], Shein 等^[43]通过第一性原理计算, MXene 的电子密度是其 MAX 前驱体的 2.5~4.5 倍, 这是由于 MAX 相中 Ti-Al 键被破坏, Ti_1 的三维态转变为 Ti_1 - Ti_1 金属键态, 使 MXene 表现出了更活跃的金属性质。此外, MXene 的导电行为可以通过 M- T_x 键或表面末端基团的类型来调节, MXene 可以转变为半导体或金属导体材料。预计没有端接的 MXene 表现出金属特性, 表面末端如 -F、-O 和 -OH 可以引导电子到某些点, 导致表面带电, 从而改变电学和其他性质^[44]。末端基团由 -F 和 -OH 组成的 MXene 只接受一个表面电子, 它们可以表现出类似的效果; 但由 -O 组成的 MXene 可以捕获两个表面电子, 表现出更高的导电性^[45]。Cao 等^[46]报道了纯 Ti_3C_2 和末端为 -F 或 -O 的 Ti_3C_2 的费米能级分别为 -0.45、0.18 和 0.71 V (versus NHE, pH=7)。近年来, 还合成和分析了许多非 Ti 基 MXene, 发现含有 Sc、Ti、Mo、Mn、V、Zr、Cr、Nb 等 MXene 呈现金属性质; Sc_2CO_2 、 Zr_2CO_2 、 Ti_2CO_2 、 $\text{Hf}_2\text{-CO}_2$ 和 Mn_2CO_2 是半导体^[2]。大多数合成的 MXene 以钛或钼为 M 元素, 以钼基 MXene 的电导率随温度变化为例, 如图 5(a) 所示, 从图中可以看出, 温度在 500 K 以上电导率快速增加^[47]。因此, 具有金属性质的 MXene 经常用于碳纤维复合材料的商业超级电容器以及电磁屏蔽领域。

2.2.2 机械性能

在 MXene 中, M-X 是所有键中键能最大的, 使其具有独特的机械强度。Tian 等^[48]利用高通量计算和数据驱动的方法研究了 MXene 的拉伸刚度和强度, 发现 MXene 的拉伸刚度在 81.71~561.4 N/m 之间, 比石墨烯和过渡金属二硫族化合物单层的刚度更高, 如图 5(b) 所示。MXene 的刚度和层间力

学性能受表面终止和 n 值 (M_{n+1}X_n) 的影响。Bai 等^[49]讨论了 MXene 的弹性行为与其表面末端的相关性, 裸露和 O 端基的 MXene 具有非常高的弹性常数 (c_{11} 超过 490 GPa, c_{44} 约 200 GPa) 而在 F 和 OH 端基的情况下会减弱。这是由于 O 端曲面的面内晶格常数较小^[50]。Buryiuk 等^[51]研究发现, 力学性能是原子层数的函数, 因此, 具有 M_2X 结构的 MXene 的刚度和强度高于具有 M_3X_2 和 M_4X_3 结构的 MXene, 这是层间的范德华力较弱导致一些 MXene 的强度较低^[44]。

与后期过渡金属 (V B 和 VI B) 相比, 早期过渡金属 (IV B) 的 M- T_x 键能往往最大, 这是因为卤化物基团的电子倾向于向早期过渡金属基团的大部分未填充的 d 轨道贡献, 并且后期过渡金属中 “ T_x ” 和 “M” 之间的电负性差异减小。Firestein 等^[52]利用原子力显微镜 (AFM) 纳米力学映射、原位透射原子显微镜 (TEM) 探测和理论计算研究了 Ti_3C_2 纳米片的拉伸强度和杨氏模量。结果表明, Ti_3C_2 纳米片的杨氏模量在 80~100 GPa 之间, 厚度为 $\sim 40 \text{ nm}$ 时, 拉伸强度达到 670 MPa。为了深入研究 MXene 纳米片的力学变形特性, 对 MXene 纳米片的几何参数 (包括结构缺陷) 进行了力学特性测试, 通过矩张量势和泊松比进行几何优化后, 纳米带的原子构型被证明取决于纳米带的宽度。 Ti_3C_2 单层和纳米带的极限拉伸强度 (UTS) 分别从 15.0 GPa 降至 11.7 GPa 和 16.5 GPa 降至 13.3 GPa。Lipatov 等^[53]报道了采用改良合成技术制造的单层 $\text{Nb}_4\text{C}_3\text{T}_x$ 薄片, 在纳米片厚度为 1.26 nm 时进行了 AFM 纳米压痕测试, 其有效杨氏模量为 386 GPa。Zha 等^[54]研究了 Mo_2C MXene 的力学性能, 在双轴应变下, 弹性模量为 $312 \pm 10 \text{ GPa}$; 在临界应变为 0.086 时, 极限强度为 20.8 GPa。然而, MXene 的高机械性能可以承受体积膨胀或外部张力的应变, 具有优异的结构稳定性和柔韧性, 因此, 可被用于碳纤维复合材料中进一步制成薄膜或海绵, 并应用于可穿戴和小型电子系统。

2.2.3 磁性

MXene 中过渡金属原子的八面体配位在低能 d_{xy} 、 d_{yz} 和 $d_{xz}(\text{e}_g)$ 态和高能 $d_{x^2-y^2}$ 、 $d_{z^2}(\text{t}_2g)$ 态发生典型的 d 轨道分裂, 因此 MXene 的磁性行为本质上是由结构构型和化学成分决定的, 特别是 d 轨道的占据。由于 M-T、M-X 之间的强共价键, 大

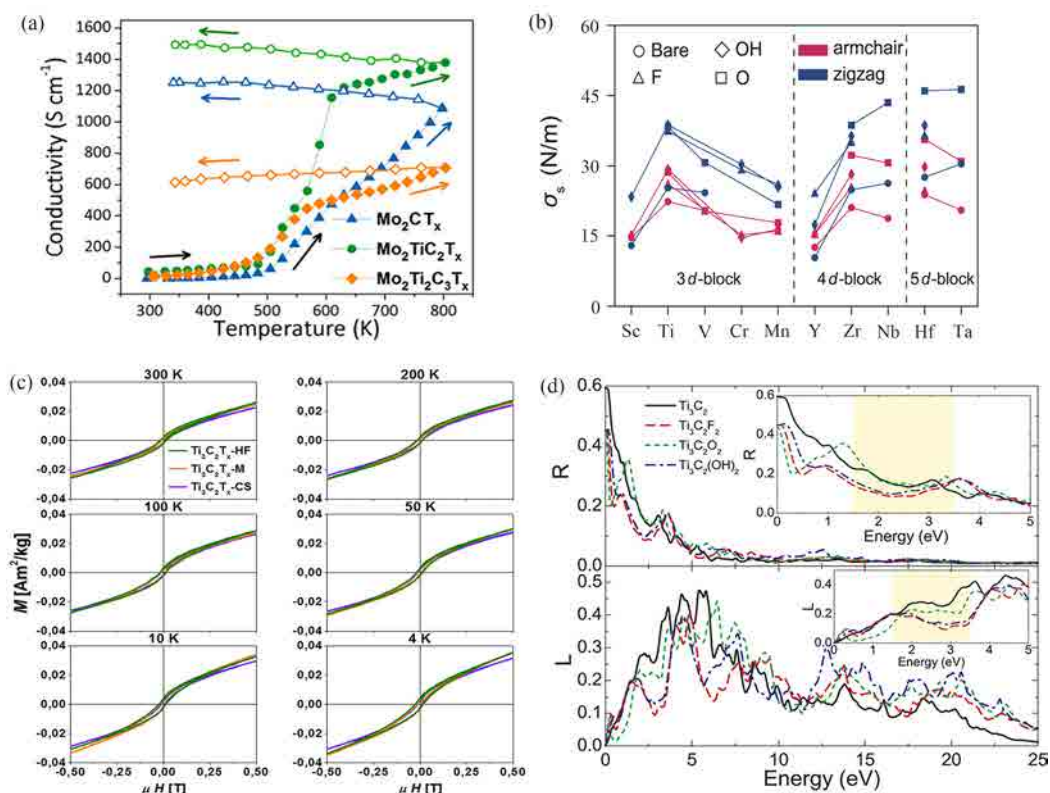


图5 (a) 各种钼基 MXene 的电导率随温度的变化^[47] (2017 American Chemical Society 版权许可); (b) MXene 的抗拉伸强度^[48] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可); (c) Ti₃C₂T_x 各样品在 4K~300K 范围内的磁性回路^[57] (2019 Elsevier B.V. 版权许可); (d) MXene 在光学能量小和大范围内的吸收光谱^[60] (2016 AIP Publishing 版权许可)

Figure 5 (a) The temperature dependent electrical conductivity of various Mo-based MXenes (Reprinted with permission from Ref.[47]; Copyright 2017 American Chemical Society); (b) The tensile strength of MXene (Reprinted with permission from Ref. [48]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.); (c) Magnetization loops measured in the temperature range of 4K–300K for various Ti₃C₂T_x (Reprinted with permission from Ref.[57]; Copyright 2019 Elsevier B.V.); (d) Absorption spectra of MXene over small and large optical energy ranges (Reprinted with permission from Ref.[60]; Copyright 2016 AIP Publishing)

