

引用格式: 张苒, 方贵安, 陆银琪, 等. MXene 基复合材料的功能设计及在智能电磁领域的研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 1-11.

ZHANG Ran, FANG Guian, LU Yinqi, et al. Functional design of MXene-based composite and research progress in the field of intelligent electromagnetics [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 1-11.

MXene 基复合材料的功能设计及在智能电磁领域的研究进展

张 苒^{1,2*}, 方贵安¹, 陆银琪¹, 张洪程², 董黎明^{1*}

(1. 徐州工程学院 材料与化学工程学院, 江苏 徐州 221018; 2. 佛山(华南)新材料研究院, 广东 佛山 528222)

摘要: MXene 作为新型二维过渡金属碳/氮化物的典型代表, 凭借优异的导电性、可调控的层间距及丰富的表面官能团, 在智能电磁领域展现出广阔应用前景。本文围绕 MXene 基复合材料的制备方法、性能调控策略及其在电磁功能材料前沿领域的研究进展展开系统论述。首先, 介绍二维 MXene 材料的核心特性, 重点分析 MXene 基复合材料的主要制备路径与微观结构特点; 随后, 深入探讨复合材料的性能调控策略, 详细剖析结构设计、表面改性、复合杂化等多维界面协同优化的作用机制; 最后, 针对当前 MXene 基复合材料面临的环境稳定性欠佳、规模化制备技术受限、多功能协同平衡难度大等核心挑战, 提出未来智能电磁材料设计的研究方向, 为该类材料在航空航天等高端领域的实际应用提供参考。

关键词: MXene; 复合材料; 智能材料; 电磁屏蔽; 航空航天

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2026.000021

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2026.000021

中图分类号: V257

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0001-11

Functional design of MXene-based composite and research progress in the field of intelligent electromagnetics

ZHANG Ran^{1,2*}, FANG Guian¹, LU Yinqi¹, ZHANG Hongcheng², DONG Liming^{1*}

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221018, Jiangsu, China; 2. Foshan (South China) New Materials Research Institute, Foshan 528222, Guangdong, China)

Abstract: MXene, as a typical two-dimensional transition metal carbide/nitride, exhibits broad application prospects in intelligent electromagnetic fields owing to its exceptional electrical conductivity, tunable interlayer spacing and rich surface functionalization. This review systematically summarizes recent advances in the synthesis, performance modulation strategies and research progress of MXene-based composites within the domain of electromagnetic functional materials. Firstly, it introduces the fundamental structural and electronic characteristics of two-dimensional MXene and critically examine prevailing synthesis routes alongside the resulting microstructural features of MXene-based composites. Secondly, it deeply explores the performance control strategies for these composites, elucidating the underlying mechanisms of multidimensional interfacial optimization—including tailored structural design, targeted surface functionalization and synergistic hybridization. Finally, in response to the key challenges currently faced by MXene-based composite, such as inadequate environmental stability, underdeveloped scalable manufacturing protocols and difficulties in achieving balanced multifunctional integration—it proposes promising future research directions to facilitate their translation into high-end applications, particularly in aerospace and related advanced technological fields.

Key words: MXene; composite; intelligent functional material; electromagnetic shielding; aerospace and aviation

航空航天技术的迭代升级对材料体系提出了“多功能、轻量化、抗极端、长寿命”的严苛要求,传统的电磁功能材料通常仅具有单一的吸波或屏蔽功能,难以适应复杂的航空航天环境。相比之下,智能电磁功能材料则可通过电场、热场、光场等外部刺激实时调控材料的介电常数及磁导率等参数,从而满足现代航天器对电磁兼容、高功率储能以及环境感知等多性能协同的需求^[1-3]。MXene自2011年被发现以来,凭借其独特的层状结构(由MAX相经蚀刻剥离形成)、高达 $10^4 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的导电性、可调的表面官能团($-\text{OH}$ 、 $-\text{O}$ 、 $-\text{F}$)及优异的力学柔韧性,迅速成为复合材料领域的研究热点^[4-7]。然而, MXene易氧化以及层间堆积等问题,导致其化学性能大大降低。为此,将MXene与聚合物、陶瓷、金属纳米粒子等组分形成复合体系,在保留自身优势的同时又可以实现性能协同增强,为航空航天领域的技术瓶颈提供新的解决方案^[8-9]。

目前, MXene因具有原子级厚度、高电子导电性、可调层间距及丰富的表面官能团等特性,已被广泛应用于能量存储与转换领域^[10-11]。其独特的层状结构不仅可为金属离子提供快速传输通道,还能通过表面官能团与金属离子发生表面赝电容反应,显著提升电荷存储的容量^[12-14]。同时,高机械强度与柔韧性使其在柔性储能器件中具有得天独厚的优势。因此, MXene基复合电极在新型储能器件中的应用研究,对于突破传统电极材料的性能瓶颈、推动储能器件的实用化进程具有重要的意义^[15]。此外, MXene基复合材料在电磁屏蔽领域能够实现宽频段电磁屏蔽与红外隐身的协同优化,解决了传统金属材料质量大、二次反射干扰的难题。因此,本文将围绕MXene基复合材料的制备技术、性能优化策略及其在电化学和电磁领域的研究进展展开系统论述(图1),旨在开发新型高效的MXene基复合材料,为航天器宽温域($-170 \sim$

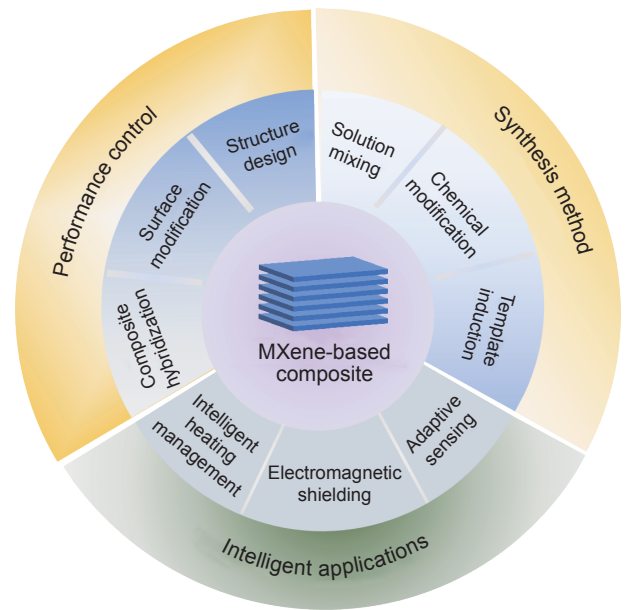


图1 MXene基复合材料的研究现状

Fig. 1 Current research status of MXene-based composite

120 °C)的环境需求以及微型操作机的姿态监测提供丰富的材料支撑。

1 MXene基复合材料的制备方法

MXene独特的层状结构源于MAX相前驱体的选择性刻蚀,即通过刻蚀MAX相中的A层(通常为铝),得到具有二维层状结构的MXene材料^[16-18]。然而, MXene表面的高活性官能团($-\text{O}$ 、 $-\text{F}$ 等)虽可以提供大量的活性位点改善其动力学性能^[19-21],却容易引起氧化以及层间堆积等问题,导致其应用性能大大降低^[22-23]。传统的MXene合成方法主要依赖氢氟酸(HF)蚀刻,存在安全隐患与环保问题,难以满足航空航天材料的规模化生产需求。近年来,绿色合成工艺取得显著进展,熔盐蚀刻、电化学蚀刻等方法逐步替代HF蚀刻,在提高材料纯度的同时降低环境风险(表1^[18, 24-26])。

