

MXene基吸波材料设计与研究进展

王 巍¹, 王婉琼¹, 李志标¹, 王金辉¹, 顾贤科^{2,3*}, 张玉晶^{1*}

¹南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

²安徽开阳科技有限公司, 安徽 芜湖

³奇瑞汽车股份有限公司, 安徽 芜湖

收稿日期: 2026年9月23日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月28日

摘 要

随着第五代/第六代移动通信技术的快速发展, 电磁辐射污染问题日益严峻, 研发轻质宽频高效吸波材料已成为迫切需要。MXene作为新型二维过渡金属碳化物/氮化物, 凭借其独特层状结构与优异导电性在电磁吸波领域备受关注, 但其过高的电导率导致阻抗匹配较差, 单一损耗机制限制了吸波性能。本文系统综述了MXene基吸波材料的最新研究进展, 从磁性氧化物复合、磁性金属复合和三维多孔结构构筑三方面阐述了多元异质结构设计与多重损耗协同对吸波性能的增强机制。研究表明, 通过引入磁性组分优化阻抗匹配、构建异质界面增强极化损耗、设计三维网络促进多重散射, 可显著提升吸波性能, 最小反射损耗可达-61.3 dB, 有效吸收带宽达7.04 GHz。最后展望了该领域面临的环境稳定性、多功能集成及规模化制备等挑战与发展方向。

关键词

MXene基吸波材料, 电磁波吸收, 阻抗匹配, 异质结构

Design Strategies and Research Progress of MXene-Based Microwave Absorbing Materials

Wei Wang¹, Wanqiong Wang¹, Zhibiao Li¹, Jinhui Wang¹, Xianke Gu^{2,3*}, Yujing Zhang^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

²Anhui Kaiyang Technology Co, Ltd., Wuhu Anhui

³Chery Automobile Co, Ltd., Wuhu Anhui

Received: September 23, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 28, 2026

*共同通讯作者。

文章引用: 王巍, 王婉琼, 李志标, 王金辉, 顾贤科, 张玉晶. MXene 基吸波材料设计与研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 173-183. DOI: 10.12677/ms.2026.1610202

Abstract

With the rapid advancement of fifth-generation (5G) and sixth-generation (6G) mobile communication technologies, electromagnetic radiation pollution has become increasingly severe, driving an urgent demand for lightweight, broadband, and high-efficiency microwave absorbing materials. MXene, as an emerging class of two-dimensional transition metal carbides/nitrides, has attracted considerable attention in the field of electromagnetic wave absorption due to its unique layered structure and exceptional electrical conductivity. However, the excessively high conductivity of pristine MXene leads to poor impedance matching, and its single loss mechanism restricts the overall absorption performance. This review systematically summarizes the recent progress in MXene-based microwave absorbing materials, elaborating on the enhancement mechanisms of microwave absorption performance through multicomponent heterostructure design and synergistic multiple loss effects from three perspectives: magnetic oxide compounding, magnetic metal compounding, and three-dimensional porous structure construction. It is demonstrated that the microwave absorption performance can be significantly improved by introducing magnetic components to optimize impedance matching, constructing heterointerfaces to intensify polarization loss, and designing three-dimensional networks to promote multiple scattering, achieving a minimum reflection loss of -61.3 dB and an effective absorption bandwidth of 7.04 GHz. Finally, the challenges and future directions in this field, including environmental stability, multifunctional integration, and scalable fabrication, are prospected.

Keywords

MXene-Based Microwave Absorbing Materials, Electromagnetic Wave Absorption, Impedance Matching, Heterostructure

Copyright © 2026 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

随着第五代/第六代移动通信、物联网与高速电子设备的飞速发展，电磁波(Electromagnetic Wave, EMW)已广泛渗透至大众日常生活之中。无线通信技术与电子设备为民用领域带来诸多便利的同时，也衍生出一系列电磁环境相关问题。已有研究证实，长期处于强电磁辐射环境中会对人体健康产生不良影响。同时，高强度电磁辐射会干扰各类电子设备的正常工作与稳定运行。在军事领域，先进的雷达探测技术大幅削弱了武器装备的电磁隐身能力。综上，研发具备高吸波性能、宽频适配范围、轻质化特性的吸波材料具有十分重要的研究价值与应用意义。

当电磁波到达材料表面后，与材料发生相互作用。其作用结果可分为三种：在材料表面反射、进入材料内部被吸收、穿过材料表面透射(图 1 所示)。在设计吸波材料时，应着重考虑最大限度的吸收电磁波，减少电磁波的反射和透射。

减少电磁波的反射，可以通过阻抗匹配原理实现。阻抗匹配是指吸波材料的输入阻抗应接近自由空间(Z_0)的阻抗值[1]。自由空间阻抗可表示为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (1)$$

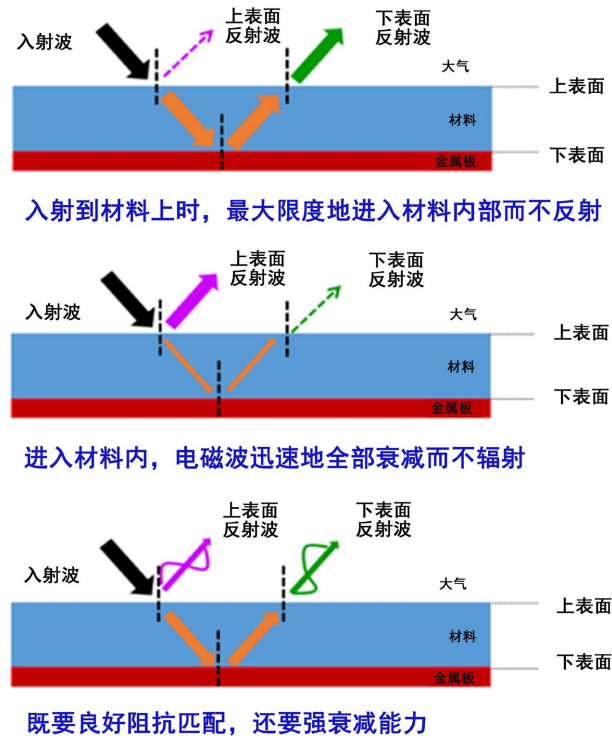


Figure 1. Mechanisms of electromagnetic wave absorption [2]
图 1. 电磁吸波机理图[2]

