Hans Journal of Nanotechnology 纳米技术, 2024, 14(2), 23-36
Published Online May 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/nat
https://doi.org/10.12677/nat.2024.1412003

Hans汉斯

二维材料MXene的制备方法、性能与应用探究

侯淑萍，韩艺婷，莫美新，葛杨美程，李　辉，贺小川
天津商业大学信息工程学院，天津

收稿日期：2024年2月25日；录用日期：2024年5月18日；发布日期：2024年5月28日

摘　要

MXene是一种新型的二维层状纳米材料，具有独特的多层结构，出色的导电性，力学性和表面功能化能力，使其在广泛的应用中具有高度普适性。本文综述了MXene的“自下而上”和“自上而下”制备方法，对比了各种方法的优缺点。分析了MXene材料的特性及对应的应用场景，对MXene在化学、生物和多功能等传感器中研究进行了总结。

关键词

MXene，制备方法，应用性能

Research on the Preparation Method and Application Performance of Two-Dimensional Material MXene

Shuping Hou, Yiting Han, Meixin Mo, Meicheng Geyang, Hui Li, Xiaochuan He
School of Information Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, China

Received: Feb. 25th, 2024; accepted: May 18th, 2024; published: May 28th, 2024

Abstract

MXene is a novel two-dimensional layered nanomaterial that has shown extensive application prospects in various fields due to its unique structure and physicochemical properties. This article provides an overview of the "bottom-up" and "top-down" preparation methods for MXene, and compares the advantages and disadvantages of each method. Analyzed the characteristics and corresponding application scenarios of MXene materials, and summarized the research on MXene in chemical, biological, and multifunctional sensors.

文章引用：侯淑萍，韩艺婷，莫美新，葛杨美程，李辉，贺小川．二维材料 MXene 的制备方法、性能与应用探究[J]．纳米技术, 2024, 14(2): 23-36. DOI: 10.12677/nat.2024.1412003

Keywords

MXene, Preparation Method, Application Performance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

材料是推动人类文明进步与现代工业发展的核心力量。随着科技的飞速发展，材料科学的重要性日益凸显，二维纳米材料在领域内注入了新的活力。二维纳米材料因其横向尺寸较大，纵向尺寸仅为一个到几个原子层的厚度，因此展现出独特的光学、电学、磁学和热学等性质，引发了研究热潮。2011 年二维层状晶体材料 MXene 材料的发现是二维纳米材料领域中的又一重大进展。MXene 是一种二维过渡金属碳、氮或碳氮化物，具有多样的组成与性能调节特点，在储能、催化、电磁屏蔽、传感、生物医学等领域，均呈现出其独特的应用潜力。

2. MXene 材料

MXene 材料发现源于科学家对 MAX 相的深入探索。MAX 相是一种三元层状化合物[1]，属于一个庞大的固体材料家族，由大约 130 种不同的组分组成，该化合物的分子式为 $M_{n+1}AX_n$，其中 M 指的是前几族的过渡金属，常见的有 Ti，Sc，Zr，Nb 等，A 主要是 IIIA~VIA 族元素，例如 Al、Si、Ga 等，X 则代表碳或氮元素。根据 n 值的变化，通常为 1、2 或 3，MAX 相主要可分为 211 相(M_2AX)、312 相(M_3AX_2)和 413 相(M_4AX_3)。这些不同的相结构使得 MAX 相在物理化学性质上有着多样的变化[2]。

MAX 相本质上是具有六方对称晶体结构的层状碳化物或氮化物，它们由交替排列且紧密堆积的 $M_{n+1}X_n$ 层和纯 A 原子层交错构成，呈现典型层状材料特征。其中 $M_{n+1}X_n$ 层之间是较强的共价键/金属键/离子键的混合性质，与 A 原子层之间是相对较弱的金属键，可以使用适当的蚀刻剂，如强酸或强碱选择性刻蚀活性高且键能低 A 原子层，从而获得类石墨烯二维片层结构特征的 MXene 材料。由于 MXene 的原子结构和化学计量与对应的 MXA 相前驱体，所以 MXene 的化学通式为 $M_{n+1}X_nT_x$。同时，伴随着 A 原子层的刻蚀，与刻蚀环境有关的多种端基 T_x (-OH、-O、-F、-Cl 等)与 M 层原子的结合，形成具有各向异性的层状结构。表面末端的配位范围能够影响 MXenes 的表面性质，高配位活性使得 MXenes 表面功能化更具潜力。

3. MXene 材料的制备方法

MXene 材料合成路线主要分为两种：“自上而下”的元素置换反应方法和“自下而上”的一步法制备方法，即基于大晶体直接剥离的自上而下方法和基于分子或原子合成的自下而上方法。

3.1. “自上而下”方法

“自上而下”方法即基于前驱体 MAX 刻蚀法[3]，是目前制备 MXene 的主流路线，在众多刻蚀方法中，根据是否含有氟元素，可以将其分为含氟刻蚀法和无氟刻蚀法。含氟刻蚀法因其高效的去除效果和广泛的应用领域而备受关注，包括 HF 刻蚀法、原位形成 HF 刻蚀法、含氟熔融盐刻蚀法等；与含氟刻蚀法相对应的是无氟刻蚀法，它主要包括电化学刻蚀法、碱刻蚀法和路易斯熔融盐刻蚀法等。含氟刻蚀法

和无氟刻蚀法各自具有特点和优势，可以根据实际需求和应用场景选择合适的刻蚀方法。在未来的发展中，环保、高效、可控的刻蚀技术将越来越受到关注，有望为我国材料加工和表面处理领域带来更多突破。

3.1.1. 含氟刻蚀法

(1) HF 刻蚀法

HF 蚀刻法是最早报道的用于 MXene 材料制备方法，适用于含有 A 原子层为 Al 的 MAX。该方法的运作原理是基于氟离子与铝的高度反应活性，致使 M-Al 较弱的结合键断裂，从而选择性地蚀刻掉铝层，生成 AlF_3。在此过程中，M-X 较强的键未受影响，同时生成并逸出氢气，最终形成多层堆叠的“手风琴”状 MXene。为获得 MXene 单层纳米片，需要使用二甲基亚砜等插层剂的插层，以减弱 MXene 片层的范德瓦斯力，并通过超声处理完成多层 MXene 的剥离。同时，刻蚀介质中的 H、O、F 原子与表面不饱和 M 原子键合，形成诸如-OH、-O、-F 等众多表面端基[4]。这些表面端基的存在，使得材料表面发生了明显的化学变化，进而影响了材料的物理和化学性质。制备 MXene 的过程受到原料选择、HF 水溶液浓度、反应温度和反应时间等参数的显著影响。以 Ti_2AlC_2 为 MAX 相，在 50 wt%的 HF 水溶液中[5]，于室温下反应 2 小时，可制备出多层 MXene。进一步通过超声分散，可得到单层 MXene。在刻蚀过程中，反应如下进行：

$$\mathrm{Ti_3AlC_2} + 3\mathrm{HF} \rightarrow \mathrm{AlF_3} + \frac{3}{2}\mathrm{H_2}\uparrow + \mathrm{Ti_3C_2}$$

$$\mathrm{Ti_3C_2} + 2\mathrm{HF} \rightarrow \mathrm{Ti_3C_2F_2} + \mathrm{H_2}$$

$$\mathrm{Ti_3C_2} + 2\mathrm{H_2O} \rightarrow \mathrm{Ti_3C_2(OH)_2} + \mathrm{H_2}$$