表1 MXene主要合成方法分类及优缺点对比^[18, 24-26]

Table 1 Comparative analysis of classification, advantages and limitations for MXene synthesis methods^[18, 24-26]

Synthesis method	Classification	Advantage	Limitation
Chemical etching	HF etching	Simple process, highly efficient, high product purity	Highly toxic and corrosive
	<i>In-situ</i> HF etching	Mild process, good product dispersion	Long reaction time
	Molten-salt etching	Environmentally friendly, high reaction efficiency	High reaction energy consumption, require post-treatment
Electrochemical etching	Anode oxidation	Green and safe, easy to control layer spacing	Slow etching process, low product yield
Bottom-up method	Chemical vapor deposition	Controllable thickness and size, large-area and high quality single-crystal films	High process cost, low yield

1.1 MXene 合成方法

目前,主要的蚀刻方法包括:(1)氢氟酸(HF)蚀刻法。通过 HF 溶液选择性刻蚀 A 层(如 Al),可快速制备 $Ti_3C_2T_x$ 等常见 MXene,但 HF 具有强腐蚀性与环境风险,且易导致 MXene 表面官能团不均,限制工程化应用。(2)绿色蚀刻法。包括熔盐蚀刻(如 NaCl-KCl 体系)、电化学蚀刻(以 MAX 相为电极,在电解质中实现 A 层溶解)、无氟化学蚀刻(如 HCl+LiF 混合体系),不仅规避 HF 的安全隐患,还能精准调控 MXene 表面官能团类型与密度,提升材料纯度与稳定性,其中熔盐蚀刻法已实现 MXene 的批量制备,为复合材料规模化生产奠定基础^[24]。(3)辅助剥离工艺。蚀刻后的 MXene 易发生层间堆叠,需通过超声剥离、插层剥离(如使用季铵盐、离子液体)等方法获得单层或少层 MXene,其中超声剥离结合冷冻干燥可有效保留 MXene 层状结构,提升材料的导电与导热性能^[25-26]。

1.2 MXene 基复合材料制备方法

单一 MXene 材料的主要缺陷是片层团聚导致的孔隙率不足与离子传输阻力增大,其优化方法主要包括:通过添加分散剂改善 MXene 在溶液中的分散性;采用冷冻干燥等工艺替代传统干燥,减少干燥过程中的片层团聚;通过插层改性法扩大层间距,提升离子传输效率^[27-28]。为了进一步提升材料性能, MXene 与其他组分(聚合物、陶瓷、金属纳米粒子等)的复合集成工艺需兼顾相容性与功能协同,主要包括:

(1) 溶液混合法

将 MXene 分散液与复合组分(如聚合物乳液、陶瓷纳米粒子悬浮液)通过搅拌、超声混合均匀,经干燥成型获得复合材料,该方法操作简便、成本较低,适用于大规模制备,但需控制 MXene 分散性以避免堆叠。

(2) 化学改性法

通过原位聚合、溶胶-凝胶等技术在 MXene 表面包覆一层功能组分(如 SiO_2 、聚合物),形成核壳结构,有效解决 MXene 易氧化、堆叠的问题,同时有效构建三维功能网络层。

(3) 模板诱导法

结合冷冻干燥、模板法等工艺制备 MXene 基多孔复合材料,如 MXene/气凝胶复合体系,通过冷冻干燥过程中冰晶生长形成三维多孔骨架,再经真空浸渍引入功能组分(如相变材料、聚合物),实现轻量化与高比表面积的统一。

与单一材料相比, MXene 基复合材料可以实现

功能梯度材料的精准制备,通过控制 MXene 浓度、尺寸等材料参数,确保材料结构与性能的一致性,为工程化应用奠定基础^[29-30]。此外,针对航空航天功能部件的成型需求,开发喷涂涂层、3D 打印兼容工艺,如在 3D 打印聚合物基底表面通过静电喷涂制备 MXene 导电涂层,赋予绝缘构件电磁屏蔽与导热功能,涂层厚度可精准控制在纳米至微米级,且可直接在复杂形状聚合物构件表面形成均匀导电层,大幅提高航天器功能部件的制备效率与精度。

2 MXene 基复合材料的性能调控

当前,通过对 MXene 基复合材料的“结构-界面-组分”的定向设计与优化,可协同提升导电性、力学性能、环境稳定性及功能响应性,匹配智能电磁材料等领域的严苛需求。而性能调控的核心在于优化其微观结构、电荷传输效率,提升材料的稳定性^[31-32]。本节将从结构设计、表面改性、复合杂化等三个核心维度,阐述 MXene 基复合材料的协同改性方法与性能调控机制。

2.1 结构设计

针对航空航天领域的多功能需求, MXene 基复合材料的结构设计已从简单混合向“功能定向架构”演变^[33-34]。由于 MXene 片层间的范德华力易导致片层团聚,从而降低比表面积与离子传输效率,因此结构调控的核心是构建多孔结构与优化层间距,具体策略包括:

(1)多孔 MXene 基材料的构建。通过模板法在 MXene 电极中引入多孔结构,提升比表面积与离子扩散效率。例如,以聚合物微球为模板,将 MXene 分散液与模板混合后去除模板,得到多孔 MXene 电极。多孔结构不仅可抑制片层团聚,还能缩短锌离子的扩散路径,提升传质效率。

(2)插层改性优化 MXene 层间距。通过离子插层(如 Li^+ 、 Na^+ 、CTAB 等阳离子表面活性剂)或分子插层(如乙二醇、尿素等小分子),扩大 MXene 的层间距,抑制片层团聚。例如,采用 CTAB 插层改性 $Ti_3C_2T_x$ MXene,可使层间距扩大,因而显著提升电极的电化学性能。

此外,通过功能梯度架构(如 MXene 表面层-相变中间层-隔热基层)空间分区设计,使热伪装与储能功能互不干扰,实现多性能协同增强;3D 多孔结构(如 MXene/气凝胶复合材料)则在轻量化的同时提升比表面积,增强储能与隔热性能,满足航天器对材料密度与功能的双重要求。

2.2 表面改性

MXene 表面的官能团类型与含量直接影响其化学相互作用及环境稳定性,因此表面改性的核心是调控官能团类型与构建保护层^[35],具体策略包括:

(1)MXene 表面官能团调控。通过刻蚀工艺优化(如调整刻蚀剂浓度、刻蚀时间)或后处理工艺(如热处理、等离子体处理),调控 MXene 表面官能团的类型与含量。例如,通过热处理去除 MXene 表面 —F 基团,增加 —O 官能团含量,提升与特定离子的配位能力;或通过等离子体处理引入新的活性官能团,增强赝电容效应。

(2)异质材料表面包覆。通过碳层、高分子层等异质材料包覆 MXene 电极,提升其环境稳定性与结构稳定性。例如,在 MXene 纤维表面包覆一层薄碳层,可有效抑制 MXene 在空气中的氧化变质;或包覆高分子层(如聚乙烯醇),提升电极的柔韧性与耐电解液侵蚀能力。

此外,利用范德华力、氢键、静电作用等非共价相互作用,将改性剂(如表面活性剂、生物分子、共轭聚合物)吸附至 MXene 表面,避免破坏 MXene 的本征结构,实现温和改性,或者通过化学反应将有机分子、聚合物链等共价键合至 MXene 表面,改变表面官能团类型与亲疏水性,从而提升分散性与界面相容性。

2.3 复合杂化

复合杂化是通过引入第二相或者多相组分(聚合物、碳材料、金属、陶瓷等),与 MXene 形成协同效应,弥补单一 MXene 的性能不足,从而实现多功能集成设计。MXene 基复合材料的性能优势源于组分间的协同效应,通过优化杂化组分的类型、比例及复合方式,从而实现组分的协同与界面的兼容。

(1)MXene 与聚合物复合。聚合物通过界面相互作用(如氢键、静电吸附)提升力学性能与柔韧性。聚合物(如环氧树脂、聚酰亚胺、聚乙烯醇、聚二甲基硅氧烷)作为基体材料,与 MXene 复合后可提升材料的柔韧性、加工性与力学性能,同时保留 MXene 的功能特性,是 MXene 基复合材料最常用的杂化方式。

(2)MXene 与碳材料复合。由于碳材料(如石墨烯、碳纳米管、碳气凝胶、碳纤维)与 MXene 具有相似的结构特征与导电特性,复合后可形成“双碳协同网络”,显著提升导电性与电磁屏蔽性能。

此外,MXene 与陶瓷(如 SiO₂)的复合则可以增强热稳定性与耐腐蚀性,多场耦合理论揭示了其性能调控机制;在电磁屏蔽中,MXene 导电网络实现

电磁波反射与耗散,介电组分(如 SiO₂)增强吸收能力,协同实现宽频段高效屏蔽;在热管理中,MXene 构建导热通道,相变材料实现热量存储与释放,隔热组分(如气凝胶)抑制热传导,形成“传导-存储-阻隔”协同体系。

3 MXene 基复合材料的智能电磁应用

3.1 智能热管理

航空航天装备在太空中通常面临着极端环境(-170 ~ 120 °C)的严峻挑战,而 MXene 基复合材料可通过热传导调控、相变储能与能源转换的协同设计,实现智能热管理一体化^[20, 36-37]。如图 2(a)、(b)所示,Sui 等^[38]采用 MXene-壳聚糖-戊二醛构建双重物理化学交联结构,抑制干燥过程中的毛细压力,在无溶剂交换条件下制备出兼具润湿性与高强度的三维多孔气凝胶(APD)。通过阻燃和隔热性能测试表明,如图 2(b)所示,APD 气凝胶在持续加热 30 min 表面温度维持在 70 °C,继续加热 10 min 至其表面温度升至 160 °C,此时木块表面仅出现了轻微变黑现象,表明制备的气凝胶具有优异的热防护与阻燃性能。Zhao 等^[39]提出盐辅助组装(SAA)法,在 MXene 胶体悬浮液中添加水溶性盐,无需复杂预处理,即可在 PE、PEEK、Kevlar 等 16 种聚合物表面快速制备均匀超薄的 MXene 涂层。该涂层可使 300 °C PEEK 基底的辐射温度降低约 200 °C,兼具优异的热管理性能、机械稳定性与洗涤耐久性,为传统方法难以在疏水/惰性聚合物表面沉积 MXene 的界面难题提供有效解决思路,显著拓展 MXene 涂层的多领域应用场景^[40]。Zhao 等^[41]通过开发 Li-PAAm/MXene 功能性水凝胶,实现“自主水分收集-循环蒸腾冷却”的一体化热管理。MXene 作为微尺度热桥,与 LiBr 协同作用增加吸湿位点,在 25 °C、90% 相对湿度条件下吸湿量达 1.18 g/g(较无 MXene 体系提升了 16.8%)。该水凝胶的传热微通道强化导热与水分蒸发,蒸腾冷却可使模拟电子设备温度降至 53 °C(较商用散热膜低 23 °C),为高集成电子设备提供可持续热管理方案。Moradi 等^[42]采用规模化静电纺丝技术,将 MXene 纳米片均匀分散并部分沿纤维轴向排列于聚丙烯腈(PAN)纤维网络中,构建了高效贯通的热量与电荷传输通道(图 3)。研究表明,所制备的 PAN-MXene 复合纱线热传导能力显著提升,相较于纯 PAN 纱线表面温度高出约 22 °C,可实现热量的快速均匀扩散;在红外光照射下,复合纤维能在短时间内升至 60.3 °C,展现出优异的光热转换

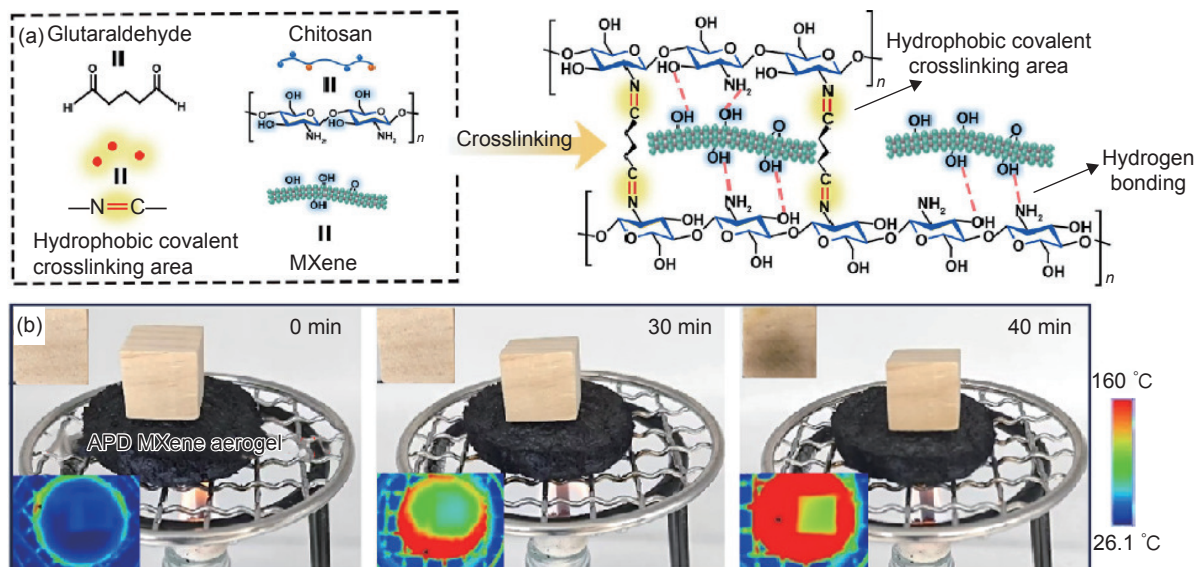


图 2 三维多孔气凝胶 APD 材料^[38] (a) 制备过程示意图; (b) 表面温度测试

Fig. 2 Three-dimensional porous aerogel APD materials^[38] (a) schematic diagram of the preparation process; (b) surface temperature measurement