多数 MXene 表现出非磁性基态, 在许多纯 MXene 中观察到磁性顺序, 如 Ta₃C₂、Ti₃C₂、Zr₃C₂、Zr₂C、Fe₂C、Cr₂C/Cr₂N、Ti₂C/Ti₂N 等 MXene 表现出磁性有序; 此外, 也有一些功能化 MXene 的磁基态被保留在其中, 如铁磁 (FM)M₂NO₂ (M=Ti,Cr), Mn₂NT₂ (T=F, O, OH), Mn₂CT₂ (T=F, Cl, OH), Ti₂MnC₂T₂ (T=F, O, OH), Hf₂MnC₂O₂, Hf₂VC₂O₂, Cr₂VC₂T₂ (T=F, O, OH), Mo₃N₂F₂ 和一些反磁性 (AFM) MXene, 如 Cr₂TiC₂T₂ (T=F 和 OH), Hf₂MnC₂T₂ (T=F 和 OH), Hf₂VC₂T₂ (T=OH 和 F), 以及 Cr₂CT₂ (T=F, Cl, H, OH)^[55]。尽管氨基 MXene 的磁性通常源于磁场的各种各向异性, 以及 N、Mn 和 Cr 基 MXene 的附加电子引起的自旋对称性, 但由于 Mn 和 Cr 的部分三维轨道被填充, 它们通常被预测具有显著的磁矩。Ponce-Pérez 等^[56]通过 DFT 计算研究了 Cr₂NO_x (0≤x≤2) 的磁

性, 结果表明, 原始 Cr₂C 表现出金属特征的 AFM 行为; 随 O 浓度增加, 系统变为半金属且 FM 开始建立; 当全氧覆盖时 MXene 变成 FM; 大多数自旋表现出金属性质, 而少数自旋表现出大于 3 eV 的能隙。

通过外部应变和官能团可以调节 MXene 的磁性, Scheibe 等^[57]研究了不同的末端对 Ti₃C₂T_x 磁性能的影响, 证实了具有 F 基或 S 基末端的样品表现出顺磁性, 包含两种末端的样品呈现出铁磁性/顺磁性, MXene 在一定温度范围内的磁性回路如图 5(c) 所示。Yue 等^[58]研究了外部机械应变对 Zr₂N MXene 磁性的影响, 无应变 Zr₂N 的基态本质是反铁磁性的, 在拉伸应变作用下从 AFM 转变到 FM。MXene 的可调磁性能对于其在碳纤维复合材料中制备自旋电子器件和应变传感器具有重要意义。

2.2.4 光学性质

在光学方面, MXene 具有优越的线性光学特性和非线性光学特性, 两者都是能量带隙的函数^[59], 类型、层数和表面末端是改变 MXene 光学功能的基本因素。Ti₃C₂T_x 的可见光透过率(约 90%)被证明高于还原氧化石墨烯(rGO)。其光学性质受 T_x 末端影响, 电负性更大的 -O 端接 MXene 可以产生比 -F 和 -OH 端接更大的带隙, -F 端接 MXene 和 -OH 端接 MXene 的介电色散具有相似的行为, 这源于它们相似的电子密度(DOS), 因此与 -O 端 MXene 相比, 裸端、-F 和 -OH 端 MXene 在低光学频率区表现出增强的光吸收, 如图 5(d) 所示^[60]。

除表面官能团外, MXene 的 M 和 X 的元素也可以调整光学特性, Hantanasirisakul 等^[61]研究了 X 元素对 MXene 光电性能的影响, 结果表明, 与 Ti₃C₂T_x 碳化物相比, Ti₃CNT_x 具有更低的电子导电性和紫外可见光谱的蓝移, Ti₃CNT_x 和 Ti₃C₂T_x 的典型表面等离子体共振 (SPR) 诱导的近红外吸收峰分别位于 670 和 780 nm 处。Zhang 等^[62]研究了 M₂CT₂ (M=Ti、Zr、Hf; T=O、F、OH) 的光学特性, 结果表明, 所有 M₂CO₂ 材料不仅具有合适的带隙 (0.92~1.75 eV), 而且具有可见光吸收能力; O 功能化的 M₂C 具有相对较大的可见吸收光面积, 吸收系数顺序为: Ti₂CO₂ > Zr₂CO₂ > Hf₂CO₂。另一方面, Lashgari 等^[63]根据密度泛函理论 (DFT) 研究了 Ti_{n+1}X_n (X=C, N, n=1,2) 的光学性质, 结果表明, Ti₂C、Ti₂N、Ti₃C₂ 和 Ti₃N₂ 的等离子体能量分别为 10.0、11.6、10.8 和 11.4 eV, 说明 MXene 材料在光照射下也表现出金属性质, 并产生表面等离子体效应。基于 MXene 的二维形貌、近红外吸收强、光学性质优异等特点, 可应用于碳纤维复合材料的薄膜及光热治疗中, 并表现出优异的性能, MXene 的光热转换和近红外光吸收特性归因于局部表面等离子体。

3 MXene 在碳纤维及其复合材料中的应用

碳纤维复合材料作为一种目前日益需求的工程应用的佳材料, 在 CF 表面引入 MXene 后不仅可以增强复合材料的界面性质, 还可以通过调节 MXene 的表面末端 (-F, -O, -Cl 等), 实现复合材料特定的功能性应用。在此, 总结了基于

MXene 用于碳纤维复合材料的最新趋势。

3.1 MXene 对碳纤维复合材料界面性能增强的应用

为了充分发挥 CF 及 MXene 的优异性能, 研究人员采用不同技术 (如接枝、电泳沉积、上浆等技术) 将 MXene 引入 CF 表面, 增加其活性基团, 实现复合材料的界面增强。在 MAX 相中, 存在具有离子特征的金属键和共价键, 而 MXene 的核心化学键主要由共价键主导, 但可以通过改变表面基团, 从而改变 MXene 的离子性, 进而改变键的强度^[64], 因此, MXene 可以通过范德华力、氢键、离子键和共价键等方式与无机和有机材料嵌合在一起。Hu 等^[65]分别通过范德华力或氢键 (CF-v-MXene)、离子键 (CF-i-MXene) 和共价键 (CF-c-MXene) 将 MXene 纳米片化学接枝到碳纤维表面上, 制备了不同键合相互作用的 CF 样品。首先将 MXene 胺硅烷改性得到 MXene-NH₂, 将 CF 氧化处理得到 CFs (CF-COOH), 由于 MXene 主要通过范德华力或氢键与 CFs 结合, 改性后的 CFs 为 CF-v-MXene; 将 CFs 浸泡双酚聚乙炔亚胺 (PEI), 使 CFs 表面带负电荷 (CF-PEI⁻), 然后在 MXene 水溶液中浸泡, 使 CF-PEI⁻ 通过离子吸附 (TiO⁻...⁺H₃N) 与 MXene 结合得到 CF-i-MXene; 由于 MXene-NH₂ 是通过羧基与氨基的缩合接枝到 CFs 上的, 则产物记为 CF-c-MXene, 示意图如图 6(a) 所示。对不同键合作用改性碳纤维的物理化学性能和碳纤维复合材料的力学性能进行了测试与分析, 结果表明, 未改性的 CF 表面光滑且有许多凹槽, MXene 对 CF 改性后, CF 表面覆盖着不同含量的 MXene 纳米片, 对于 CF-c-MXene, 胺硅烷改性的 MXene 薄片由于其较强的共价键, 其形状相对规则且较小, 均匀地覆盖在纤维表面, 如图 6(b)~6(e) 所示; MXene 的引入对碳纤维复合材料的界面附着力和力学性能有明显的改善作用, 并且共价键增强的复合材料性能最优, 其复合材料的冲击强度和界面抗剪强度 (ILSS) 分别比未处理的碳纤维复合材料提高了 90.1% 和 110.3%, 如图 6(g) 和 6(f) 所示。

除接枝技术外, 研究人员还巧妙地采用了电泳沉积和上浆技术等, 将 MXene 应用于碳纤维复合材料的界面性能增强中。Hu 等^[66]采用电泳沉积技术将 MXene 纳米片引入 CF 表面, 采用真空辅助树脂灌注法对 MXene 沉积的 CF 进行环氧