(2) 原位形成 HF 刻蚀法

氢氟酸(HF)作为一种强腐蚀性、毒性的化学物质，其使用一直受到限制。为了解决这些问题，科研人员提出了一种利用 LiF 和 HCl 混合溶液代替 HF 的方法。混合溶液中的氟离子和氢离子同时存在，避免了直接使用 HF，因此该方法具有操作安全简单、能耗低、环境友好等优点。该方法类似 HF 刻蚀的反应机制，依赖于刻蚀剂中的氟离子对前驱体 MAX 相中 A 层原子形成氟化物，同时伴随着 H^+转化为 H_2，阳离子 Li^+自发插入到 MXene 层之间，扩大了 MXene 的层间距，使得单层的 MXene 可以通过温和的超声和手摇法剥离得到。除了 LiF 外，其他氟酸盐，如 NaF、KF、NH_4F 和 FeF_3 等也可以与 HCl 配合，同样也可用 H_2SO_4 代替 HCl。该方法得到的 MXene 表面端基类型可能包含-F、-OH、-O 和-SO_4 等。这些不同的端基会对 MXenes 的性能产生影响，因此可以通过调整混合溶液的组成和刻蚀时间等参数来控制 MXenes 的形貌和结构，从而进一步优化其性能和应用领域[6] [7]。

另一种原位形成 HF 刻蚀法是通过双氟盐在水中发生电离产生氟离子，从而完成 MAX 相中对 A 层原子的刻蚀。以 NH_4HF_2 为代表的各类双氟酸盐，如 $NaHF_2$ 和 KHF_2 等，均被用于刻蚀 MAX 相以制备 MXene 材料。在此刻蚀过程中，水合阳离子如 K^+、NH_4^+ 等会插入 MXene 层间，由于这些阳离子半径较大，所制备的 MXene 具有更大的层间距。然而，为了将产物剥离为单层纳米片，仍需加入插层剂进行进一步的插层处理。

NH_4HF_2 对 Ti_3AlC_2 的 MAX 相刻蚀反应式如下：

$$\mathrm{Ti_3AlC_2} + 3\mathrm{NH_4HF_2} \rightarrow (\mathrm{NH_4})_3\mathrm{AlF_2} + \mathrm{Ti_3C_2} + \frac{3}{2}\mathrm{H_2}$$

$$\mathrm{Ti_3C_2} + \alpha\mathrm{NH_4HF_2} + b\mathrm{H_2O} \rightarrow (\mathrm{NH_3})_c(\mathrm{NH_4})_d\mathrm{Ti_3C_2(OH)}_x\mathrm{F}_y$$

这种方法是目前制备 MXene 最常用的方法，但其刻蚀范围和产率有限，仅限于 MAX 相中 A 原子层为 Al 的情形。

(3) 含氟熔融盐刻蚀法

经过深入研究表明，大多数 A 层非 Al 的 MAX 相或氮化物 MXA 相在水溶液中的剥离能较高，因此难以完成刻蚀。此外，氮化物的结构稳定性较差，在含氟的水溶液中容易降解，因此难以通过氟刻蚀法获取氮化物的 MXene。为了解决这一难题，研究者们采用了含氟易熔盐(如 KF、LiF 及 NaF)与 Ti_4AlN_3 在 550℃下共热的方法[8] [9]，成功生成了 $Ti_4N_3T_x$，其表面基团为-F、-O 等。这一创新方法为获取氮化物的 MXene 提供了一条有效的途径，缺点是温度高、亲水性较差。

3.1.2. 无氟刻蚀法

(1) 电化学刻蚀法

电化学刻蚀法是一种利用 MAX 相的导电性，将待刻蚀的前驱体 MAX 相作为工作电极，在电解液中施加电压进行电化学反应，选择性去除 A 原子层得到对应的 MXene 的方法。该方法中，M-A 键的化学活性比 M-X 键更强，因此首先断裂。研究表明，电解液中的 Cl^-是刻蚀的必要条件。例如，使用 NH_4Cl 或 $FeCl_3$ 作为电解液对 Ti_3AlC_2 进行电化学刻蚀时[10] [11]，Cl^-和 Al 原子的结合可以打破 Ti-Al 键，从而选择性地刻蚀掉 Al 层，其反应式如下：

$$\mathrm{Ti_3AlC_2 + 3Cl^- - 3e^- \rightarrow Ti_3C_2 + AlCl_3}$$

$$\mathrm{Ti_3C_2 + 2OH^- - 2e^- \rightarrow Ti_3C_2\left(OH\right)_2}$$

$$\mathrm{Ti_3C_2 + 2H_2O \rightarrow Ti_3C_2\left(OH\right)_2 + H_2}$$

电化学法在实现反应过程中，须添加电解质以催化反应的进行。由此产生的 MXene 表面会附着部分电解质中的基团，如-Cl、-OH、-O 等。这些基团可以改变材料的性能，因此可以利用电解质引入一些所需的功能性基团来改变材料的性能。

在电化学刻蚀过程中，由于 MAX 相是致密块体，只有表面与电解液接触，因此随着时间的延长，会形成 MXA 相内核、MXene 中间和碳化物衍生碳三层结构[12] [13] [14]，使 MXene 难以收集，产率大大降低。为了促进 MXA 相的块体内部能与电解液充分接触，保证刻蚀反应的持续进行，可添加插层剂以扩大层间距，既促进内部 MAX 相的刻蚀，又有利于抑制外层 MXene 的过度刻蚀。此外，热辅助电化学刻蚀可提高刻蚀效率和产率，然而，目前该技术仍存在一些挑战，无法得到高产率和纯相的 MXene。

(2) 碱刻蚀法

在制备 MXene 的过程中，碱刻蚀法需要满足高温和高碱浓度的必要条件。这是由于稀碱溶液的腐蚀性相对较弱，仅能对 MAX 相的最表层进行刻蚀。因此，为了实现更有效的刻蚀和制备出高质量的 MXene 材料，需要提高碱浓度和温度，以确保充分破坏 MAX 相并实现深度刻蚀[15] [16] [17]。

根据相关研究，将 Ti_3AlC_2 与 27.5 mol/L NaOH 溶液在 270℃下进行水热反应，可以获得表面无氟、产率高达 92%的产物，并且该产物的亲水性良好。在此水热过程中，主要的化学反应是将 MAX 相中的 Al 原子层转化为 $Al(OH)_3$，然后在碱性介质中溶解。具体化学反应式如下：

$$\mathrm{Ti_3AlC_2 + OH^- + 5H_2O \rightarrow Ti_3C_2\left(OH\right)_2 + Al\left(OH\right)_4^- + 2.5H_2}$$

$$\mathrm{Ti_3AlC_2 + OH^- + 5H_2O \rightarrow Ti_3C_2O_2 + Al\left(OH\right)_4^- + 3.5H_2}$$