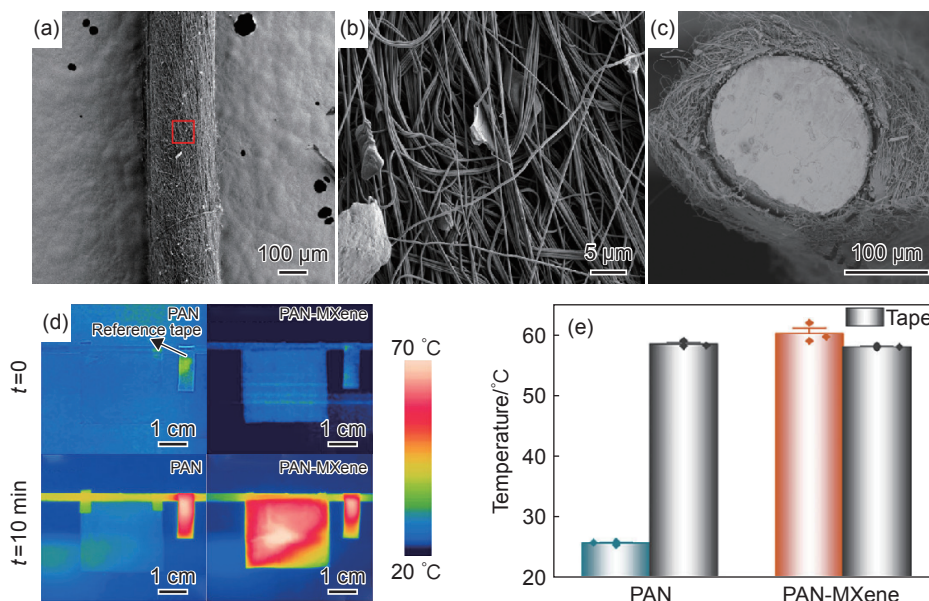


图 3 聚丙烯腈-MXene 复合纤维毡^[42] (a)~(c) 正面与截面的扫描电子显微镜图;

(d) 红外灯照射下的热图像; (e) 平均表面温度

Fig. 3 Polyacrylonitrile-MXene composite fiber mats^[42] (a)~(c) the front view and cross-section SEM images; (d) thermal images under infrared lamp irradiation; (e) average surface temperature

性能, 兼具“高效散热”与“主动加热”双重热管理能力。凭借 MXene 高导热的本征特性, 通过结构设计、组分协同及界面相容性优化策略, 可构建高效传热通道, 实现热调控功能与航空航天极端环境适配性的协同提升。此外, MXene 基复合材料在能量回收领域的应用也取得突破, 其与纳米发电机(TENGs)的集成体系, 可将航天器振动能、太阳能转化为电能, 为深空探测任务提供可持续能源解决方案^[43]。

3.2 电磁防护

电磁干扰(EMI)是航空航天电子系统的关键威胁, 太阳电磁辐射、航天器间信号串扰及战场电磁侦察均需高性能屏蔽材料。传统金属屏蔽材料存在质量大、易腐蚀、二次反射干扰等缺陷, 而 MXene 基复合材料通过“吸收-反射-耗散”协同机制, 可以实现轻量化与高效屏蔽的统一^[44-45]。MXene 的高导电性使其在复合材料中能够形成连续导电网络, 通过电子跃迁与涡流效应耗散电磁波

能量^[46-47]。Zhang等^[48]提出一种均匀应变策略,通过聚合物脱水收缩作用构建均匀自褶皱的MXene薄膜。该晶格结构可以提供额外的电磁波散射界面与导电通路,从而增强了电磁波损耗。得益于这一结构,厚度仅为17 μm的褶皱MXene薄膜实现了高达81.5 dB的电磁干扰屏蔽效能。Song等^[49]通过浸渍混合方法制备电磁屏蔽复合纸,并系统地研究了层数与EMI屏蔽效率的相关性。研究表明,复合纸在X波段的平均电磁干扰屏蔽效能(EMI SE)达到78.23 dB,展示出对电磁波的高效屏蔽能力。此外,Liu等^[50]采用“离子插层-超声剥离-中低温热还原”协同策略,制备少层 $Ti_3C_2T_x$ MXene,并通过溶液浇铸法构筑退火 $Ti_3C_2T_x$ /环氧树脂电磁屏蔽纳米复合材料。研究表明,当 $Ti_3C_2T_x$ 质量分数为15%时,复合材料(厚度2 mm)在X波段(8.2~12.4 GHz)的电磁干扰总屏蔽效能(SE_T)达41 dB,高于商业屏蔽材料标准(≥ 20 dB);其电导率高达 $105 S \cdot m^{-1}$,较未退火MXene/环氧树脂复合材料提升了176%,屏蔽效能提升了37%。如图4所示,Liu等^[51]采用逐层真空抽滤结合模压工艺,构筑了细菌纤维素(BC)/MXene/空心 Fe_3O_4 (HFO)电磁双梯度复合屏蔽膜(G-BMH)。

该薄膜以BC为柔性基质,通过精准调控各层MXene(导电相)与HFO(磁损耗相)的含量,形成自上而下的正导电梯度与负磁梯度结构,结合HFO的中空特性,构建了“吸收-反射-重吸收”的多重电磁波损耗机制。测试结果表明,当厚度为0.35 mm时,G-BMH薄膜在X波段(8.2~12.4 GHz)的电磁干扰总屏蔽效能(SE_T)达67.6 dB,反射屏蔽效能(SE_R)低至5.1 dB,吸收系数(A)达0.32,有效降低了二次电磁污染。Tao等^[52]通过“模板-真空抽滤-热压”两步法,制备出具有多层斜纹结构的纳米纤维复合膜(PVA/Ag/M),并系统探究不同AgNW/MXene含量对材料微观结构、导电性和电磁干扰屏蔽性能的影响(图5)。结果表明,PVA/Ag/M复合膜表面具有显著的斜纹梯度结构,各组分间的物理与化学相互作用,同时改善了材料内部导电网络的连续性与力学性能。当AgNW/MXene质量分数仅为2.5%时,该复合薄膜的电磁干扰屏蔽效能可达101.6 dB,比屏蔽效能达 $36501.5 dB \cdot cm^2/g$,显示出在电磁屏蔽领域的广阔应用潜力。由此可见,以MXene高导电性构建连续导电网络为核心,借助MXene表面官能团的可调性进行结构调控与多组分复合,优化电磁波