其中, μ_0 和 ε_0 分别为真空磁导率和真空介电常数。当吸波材料涂覆于金属背衬上时, 可将吸波层等效为终端短路的传输线。根据传输线理论, 其输入阻抗 Z_{in} 可表示为:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tan \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \right] \quad (2)$$

其中, f 为电磁波频率, d 为吸波层厚度, c 为真空光速, ε_r 和 μ_r 分别为材料的相对复介电常数和相对复磁导率。则输入阻抗 Z 可表示为:

$$Z = \left| \frac{Z_{in}}{Z_0} \right| = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tan \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \right] \quad (3)$$

当 $Z \rightarrow 1$ 时, 吸波层输入阻抗接近自由空间阻抗, 电磁波在材料表面的反射最小, 能够最大程度进入材料内部, 此即阻抗匹配。若 Z 明显偏离 1, 即使材料内部损耗能力很强, 大量电磁波仍会在表面被反射, 最终吸波性能较差。因此, 阻抗匹配是高效吸波材料设计的首要条件。

对于电磁波吸收性能, 我们一般以反射损耗 RL (Reflection Loss) 来衡量, 其表达式如下:

$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (4)$$

RL 值是指初始入射电磁波与最终反射电磁波之间的差值, 其为负值, 且值越小则代表材料对电磁波的衰减能力越强。此外有效吸收带宽 EAB (Effective absorption bandwidth) 也是衡量材料吸波性能的重要指标, 指代的是 $RL \leq -10$ dB 的频率范围, 此时有超过 90% 的电磁波被有效吸收, RL 值与吸收率之间的关系如表 1 所示[3]。

Table 1. Corresponding relationship between the reflection loss (RL) value and absorption rate**表 1.** 反射损耗 RL 值与吸收率的对应关系

RL/dB	-5	-10	-20	-30	-40	-50
吸收率/%	68.4	90	99	99.9	99.99	99.999

电磁波进入材料内部后，其衰减能力主要由材料的复介电常数和复磁导率决定：

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (6)$$

其中， ε' 和 μ' 分别表示材料对电场能量和磁场能量的存储能力， ε'' 和 μ'' 分别表示介电损耗和磁损耗能力。介电损耗正切和磁损耗正切可分别表示为：

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (7)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (8)$$

电磁波进入材料后的衰减程度可由衰减常数 α 描述：

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}\pi f}{c} \sqrt{\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon' + \sqrt{(\mu''\varepsilon'' - \mu'\varepsilon')^2 + (\mu'\varepsilon'' + \mu''\varepsilon')^2}} \quad (9)$$

α 越大，表明电磁波在材料内部衰减越快。由上式可知，提高 ε'' 和 μ'' 通常有利于增大衰减常数。但需要强调的是 α 并非越大越好。若 ε'' 或 μ'' 过高，往往伴随 ε' 或 μ' 的异常增大，使 Z_{in}/Z_0 远离 1，反而恶化阻抗匹配。因此，高效吸波材料必须同时满足两个条件：一是电磁波能尽可能进入材料内部，即阻抗匹配良好；二是电磁波进入后能被快速耗散，即衰减常数足够大。

从损耗机制来看，电磁波的损耗机制分为两种：介电损耗型和磁损耗型。其中介电损耗来源于传导损耗和极化弛豫损耗：(1) 电导损耗的机理是材料内部的载流子作定向运动而产生感应电流，将微波能量转化为热能；(2) 极化损耗是指材料中的电子、离子、极性分子、空间电荷在交变电磁场的作用下反复极化而导致电磁波能量耗散；(3) 磁损耗的主要包括自然共振、交换共振和涡流损耗等。

作为一种新型二维介电损耗型材料，MXene 凭借其独特的二维层状结构与可调控的表面化学特性，在电磁吸波领域得到了广泛关注。该材料具备优异的本征导电性，可为传导损耗的产生提供良好基础；同时，其表面丰富的含氧官能团(-O、-OH 等)及大量层间界面可诱发显著的偶极极化与界面极化弛豫效应，实现电磁能向热能的有效转化。此外，MXene 多层堆叠结构所构建的内部反射网络能够有效延长电磁波传输路径并加剧能量衰减，使其可在较小材料厚度下实现宽频、高效的微波吸收性能。但纯 MXene 材料由于导电性过高导致阻抗匹配极差，限制了其吸波性能的充分发挥。将其与其他材料复合，构建多元异质结构，可以实现多重损耗机制的协同，是提升 MXene 吸波材料的关键策略。本文将重点介绍 MXene 吸波材料的结构与性质以及 MXene 基复合吸波材料的研究进展。

2. MXenes 材料的结构与性质

2011 年，Gogotsi 和 Barsoum 团队的突破性研究首次报道了多层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的制备，这标志着一种全新的二维材料 - 过渡金属碳化物、氮化物及碳氮化物(统称为 MXenes)的诞生[4]-[6]。这类材料一般通过对化学通式为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ ($n=1\sim4$) 的三元层状陶瓷 MAX 相前驱体进行选择刻蚀衍生得到。在该化学通式中，M 代表早期过渡金属元素(如 Ti、Ta、V、Mo、Nb、Cr 等)，A 主要为第 13 或 14 族的主族元素(如