所得 MXene 的微观形貌呈现为手风琴状，表面端基类型为-O 和-OH，具有良好的亲水性，并且避免了卤素端基的引入。

(3) 路易斯酸熔融盐刻蚀法

路易斯酸熔融盐刻蚀法是依据氧化还原电位序进行的。在熔融状态下，路易斯酸熔融盐通常具有较高的电化学氧化还原电位，因此能够刻蚀电化学氧化还原电位较低的 MAX 相。根据不同的路易斯熔融盐类型，可以分别获得表面端基为-Cl、-Br 和-I 的 MXene。这些端基与 MXene 表面的结合力相对较弱[18] [19] [20]，与-F 端基的结合力相比更是如此。因此，通过基团的置换，可以合成表面为-O、-NH、-S、-Se、-Te 以及表面无端基的 MXene，从而实现对 MXene 性能的调控和应用[21] [22] [23]。熔融盐刻蚀法所获得的 MXene 仍呈现出手风琴形貌，目前尚未找到有效的剥离方法以制备单片层的 MXene。尽管该方法具有较好的普适性和较高的操作安全性，但目前仍处于探索阶段，对于制备的 MXene 的电导率、亲水性等特性仍需进一步深入研究。

通过以上分析可知“自上而下”的刻蚀方法通常需要经历两个关键步骤。第一步是从 MAX 相中刻蚀去除 A 原子层，这是 MXene 制备过程中的基础步骤，为后续的插层剥离提供了必要条件。第二步是对多片层 MXene 进行插层剥离，以将多层 MXene 纳米片分离成单层或少层纳米片。这个步骤是制备高质量 MXene 纳米片的关键环节，能够确保得到的纳米片具有所需的形态和结构。通过这两个步骤的有机结合，可以获得高质量的 MXene 纳米片。这种制备方法具有普适性和可调控性，为 MXene 材料的大规模生产和应用提供了有效的途径。

3.2. “自下而上”方法

“自下而上”的方法是以分子或原子为基础的直接合成策略，其发展将有助于推动具有卓越功能的 MXenes 家族在实际应用领域的迅猛拓展，目前主要是如化学气相沉积(CVD)法[24]和离子喷溅法等。2019 年，Druffel 研究团队在借鉴 Hwu 团队 1986 年关于 Sc、Y、Zr 金属碳化物合成研究的基础上，成功实现了通过固相反应将 YF_3、Y 金属与石墨进行组合，进而合成具有类 Mxene 结构的 Y_2CF_2。2023 年 3 月 23 日，《Science》杂志发表了芝加哥大学 Dmitri V. Talapin 教授团队关于 MXenes 合成的研究成果[25]。该研究提出了一种具有可扩展性和经济性的新策略，通过金属钛、氯化钛以及各类碳或氮源在高温条件下合成 Ti_2CCl2 和 Ti_2NCl_2 MXenes [25]。结构分析表明，研究范围内存在 Ti_2CCl_2 MXene 相，并与 MAX 相合成的 Ti_2CCl_2 进行比较，性能相近。通过对比 XRD 图谱与 SEM 图像，发现 Cl 在 MXene 表面实现全覆盖，优于传统 MAX 剥离路线合成的 MXenes，且片层取向垂直于基底，使得表面具有高催化活性的边缘位点，表面基团可被其他分子取代或完全去除。同时作者采用直接化学气相沉积合成方法，将 Ti 箔与 $TiCl_4$ 和 N_2 在 640℃以上反应，形成纯氮化物 Ti_2NCl_2 MXene。与碳化物 MXenes 相比，氮化物 MXenes 具有诸如铁磁性和高导电性等吸引人的性能，该方法是对传统难于现实氮化物 MAX 相蚀刻方法的补充，同时实现了以氯为端部的氮化物 MXenes 的实验。直接合成途径使得 MXene 地毯式化学气相沉积生长及复杂的球晶状形态成为可能，这些形态通过 MXene 地毯的弯曲与释放过程形成，以暴露新表面供进一步反应。实验结果显示，直接合成的 MXenes 具有卓越的锂离子嵌入储能性能。可见化学气相沉积(CVD)法可直接由金属原料制备 MXenes，从而规避蚀刻过程中产生的废液与废气问题。通过控制反应条件和前驱体比例，可实现不同组成和结构的 MXenes，制备大面积、均匀且连续的 MXenes 薄膜，通过调整温度和气氛，可实现对 MXenes 表面官能团的控制和调节。

离子溅射也被用于合成超薄 Ti_2C 纳米片。用低能重离子(LEIF)轰击靶靶的离子束装置轰击 Ti 和 C，得到由单个相组成的重复纳米层[26]。通常情况下，自下而上的方法(即 CVD，离子溅射)制备的 MXenes 表面没有末端，但通常收率低，对设备要求高。

各种制备方法的优缺点对比如表 1 所示。

DOI: 10.12677/nat.2024.1412003

Table 1. Advantages and disadvantages of MXene preparation methods
表 1. MXene 制备方法的优缺点

方法			MAX 相	生成条件	原理	端基	优缺点
自上而下	含氟刻蚀法	HF 刻蚀法	大部分 A 原子层为 Al 的 MAX	浓 HF	氟离子对前驱体 MAX 相中 A 层原子形成氟化物	-OH、-O、-F	缺点：强腐蚀性、有毒； 优点：大规模生产
		原位形成 HF 刻蚀法		酸 + 他氟酸盐，如 H_2SO_4、HCl、LiF、NaF、KF、NH_4F 和 FeF_3		-F、-OH、-O 和-SO_4	缺点：刻蚀范围和产率有限； 优点：毒性低、腐蚀性弱
				双氟酸盐：$NaHF_2$ 和 KHF_2、NH_4HF_2		-OH、-O、-F	
		含氟熔融盐刻蚀法	大多数 A 层非 Al 的 MAX 相或氮化物 MXA 相	氟易熔盐(如 KF、LiF 及 NaF)高温		-F、-O 等	缺点：温度高、亲水性较差； 优点：可获取氮化物
	无氟刻蚀法	电化学刻蚀法		电解液中的 Cl^-	在电解液中施加电压进行电化学反应，选择性去除 A 原子层	-Cl、-OH、-O 等	缺点：难以收集，产率大大降低，纯净度不高 优点：电解质引入一些所需的功能性基团
		碱刻蚀法	大部分 A 原子层为 Al 的 MAX	与 NaOH 溶液在高温下进行水热反应	将 MAX 的 Al 原子层转化为 $Al(OH)_3$，然后在碱性介质中溶解	-O 和-OH	缺点：高温和高碱浓度 优点：具有良好的亲水性，并且避免了卤素端基的引入
		路易斯熔融盐刻蚀法		反应温度，能耗高	高的电化学氧化还原电位较低的 MAX 相	-Cl、-Br 和-I	缺点：剥离为单片层的 MXene 困难 优点：端基可调、较好普适性和较高操作安全性
自下而上	-	化学气相沉积(CVD)法	——	高温下将甲烷或氨气中的碳或氮源与过渡金属原子反应，生成高质量的 MXenes 晶体。	通过精确调节生长条件，可以影响成核生长过程，进而控制 MXenes 晶体的形态、厚度、尺寸以及异质结空间取向等关键参数。	可调	缺点：通常收率低，对设备要求高； 优点：可控制薄膜的成分、厚度和形貌。
		离子喷溅法		离子束轰击目标材料表面并产生溅射原子，进而形成薄膜的技术。	用低能重离子(LEIF)轰击靶靶的离子束装置轰击 Ti 和 C，得到由单个相组成的重复纳米层。		