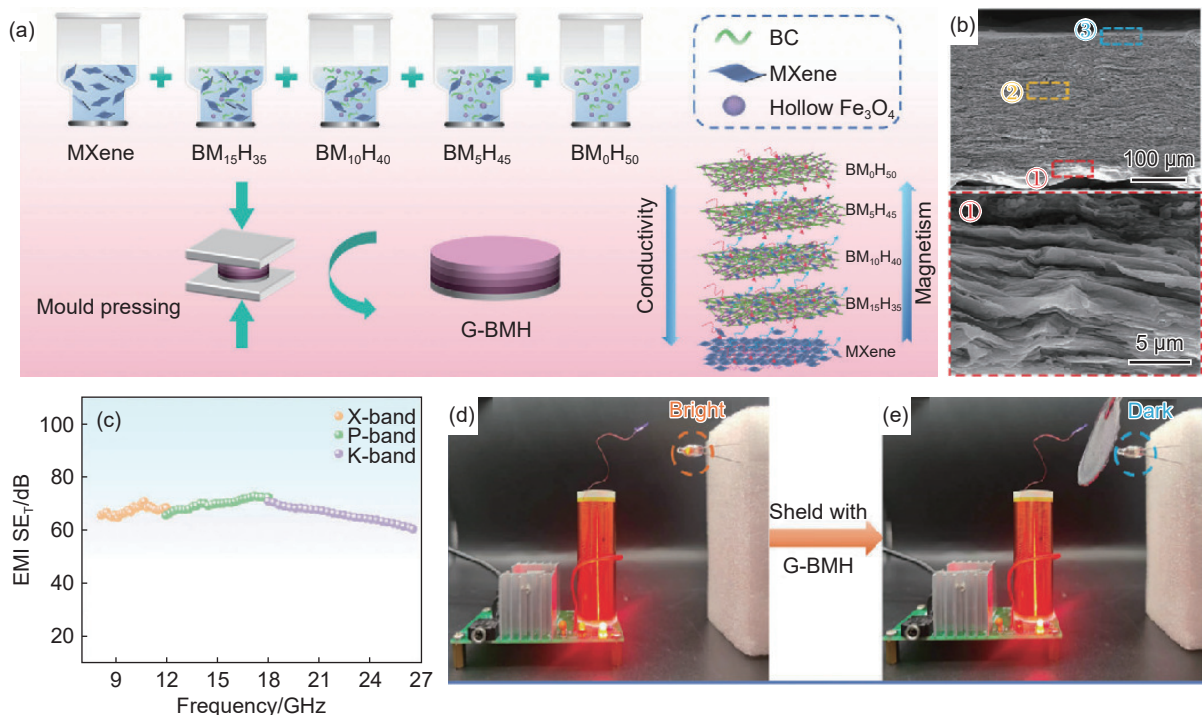


图4 MXene电磁双梯度复合材料(G-BMH)^[51] (a)制备流程示意图;(b)扫描电子显微镜图;(c)G-BMH在宽频范围(8.2~26.5 GHz)内的EMI SE_T值;(d)、(e)G-BMH复合材料的电磁屏蔽性能展示数码图片

Fig. 4 MXene based electric-magnetic dual-gradient composite film(G-BMH)^[51] (a) schematic fabrication diagram; (b) SEM images; (c) G-BMH's EMI SE_T in a wide band range(8.2-26.5 GHz); (d), (e) the digital pictures of electromagnetic shielding performance for G-BMH composite materials

“吸收-反射-耗散”路径,进一步提升宽频段(5~1000 MHz)屏蔽效果,可为解决航天器全频谱电磁兼容问题提供了新路径。

3.3 自适应传感

现代航空航天技术对智能驱动器件的需求日益增长,如微型推进器、自适应机翼、柔性机器人等,要求材料具备高功率密度、宽温域适应性与可编织性^[53-55]。在传感领域, MXene 的高导电性与表面敏感性使其成为高性能传感器的理想组分, MXene/聚合物复合薄膜可实现对温度、压力、电磁辐射的精准检测,检测灵敏度较传统传感器提升一个数量级,且在极端环境下(高辐射、宽温域)保持稳定响应,可用于航天器姿态监测、环境感知等场景^[56-58]。Herber 等^[59]通过激光诱导 MXene 胶体形成微气泡,借助对流与界面作用力实现 $Ti_3C_2T_x$ MXene 的定向组装及其在柔性 PET 基底上的导电图案。该图案展现出各向异性应变响应,即压缩应变下电阻降低,拉伸应变下电阻显著升高,且窄线

宽图案下灵敏度更高、宽线宽图案下稳定性更优。Zhao 等^[60]通过模仿竹子中空层结构,通过物理共混和冷冻干燥制备了甲基纤维素/壳聚糖 MXene (MC/CS@MXene)气凝胶(图6)。该气凝胶通过静电吸附、氢键作用和协同效应,赋予其组装的压阻式传感器优异性能、高灵敏度、优异的机械稳定性(在 10 kPa 下压缩 8000 次)和快速的响应/恢复时间(119 ms / 91 ms)。此外,基于 MC/CS/@MXene 的传感器阵列还可以实时监测民航飞行员的各种生理信号。Li 等^[61]报道一种墨水工程策略,可在无需复杂后处理的情况下,将单相 MoWNb 中熔合金涂料直接印刷到任意表面。这些传感器表现出卓越的应变灵敏度(300 °C 时应变系数高达-752.7)、低检测限(0.57 $\mu\epsilon$)以及宽温域(-150 ~ 1100 °C)稳定性。此外,通过集成远程无线电(LoRa)模块,构建了一套无线传感系统,可用于在各种极端环境下对可变形飞行器进行原位实时监测。由此可见,借助 MXene 高导电性与表面敏感性,通过微观结构