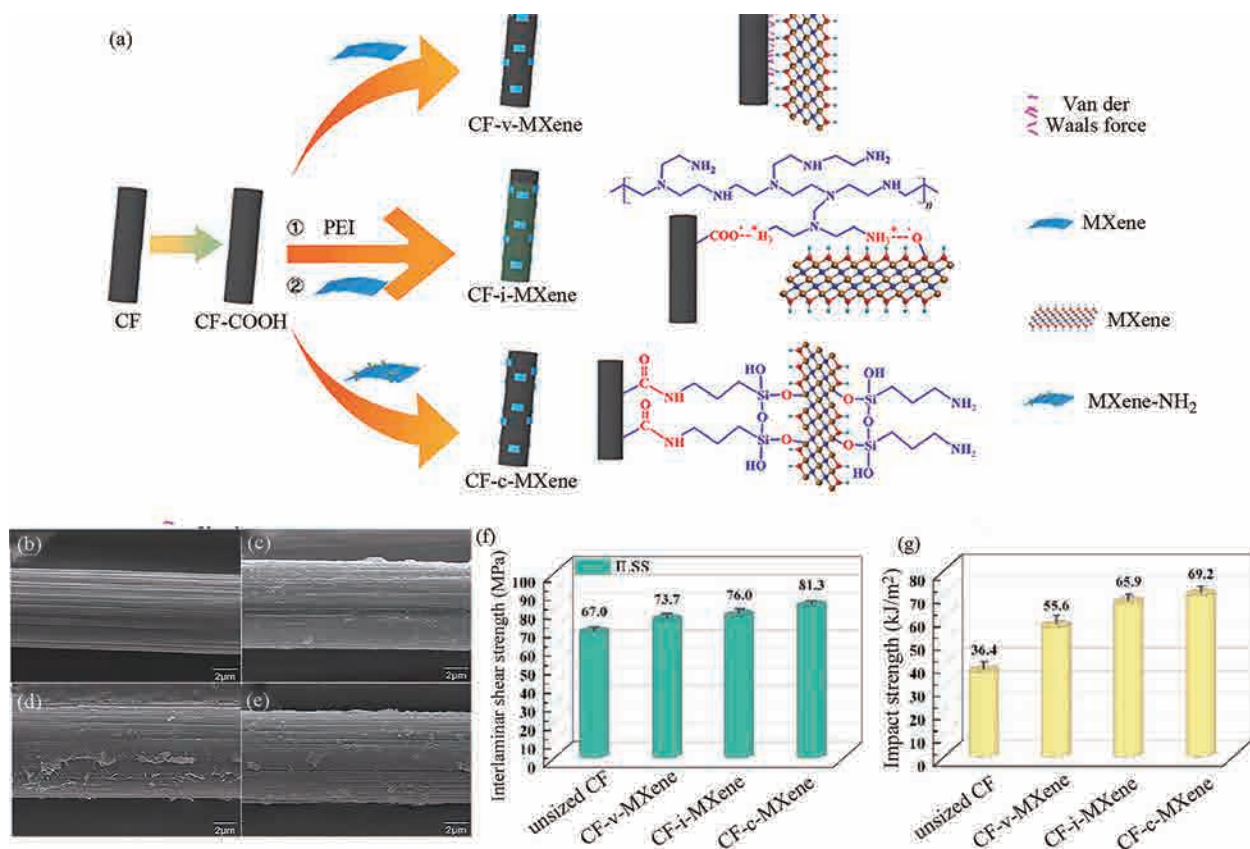


图6 (a) 通过不同的键在CFs上修饰的示意图; (b) 未处理的CF, (c) CF-v-MXene, (d) CF-i-MXene 和 (e) CF-c-MXene 不同形貌的SEM图像; 复合材料的(f) ILSS 和(g) 冲击强度^[65] (2024 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 6 (a) Schematic illustration of decorating MXene on CFs through different bonds; SEM images of different CF morphologies: (b) unsized CFs, (c) CF-v-MXene, (d) CF-i-MXene, and (e) CF-c-MXene; (f) ILSS and (g) impact strength of the composites (Reprinted with permission from Ref.[65]; Copyright 2024 Elsevier Ltd.)

树脂浸润, 制备了碳纤维复合材料。MXene通过机械连锁和氢键作用改善了CF的表面粗糙度, 进一步提高了碳纤维复合材料的界面性质。结果表明, 相比未处理碳纤维制备的复合材料, 层间剪切强度(ILSS)增强了53%, 抗弯强度增强了22.2%。Xu等^[67]制备了一种含有MXene、CNTs和聚醚酰亚胺(PEI)双重相容剂的复合施胶剂, 采用上浆技术对CF表面改性并制备了碳纤维复合材料, 在PEI/MXene/CNTs界面层中 π - π 相互作用、氢键和机械互锁作用, 使复合材料的力学性质显著提高, 其抗弯强度、抗弯模量和ILSS分别比原碳纤维复合材料提高74.16%、63.76%和62.79%。因此, MXene能够通过不同的成键作用引入碳纤维表面, 提高纤维的表面活性, 从而改善碳纤维复合材料界面性质, 为MXene在碳纤维复合材料领域实现特定的功能化应用打下了基础, 实现商业化的功能化应用并批量生产是其未来发展的方向。

3.2 MXene功能化的碳纤维复合材料中的应用

3.2.1 超级电容器

超级电容器在电化学储能系统中具有重要的应用价值, 基于MXene的储能电极正在成为科学界的热门话题^[68]。然而, 在CF上引入MXene可用于开发超级电容器等储能设备中的电极, 虽然MXene在电能存储方面表现优异, 但是将纳米特性转化为宏观结构仍面临挑战, 并且纯MXene在制备电极过程中会出现累积而形成自堆积的现象, 导致离子迁移和电容恶化的问题。基于这些问题, 研究人员提出了引入重氮盐或导电聚合物等作为间隔层以优化MXene的粘附, 抑制MXene纳米片的堆积。Dharmasiri等^[69]采用在重氮盐修饰的CF上涂覆MXene, 可以有效地防止MXene纳米片在电极制作过程中的再堆积, 并成功构建了电极和结构超级电容器, 比原始CF的电容分别提高了725倍和42倍, 此外, MXene涂层使电极与环氧树脂的界面附着力提高了54%。Liu等^[70]

提出将聚苯胺(PANI)聚合物嵌入到MXene电极中,成功制备了基于MXene@PANI涂层碳纤维布的超级电容器电极,此电极具有2D/0D/1D的层次纳米结构(制备过程示意图见7(a)),可以有效地防止MXene纳米片在电极制作过程中的再堆积(结构形貌如图7(b)~7(e)),并为电极提供良好的导电性,实现快速电子转移。电极在 1 mA/cm^2 的恒流密度下,它的面电容高达 1347 mF/cm^2 ,在5000次循环后,在 20 mA/cm^2 时仍保持其原始容量的81% (图7f~7g)。

构建多孔结构的MXene基纤维电极也可以

有效削弱MXene的堆叠。Sun等^[71]设计了一种分层多孔MXene/CF异质结构的电极,抑制了MXene纳米片的自堆积,当MXene/CF异质结构用作超级电容器的自支撑电极时,具有 $7.14 \text{ F}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的高容量电容,在 $100 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下仍保持63.9%的容量,还具有出色的循环稳定性(在5000次循环后电容保持了99.8%)。此外,还组装了柔性全固态超级电容器,显示出高能量密度($10.6 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$),最大功率密度为 $12780 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$,还具有良好的柔韧性,即使在不同弯曲角度下循环2500次后也能保持结构完整性和高电容。