4. MXene 材料的性能

4.1. 导电性

MXene 材料是一种新型的二维材料，通常展现出类似金属的超高电导率，这得益于其出色的导电性能。这种高导电性主要源于两个方面。首先，过渡金属 M 层的 d 轨道电子赋予了其接近费米能级的高电子密度[27] [28]，这种高电子密度在过渡金属的化学和物理性质中起着关键作用，使得 MXene 材料具有很好的导电性。其次，MXene 内部的金属碳化物层实现了有效的电子传输，进一步提高了其导电性。

理论上，无表面端基的 MXene 应具有金属性。然而，在实际制备过程中，由于无法避免表面端基的引入，MXene 的导电性会受到一定影响。对于 Ti_3C_2、Zr_3C_2、Nb_4C_3 等 MXene [29] [30]，其导电性受表面端基影响较小，无论结合何种端基，它们均能保持金属性。然而，对于 Ti_2C、Zr_2C、Hf_2C 等 MXene，与氧端基结合后，它们会从导体转变为半导体性质。

除了表面端基的影响，实际制备过程中的产物缺陷浓度和尺寸也会对 MXene 的电导率产生影响。通常，缺陷浓度较低且尺寸较大的纳米片具有更高的电导率。因此，优化刻蚀条件对于调控 MXene 的电导率至关重要[31]。

MXene 的高度导电性使其在电极材料、传感器、储能器等领域具有重要应用价值。例如，在电池中，MXene 可以作为电极材料，提高电池的电导率和能量密度[32] [33]。在传感器领域，MXene 可以用于制造高灵敏度的传感器，用于检测气体、湿度、温度等参数。此外，MXene 还可以用于制造储能器，如超级电容器和锂离子电池等。

总之，MXene 材料的高导电性和优异的应用前景使其成为当前材料科学领域的研究热点之一。未来随着制备技术的不断进步和应用领域的不断拓展，MXene 材料将会在更多领域发挥重要作用。

4.2. 分散性

MXene 是一种具有优异性能的材料，其在水和多种有机溶剂中的良好分散性使其在许多领域具有广泛的应用前景。MXene 的分散性主要受到其表面基团类型的影响[34] [35]。由于 MXene 具有亲水表面基团(-OH，-O 等)，它能够很好地分散在水溶液中，并且与水凝胶基质相容。

MXene 被认为是一种有前景的导电水凝胶纳米填料[36]。然而，MXene 的稳定性较差，容易氧化为 TiO_2，导致电导率下降。为了提高 MXene 的稳定性，可以采取一些措施，例如在某些有机溶剂(如 DMF、NMP、PC 和乙醇)中形成稳定分散体[5] [37]。

为了延长 MXene 的存储寿命，可以采用置换溶剂的方法进行储存[38]。这种方法可以有效地减少 MXene 的氧化，并保持其分散性和相容性。此外，还可以通过控制储存条件(如温度、湿度等)来进一步延长 MXene 的存储寿命[39] [40]。

虽然 MXene 具有优异的分散性和相容性，但其稳定性差是一个需要解决的问题。未来可以通过进一步的研究和开发，探索新的制备方法和储存技术，以提高 MXene 的稳定性并延长其存储寿命。这将有助于进一步拓展 MXene 的应用领域，并推动其在各个领域中的广泛应用。

4.3. 机械性能

MXene 是一种新型的二维材料，通常展现出良好的机械性能。其机械性能的优异主要归因于其独特的结构特点。在通过刻蚀除去 A 原子层得到 MXene 后，电子密度在 $M_{n+1}Xn$ 层中更为集中[41]，并且包含结合强度高的 M-C 键或 M-N 键。这些因素进一步增强了 MXene 的机械性能。

有研究表明[42]，通过第一性原理计算，当沿着 MXene 的基准面进行拉伸时，其杨氏模量可达(0.33

+ 0.03) TPa，高于相同厚度的其它二维材料。这说明 MXene 具有较高的弹性模量，能够承受较大的拉伸应力。

此外，通过引入表面端基(-OH、-O、-H 等)，MXene 具有较大的临界应变，这抑制了受拉伸应力时表面金属层的塌陷，从而增强了 MXene 的柔韧性。这意味着 MXene 不仅具有较高的强度，还具有一定的韧性，使其在受到外力作用时不易破裂或变形[43] [44]。

然而，结构缺陷如孔隙和片层褶皱等会对 MXene 的机械性能产生不良影响[45] [46] [47]。这些缺陷可能会破坏 MXene 的连续性和完整性，降低其力学性能。因此，在制备和应用 MXene 时，需要采取措施避免或减少这些结构缺陷的产生。

总的来说，MXene 的优异机械性能使其在许多领域具有广泛的应用前景。例如，它可以作为高性能复合材料的增强剂、电容器、电池电极等。然而，为了充分发挥其潜力，需要进一步研究和优化其制备工艺，以提高其质量和产量。同时，也需要深入研究其结构与性能之间的关系，以更好地理解和应用这种新型二维材料。

4.4. 光学性能

MXene 是一种具有可调光学性质的材料，其电子特性和光学性质受到表面端基的影响。不同的表面端基可以调控 MXene 的电子结构和带隙[48]，从而影响其对各段波光的吸收系数。在可见光范围内，-F 和-OH 端基会降低 MXene 的吸收和反射率[49]，而带有其他端基的 MXene 则表现出不同的光学性质。对于紫外光，带有端基的 MXene 比无端基的 MXene 具有更高的反射率[50]。

除了端基调控外，对 MXene 进行插层处理也可以改变其光学性质[51]。通过插层处理，可以调控 MXene 的层间距大小，进而影响其光学性质。这种调控方式为 MXene 的光学性质提供了更多的可能性。

MXene 在光热疗法、透明导电涂料、光热应用等领域具有广泛的应用前景[52]。在光热疗法中[53]，MXene 可以作为光热转换材料[54]，将光能转化为热能，从而杀死癌细胞或破坏病毒。在透明导电涂料中[55]，MXene 可以与其他材料复合，制备出具有优异导电性和透明度的涂料，用于太阳能电池、显示器等领域。此外，MXene 还可以用于光热应用[56]如太阳能热水器、光热发电等。