Al、Si、Ga 等), X 则代表碳或氮原子(图 2)。这种独特的结构构成使得 MAX 相种类丰富, 目前由这些元素已经组合衍生出一百多种 MXene 产物, 在能源、催化、电磁屏蔽等领域得到广泛应用。

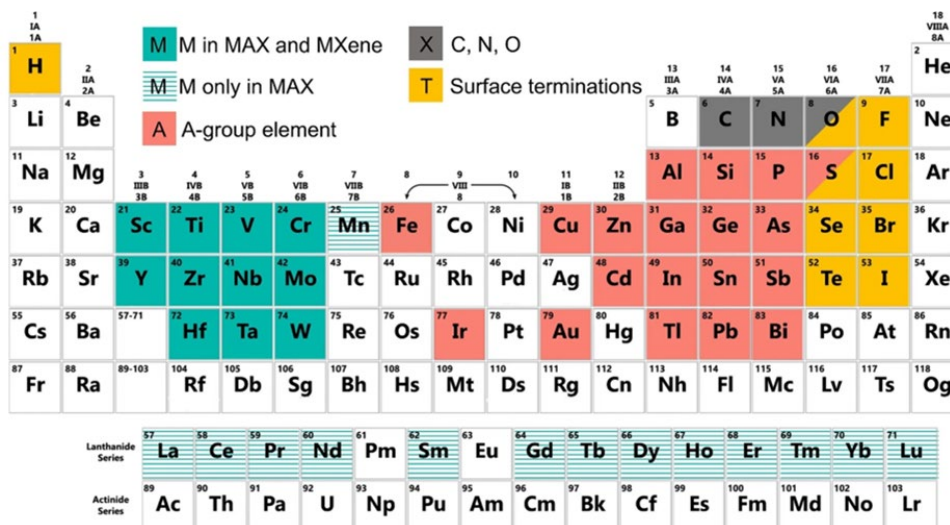


Figure 2. Periodic table showing the distribution of elements in MXenes [7]

图 2. 元素周期表中 MXene 元素的分布图[7]

在晶体结构上, MAX 相前驱体具有典型的六方密排结构, 空间群为 $P6_3/mmc$ 。该结构由交替堆叠的 $M_{n+1}X_n$ 层与单层 A 位原子沿 c 轴方向构成, 其中 M-X 键为较强的共价键/金属键/离子键混合键合, 而 M-A 键则为较弱的金属键。这种键合强度的明显差异, 可以让 MAX 相可以通过化学蚀刻等“自上而下”的方法将“A”位原子选择性地移除, 移除后, 剩余的、松散堆积的 $M_{n+1}X_n$ 层状结构通常以混合表面官能团 T_x (例如-O、-OH 和-F) 进行终止, 由此得到的二维材料即被命名为 MXenes, 具有类石墨烯层状结构。

层状结构其通用化学式可表示为 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n = 1 \sim 4, x \leq 2$), 具体制备与结构演变过程如图 3 所示[8][9]。

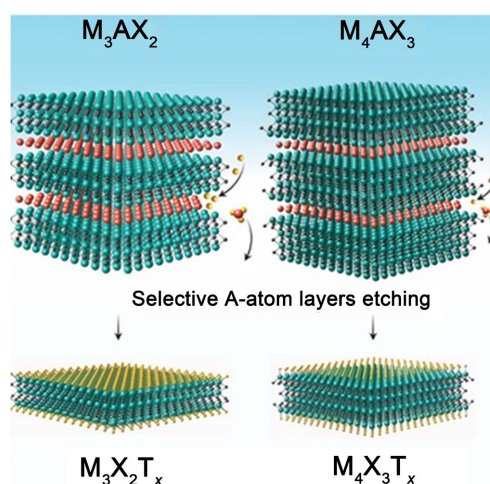


Figure 3. Schematic diagram for the synthesis of various MXenes from the corresponding MAX phases [9]

图 3. 从相应的 MAX 相制备各种 MXenes 的示意图[9]

MXenes 凭借优异的导电性能、极低的离子扩散能垒、丰富的表面化学特性、可灵活调控的层间距、优异的氧化还原反应活性、良好的亲水特性以及机械稳定性等诸多优势,在跨学科应用领域均展现出广阔的前景。在储能技术领域, MXenes 独特的宽层间通道与高效的离子传输动力学特性,使其成为高性能金属离子电池和超级电容器的理想电极材料。在分离膜应用场景中,该材料具备的柔韧特性、可精准调控的层间结构、丰富的表面官能团以及良好的机械性能,为其膜材料的开发与应用奠定了坚实基础[10]。与此同时,高导电率与轻量化的特质,让 MXenes 在电磁吸波与电磁屏蔽领域具备显著应用优势,而其表面大量的活性反应位点,也使其拥有优异的电催化、氧化还原催化潜能[11]-[13]。除此之外, MXenes 优异的亲水特性,可实现胶体形态的直接加工,能够制备出自支撑薄膜、无添加油墨等功能性材料,便于器件集成的制备[14]。尤为关键的是, MXenes 的化学组分、微观形貌与层间环境均可实现精准调控,能够根据不同应用场景的性能需求开展定向材料设计,具备极强的性能调控潜力与研发价值。

MXenes 材料主要分为四类: (1) 多孔凝胶结构: 以二维 MXene 构筑的三维多孔网络,具备高孔隙率、低密度、结构可调等特性; (2) 薄膜结构: 通过真空抽滤、旋涂或 Langmuir-Blodgett 等方法将 MXene 纳米片组装得到; (3) 织物结构: 将 MXene 晶体构型与纺织基底表面特性结合,构筑多级功能化网络,既保留织物柔软可弯曲的特点,又兼具优异导电性、电化学活性与环境稳定性; (4) 球形/颗粒结构: 采用物化手段将二维 MXene 纳米片重排为三维球状或颗粒形貌,在保留 MXene 优异导电性、表面化学活性与力学强度的同时,借助三维传输网络有效提升材料比表面积、离子传输效率及环境稳定性[15]。