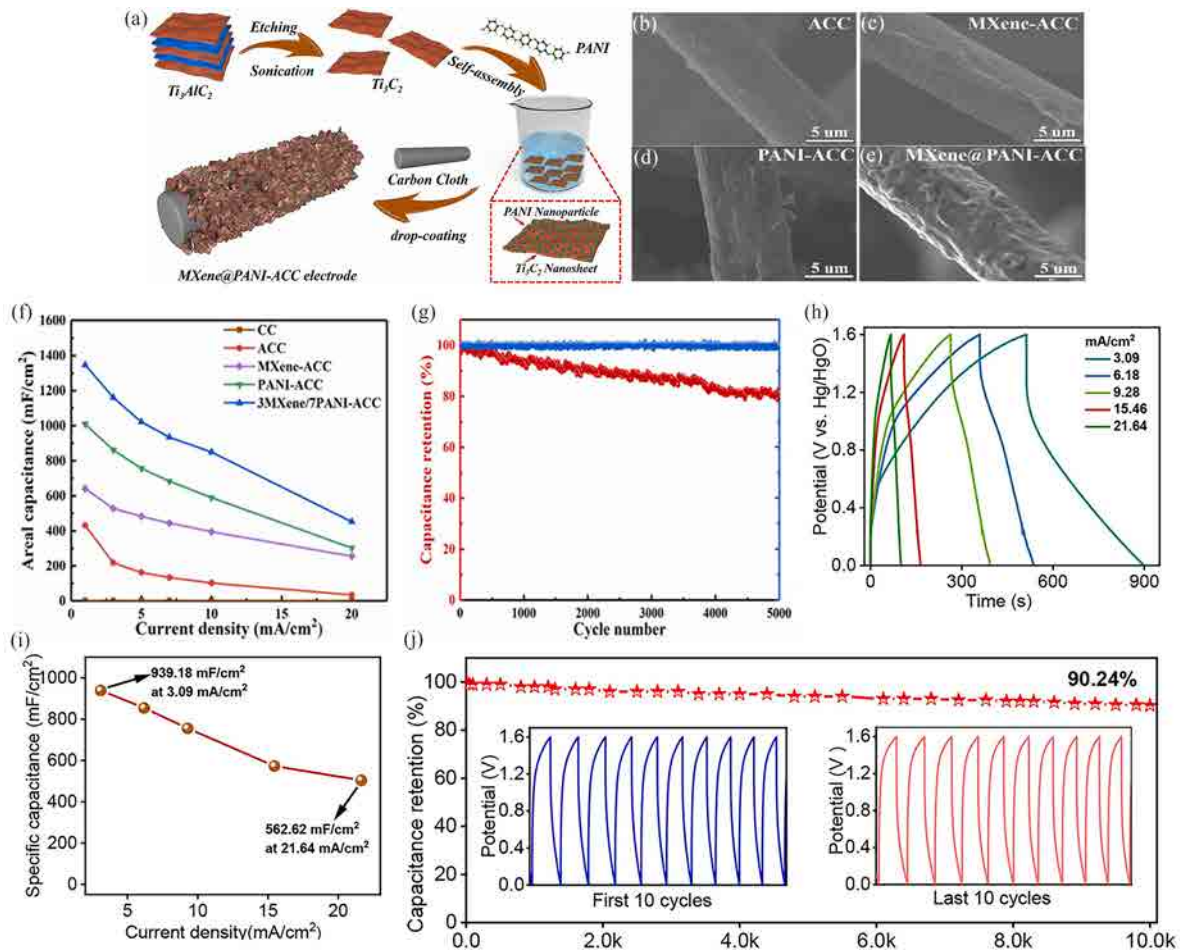


图7 (a) MXene@PANI 纳米复合材料和MXene@PANI-ACC电极的制备过程示意图;(b) 活性碳布 (ACC),(c) MXene-ACC,(d) PANI-ACC 和 (e) MXene@PANI-ACC 的 SEM 图片;(f) 不同样品的面电容图;(g) 3MXene@7PANI-ACC 电极在 20 mA/cm^2 电流密度下循环 5000 次的稳定性^[70] (2022 Elsevier B.V. 版权许可);(h) 不同电流密度下测量的器件的不同电流密度下的 GCD 图;(i) 器件的比电容与电流密度曲线;(j) 循环稳定性测试曲线^[72] (2022 Elsevier B.V. 版权许可)

Figure 7 (a) Schematic illustration of the preparation procedure of MXene@PANI nanocomposites and MXene@PANI-ACC electrodes; (b) SEM micrographs of (b) activated carbon cloth (ACC), (c) MXene-ACC, (d) PANI-ACC, and (e) MXene@PANI-ACC; (f) Plots of the areal capacitance of different samples; (g) The cycling stability of 3MXene@7PANI-ACC electrode at a current density of 20 mA/cm^2 for 5000 cycles (Reprinted with permission from Ref.[70]; Copyright 2022 Elsevier B.V.); (h) GCD profiles of the device measured at various scan rates and current densities; (i) Specific capacitance versus current density curve of the device; (j) Cyclic stability test curve (Reprinted with permission from Ref.[72]; Copyright 2022 Elsevier B.V.)

Khumujam等^[72]制备了一种湿纺MXene/PAN纤维衍生的多孔MXene/碳纤维(W-MX/CF)作为负极,超薄NiCo₂S₄电沉积W-MX/CF(NiCo₂S₄@W-MX/CF)作为正极,负极在电流密度为3.86 mA/cm²时的比容量为2160 mF·cm⁻²,并表现出良好的可逆性和稳定性;正极在电流密度为3.86 mA/cm²时,比电容高达1421 mF·cm⁻²。采用PVA/KOH为固体电解质,组装了固态不对称光纤形状超级电容器,该器件在301.51 mW·cm⁻³的功率密度下提供了40.70 mWh·cm⁻³的优异能量密度,具有优异的循环稳定性和高达10000次循环的可逆性,如图7(h)~7(j)所示。基于超级电容器的电化学性能及结构的改进,为未来基于MXene@CF的高性能、柔性、可穿戴和便携式储能设备的设计和开发提供了一条途径。

3.2.2 电磁屏蔽

电磁干扰(EMI)不断影响着电子设备的耐用性和效率,因此具有不同介电和磁损耗的以吸收为主的电磁干扰屏蔽材料对于当今的设备是必要的^[73]。高导电性是电磁干扰屏蔽材料的关键特性,MXene优越的导电性使其处于EMI屏蔽应用的最前沿,由于仅MXene并不能满足电磁干扰屏蔽的每一个指标,因此,研究人员将MXene与其他材料复合可以提供一种具有增强电磁干扰屏蔽特性的合适屏蔽材料,例如聚合物、纤维、铁氧体等^[74]。其中碳纤维复合材料结构可以提供高效的电磁屏蔽,满足各种极端条件下材料应用的要求,因此将MXene嵌入CF中应用于复合材料领域,可实现轻量化、高效和灵活的电磁屏蔽。单独的MXene嵌入CF会表现出较差的机械特性,添加聚合物作为粘合剂,穿透MXene层,并增强其机械特性,对下一代电磁干扰屏蔽材料带来了积极影响。Yin等^[75]基于层接层方法,将MXene和聚苯胺(PANI)聚合物交替组装在CF上,PANI/MXene/CF织物具有良好的导电性(24.57 S·m⁻¹)、较高的电磁散射系数(26.0 dB)、良好的电磁干扰屏蔽性能(135.5 dB·cm³·g⁻¹)和优异的电压驱动焦耳加热性能。Duan等^[76]制备了Ti₃C₂T_x MXene/碳纤维织布/热塑性聚氨酯(Ti₃C₂T_x MXene/CFf/TPU)复合材料,制备工艺示意图如图8(a)所示。结果表明,MXene薄片沉积在了CF表面,使表面变得粗糙,随MXene浓度增加,这种现象更加明显,并且复合材料具有明显的层状结构,如图8(b)~8(g)所示;

MXene的范德华力和共价键的协同强化作用使复合材料的抗拉强度提高到170.2 MPa,如图8(h)所示;复合材料随着MXene含量的增加,EMI屏蔽效率逐渐提高,EMI-SE最高达到40.4 dB,如图8(i)~8(k)所示。Duan等^[77]制造了具有ES纤维增强的轻质柔性再生碳纤维(rCEF),并制备了rCEF@PPy/MXene,具有高导电性(162.92 S·m⁻¹)、显著的电磁干扰屏蔽效果(60 dB)和出色的焦耳加热性能。利用MXene制备的具有优异电磁干扰屏蔽性能的碳纤维复合材料有了一些深入分析,为以后研究人员在碳纤维复合材料的电磁屏蔽方向奠定了基础,“绿色”电磁干扰屏蔽是未来的发展趋势。

3.2.3 微波吸收

随着电子技术的飞速发展,电磁污染日益严重,需要开发能够有效减轻电磁辐射的隐身材料。MXene可以通过介质弛豫增强电磁波的耗散^[78],通过改善MXene的固有结构特性或将其与其他损耗材料复合可增强MXene基吸收材料的吸收带宽^[79]。同时使用两种或多种介电材料来调节MXene的性能具有多种优势,有助于规避单一接口的问题,允许创建分层结构,从而增强异构接口的设计多功能性,实现更有效的阻抗控制。然而,将MXene与CF和磁性颗粒或导电聚合物复合在微波吸收领域的研究取得了一定的进展。Wang等^[80]通过在CF表面引入自组装MXene并随后锚定MoS₂,制备了层叠CF@MXene@MoS₂ (CMM)芯鞘协同结构,合成过程示意图见图9(a),结构示意图见图9(c)。CMM的横断面SEM图证实,MXene薄片在CF轴向紧密堆叠,形成空心圆柱形护套;将最外层的MoS₂纳米片垂直排列在MXene鞘层表面,形成另一个鞘层,建立了分层三维微棒结构,如图9(b)、9(d)和9(e)所示。表面具有大尺寸的纳米球和微小的裂纹,如图9(f)和9(g)所示。其结构表现出良好的反射损耗(RL)值和最宽有效吸收带宽(EAB),其在7.0 GHz时的RL值为-61.51 dB,厚度为3.5 mm,在10.4~18.0 GHz范围内,薄厚度为2.1 mm,最宽EAB为7.6 GHz,如图9(h)~9(m)所示;同时通过调节MoS₂的负载,实现了在全X波段和全Ku波段之间的有效吸收可调性,相应的最小RL值在X波段(CMM-5)的2.3 mm处为-52.65 dB,在Ku波段(CMM-3)的2.1 mm处为-31.92 dB,如图9(n)和9(o)所示。Han等^[81]利用CF作为一维