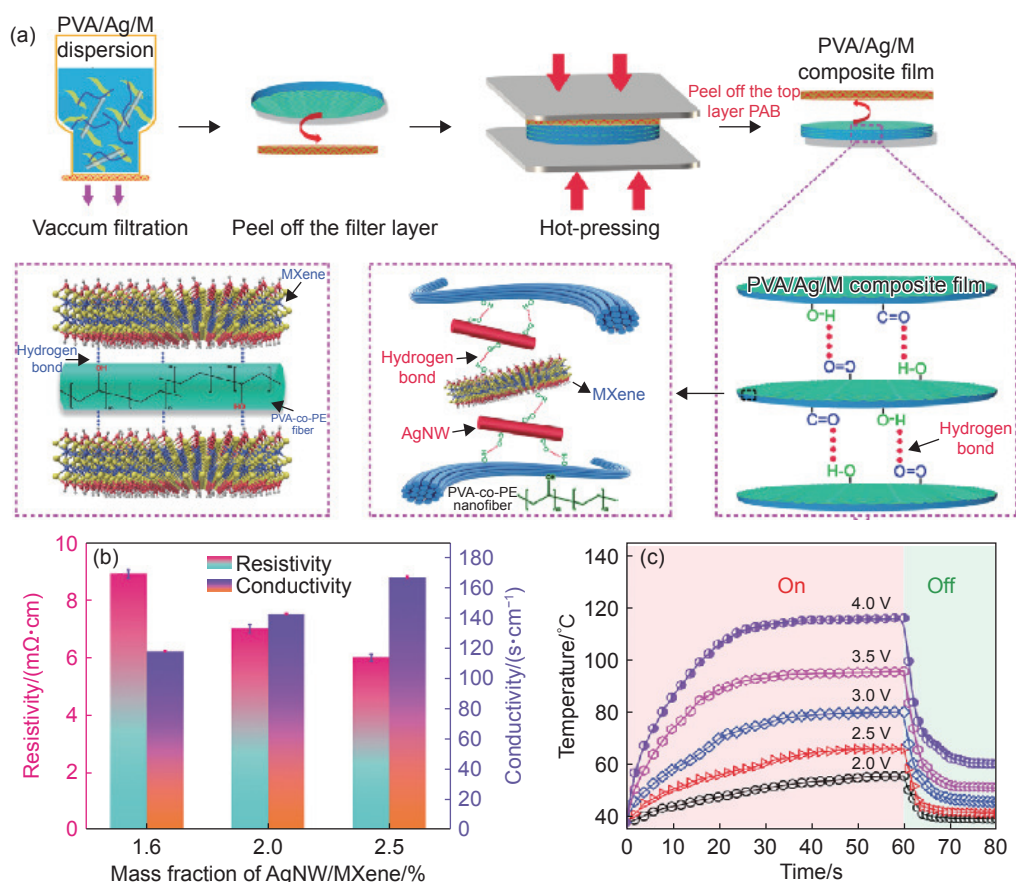


图5 聚乙烯醇/MXene 交替多层薄膜^[52] (a)多层浇铸工艺示意图;(b)不同聚合物复合材料的电阻率与电导率对比;(c)聚合物复合膜表面温度随时间的变化曲线图

Fig. 5 Alternating multi-layer films of PVA/MXene^[52] (a) schematic diagram of multi-layer casting process; (b) comparison of resistivity and conductivity for different polymer composite; (c) time-dependent surface temperatures of the composite film

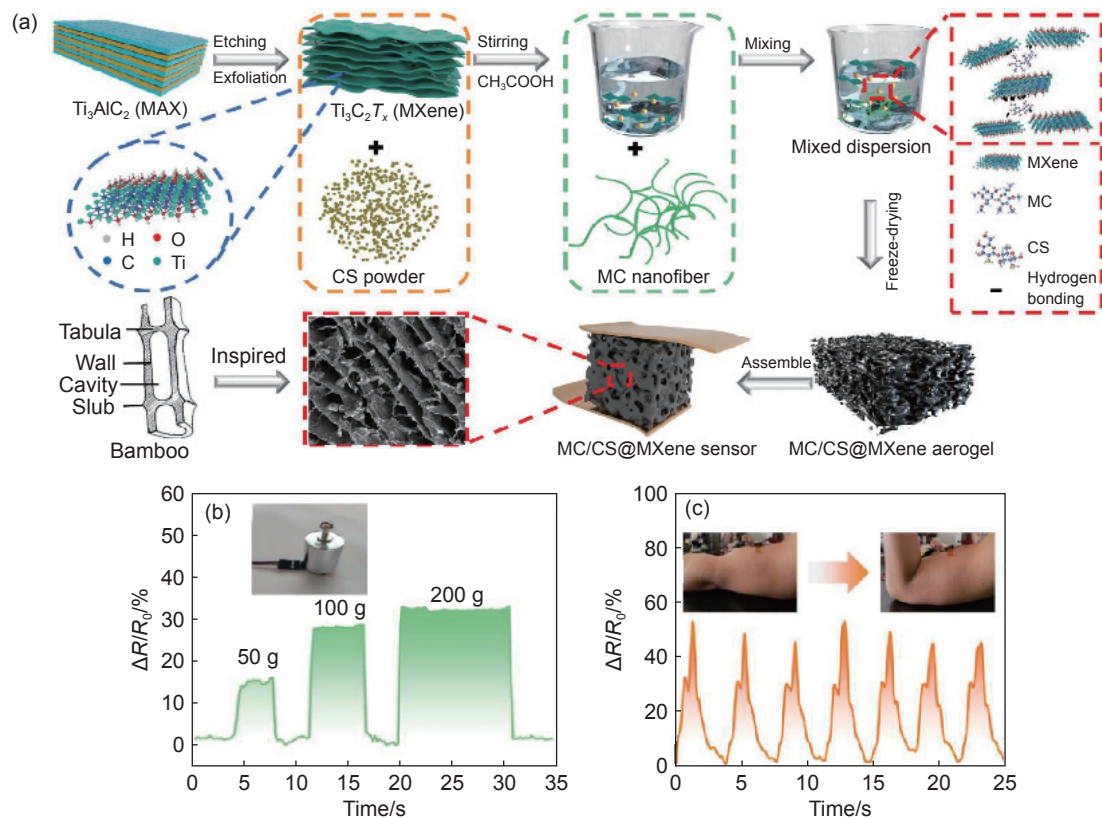


图 6 金属碳化物/碳化硅@MXene 气凝胶^[60] (a) 制备流程示意图; (b) 气凝胶在不同应力下的动态传感响应; (c) 在不同手臂伸展状态下的动态传感响应

Fig. 6 Metal carbides/silicon carbide@MXene aerogels^[60] (a) schematic preparation process; (b) dynamic response under different stresses; (c) dynamic response under different arm extension states

设计、组分协同及制备工艺优化,可以实现高灵敏、宽温域传感响应,满足航空航天极端环境下设备监测与环境感知需求。

4 结束语

MXene 基复合材料凭借其独特的物理化学性能与灵活的制备调控策略,在航空航天领域的应用研究已取得显著进展,但当前仍面临三大核心挑战:(1)极端环境稳定性不足, MXene 在高温、强辐射、宽温域循环等太空环境中易发生氧化与结构退化,直接影响材料服役寿命,而其太空环境稳定性验证目前仅局限于短期模拟实验,缺乏长期在轨实测数据支撑;(2)规模化生产技术瓶颈,绿色蚀刻工艺的产率较低,3D 打印兼容涂层的均匀性与一致性难以控制,难以满足航天器部件批量生产的严苛需求;(3)多场耦合性能优化欠缺,现有材料多聚焦于单一功能或双功能集成,针对航空航天领域对电磁屏蔽、热管理与自适应传感等多功能协同的核心需求,尚未形成成熟的设计理论与规模化制备技术。为此,本文提出以下未来发展方向:

(1)人工智能辅助材料设计。融合机器学习与密度泛函理论(DFT)计算,构建 MXene 基复合材料的“结构-性能”定量关系模型,精准预测表面官能团修饰、复合组分比例、微观结构参数等对材料抗辐射性、长寿命、多场协同性等航空航天关键性能的影响机制,大幅缩短材料优化周期。例如,通过 AI 算法高效筛选核壳结构、梯度构型等最优参数组合,实现电磁屏蔽效能与热导率的协同最大化,为多功能集成材料设计提供科学指导。

(2)极端环境可靠性提升。开展 MXene 基复合材料在高真空、强辐射、宽温域循环等太空极端环境下的长期性能演化研究,开发 SiO₂、Al₂O₃ 等抗氧化涂层与层间交联稳定化技术,从结构设计与表面改性双重维度抑制 MXene 的氧化降解与层间剥离;建立基于环境因素与性能衰减关联的材料寿命预测模型,为航天器部件的服役周期评估与维护策略制定提供科学依据。

(3)多功能集成与工程化应用。聚焦航空航天实际应用需求,构建“电磁屏蔽-热管理-自适应传感”一体化复合材料体系,通过功能定向设计、界面作用调控与工艺优化,实现多性能协同增强;

推进绿色蚀刻工艺的规模化升级,优化3D打印、涂层涂覆等制备技术,提升材料制备的一致性与生产效率;开展部件级集成验证实验,建立MXene基复合材料在航空航天领域的应用标准、性能测试规范与质量控制体系。

未来,随着制备技术的成熟、性能调控理论的完善与极端环境可靠性的持续提升,MXene基复合材料有望推动航天器向“多功能集成、轻量化设计、智能化响应、长寿命服役”方向跨越式发展,为航空航天技术的升级迭代提供核心材料支撑。

参考文献:

- [1] 王敬枫,康辉,成中军,等. $Ti_3C_2T_x$ MXene 基电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(6): 14-25.
WANG J F, KANG H, CHENG Z J, et al. Research progress in $Ti_3C_2T_x$ MXene- based electromagnetic interference shielding material[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(6): 14-25
- [2] YUN T, KIM H, IQBAL A, et al. Electromagnetic shielding of monolayer MXene assemblies[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(9): 1906769-1906777.
- [3] IQBAL A, SAMBYAL P, KOO C M. 2D MXenes for electromagnetic shielding: a review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(47): 2000883-2000907.
- [4] ZHANG X, ZHANG Z H, ZHOU Z. MXene-based materials for electrochemical energy storage[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2018, 27(1): 73-85.
- [5] 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): 992-1005.
- [6] HONG NG V M, HUANG H, ZHOU K, et al. Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: synthesis and applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(7): 3 039-3068.
- [7] SARYCHEVA A, MAKARYAN T, MALESKI K, et al. Two-dimensional titanium carbide (MXene) as surface-enhanced Raman scattering substrate[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(36): 19983-19988.
- [8] TAN A Y S, AWAN H T A, CHENG F L, et al. Recent advances in the use of MXenes for photoelectrochemical sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482: 148774-148797.
- [9] WEI Y, ZHANG P, SOOMRO R A, et al. Advances in the synthesis of 2D MXenes[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(39): 2103148-2103177.
- [10] PANG J B, MENDES R G, BACHMATIUK A, et al. Applications of 2D MXenes in energy conversion and storage systems[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(1): 72-133.
- [11] LI X Q, WANG C Y, CAO Y, et al. Functional MXene materials: progress of their applications[J]. *Chemistry*, 2018, 13(19): 2742-2757.
- [12] HE H T, XIA Q X, WANG B X, et al. Two-dimensional vanadium carbide (V_2CT_x) MXene as supercapacitor electrode in seawater electrolyte[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(4): 984-987.
- [13] ZHAN C, NAGUIB M, LUKATSKAYA M, et al. Understanding the MXene pseudocapacitance[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, 9(6): 1223-1228.
- [14] OKUBO M, SUGAHARA A, KAJIYAMA S, et al. MXene as a charge storage host[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2018, 51(3): 591-599.
- [15] MA C, MA M G, SI C L, et al. Flexible MXene-based composites for wearable devices[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(22): 2009524-2009543.
- [16] LU H, LI J B, ZHANG R L, et al. Advances and perspectives of two-dimensional materials MXenes: efficient catalysts for magnesium hydride[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 217: 115759-115782.
- [17] MASHTALIR O, NAGUIB M, DYATKIN B, et al. Kinetics of aluminum extraction from Ti_3AlC_2 in hydrofluoric acid[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 139(1): 147-152.
- [18] LI Z Y, WANG L B, SUN D D, et al. Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti_3C_2 [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2015, 191: 33-40.
- [19] MA Y N, CHENG Y F, WANG J, et al. Flexible and highly-sensitive pressure sensor based on controllably oxidized MXene[J]. *InfoMat*, 2022, 4(9): 12328-12339.
- [20] ZHANG A T, LIU R, TIAN J M, et al. MXene-based nanocomposites for energy conversion and storage applications[J]. *Chemistry*, 2020, 26(29): 6342-6359.
- [21] JIN X X, WANG J F, DAI L Z, et al. Flame-retardant poly(vinyl alcohol)/MXene multilayered films with outstanding electromagnetic interference shielding and thermal conductive performances[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 380: 122475-122483.
- [22] 党阿磊,方成林,赵翌,等. 新型二维纳米材料MXene的制备及在储能领域的应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(4): 1-14.
DANG A L, FANG C L, ZHAO Z, et al. Preparation of a new two-dimensional nanomaterial MXene and its application progress in energy storage[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(4): 1-14
- [23] CAO W, NIE J L, CAO Y, et al. A review of how to