3. Mxenes 电磁吸波材料

纯 MXene 具有良好的本征导电性,其微波吸收性能可通过对微观结构、缺陷浓度及表面官能团的调控进行有效调节。通过调整制备参数或后处理工艺,可引入结构缺陷与表面端基(如-O、-OH),增强偶极极化与界面极化弛豫,从而提升介电损耗能力。然而,纯 MXene 的衰减机制仍相对单一,吸收带宽通常较窄。因此,进一步将磁性或介电组分与 MXene 复合,构建具有多重损耗机制的 MXene 基复合材料,成为突破 MXene 材料吸波性能瓶颈的重要方向。

磁性组分(如 Fe_3O_4 、Fe、Co 和 Ni 等)因具备良好的磁导率与磁损耗特性,在吸波材料领域已被广泛研究。其中铁氧体材料(如 Fe_3O_4 和 CoFe_2O_4)因其环境友好性、高居里温度以及在低频范围内显著的磁损耗能力,受到研究者的重点关注。因此,将磁性铁氧体材料颗粒引入 MXene 片层结构中,能够有效增强复合材料的电磁波吸收性能并改善其阻抗匹配特性。

如图 4(a)所示, Swapnalini 等人通过简便的水热法将 CoFe_2O_4 插入 MXene 层间,成功制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 复合材料。 CoFe_2O_4 的引入不仅增强了该二维复合材料的介电响应,还诱导出各向异性行为,这一特性赋予材料较高的摩尔磁化率,从而提升了整体电磁波耗散效率[16]。Zhang 等人采用溶剂热法将 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合(图 4(b)), Fe_3O_4 的加入显著优化了复合体系的阻抗匹配,并引入了额外的磁损耗机制,所制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米复合材料在 4.2 mm 厚度处的最小反射损耗达到 -57.2 dB(图 4(c)) [17]。Liu 课题组通过水热法构筑了 $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 三元复合材料(图 4(d)-(e))。得益于 $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 提供的介电损耗与 Fe_3O_4 贡献的磁损耗之间的协同作用,该复合材料在 1.9 mm 厚度处实现了 -57.3 dB 的最小反射损耗,其性能明显优于单一的 Fe_3O_4 或二元 $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 体系(图 4(f)) [18]。He 等人则利用原位溶剂热法制备了 CoFe_2O_4 修饰的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料(图 4(g), 图 4(h))。 CoFe_2O_4 的引入增强了复合材料的复磁导率实部与虚部,使其有效吸收带宽拓宽至 8.5 GHz(图 4(i)) [19]。此外, Wang 等人通过一步溶剂热法并结合静电吸附策略,成功制备了花状 $\text{CoO}/\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料,该材料在 1.50 mm 厚度处的最小反射损耗为 -58.37 dB。