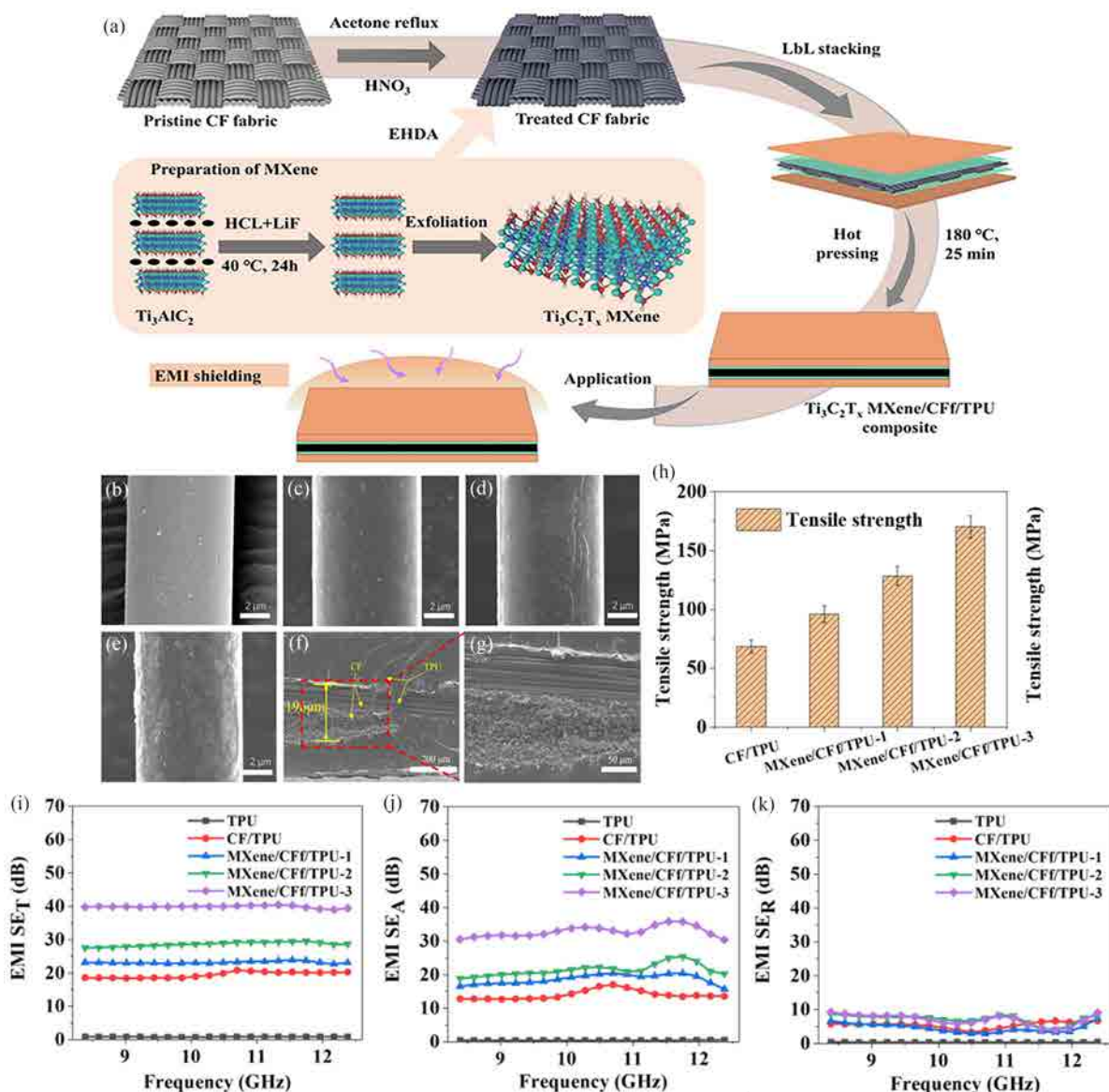


图 8 (a) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU 复合材料制备工艺示意图; (b-e) CF 涂覆不同质量分数 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene; (f-g) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU 复合材料的横截面图; (h) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU 复合材料的抗拉伸强度; (i) SE_T , (j) SE_A 和 (k) SE_R 的 EMI-SE^[76] (2022 Elsevier Ltd. 版权许可)

Figure 8 (a) A schematic of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU composite preparation process; SEM images of (b-e) CF coated with different $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene mass fractions; (f-g) Cross-sectional views of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU composite; (h) Tensile strength of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CFf/TPU composites; EMI-SE of (i) SE_T , (j) SE_A and (k) SE_R (Reprinted with permission from Ref.[76]; Copyright 2022 Elsevier Ltd.)

基体, MXene 作为中间层, ZnO 作为外层, 制备了分层 CF@MXene@ZnO (CMZ) 复合材料, 为了进行比较, 将前驱体 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 添加不同的负载量, 分别记为 CMZ1、CMZ2、CMZ3 和 CMZ4。CMZ 由于协同效应增加了层间阻抗匹配, 在 3.5 mm 厚度下, CMZ2 在 9.0 GHz 时的 RL 值为 -67.35 GHz, 在 4.0 mm 厚度下的 EAB 为 5.44 GHz, 覆盖了整个 X 波段。MXene 基气凝胶

复合材料具有最宽的吸收带宽和多功能集成度, Chao 等^[82] 制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/CF/PI 气凝胶, 气凝胶的最小反射损耗 ($\text{RL}_{\min}$) 达到 -61.96 dB, EAB 为 3.97 GHz。目前, 尽管已经报道了基于 MXene 与碳纤维复合的超宽带吸收材料, 但它们仍处于探索性研究阶段, 因此, 开发性能稳定的“轻、薄、宽、坚固”的吸波材料是未来的发展趋势。总而言之, MXene 由于具有可调的表面官能

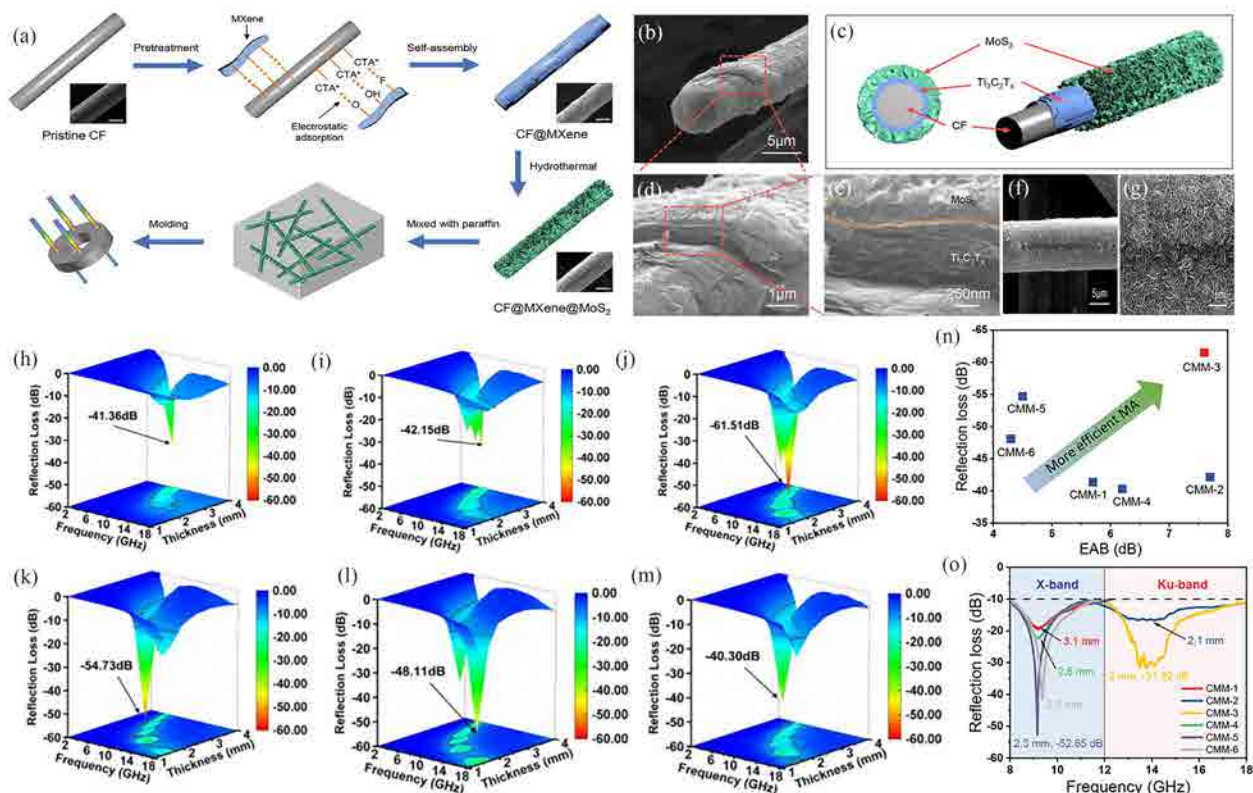


图9 (a) CMM吸收器合成过程示意图; (b,d,e) CMM复合材料的SEM横截面图像; (c) CMM微棒结构示意图; (f,g) CMM的SEM图; CMM系列的三维RL曲线图; (h) CMM-1, (i) CMM-2, (j) CMM-3, (k) CMM-4, (l) CMM-5, (m) CMM-6; (n) CMM系列的RL_{min}与最大EAB; (o) CMM系列的X波段和Ku波段的最佳RL曲线^[80] (2020 Wiley-VCH GmbH版权许可)

Figure 9 (a) Schematic illustration of the synthesis process of the CMM absorber; (b,d,e) Cross-sectional SEM images of the CMM composite; (c) Schematic illustration of the structure of CMM microrod; 3-D RL plots of the CMM series. (f,g) SEM images of CMM; (h) CMM-1, (i) CMM-2, (j) CMM-3, (k) CMM-4, (l) CMM-5, (m) CMM-6; (n) RL_{min} versus maximum EAB of the CMM series; (o) Optimal RL curves in the X-band and Ku-band of the CMM series (Reprinted with permission from Ref.[80]; Copyright 2020 Wiley-VCH GmbH)