- improve $Ti_3C_2T_x$ MXene stability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154097-154121.
- [24] LI T F, YAO L L, LIU Q L, 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): 6115-6119.
- [25] WANG S B, LIU Y, LIU Y Y, et al. Effect of HF etching on titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$) microstructure and its capacitive properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139512-139520.
- [26] LI M, LU J, LUO K, 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): 4730-4737.
- [27] MCLELLAN K, LI T, SUN Y C, et al. 4D printing of MXene composites for deployable actuating structures [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(12): 8774-8785.
- [28] OLIVEIRA F M, AZADMANJIRI J, WANG X H, et al. Structure design and processing strategies of MXene-based materials for electromagnetic interference shielding[J]. *Small Methods*, 2023, 7(7): 2300112-2300141.
- [29] PEI Y Y, ZHANG X L, HUI Z Y, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene for sensing applications: recent progress, design principles, and future perspectives[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 3996-4017.
- [30] YU H, WANG Y H, JING Y, et al. Surface modified MXene-based nanocomposites for electrochemical energy conversion and storage[J]. *Small*, 2019, 15(25): 1901503-1901522.
- [31] GONG K L, ZHOU K Q, QIAN X D, et al. MXene as emerging nanofillers for high-performance polymer composites: a review[J]. *Composites Part B*, 2021, 217: 108867-108906.
- [32] BIBI S, AHMAD SHAH S S, NAZIR M A, et al. MOF/MXene composites: synthesis, application and future perspectives[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2024, 8(8): 2400011-2400043.
- [33] TU S B, JIANG Q, ZHANG X X, et al. Large dielectric constant enhancement in MXene percolative polymer composites[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3369-3377.
- [34] LI W, WANG J Y, WANG K, et al. Synergistic MXene/transition metal composites: engineering high-performance flexible supercapacitors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 143: 119716-119738.
- [35] MIAO B J, BASHIR T, ZHANG H L, et al. Impact of various 2D MXene surface terminating groups in energy conversion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114506-114526.
- [36] CHAUDHARI N K, JIN H, KIM B, et al. MXene: an emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(47): 24564-24579.
- [37] HASSAN T, PARK C, NAQVI S M, et al. MXenes for infrared thermal management[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(48): 40703-40732.
- [38] SUI Y L, WU N, LIU Y, et al. Hydrophobic interaction-directed solvent-free ambient-pressure-dried MXene aerogels[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(11): 14667-314677.
- [39] ZHAO L, BI L Y, HU J Y, et al. Universal salt-assisted assembly of MXene from suspension on polymer substrates[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 10027-10037.
- [40] XIE X, XUE R, LIU X Y, et al. Multifunctional NR/MXene/SiO₂ film with core-shell structure for all-weather thermal management and EM shielding[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2026, 708: 139819-139833.
- [41] ZHAO K, TANG J, XU D C, et al. Enabling autonomous moisture harvesting and cyclic transpiration cooling with MXene-LiBr functionalized hydrogels for advanced thermal management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(49): 11789-11801.
- [42] MORADI A, SZEWCZYK P K, STACHEWICZ U. Scalable and multifunctional PAN-MXene composite fibers for thermal management, photothermal conversion, energy harvesting, and sensing for wearable applications[J]. *Advanced Materials*, 2025: 22098-22115.
- [43] ZAHRA Q U A, ULLAH S, SHAHZAD F, et al. MXene-based aptasensors: advances, challenges, and prospects [J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 129: 100967-11003.
- [44] PENG Y H, LIU J R, FENG Z B, et al. Multi-component heterogeneous interface engineering and magnetic domain evolution for broadband electromagnetic wave attenuation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 524: 168991-169001.
- [45] LI Y F, HUANG S R, PENG S A, et al. Toward smart sensing by MXene[J]. *Small*, 2023, 19(14): 2206126-2206151.
- [46] WANG L, CHEN L X, SONG P, et al. Fabrication on the annealed $Ti_3C_2T_x$ MXene/Epoxy nanocomposites for electromagnetic interference shielding application[J]. *Composites Part B*, 2019, 171: 111-118.
- [47] LIU Y, WANG Y D, WU N, et al. Diverse structural design strategies of MXene-based macrostructure for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 240-270.

- [48] ZHANG S, WU J T, HOU Z L, et al. Regular-wrinkling tunable MXene lattice for electromagnetic interference shielding[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 1275-1284.
- [49] SONG M P, LIU Z, WANG Y, et al. Industrial-grade flexible carbon fiber paper/MXene composite electromagnetic shielding material with ultra-large area and ultra-high performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(27): 2421422-2421432.
- [50] LIU A, QIU H, LU X H, et al. Asymmetric structural MXene/PBO aerogels for high-performance electromagnetic interference shielding with ultra-low reflection[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(5): 2414085-2414100.
- [51] LIU M X, ZHANG H R, HUANG X M, et al. An electric-magnetic dual-gradient composite film comprising MXene, hollow Fe_3O_4 , and bacterial cellulose for high-performance EMI shielding and infrared camouflage[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(22): 2419077-2419087.
- [52] TAO D C, YANG C G, CHEN C, et al. Highly flexible and ultralight PVA-co-PE-AgNW/MXene composite film with low filling for multistage electromagnetic interference shielding[J]. *Small*, 2025, 21(7): 2411752-2411672.
- [53] LI X, GUO T Z, LI M, et al. Overview of MXene-based sensors: fundamentals and applications in gas sensors, biosensors, and mechanical sensors[J]. *Carbon*, 2026, 247: 121015-121033.
- [54] 闫勇旭, 陈青松, 付耀衡, 等. 智能传感器技术及其航天应用研究综述[J]. *智能感知工程*, 2024, 1(1): 81-89.
YAN Y X, ZHANG Q S, FU Y H, et al. A review of smart sensor technology and its aerospace applications[J]. *Intelligent Perception Engineering*, 2024, 1(1): 81-89.
- [55] YANG W J, LIU F L, LIN Y X, et al. MXene-based flexible sensors for wearable applications[J]. *Soft Science*, 2025, 5(3): 33-58.
- [56] 邢飞, 李皓鹏, 李文倩, 等. 柔性传感器在复合材料结构健康监测中的应用: 进展、挑战与展望[J]. *航空制造技术*, 2025, 68(21): 62-75.
- XING F, LI H P, LI W Q, et al. Flexible sensors for structural health monitoring of composites: advances, challenges, and perspectives[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(21): 62-75.
- [57] XU T Y, HE Q L, CHEN H, et al. Principle and structural design of MXene-based sensors toward smart life[J]. *Interdisciplinary Materials*, 2025, 4(2): 284-299.
- [58] QIN R, SHAN G, HU M, et al. Two-dimensional transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their applications in sensors[J]. *Materials Today Physics*, 2021, 21: 100527-100569.
- [59] HERBER M, HILL E H. Optically-directed bubble printing of MXenes on flexible substrates toward MXene-enabled wearable electronics and strain sensors[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(18): 7258-7265.
- [60] ZHAO Y L, LI B, ZHONG M, et al. Highly sensitive, wearable piezoresistive methylcellulose/chitosan@MXene aerogel sensor array for real-time monitoring of physiological signals of pilots[J]. *Science China Materials*, 2025, 68(2): 542-551.
- [61] LI W, LI Y, XU M, et al. Highly customizable, ultrawide-temperature free-form flexible sensing electronic systems based on medium-entropy alloy paintings[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7351-7364.

收稿日期: 2026-01-30; 录用日期: 2026-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52502116); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515110140)

通讯作者: 张苒(1989—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为功能复合材料, 联系地址: 江苏省徐州市云龙区丽水路2号徐州工程学院(221018), E-mail: zhangr5095@xzit.edu.cn; 董黎明(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高分子环保涂层新材料, 联系地址: 江苏省徐州市云龙区丽水路2号徐州工程学院(221018), E-mail: dlm@xzit.edu.cn

(本文责编: 高磊)