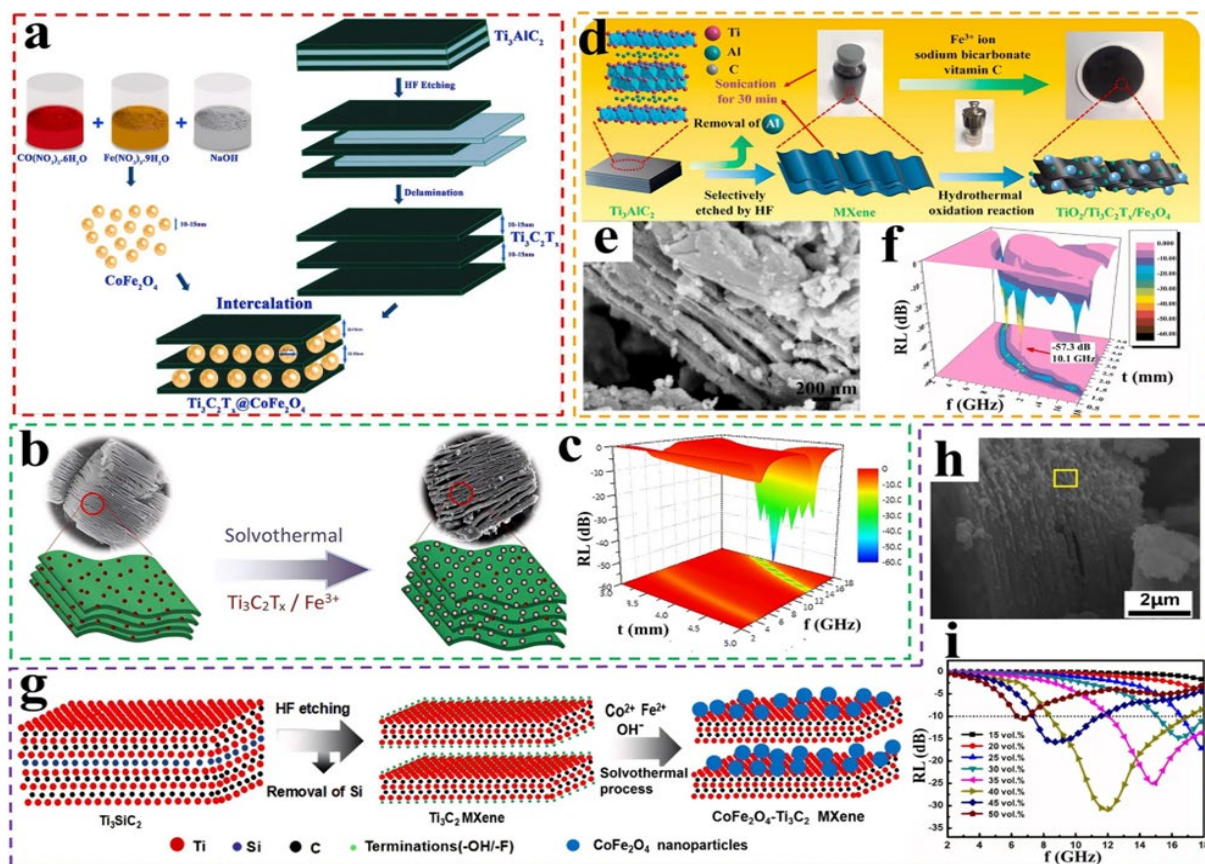


Figure 4. (a) Schematic illustration of the intercalation process of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ structure [16]; (b), (c) Schematic diagram, SEM image, and three-dimensional reflection loss plot of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ [17]; (d)~(f) Schematic illustration of the synthesis process, SEM image, and three-dimensional reflection loss plot of $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Fe}_3\text{O}_4$ [18]; (g)~(i) Schematic diagram, SEM image, and three-dimensional reflection loss plot of $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Ti}_3\text{C}_2$ MXene in the 2~18 GHz range [19]

图 4. (a) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 结构的插层过程示意图[16]; (b) (c) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的示意图、扫描电镜图及三维反射损耗图[17]; (d)~(f) $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的合成过程示意图、扫描电镜图及三维反射损耗图[18]; (g)~(i) $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Ti}_3\text{C}_2$ MXene 在 2~18 GHz 范围内的示意图、扫描电镜图及三维反射损耗图[19]

与铁氧体相比,磁性金属(如 Fe、Co、Ni 及其合金)通常具有更高的电导率与饱和磁化强度,因而在提升 MXene 磁性方面表现出更大潜力。将 MXene 与高磁损耗的磁性金属颗粒复合,不仅可引入额外的磁损耗通道,加速电磁波的衰减,还能通过构建丰富的异质界面增强界面极化,从而协同提升整体微波吸收性能。

例如, Pan 等人采用磁场辅助的原位液相法,成功制备了二维 MXene 与一维钴纳米链复合的纳米材料(MXene-CoC) (图 5(a)), 钴纳米链的引入使复合材料的饱和磁化强度(M_s)提升至 34.15 emu/g (图 5(b))。性能对比表明,纯 MXene 虽具有较高的介电常数,但其吸波性能较弱,而复合钴纳米链后,材料在 1.02 mm 厚度处的最小反射损耗显著提高至-46.48 dB (图 5(c))。该增强效应主要源于钴纳米链的磁共振与 MXene 层中缺陷诱导的偶极极化之间的协同作用[20]。Wen 课题组通过球化策略构筑了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@Ni 微球结构,其中 MXene 为镍纳米针的定向生长提供了丰富的成核位点(图 5(d)), 高密度、各向异性的镍纳米针形成了连续的磁响应网络,显著增强了材料的磁性能与电磁波耗散能力(图 5(e), 图 5(f)) [21]。此外, Cui 等人利用超声喷雾法合成了三维多孔 MXene/Ni 复合微球,该材料在 1.9 mm 厚度处的最小反射损耗达到-52.7 dB (图 5(g)~(i)) [22]。