团,提高了其在各种领域的适用性,已结合碳纤维复合材料被应用于超级电容器、微波吸收及电磁屏蔽等多种研究领域。随着研究的深入和技术的进步,将最大限度地发掘其应用潜力并在碳纤维复合材料的更多领域发挥作用,同时实现批量化生产也是未来发展的方向。

4 挑战及未来展望

虽然MXene材料的功能化已经应用于碳纤维复合材料中,但在开发过程中仍需克服一些挑战才能使MXene基碳纤维复合材料在多个领域成为可行的选择。首先,在超级电容器领域,MXene材料的不稳定性会导致功率输出不一致,对供电性能产生了重大影响;MXene是一种脆性材料,容易与电流接触时断裂,然而,为了使MXene基超级电容器技术取得成功,必须要克服MXene对

放电敏感、低反应性和有限的保质期等问题。其次,在电磁屏蔽领域,MXene在此领域的研究类型存在局限性,大多数研究主要集中在Ti₃C₂T_x MXene上,关于其他类型MXene的EMI屏蔽特性报道很少;所研究的基于MXene的EM频率范围存在局限性,主要集中在微波频段等;然而需要研究更多类型的MXene以及更大范围的屏蔽性能,并且要保证绿色电磁干扰屏蔽应用。在微波吸收领域,尽管基于MXene的吸波材料种类繁多,但对其吸波机理的解释却缺乏对不同材料的区分,因此,需要进一步系统研究来阐明其吸收机理;低密度、薄厚度、宽频带吸波材料的研究仍存在困难,然而,开发性能稳定的“轻、薄、宽、强”吸波材料仍需付出巨大努力。最后,MXene在碳纤维复合材料中更多领域的应用也需进一步探索,如通过MXene表面化学功能化的扩展,有望

发挥其最佳的化学适用性。随着不断的研究和开发,基于MXene的碳纤维复合材料将在未来可以取得重大突破。

参考文献

- 1 Naguib, M.; Kurtoglu, M.; Presser, V.; Lu, J.; Niu, J. J.; Heon, M.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Adv. Mater.*, **2011**, 23(37), 4248–4253.
- 2 Lamiel, C.; Hussain, I.; Warner, J. H.; Zhang, K. L. Beyond Ti-based MXenes: a review of emerging non-Ti based metal-MXene structure, properties, and applications. *Mater. Today*, **2023**, 63, 313–338.
- 3 丁姗姗, 姜耀元, 汪滨, 王传春, 王杰, 马佳瑜, 金旭, 李秀艳. MXene的制备及应用进展. *高分子通报*, **2022**, (9), 16–26.
- 4 Kumar, S.; Kumari, N.; Seo, Y. MXenes: versatile 2D materials with tailored surface chemistry and diverse applications. *J. Energy Chem.*, **2024**, 90, 253–293.
- 5 Yadav, M.; Kumar, M.; Sharma, A. Review of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanosheets and their applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2024**, 7(9), 9847–9867.
- 6 Anasori, B.; Xie, Y.; Beidaghi, M.; Lu, J.; Hosler, B. C.; Hultman, L.; Kent, P. R. C.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes). *ACS Nano*, **2015**, 9(10), 9507–9516.
- 7 Chen, Q. D.; Yuan, S. F.; Dai, J. H.; Song, Y. Functionalized $\text{M}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ MXenes (M=Cr and Mo; T=F, O, and OH) as high performance electrode materials for sodium ion batteries. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2021**, 23(2), 1038–1049.
- 8 Li, G. J.; Natsu, V.; Shi, T.; Barsoum, M. W.; Titova, L. V. Two-dimensional MXenes $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_z$ and $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_z$: microscopic conductivity and dynamics of photoexcited carriers. *ACS Appl. Energy Mater.*, **2020**, 3(2), 1530–1539.
- 9 Li, N.; Zeng, Z. L.; Zhang, Y. W.; Chen, X. Z.; Kong, Z. Z.; Arramel, Li, Y.; Zhang, P.; Nguyen, B. S. Double transition metal carbides MXenes (D-MXenes) as promising electrocatalysts for hydrogen reduction reaction: *Ab initio* calculations. *ACS Omega*, **2021**, 6(37), 23676–23682.
- 10 Wan, Y.; Takahashi, J. Development of carbon fiber-reinforced thermoplastics for mass-produced automotive applications in Japan. *J. Compos. Sci.*, **2021**, 5(3), 86.
- 11 Zhang, J.; Lin, G.; Vaidya, U.; Wang, H. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. *Compos. Part B Eng.*, **2023**, 250, 110463.
- 12 丁奇胜, 谭晶, 张政和, 程礼盛, 杨卫民. 高取向度碳纤维原丝制备工艺研究进展. *高分子通报*, **2023**, (3), 310–315.
- 13 Peng, X. C.; Wu, Y. F.; Wei, Z. M. Research progress on the surface modification of carbon fiber. *RSC Adv.*, **2024**, 14(6), 4043–4064.
- 14 Li, J.; Yang, Z. F.; Huang, X. F.; Zhao, Y.; Li, X.; Wei, W. F.; Li, H.; Wu, G. N. Interfacial reinforcement of composites by the electrostatic self-assembly of graphene oxide and NH_3 plasma-treated carbon fiber. *Appl. Surf. Sci.*, **2022**, 585, 152717.
- 15 Sasikumar, R.; Babu, B. R.; Subramanian, V.; Jayavel, R. Multifunctionality of MWCNT modified carbon fiber reinforced thermoplastic composite, and reclaiming composite in the pursuit of sustainable energy storage applications: an experimental and numerical analysis. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 248, 110468.
- 16 Xiong, K.; Liu, F.; Chen, T.; Xiong, L. Facile and efficient grafting of graphene oxide onto carbon fiber with hyperbranched poly(thioether-yne) via click chemistry to improve interface and mechanical properties of composite. *Surf. Interfaces*, **2024**, 46, 104038.
- 17 Wang, Z. Y.; Zhang, Y. Z.; Sun, G. W.; Gao, W.; Wang, Y. L.; Zhan, L. Improvement of carbon fiber/phenolic composite properties by low-loading graphene oxide and SiO_2 nanoparticles. *Mater. Lett.*, **2024**, 365, 136400.
- 18 Randall, J. D.; Stojcevski, F.; Djordjevic, N.; Hendlmeier, A.; Dharmasiri, B.; Stanfield, M. K.; Knorr, D. B.; Tran, N. T.; Varley, R. J.; Henderson, L. C. Carbon fiber polypropylene interphase modification as a route to improved toughness. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2022**, 159, 107001.
- 19 Naguib, M.; Mashtalir, O.; Carle, J.; Presser, V.; Lu, J.; Hultman, L.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. Two-dimensional transition metal carbides. *ACS Nano*, **2012**, 6(2), 1322–1331.
- 20 Pinto, D.; Anasori, B.; Avireddy, H.; Shuck, C. E.; Hantanasirisakul, K.; Deysher, G.; Morante, J. R.; Porzio, W.; Alshareef, H. N.; Gogotsi, Y. Synthesis and electrochemical properties of 2D molybdenum vanadium carbides-solid solution MXenes. *J. Mater. Chem. A*, **2020**, 8(18), 8957–8968.
- 21 Chen, X.; Li, R.; Li, B.; Wang, J.; Wang, T.; Yan, F. X.; Zhang, G. J. Achieving ultra-high ductility and fracture toughness in molybdenum via Mo_2TiC_2 MXene addition. *Mater. Sci. Eng. A*, **2021**, 818, 141422.
- 22 Dhamodharan, D.; Al-Harthi, M. A.; Ramya, B.; Bafaqeer, A.; Alam, F. MXenes: a promising material with multifunctional applications. *J. Environ. Chem. Eng.*, **2024**, 12(2), 112316.