总之，MXene 具有可调的光学性质，其应用前景广泛。通过进一步的研究和开发，可以探索更多具有创新性的应用领域。

4.5. 磁学性能

MXene 的磁性来源主要归因于其 M 层的过渡金属原子[57]。这些原子在 MXene 的晶体结构中起着关键作用，决定了其磁学性质。根据理论计算，表面无端基的 MXene 材料均具有一定的磁性，而表面端基会对 MXene 的磁性产生影响。所以端基的种类和数量可以改变 MXene 的磁性强度和方向，从而实现对磁性的调控。

除了表面端基外，还有其他方法可以对 MXene 的磁性进行调控[58]。例如，通过掺杂异质原子，可以在 MXene 中引入新的磁性来源，从而增强或改变其磁性。此外，引入机械应变和空位也是一种有效的调控手段。这些方法可以改变 MXene 的晶体结构，进而影响其磁学性质。

MXene 在磁学性质上的多样性为其在自旋电子器件、磁性纳米器件等领域的应用提供了广阔的空间。例如，在自旋电子器件中，MXene 可以作为自旋极化电流的通道，实现高效的自旋信息传输。而在磁性纳米器件中，MXene 可以作为磁性材料的基底，为纳米尺度的磁性器件提供稳定的性能。

4.6. 其他性能

MXene 表面的端基调控对其光学、电子和电化学性质具有深远的影响。在 MXene 的研究中，端基

的调控一直是一个重要的研究方向。例如，当 MXene 的表面端基为硫或硒时，它展现出超导性质。这揭示了 MXene 在超导领域的应用潜力，包括超导材料和超导电子器件等。此外，不同的端基还可以调控 MXene 的带隙宽度，进而影响其光学吸收和发光性质。

5. MXene 在传感器中的应用

作为一种新型二维材料，MXenes 具备出色的导电性能、化学稳定性和表面功能化特性，因此在传感器领域具有广泛的应用潜力。在化学传感器中，MXenes 可作为灵敏材料，有效地检测有害气体和重金属离子等化学物质。在生物传感器领域，MXenes 表现出对生物分子的高度亲和力，可用于检测生物标志物、蛋白质和 DNA 等生物分子，展现出潜在的生物医学应用前景。在压力传感器领域，研究者将活性基团的聚合物与 MXenes 结合，以增强柔性传感材料的力学性能和导电性。目前，主要通过织物、薄膜、气凝胶和水凝胶四种形态构建压力传感器。

5.1. 化学传感器

MXene 由于其丰富的碳化物、氮化物及碳氮化物，表现出卓越的亲水性、高比表面积和优异的电导性，因此被视为一种极具潜力的电化学传感应用材料。

中国石油大学(华东)张冬至科研团队利用 MXene 的大比表面积[59]，制备出具有抗聚集特性的三维皱褶 MXene $Ti_3C_2T_x$ 微球。该微球具有广阔的吸附表面，与 ZnO 纳米颗粒复合后，形成更活跃的吸附位点。由于高表面积、丰富的边缘和折叠缺陷，以及 MXene/ZnO p-n 异质结的构建，该微球对 NO_2 的选择性显著提升。在 100 ppm NO_2 下，响应信号从 27.27%~41.93%上升，回收率从~30%提高至~100%。三维皱褶 MXene 球体结构为 MXene 的化学传感提供新视角，推动其在气体传感器领域的应用，为探究 MXene 气体传感机理提供有益参考。针对二维层状 MXene 片材易堆积及复配 MXene 表面容量较低的问题，济南大学宋鹏团队研发出一种三维 MXene/rGO/CuO 气凝胶[60]。该气凝胶得益于高度互连的多孔网络、较大的比表面积、均匀分散的 CuO 纳米颗粒及良好的电子导电性，在室温下展现出优异的丙酮传感性能。传感器对 100 ppm 丙酮的响应率高达 52.09%，响应和恢复时间迅速，且具有较好的重复性和选择性。这种金属氧化物半导体复合三维石墨烯/MXene 结构策略为气体传感器的发展提供了新思路。越南岘港维新大学科研团队为解决 MXene 材料的窄带隙问题，将 MoS_2 与 MXene 进行复合[61]。这种复合材料具有高金属导电性和完全功能化的表面，能显著提高信号。当 NO_2 浓度分别增加到 10 ppm、50 ppm 和 100 ppm 时，灵敏度分别为 35.8%、63.4%和 72.5%。该气体传感器在环境温度下能可靠检测几种有害气体，具有高灵敏度，适用于精确检测危险气体。

5.2. 生物传感器

MXene 材料在生物传感器领域具备显著优势。凭借电学检测，其操作简便、准确度高，并能规避化学检测所面临的局限，如试剂消耗和环境污染等问题。此外，通过对 MXene 表面官能团的灵活改性，实现了功能多样化。同时，MXene 具备较高的稳定性和亲水性，以及完整的金属原子层和可调成分，使其在临床和生物医学领域展现出广泛的应用潜力。

福州大学唐点平教授科研团队受人体皮肤棘突微结构的启发，利用 CRISPR-Cas12a 技术，制造了 Ti_3C_2Tx-PEDOT:PSS/PDMS 压阻式传感器[62]。该传感器具有随机接触面和棘状结构，能将外部刺激转化为电信号，具有高灵敏度、广泛性和可移植性。他们还利用磁珠-ssDNA-Au@Pt 纳米颗粒作为 CRISPR-Cas12a 系统的信号转导标签，构建了 CRISPR-Cas12a 无线生物传感器，当 Cas12a 与目标 HPV DNA 结合时，切割活性被激活，从而释放 Au@PtNPS，这些纳米颗粒能催化 H_2O_2 生成 O_2，压缩压阻器件，增加电流。该传感器可集成到智能手机中，通过视觉读数。这种基于 CRISPR-Cas12a 的无线压阻生

物传感器为分子诊断提供了新选择。东华大学侯成义团队利用印刷技术，将疏水蜡、导电电极和 MXene/亚甲基蓝复合材料整合至 HIS 纸中，通过折叠形成 3D 结构，高效收集和扩散汗液[15]。这种结构可以同时检测葡萄糖和乳酸，灵敏度较高。该研究为可穿戴设备的汗液实时分析提供了一种小型化、低成本、灵活的生化平台解决方案。北京化工大学的张立群研究团队，成功地使用浸涂法，在柔韧可降解的丝素纳米纤维(MXene-SF)膜上，均匀沉积了几层导电的 Ti_3C_2Tx MXene 纳米片，制造出基于 MXene/蛋白质纳米复合材料的压力传感器[63]。这种传感器能全面监测生命体征，从细微的脉搏、发声到大规模的运动如膝盖弯曲都能捕捉。它未来在智能电子皮肤、人体运动检测、疾病诊断及人机交互等领域有巨大潜力。