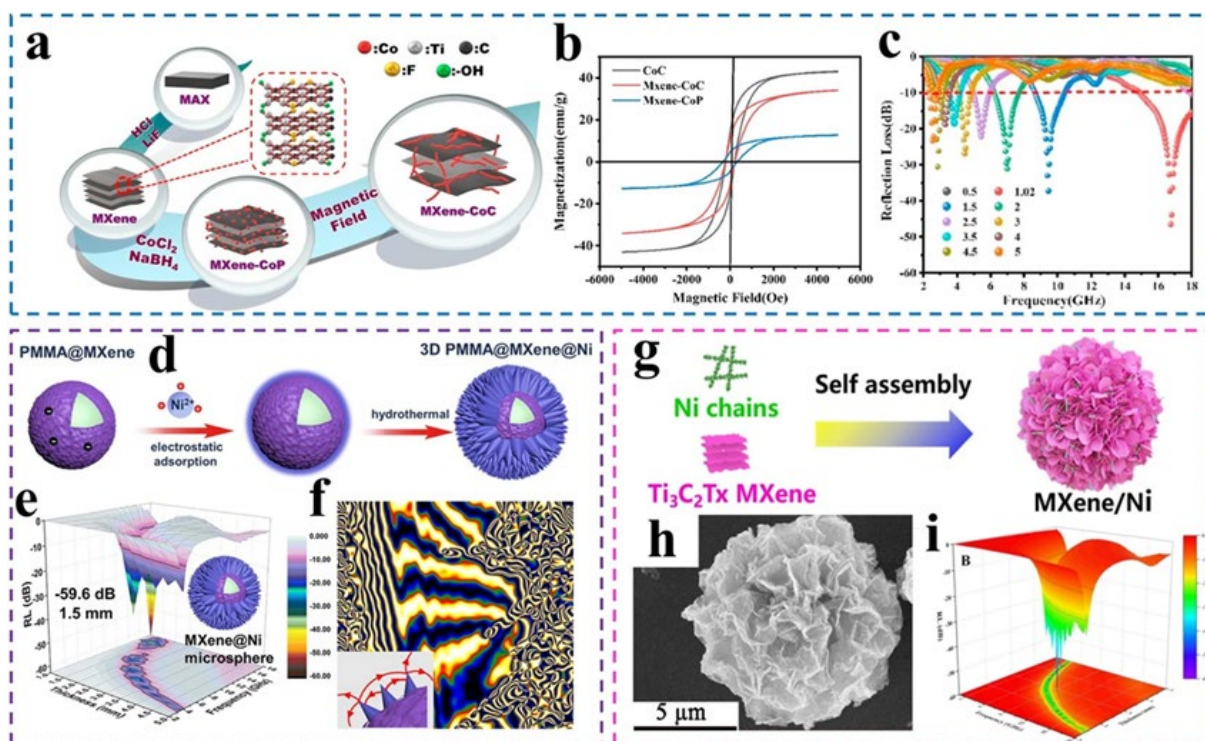


Figure 5. (a) Schematic illustration of MXene/CoC; (b) Hysteresis loops of CoC, MXene-CoC, and MXene-CoP measured at room temperature; (c) Corresponding 2D RL values at different thicknesses in the 2~18 GHz range [20]; (d) Schematic illustration of the synthesis of 3D PMMA@MXene@Ni; (e) 3D RL plot of MXene@Ni microspheres; (f) The corresponding distribution of magnetic flux lines, indicating substantial magnetic coupling between anisotropic Ni nanotips[21]; (g)~(i) Schematic illustration, SEM image, and 3D RL values of porous MXene/Ni composites [22]

图 5. (a) MXene/CoC 的示意图; (b) 在室温下测量的 CoC、MXene-CoC 和 MXene-CoP 的磁滞回线; (c) 在 2~18 GHz 范围内不同厚度下对应的 2D RL 值[20]; (d) 3D PMMA@MXene@Ni 的合成图; (e) MXene@Ni 微球的 3D RL 图; (f) 磁通量线的相应分布表明各向异性 Ni 纳米尖峰之间的实质性磁耦合[21]; (g)~(i) 多孔 MXene/Ni 复合材料的示意图、SEM、3D RL 值[22]

在 MXene 基电磁波吸收材料的研究中,引入磁性氧化物或磁性金属组分虽能有效增强材料的磁响应特性、拓宽有效吸收带宽,但在以聚合物为基体的复合材料体系中,这一策略也可能带来材料整体密度上升和磁性填料填充率增加的问题。为平衡这一矛盾,研究工作中常需同步引入石墨烯、无定形碳等轻质碳材料进行协同改性。这类碳材料凭借其低密度、高导电性和良好的界面相容性,不仅能够有效降低复合体系的整体质量,优化力学特性,还能通过构筑三维导电网络或调控介电响应,改善 MXene 与聚合物基体之间的阻抗匹配性能,从而在维持高效电磁波耗散能力的同时,实现复合材料综合性能的优化与提升。

MXene 通常具有较高的本征电导率,其过大的介电常数易导致与自由空间阻抗严重失配。因此,往往需要借助中低介电常数的介质材料对 MXene 的介电性能进行调节,以获得更优的吸波表现。例如,Cheng 等人以三聚氰胺泡沫(MF)为三维骨架,通过静电作用将镍修饰的还原氧化石墨烯/MXene 复合材料负载于其上(图 6(a)~(c)),所得 RGO/MXene/Ni-MF 复合材料的最小反射损耗为-61.3 dB,有效吸收带宽达 7.04 GHz [23]。Zhang 团队则采用聚多巴胺修饰的聚酰亚胺泡沫(PIF)作为载体,构建了 MXene/PIF 复合吸波材料(图 6(d)),通过调控 MXene 的负载量,该材料在特定厚度下可实现-32.6 dB 的最小反射损耗(图 6(e),图 6(f)) [24]。Sun 课题组以 MF 衍生的碳泡沫(CF)为模板,制备了 MXene/环氧树脂复合材料(图 6(g)~(i))。该复合泡沫的多孔结构促进了电磁波的入射与多次散射,内部形成的导电网络进一步增强了传

导损耗。同时,不同相界面(如 MXene/CF、MXene/环氧树脂、CF/环氧树脂)处的电荷积累形成类电容结构,引发了显著的界面极化弛豫。此外,材料中存在的结构缺陷和表面官能团也促进了偶极子极化。在这些机制的协同作用下,材料在 1.83 mm 厚度处实现了 -41.46 dB 的最小反射损耗[25]。