- 23 Ghidui, M.; Lukatskaya, M. R.; Zhao, M. Q.; Gogotsi, Y.; Barsoum, M. W. Conductive two-dimensional titanium carbide ‘clay’ with high volumetric capacitance. *Nature*, **2014**, 516(7529), 78–81.
- 24 Bai, W. C.; Shi, L. Y.; Li, Z. H.; Liu, D.; Liang, Y. M.; Han, B. C.; Qi, J.; Li, Y. Q. Recent progress on the preparation and application in photocatalysis of 2D MXene-based materials. *Mater. Today Energy*, **2024**, 41, 101547.
- 25 Mazinani, A.; Rastin, H.; Nine, M. J.; Lee, J.; Tikhomirova, A.; Tung, T. T.; Ghomashchi, R.; Kidd, S.; Vreugde, S.; Losic, D. Comparative antibacterial activity of 2D materials coated on porous-titania. *J. Mater. Chem. B*, **2021**, 9(32), 6412–6424.
- 26 Venkateshalu, S.; Cherusseri, J.; Karnan, M.; Kumar, K. S.; Kollu, P.; Sathish, M.; Thomas, J.; Jeong, S. K.; Grace, A. N. New method for the synthesis of 2D vanadium nitride (MXene) and its application as a supercapacitor electrode. *ACS Omega*, **2020**, 5(29), 17983–17992.
- 27 Sun, K. Y.; Wu, Y. Z.; Xu, J.; Xiong, W. F.; Xu, W.; Li, J. W.; Sun, Z. Y.; Lv, Z. Y.; Wu, X. S.; Jiang, Q.; Cai, H. L.; Shi, D. Q. Niobium carbide (MXene) reduces UHMWPE particle-induced osteolysis. *Bioact. Mater.*, **2022**, 8, 435–448.
- 28 He, H. T.; Wang, J. K.; Xia, Q. X.; Wang, L. B.; Hu, Q. K.; Zhou, A. G. Effect of electrolyte on supercapacitor performance of two-dimensional molybdenum carbide (Mo_2CT_x) MXene prepared by hydrothermal etching. *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, 568, 150971.
- 29 Wu, Z. Y.; Zhu, S.; Bai, X. R.; Liang, M.; Zhang, X.; Zhao, N. Q.; He, C. N. One-step *in situ* synthesis of Sn-nanoconfined $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene composites for Li-ion battery anode. *Electrochim. Acta*, **2022**, 407, 139916.
- 30 Arole, K.; Blivin, J. W.; Bruce, A. M.; Athavale, S.; Echols, I. J.; Cao, H. X.; Tan, Z. Y.; Radovic, M.; Lutkenhaus, J. L.; Green, M. J. Exfoliation, delamination, and oxidation stability of molten salt etched Nb_2CT_2 MXene nanosheets. *Chem. Commun.*, **2022**, 58(73), 10202–10205.
- 31 Yin, T.; Li, Y.; Wang, R. H.; Al-Hartomy, O. A.; Al-Ghamdi, A.; Wageh, S.; Luo, X. L.; Tang, X.; Zhang, H. Synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{F}_x$ MXene with controllable fluorination by electrochemical etching for lithium-ion batteries applications. *Ceram. Int.*, **2021**, 47(20), 28642–28649.
- 32 Liew, J.; Liu, L.; Loh, K. H.; Bashir, S.; Ramesh, K.; Ramesh, S. How viable are MXenes? Recent developments of MXene synthesis and its application in solid-state electrolytes. *J. Energy Storage*, **2024**, 84, 110868.
- 33 Wang, D.; Zhou, C. K.; Filatov, A. S.; Cho, W.; Lagunas, F.; Wang, M. Z.; Vaikuntanathan, S.; Liu, C.; Klie, R. F.; Talapin, D. V. Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes. *Science*, **2023**, 379(6638), 1242–1247.
- 34 Gandla, D.; Zhuang, Z. L.; Jadhav, V. V.; Tan, D. Q. Lewis acid molten salt method for 2D MXene synthesis and energy storage applications: a review. *Energy Storage Mater.*, **2023**, 63, 102977.
- 35 Ajmal, Z.; Qadeer, A.; Khan, U.; Bilal Hussain, M.; Irfan, M.; Mehmood, R.; Abid, M.; Djellabi, R.; Kumar, A.; Ali, H.; Kalam, A.; Al-Sehemi, A. G.; Algarni, H.; Al-Hadeethi, Y.; Qian, J.; Hayat, A.; Zeng, H. Q. Current progresses in two-dimensional MXene-based framework: prospects from superficial synthesis to energy conversion and storage applications. *Mater. Today Chem.*, **2023**, 27, 101238.
- 36 Zhang, X.; Zhang, Z. H.; Zhou, Z. MXene-based materials for electrochemical energy storage. *J. Energy Chem.*, **2018**, 27(1), 73–85.
- 37 Tang, Q.; Zhou, Z.; Shen, P. W. Are MXenes promising anode materials for Li ion batteries? Computational studies on electronic properties and Li storage capability of Ti_3C_2 and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{X}_2$ ($\text{X}=\text{F}, \text{OH}$) monolayer. *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, 134(40), 16909–16916.
- 38 Patil, A. M.; Jadhav, A. A.; Chodankar, N. R.; Avatare, A. T.; Hong, J.; Dhas, S. D.; Patil, U. M.; Jun, S. C. Recent progress of MXene synthesis, properties, microelectrode fabrication techniques for microsupercapacitors and microbatteries energy storage devices and integration: A comprehensive review. *Coord. Chem. Rev.*, **2024**, 517, 216020.
- 39 Urbankowski, P.; Anasori, B.; Hantanasirisakul, K.; Yang, L.; Zhang, L. H.; Haines, B.; May, S. J.; Billinge, S. J. L.; Gogotsi, Y. 2D molybdenum and vanadium nitrides synthesized by ammoniation of 2D transition metal carbides (MXenes). *Nanoscale*, **2017**, 9(45), 17722–17730.
- 40 Hong Ng, V. M.; Huang, H.; Zhou, K.; Lee, P. S.; Que, W. X.; Xu, J. Z.; Kong, L. B. Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: synthesis and applications. *J. Mater. Chem. A*, **2017**, 5(7), 3039–3068.
- 41 Shuck, C. E.; Han, M. K.; Maleski, K.; Hantanasirisakul, K.; Kim, S. J.; Choi, J.; Reil, W. E. B.; Gogotsi, Y. Effect of Ti_3AlC_2 MAX phase on structure and properties of resultant $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2019**, 2(6), 3368–3376.
- 42 Gao, L. F.; Li, C.; Huang, W. C.; Mei, S.; Lin, H.; Ou, Q.; Zhang, Y.; Guo, J.; Zhang, F.; Xu, S. X.;

- Zhang, H. MXene/polymer membranes: synthesis, properties, and emerging applications. *Chem. Mater.*, **2020**, 32(5), 1703–1747.
- 43 Shein, I. R.; Ivanovskii, A. L. Graphene-like nanocarbidides and nanonitrides of metals (MXenes): synthesis, properties and simulation. *Micro Nano Lett.*, **2013**, 8(2), 59–62.
 - 44 Tang, H.; Wang, R. R.; Shi, L. J.; Sheremet, E.; Rodriguez, R. D.; Sun, J. Post-processing strategies for improving the electrical and mechanical properties of MXenes. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 425, 131472.
 - 45 Shariq, M.; Alshehri, K.; Mohammed Bouzgarrou, S.; Kashif Ali, S.; Alqurashi, Y.; Hassan, K. F.; Azooz, R. E. Progress in development of MXene-based nanocomposites for supercapacitor application—a review. *FlatChem*, **2024**, 44, 100609.
 - 46 Cao, S. W.; Shen, B. J.; Tong, T.; Fu, J. W.; Yu, J. G. 2D/2D heterojunction of ultrathin MXene/Bi₂WO₆ nanosheets for improved photocatalytic CO₂ reduction. *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, 28(21), 1800136.
 - 47 Kim, H.; Anasori, B.; Gogotsi, Y.; Alshareef, H. N. Thermoelectric properties of two-dimensional molybdenum-based MXenes. *Chem. Mater.*, **2017**, 29(15), 6472–6479.
 - 48 Tian, S.; Zhou, K.; Huang, C. Q.; Qian, C.; Gao, Z. B.; Liu, Y. L. Investigation and understanding of the mechanical properties of MXene by high-throughput computations and interpretable machine learning. *Extreme Mech. Lett.*, **2022**, 57, 101921.
 - 49 Bai, Y. L.; Zhou, K.; Srikanth, N.; Pang, J. H. L.; He, X. D.; Wang, R. G. Dependence of elastic and optical properties on surface terminated groups in two-dimensional MXene monolayers: a first-principles study. *RSC Adv.*, **2016**, 6(42), 35731–35739.
 - 50 Ibrahim, Y.; Mohamed, A.; Abdelgawad, A. M.; Eid, K.; Abdullah, A. M.; Elzatahry, A. The recent advances in the mechanical properties of self-standing two-dimensional MXene-based nanostructures: deep insights into the supercapacitor. *Nanomaterials*, **2020**, 10(10), 1916.
 - 51 Borysiuk, V. N.; Mochalin, V. N.; Gogotsi, Y. Molecular dynamic study of the mechanical properties of two-dimensional titanium carbides Ti_{n+1}C_n (MXenes). *Nanotechnology*, **2015**, 26(26), 265705.
 - 52 Firestein, K. L.; von Treifeldt, J. E.; Kvashnin, D. G.; Fernando, J. F. S.; Zhang, C.; Kvashnin, A. G.; Podryabinkin, E. V.; Shapeev, A. V.; Siriwardena, D. P.; Sorokin, P. B.; Golberg, D. Young's modulus and tensile strength of Ti₃C₂ MXene nanosheets as revealed by *in situ* TEM probing, AFM nanomechanical mapping, and theoretical calculations. *Nano Lett.*, **2020**, 20(8), 5900–5908.
 - 53 Lipatov, A.; Alhabeib, M.; Lu, H. D.; Zhao, S. S.; Loes, M. J.; Vorobeve, N. S.; Dall'Agnese, Y.; Gao, Y.; Gruverman, A.; Gogotsi, Y.; Sinitskii, A. Electrical and elastic properties of individual single-layer Nb₄C₃T_x MXene flakes. *Adv. Electron. Mater.*, **2020**, 6(4), 1901382.
 - 54 Zha, X. H.; Yin, J. S.; Zhou, Y. H.; Huang, Q.; Luo, K.; Lang, J. J.; Francisco, J. S.; He, J.; Du, S. Y. Intrinsic structural, electrical, thermal, and mechanical properties of the promising conductor Mo₂C MXene. *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120(28), 15082–15088.
 - 55 Li, Y. R.; Lai, M. L.; Hu, M. M.; Zhao, S. J.; Liu, B.; Kai, J. J. Insights into electronic and magnetic properties of MXenes: from a fundamental perspective. *Sustain. Mater. Technol.*, **2022**, 34, e00516.
 - 56 Ponce-Pérez, R.; Guerrero-Sanchez, J.; Gutierrez-Ojeda, S. J.; Moreno-Armenta, M. G. Oxygen coverage effect on the magnetic properties of the Cr₂NO_x (0 ≤ x ≤ 2) MXene. *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2021**, 3(11), 4967–4976.
 - 57 Scheibe, B.; Tadyszak, K.; Jarek, M.; Michalak, N.; Kempinski, M.; Lewandowski, M.; Peplińska, B.; Chybczyńska, K. Study on the magnetic properties of differently functionalized multilayered Ti₃C₂T_x MXenes and Ti-Al-C carbides. *Appl. Surf. Sci.*, **2019**, 479, 216–224.
 - 58 Yue, Y. L.; Wang, B. W.; Miao, N. X.; Jiang, C.; Lu, H. W.; Zhang, B. W.; Wu, Y. K.; Ren, J.; Wang, M. Tuning the magnetic properties of Zr₂N MXene by biaxial strain. *Ceram. Int.*, **2021**, 47(2), 2367–2373.
 - 59 Gao, L. F.; Zhao, Y. M.; Chang, X. H.; Zhang, J.; Li, Y.; Wageh, S.; Al-Hartomy, O. A.; Al-Sehemi, A. G.; Zhang, H.; Ågren, H. Emerging applications of MXenes for photodetection: recent advances and future challenges. *Mater. Today*, **2022**, 61, 169–190.
 - 60 Berdiyrov, G. R. Optical properties of functionalized Ti₃C₂T₂ (T=F, O, OH) MXene: first-principles calculations. *AIP Adv.*, **2016**, 6(5), 055105.
 - 61 Hantanasirisakul, K.; Alhabeib, M.; Lipatov, A.; Maleski, K.; Anasori, B.; Salles, P.; Ieosakulrat, C.; Pakawatpanurut, P.; Sinitskii, A.; May, S. J.; Gogotsi, Y. Effects of synthesis and processing on optoelectronic properties of titanium carbonitride MXene. *Chem. Mater.*, **2019**, 31(8), 2941–2951.
 - 62 Zhang, H. J.; Yang, G.; Zuo, X. Q.; Tang, H. B.; Yang, Q.; Li, G. Computational studies on the structural, electronic and optical properties of graphene-like MXenes (M₂CT₂, M=Ti, Zr, Hf; T=O, F, OH) and their potential applications as visible-light driven photocatalysts. *J. Mater. Chem. A*, **2016**, 4(33), 12913–12920.
 - 63 Lashgari, H.; Abolhassani, M. R.; Boochani, A.; Elahi, S. M.; Khodadadi, J. Electronic and optical properties