5.3. 多功能传感器

传统传感器仅能测量单一参数，但在某些场合需要同时测量多个参数，因此，在 MXene 传感器研究领域，研究者致力于柔性传感器的多功能多模式识别研究。我国学者邓维礼团队设计了一款创新型基于微通道受限 MXene 的柔性多功能压阻压力传感器。MXenes 在沟槽中构建三维堆叠结构[64]，赋予更大的变形空间和敏锐的微动性能。得益于其优异的灵敏度，该传感器能实现压力、声音、加速度和微运动的多功能微力传感，使柔性压阻式多功能微力传感器的低成本制造成为可能。北京化工大学的张好斌研究团队运用真空辅助逐层组装技术，在协同作用下一维 AgNWs 与二维 MXene 纳米片于多孔丝基底之上，构建出具有高导电性仿生叶状纳米结构[65]。通过独特的导电网络与功能纳米材料可控共形沉积，以及多孔特性的保留，这些复合纺织品展现出多种创新性能。其中，MXene 层能有效保护 AgNWs 免受氧化，使纺织品具备敏感湿度响应，并呈现出独特的自衍生疏水性。得益于导电性、EMI 屏蔽、高度敏感的湿度响应和超疏水性，这些多功能纺织品在智能服装、传感器、致动器、能源发电机和电磁干扰屏蔽领域具有广泛应用潜力。郑州大学的郑燕君博士团队研发了一种新型的导电纳米材料涂覆的热塑性聚氨酯无纺布多功能电子纺织品[66]。这种材料以 Ti_3C_2TxMXene 和碳纳米管为基础，制备简单，具有高灵敏度、宽传感范围、快速响应/恢复时间、优良的长期稳定性和可靠性，是一种可调谐的导电织物应变传感器。此外，这种织物还具有优异的电磁干扰屏蔽效果和卓越的热管理性能，包括在较低施加电压下具有较高的焦耳加热温度、快速的焦耳加热响应、充足的加热稳定性和可靠性。此项研究证实，这种高性能多功能电子纺织品在应变传感、电磁干扰屏蔽和热管理等领域，在人工智能和新兴可穿戴电子产品中具有极大的应用潜力。

6. 结论与展望

近年来，MXenes 作为一种具有独特结构和优异性能的二维材料，在多个领域展现出了广泛的应用前景，包括能源存储与转换、传感、催化、电磁干扰(EMI)屏蔽、生物医学/治疗以及水处理等。然而，尽管在 MXenes 的研究和应用方面取得了显著的成果，但仍存在许多挑战和未解决的问题。

在 MXene 的合成方法中，温度、压力、反应时间等因素都会对其产生影响，因此需要探索新的合成方法以提高质量和稳定性。此外，对于 MXenes 的构效关系缺乏深入理解，需要进一步研究以提供理论支持。

目前，MXene 材料在化学、生物和多功能传感器领域具有广泛的应用前景。然而，目前 MXene 传感器的研究仍处于初级阶段，面临着诸如稳定性、耐久性等问题。未来，随着 MXene 材料的制备和加工技术的不断发展，相信 MXene 将在传感器领域取得更大的突破。此外，跨学科的研究和技术融合将为 MXene 传感器的创新发展提供更多可能性。

基金项目

天津商业大学国家级大创项目，项目编号：JDG22006。

参考文献

[1] 徐斌. MXene 材料制备、性质与储能应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

[2] Lim, K.R.G., Shekhirev, M., Wyatt, B.C., *et al*. (2022) Fundamentals of MXene Synthesis. *Nature Synthesis*, **1**, 601-614. https://doi.org/10.1038/s44160-022-00104-6

[3] 吴晓娜, 汪宜宇, 赵凯. MXene 基复合水凝胶在修复感染创面中的研究进展[J/OL]. 复合材料学报, 2024: 1-10. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231214.001

[4] 朱言, 魏子婧, 林乐怡, 等. MXene/CNTs 复合材料的制备及应用进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 101-106.

[5] 李国辉, 张丹丹, 伍远辉, 等. MXenes 的性能及应用研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 2023: 1-9. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.tq.20231209.1403.002.html, 2024-04-07.

[6] 门海蛟, 宋健尧, 黄秉经, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(21): 45-67.

[7] 杜春保, 朱亚楠, 薛丹, 等. 基于 MXene/丝素蛋白纳米复合材料的仿生促动器在实验教学中的设计与探索[J]. 当代化工研究, 2023(19): 176-178.

[8] Hantanasirisakul, K., Zhao, M.Q., Urbankowski, P., *et al*. (2016) Fabrication of $Ti_3C_2T_x$ MXene Transparent Thin Films with Tunable Optoelectronic Properties. *Advanced Electronic Materials*, **2**, Article ID: 1600050. https://doi.org/10.1002/aelm.201600050

[9] Tan, T., Jiang, X., Wang, C., *et al*. (2020) 2D Material Optoelectronics for Information Functional Device Applications: Status and Challenges. *Advanced Science*, **7**, Article ID: 2000058. https://doi.org/10.1002/advs.202000058

[10] Li, X.-P., *et al*. (2019) Highly Sensitive, Reliable and Flexible Piezoresistive Pressure Sensors Featuring Polyurethane Sponge Coated with MXene Sheets. *Journal of Colloid & Interface Science*, **542**, 54-62.

[11] (2022) Study Results from Zhengzhou University in the Area of Electronics Reported (Multifunctional MXene/Cnts Based Flexible Electronic Textile with Excellent Strain Sensing, Electromagnetic Interference Shielding and Joule Heating Performances). Electronics Newsweekly.

[12] Kong, D., El-Bahy, Z.M., Algadi, H., *et al*. (2022) Highly Sensitive Strain Sensors with Wide Operation Range from Strong MXene-Composited Polyvinyl Alcohol/Sodium Carboxymethylcellulose Double Network Hydrogel. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, **5**, 1976-1987. https://doi.org/10.1007/s42114-022-00531-1

[13] Lu, Y., Qu, X., Zhao, W., *et al*. (2020) Highly Stretchable, Elastic, and Sensitive MXene-Based Hydrogel for Flexible Strain and Pressure Sensors. Research, 2020(11), 1-13. https://doi.org/10.34133/2020/2038560

[14] Fan, K., Li, K., Han, L., *et al*. (2023) Multifunctional Double-Network $Ti_3C_2T_x$ MXene Composite Hydrogels for Strain Sensors with Effective Electromagnetic Interference and UV Shielding Properties. *Polymer*: *The International Journal for the Science and Technology of Polymers*, **273**, Article ID: 125865. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125865

[15] Li, M., Wang, L., Liu, R., *et al*. (2021) A Highly Integrated Sensing Paper for Wearable Electrochemical Sweat Analysis. *Biosensors and Bioelectronics*, **174**, Article ID: 112828. https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112828

[16] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., *et al*. (2011) Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2. *Advanced Materials*, **23**, 4248-4253. https://doi.org/10.1002/adma.201102306