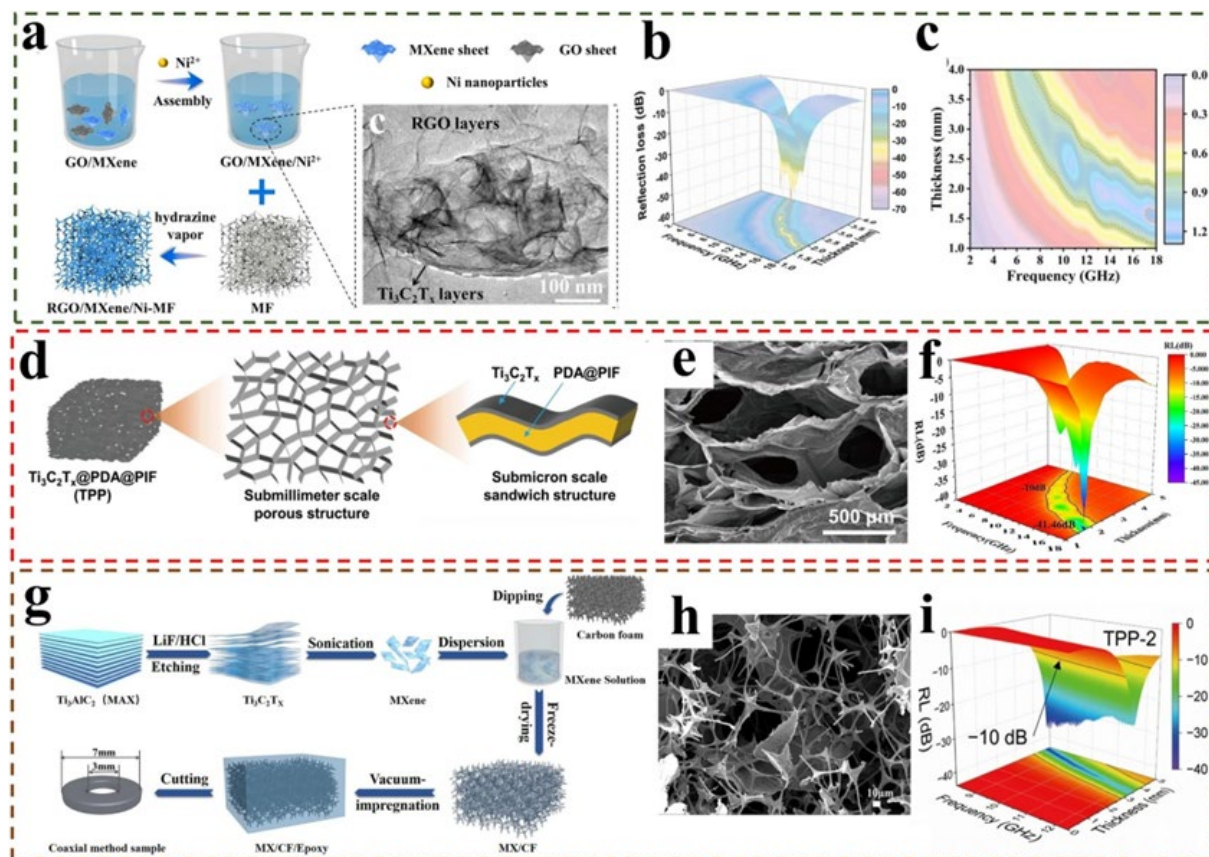


Figure 6. (a)~(c) Schematic illustration of the synthesis of RGO/MXene/Ni-MF, and 3D and 2D reflection loss plots [23]; (d)~(f) Schematic illustration of the preparation process of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@\text{PDA}@\text{PIF}$, SEM images, and 3D reflection loss [24]; (g)~(i) Schematic illustration of the preparation process, SEM images, and 3D reflection loss plot of MX/CF/epoxy foam [25]

图 6. (a)~(c) RGO/MXene/Ni-MF 合成示意图, 三维、二维反射损耗图[23]; (d)~(f) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@\text{PDA}@\text{PIF}$ 制备流程示意图, 扫描电子显微镜图像与三维反射损耗[24]; (g)~(i) MX/CF/环氧泡沫的制备流程示意图、SEM 图像及三维反射损耗图[25]

4. 结论

本文系统综述了 MXene 基电磁波吸收材料的结构特征、损耗机理及近年来的研究进展,着重探讨了通过组分复合与结构设计实现高效吸波性能的有效策略。研究表明,纯 MXene 虽凭借其二维层状结构、高导电性及丰富的表面官能团展现出优异的介电损耗潜力,但其阻抗匹配特性较差,单一损耗机制难以实现宽频高效吸收。通过引入磁性组分(如 Fe_3O_4 、 CoFe_2O_4 等铁氧体及 Co、Ni 等磁性金属)构建多元异质结构,可协同引入磁损耗机制并优化阻抗匹配,是突破纯 MXene 吸波性能瓶颈的关键路径。同时,以三聚氰胺泡沫、聚酰亚胺泡沫及碳泡沫等轻质骨架构筑三维多孔 MXene 基复合材料,可通过多尺度界面极化、传导损耗及电磁波多重散射的协同作用,在较低填料含量下实现宽频强衰减特性。通过系统分析发现,具有三维网络骨架的 MXene 轻质复合材料不仅展现出优异的电磁波衰减能力($\text{RL}_{\min}$ 可达 -61.3 dB, EAB 拓宽至 7.04 GHz),同时满足薄层化、宽频带及低密度的工程应用需求。本文通过整合材料组分优化

- 异质界面构筑 - 多级结构设计的构效关系, 为新型 MXene 基吸波材料的开发提供了理论支撑与技术路线参考, 对推动轻质高效电磁吸波材料的发展具有重要指导意义。

尽管 MXene 基吸波材料已取得长足进展, 但在实际应用中仍面临诸多挑战。首先, 材料在湿热、氧化等环境中的稳定性亟待提升, 未来可通过表面封装或核壳结构设计, 在保持电磁性能的同时增强环境耐受性。其次, 当前研究多聚焦于单一吸波功能, 而实际应用常要求材料兼具导热、传感、隐身或储能等多重特性, 通过构建多相异质结构或引入动态响应单元, 有望实现智能化与自适应功能的集成。此外, 规模化制备的工艺可控性与成本效益亦是制约产业化的关键, 开发绿色、低能耗的合成路线, 实现结构与性能的精准调控, 将成为后续研究的重点。最后, 复杂电磁环境下的频率选择性响应与兼容性也需进一步关注, 可借助超结构设计或电路模拟优化频带特性, 以满足不同应用场景的防护需求。