- of 2D graphene-like compounds titanium carbides and nitrides: DFT calculations. *Solid State Commun.*, **2014**, 195, 61–69.
- 64 Shukla, M.; Kumar, S.; Kumar, V. Metal–MXenes interaction: adsorption, bonding, and role of delocalized chemical bonding. *MXenes as Surface-Active Advanced Materials*. Amsterdam: Elsevier, **2024**, 63–80.
 - 65 Hu, S. K.; Han, P.; Meng, C.; Yu, Y.; Han, S. L.; Wang, H. Y.; Wei, G.; Gu, Z. Comparative study of different bonding interactions on the interfacial adhesion and mechanical properties of MXene-decorated carbon fiber/epoxy resin composites. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 245, 110352.
 - 66 Hu, Y.; Pang, S. J.; Yang, G. Y.; Yao, X. M.; Li, C. B.; Jiang, J. J.; Li, Y. J. MXene modified carbon fiber composites with improved mechanical properties based on electrophoretic deposition. *Mater. Res. Bull.*, **2022**, 150, 111761.
 - 67 Xu, N.; Chen, S. H.; Li, Y. Z.; Jiang, N. Y.; Zheng, T.; Goossens, N.; Vleugels, J.; Zhang, D. X.; Seveno, D. A hybrid 1D/2D coating strategy with MXene and CNT towards the interfacial reinforcement of carbon fiber/poly(ether ether ketone) composite. *Compos. Part B Eng.*, **2022**, 246, 110278.
 - 68 Ma, C.; Ma, M. G.; Si, C. L.; Ji, X. X.; Wan, P. B. Flexible MXene-based composites for wearable devices. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31 (22), 2009524.
 - 69 Dharmasiri, B.; Usman, K. A. S.; Qin, S. A.; Razal, J. M.; Tran, N. T.; Coia, P.; Harte, T.; Henderson, L. C. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene coated carbon fibre electrodes for high performance structural supercapacitors. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 476, 146739.
 - 70 Liu, W. L.; Guo, Y. Q.; Lin, T.; Peng, H. C.; Yu, Y. P.; Yang, F.; Chen, S. High-performance supercapacitor electrodes of MXene/PANI/carbon fiber hybrid composites with 2D/0D/1D hierarchical nanostructures. *J. Alloys Compd.*, **2022**, 926, 166855.
 - 71 Sun, L.; Fu, Q.; Pan, C. X. Hierarchical porous “skin/skeleton”-like MXene/biomass derived carbon fibers heterostructure for self-supporting, flexible all solid-state supercapacitors. *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 410, 124565.
 - 72 Khumujam, D. D.; Kshetri, T.; Singh, T. I.; Kim, N. H.; Lee, J. H. Fibrous asymmetric supercapacitor based on wet spun MXene/PAN fiber-derived multichannel porous MXene/CF negatrod and NiCo_2S_4 electrodeposited MXene/CF positrod. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 449, 137732.
 - 73 Iqbal, A.; Shahzad, F.; Hantanasirisakul, K.; Kim, M. K.; Kwon, J.; Hong, J.; Kim, H.; Kim, D.; Gogotsi, Y.; Koo, C. M. Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti_3CNT_x (MXene). *Science*, **2020**, 369 (6502), 446.
 - 74 Verma, R.; Thakur, P.; Chauhan, A.; Jasrotia, R.; Thakur, A. A review on MXene and its’ composites for electromagnetic interference (EMI) shielding applications. *Carbon*, **2023**, 208, 170–190.
 - 75 Yin, G.; Wang, Y.; Wang, W.; Yu, D. Multilayer structured PANI/MXene/CF fabric for electromagnetic interference shielding constructed by layer-by-layer strategy. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Aspects*, **2020**, 601, 125047.
 - 76 Duan, N. M.; Shi, Z. Y.; Wang, Z. H.; Zou, B.; Zhang, C. P.; Wang, J. L.; Xi, J. R.; Zhang, X. S.; Zhang, X. Z.; Wang, G. L. Mechanically robust $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/carbon fiber fabric/thermoplastic polyurethane composite for efficient electromagnetic interference shielding applications. *Mater. Des.*, **2022**, 214, 110382.
 - 77 Duan, Y. F.; Fang, X. T.; Zhang, Z. L.; Sun, R.; Hong, J.; Ruan, F. T.; Hu, Q. L.; Xu, Z. Z. Lightweight, flexible rCEF@PPy/MXene for ultra-efficient EMI shielding felt with Joule heating performance. *Mater. Lett.*, **2023**, 341, 134297.
 - 78 Cui, C.; Guo, R. H.; Ren, E. H.; Xiao, H. Y.; Zhou, M.; Lai, X. X.; Qin, Q.; Jiang, S. X.; Qin, W. F. MXene-based rGO/ Nb_2CT_x / Fe_3O_4 composite for high absorption of electromagnetic wave. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 405, 126626.
 - 79 Wang, X. W.; Zhao, C.; Li, C. P.; Liu, Y.; Sun, S.; Yu, Q. L.; Yu, B.; Cai, M. R.; Zhou, F. Progress in MXene-based materials for microwave absorption. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2024**, 180, 207–225.
 - 80 Wang, J. Q.; Liu, L.; Jiao, S. L.; Ma, K. J.; Lv, J.; Yang, J. J. Hierarchical carbon fiber@MXene@ MoS_2 core-sheath synergistic microstructure for tunable and efficient microwave absorption. *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, 30(45), 2002595.
 - 81 Han, X. P.; Huang, Y.; Gao, S.; Zhang, G. Z.; Li, T. H.; Liu, P. B. A hierarchical carbon fiber@MXene@ZnO core-sheath synergistic microstructure for efficient microwave absorption and photothermal conversion. *Carbon*, **2021**, 183, 872–883.
 - 82 Chao, M.; Chu, N.; Zhang, B.; Luo, C. J.; Yan, L. K. MXene/carbon fiber/polyimide composite aerogel for multifunctional microwave absorption. *Compos. Commun.*, **2024**, 46, 101837.