[17] Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., *et al*. (2012) Two-Dimensional Transition Metal Carbides. *ACS Nano*, **6**, 1322-1331. https://doi.org/10.1021/nn204153h

[18] Han, M., Shuck, C., Rakhmanov, R., *et al*. (2020) Beyond $Ti_3C_2T_x$: MXenes for Electromagnetic Interference Shielding. *ACS Nano*, **14**, 5008-5016. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01312

[19] Kumar, S., Kumari, N. and Seo, Y. (2024) MXenes: Versatile 2D Materials with Tailored Surface Chemistry and Diverse Applications. *Journal of Energy Chemistry*, **90**, 253-293. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.11.031

[20] Li, Y., Xie, J., Wang, R., *et al*. (2024) Textured Asymmetric Membrane Electrode Assemblies of Piezoelectric Phosphorene and $Ti_3C_2T_x$ MXene Heterostructures for Enhanced Electrochemical Stability and Kinetics in LIBs. *Nano-Micro Letters*, **16**, 400-420. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01265-5

[21] Kang, S.M., Yu, Y., Park, R., *et al*. (2024) Highly Aligned Ternary Nanofiber Matrices Loaded with MXene Expedite Regeneration of Volumetric Muscle Loss. *Nano-Micro Letters*, **16**, 275-298. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01293-1

[22] Li, Y., Zhu, Y., Vallem, S., *et al*. (2024) Flame-Retardant Ammonium Polyphosphate/MXene Decorated Carbon Foam Materials as Polysulfide Traps for Fire-Safe and Stable Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **89**, 313-323. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.10.029

[23] Zhao, W., Shi, X., Liu, B., *et al*. (2024) The Design and Engineering Strategies of Metal Tellurides for Advanced Metal-Ion Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **89**, 579-598. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.09.044

[24] Li, Z., Chen, X., Zhang, R., *et al*. (2024) Advanced Cellulose-Based Materials toward Stabilizing Zinc Anodes. *Science China Chemistry*, 1-20. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5839.o6.20240123.1627.004.html

[25] Wang, D., Zhou, C., Filatov, A.S., *et al*. (2023) Direct Synthesis and Chemical Vapor Deposition of 2D Carbide and Nitride MXenes. *Science*, **379**, 1242-1247. https://doi.org/10.1126/science.add9204

[26] Vacík, J., *et al*. (2020) Ion Sputtering for Preparation of Thin MAX and MXene Phases. *Radiation Effects and Defects in Solids*, **175**, 177-189. https://doi.org/10.1080/10420150.2020.1718142

[27] Zhu, C., Hao, Y., Wu, H., *et al*. (2024) Self-Assembly of Binderless MXene Aerogel for Multiple-Scenario and Responsive Phase Change Composites with Ultrahigh Thermal Energy Storage Density and Exceptional Electromagnetic Interference Shielding. *Nano-Micro Letters*, **16**, 373-388. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01288-y

[28] Fan, W., Wang, Q., Rong, K., *et al*. (2024) MXene Enhanced 3D Needled Waste Denim Felt for High-Performance Flexible Supercapacitors. *Nano-Micro Letters*, **16**, 389-400. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01226-y

[29] Sunderiya, S., Suragtkhuu, S., Purevdorj, S., *et al*. (2024) Understanding the Oxidation Chemistry of $Ti_3C_2T_x$ (MXene) Sheets and Their Catalytic Performances. *Journal of Energy Chemistry*, **88**, 437-445. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.09.037

[30] Lian, X., Shi, Y., Shen, X., *et al*. (2024) Design of High Performance MXene/Oxide Structure Memristors for Image Recognition Applications. *Chinese Journal of Electronics*, 1-10. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1284.tn.20231220.1238.022.html

[31] Ya, Z., Wang, Q., Cai, J., *et al*. (2024) An Ultra-Porous g-C_3N_4 Micro-Tube Coupled with MXene ($Ti_3C_2T_x$) Nanosheets for Efficient Degradation of Organics under Natural Sunlight. *Journal of Environmental Sciences*, **137**, 258-270. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.049

[32] Qi, Z., Zhang, T., Zhang, X., *et al*. (2023) MXene-Based Flexible Pressure Sensor with Piezoresistive Properties Significantly Enhanced by Atomic Layer Infiltration. *Nano Materials Science*, **5**, 439-446. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2022.10.003

[33] Li, H., Wen, J., Ding, S., *et al*. (2023) Synergistic Coupling of 0D-2D Heterostructure from ZnO and $Ti_3C_2T_x$ MXene-Derived TiO_2 for Boosted NO_2 Detection at Room Temperature. *Nano Materials Science*, **5**, 421-428. https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2023.02.001

[34] Su, T., Meng, J., Xiao, Y., *et al*. (2023) *In Situ* Growth of Cobalt on Ultrathin $Ti_3C_2T_x$ as an Efficient Co-Catalyst of g-C_3N_4 for Enhanced Photocatalytic CO_2 Reduction. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **64**, 76-86. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.06.018

[35] Wang, X., Zhang, R., Ma, C., *et al*. (2023) Surface Hydrophobic Modification of MXene to Promote the Electrochemical Conversion of N_2 to NH_3. *Journal of Energy Chemistry*, **87**, 439-449. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.043

[36] Guo, D., Pan, Q., Vietor, T., *et al*. (2023) MXene Based Non-Noble Metal Catalyst for Overall Water Splitting in Alkaline Conditions. *Journal of Energy Chemistry*, **87**, 518-539. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.049

[37] 朱言，魏子婧，林乐怡，等. MXene/CNTs 复合材料的制备及应用进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 101-106. https://doi.org/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2023.s2.021

[38] Qiao, W., Zhou, L., Zhao, Z., *et al*. (2023) MXene Lubricated Tribovoltaic Nanogenerator with High Current Output and Long Lifetime. *Nano-Micro Letters*, **15**, 44-56. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01198-z

[39] Pan, L., Hu, R., Zhang, Y., *et al*. (2023) Built-In Electric Field-Driven Ultrahigh-Rate K-Ion Storage via Heterostructure Engineering of Dual Tellurides Integrated with $Ti_3C_2T_x$ MXene. *Nano-Micro Letters*, **15**, 135-148. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01202-6

[40] Liu, Y., Wang, Y., Wu, N., *et al*. (2023) Diverse Structural Design Strategies of MXene-Based Macrostructure for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding. *Nano-Micro Letters*, **15**, 427-456. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01203-5

[41] Wang, Y., Chen, N., Zhou, B., *et al*. (2023) NH_3-Induced in Situ Etching Strategy Derived 3D-Interconnected Porous MXene/Carbon Dots Films for High Performance Flexible Supercapacitors. *Nano-Micro Letters*, **15**, 279-290. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01204-4

[42] He, H., Qin, Y., Zhu, Z., *et al*. (2023) Temperature-Arousing Self-Powered Fire Warning E-Textile Based on P-N Segment Coaxial Aerogel Fibers for Active Fire Protection in Firefighting Clothing. *Nano-Micro Letters*, **15**, 149-168. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01200-8

[43] 尹建宇，刘逆霜，高义华. MXene 在压力传感中的研究进展[J/OL]. 无机材料学报, 2024(2): 179-185. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1363.tq.20240220.2300.016.html, 2024-03-01.

[44] Venkateswarlu, S., Vallem, S., Umer, M., *et al*. (2023) Recent Progress on MOF/MXene Nanoarchitectures: A New Era in Coordination Chemistry for Energy Storage and Conversion. *Journal of Energy Chemistry*, **86**, 409-436. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.07.044

[45] Shen, G.Z., *et al*. (2023) Highly Stable Capacitive Tactile Sensors with Tunable Sensitivity Facilitated by Electrostatic Interaction of Layered Double Hydroxide, MXene, and Ag NWs. *Science China* (*Technological Sciences*), **66**, 3287-3297. https://doi.org/10.1007/s11431-022-2408-3

[46] Wang, Y., Wang, Y., Dong, Y., *et al*. (2023) 2D Nb_2CT_x MXene/MoS_2 Heterostructure Construction for Nonlinear Optical Absorption Modulation. *Opto-Electronic Advances*, **6**, 9-20. https://doi.org/10.29026/oea.2023.220162

[47] Li, X. and Luo, H. (2023) Maximizing Terahertz Energy Absorption with MXene Absorber. *Nano-Micro Letters*, **15**, 144-147. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01167-6

[48] Lu, X., Xie, D., Zhu, K., *et al*. (2023) Swift Assembly of Adaptive Thermocell Arrays for Device-Level Healable and Energy-Autonomous Motion Sensors. *Nano-Micro Letters*, **15**, 112-126. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01170-x

[49] Wu, F., Hu, P., Hu, F., *et al*. (2023) Multifunctional MXene/C Aerogels for Enhanced Microwave Absorption and Thermal Insulation. *Nano-Micro Letters*, **15**, 82-97. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01158-7

[50] Tian, S., Wang, M., Fornasiero, P., *et al*. (2023) Recent Advances in MXenes-Based Glucose Biosensors. *Chinese Chemical Letters*, **34**, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.cclet.2023.108241

[51] Ma, W., Qiu, Z., Li, J., *et al*. (2023) Interfacial Electronic Coupling of V-Doped Co_2P with High-Entropy MXene Reduces Kinetic Energy Barrier for Efficient Overall Water Splitting. *Journal of Energy Chemistry*, **85**, 301-309. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.06.017

[52] Liu, J., Ma, L., Li, S., *et al*. (2023) Three-Dimensional Architecture Using Hollow Cu/C Nanofiber Interpenetrated with MXenes for High-Rate Lithium-Ion Batteries. *Rare Metals*, **42**, 3378-3386. https://doi.org/10.1007/s12598-023-02372-3

[53] Wang, J., Suo, J., Song, Z., *et al*. (2023) Nanomaterial-Based Flexible Sensors for Metaverse and Virtual Reality Applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **5**, 413-445. https://doi.org/10.1088/2631-7990/acded1

[54] Hu, P., Chai, R., Wang, P., *et al*. (2023) Supercapacitive Properties of $MnNiS_x$@ $Ti_3C_2T_x$ MXene Positive Electrode Assisted by Functionalized Ionic Liquid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **61**, 102-109. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.03.013

[55] Nikkhah, A., Nikkhah, H., Langari, H., *et al*. (2023) MXene: From Synthesis to Environment Remediation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **61**, 260-280. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.02.028

[56] Prajapati, K.A. and Bhatnagar, A. (2023) A Review on Anode Materials for Lithium/Sodium-Ion Batteries. *Journal of Energy Chemistry*, **83**, 509-540. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.04.043

[57] Liu, S., Chen, M., Xie, Y., *et al*. (2023) Nb_2CT_x MXene Boosting PEO Polymer Electrolyte for All-Solid-State Li-S Batteries: Two Birds with One Stone Strategy to Enhance Li~+ Conductivity and Polysulfide Adsorptivity. *Rare Metals*, **42**, 2562-2576. https://doi.org/10.1007/s12598-022-02260-2

[58] Yang, W., Ni, Z., You, D., *et al*. (2023) Multifunctional Sulfur-Immobilizing GO/MXene Aerogels for Highly-Stable and Long-Cycle-Life Lithium-Sulfur Batteries. *Rare Metals*, **42**, 2577-2591. https://doi.org/10.1007/s12598-023-02272-6

[59] Yang, C., Zhang, D., Wang, D., *et al*. (2023) *In Situ* Polymerized MXene/Polypyrrole/Hydroxyethyl Cellulose-Based Flexible Strain Sensor Enabled by Machine Learning for Handwriting Recognition. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 5811-5821. https://doi.org/10.1021/acsami.2c18989

[60] Liu, M., Wang, Z., Song, P., *et al*. (2021) Flexible MXene/RGO/CuO Hybrid Aerogels for High Performance Acetone Sensing at Room Temperature. *Sensors and Actuators B*: *Chemical*, **340**, Article ID: 129946. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129946

[61] Le, V.T., Vasseghian, Y., Doan, V.D., *et al*. (2022) Flexible and High-Sensitivity Sensor Based on Ti_3C_2-MoS_2 MXene Composite for the Detection of Toxic Gases. *Chemosphere*, **291**, Article ID: 133025. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133025

[62] Zeng, R., Wang, W., Chen, M., *et al*. (2020) CRISPR-Cas12a-Driven MXene-PEDOT: PSS Piezoresistive Wireless Biosensor. *Nano Energy*, **82**, Article ID: 105711. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105711

[63] Chao, M., He, L., Gong, M., *et al*. (2021) Breathable $Ti_3C_2T_x$ MXene/Protein Nanocomposites for Ultrasensitive Medical Pressure Sensor with Degradability in Solvents. *ACS Nano*, **15**, 9746-9758. https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00472

[64] Gao, Y., Yan, C., Huang, H., *et al*. (2020) Microchannel-Confined MXene Based Flexible Piezoresistive Multifunctional Micro-Force Sensor. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article ID: 1909603. https://doi.org/10.1002/adfm.201909603

[65] Liu, L.X., Chen, W., Zhang, H.B., *et al*. (2019) Flexible and Multifunctional Silk Textiles with Biomimetic Leaf-Like MXene/Silver Nanowire Nanostructures for Electromagnetic Intearference Shielding, Humidity Monitoring, and Self-Derived Hydrophobicity. *Advanced Functional Materials*, **29**, Article ID: 1905197.

https://doi.org/10.1002/adfm.201905197

[66] Liu, H., Chen, X., Zheng, Y., *et al*. (2021) Lightweight, Superelastic, and Hydrophobic Polyimide Nanofiber/MXene Composite Aerogel for Wearable Piezoresistive Sensor and Oil/Water Separation Applications. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article ID: 2008006. https://doi.org/10.1002/adfm.202008006