基金项目

南京理工大学大学生创新创业训练计划立项资助, 项目编号为: 202510288110X。

参考文献

- [1] Elmahaishi, M.F., Azis, R.S., Ismail, I. and Muhammad, F.D. (2022) A Review on Electromagnetic Microwave Absorption Properties: Their Materials and Performance. *Journal of Materials Research and Technology*, **20**, 2188-2220. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.140>
- [2] Fang, G., Liu, C., Xu, G., Xiao, A., Peng, K., Zhang, Y., *et al.* (2019) Enhanced Microwave Absorption Properties of Zr⁴⁺-Doped Fe₃O₄ for Coordinated Impedance Matching and Attenuation Performances. *Journal of Alloys and Compounds*, **790**, 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.159>
- [3] 孙嘉豪. SiO₂ 包覆碳纤维的介电调控及其宽频电磁波吸收性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [4] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., *et al.* (2011) Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti₃AlC₂. *Advanced Materials*, **23**, 4248-4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>
- [5] Naguib, M., Mochalin, V.N., Barsoum, M.W. and Gogotsi, Y. (2014) 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials. *Advanced Materials*, **26**, 992-1005. <https://doi.org/10.1002/adma.201304138>
- [6] Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., *et al.* (2012) Two-Dimensional Transition Metal Carbides. *ACS Nano*, **6**, 1322-1331. <https://doi.org/10.1021/nn204153h>
- [7] Xiang, G., Chen, M., Ni, Z., Shen, Y. and Xu, L. (2021) Synthesis of a Hollow-Structured Flower-Like Fe₃O₄@MoS₂ Composite and Its Microwave-Absorption Properties. *RSC Advances*, **11**, 20180-20190. <https://doi.org/10.1039/d1ra02095a>
- [8] Xiong, D., Li, X., Bai, Z. and Lu, S. (2018) Recent Advances in Layered Ti₃C₂T_x MXene for Electrochemical Energy Storage. *Small*, **14**, Article ID: 1703419. <https://doi.org/10.1002/sml.201703419>
- [9] Wyatt, B.C., Rosenkranz, A. and Anasori, B. (2021) 2D MXenes: Tunable Mechanical and Tribological Properties. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2007973. <https://doi.org/10.1002/adma.202007973>
- [10] Karahan, H.E., Goh, K., Zhang, C., Yang, E., Yildirim, C., Chuah, C.Y., *et al.* (2020) MXene Materials for Designing Advanced Separation Membranes. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1906697. <https://doi.org/10.1002/adma.201906697>
- [11] Iqbal, A., Sambyal, P. and Koo, C.M. (2020) 2D MXenes for Electromagnetic Shielding: A Review. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article ID: 2000883. <https://doi.org/10.1002/adfm.202000883>
- [12] Tsounis, C., Kumar, P.V., Masood, H., Kulkarni, R.P., Gautam, G.S., Müller, C.R., *et al.* (2022) Advancing MXene Electrocatalysts for Energy Conversion Reactions: Surface, Stoichiometry, and Stability. *Angewandte Chemie International Edition*, **62**, e202210828. <https://doi.org/10.1002/anie.202210828>
- [13] Li, X., You, W., Xu, C., Wang, L., Yang, L., Li, Y., *et al.* (2021) 3D Seed-Germination-Like MXene with in Situ Growing CNTs/Ni Heterojunction for Enhanced Microwave Absorption via Polarization and Magnetization. *Nano-Micro Letters*, **13**, Article No. 157. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00680-w>
- [14] Abdolhosseinzadeh, S., Jiang, X., Zhang, H., Qiu, J. and Zhang, C. (2021) Perspectives on Solution Processing of Two-Dimensional MXenes. *Materials Today*, **48**, 214-240. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.010>
- [15] 徐慧宁, 黎杰, 崔志刚, 等. MXene 材料在交通领域的应用进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(12): 141-155.

- [16] Swapnalin, J., Koneru, B., Banerjee, P., Natarajan, S. and Franco, A. (2022) Multilayer Intercalation: MXene/Cobalt Ferrite Electromagnetic Wave Absorbing Two-Dimensional Materials. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **168**, Article ID: 110797. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110797>
- [17] Zhang, X., Wang, H., Hu, R., Huang, C., Zhong, W., Pan, L., *et al.* (2019) Novel Solvothermal Preparation and Enhanced Microwave Absorption Properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Modified by in Situ Coated Fe_3O_4 Nanoparticles. *Applied Surface Science*, **484**, 383-391. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.264>
- [18] Liu, P., Yao, Z., Ng, V.M.H., Zhou, J., Kong, L.B. and Yue, K. (2018) Facile Synthesis of Ultrasmall Fe_3O_4 Nanoparticles on MXenes for High Microwave Absorption Performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **115**, 371-382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.10.014>
- [19] He, J., Liu, S., Deng, L., Shan, D., Cao, C., Luo, H., *et al.* (2020) Tunable Electromagnetic and Enhanced Microwave Absorption Properties in CoFe_2O_4 Decorated Ti_3C_2 MXene Composites. *Applied Surface Science*, **504**, Article ID: 144210. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144210>
- [20] Pan, F., Yu, L., Xiang, Z., Liu, Z., Deng, B., Cui, E., *et al.* (2021) Improved Synergistic Effect for Achieving Ultrathin Microwave Absorber of 1D Co Nanochains/2D Carbide MXene Nanocomposite. *Carbon*, **172**, 506-515. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.10.039>
- [21] Wen, C., Li, X., Zhang, R., Xu, C., You, W., Liu, Z., *et al.* (2022) High-Density Anisotropy Magnetism Enhanced Microwave Absorption Performance in $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@Ni Microspheres. *ACS Nano*, **16**, 1150-1159. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08957>
- [22] Cui, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Liu, P., Ahmad, M., Zhang, Q., *et al.* (2021) Wrinkled Three-Dimensional Porous MXene/Ni Composite Microspheres for Efficient Broadband Microwave Absorption. *Carbon*, **181**, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.05.022>
- [23] Cheng, H., Pan, Y., Li, W., Liu, C., Shen, C., Liu, X., *et al.* (2023) Facile Design of Multifunctional Melamine Foam with Ni-Anchored Reduced Graphene Oxide/MXene as Highly Efficient Microwave Absorber. *Nano Today*, **52**, Article ID: 101958. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.101958>
- [24] Zhang, Y., Han, M., Hu, R., Zhang, P., Pan, L. and Sun, Z. (2024) Sandwiched MXene/Polyimide Composite Foams for Multiscale Microwave Absorption. *Science China Materials*, **67**, 272-278. <https://doi.org/10.1007/s40843-023-2682-3>
- [25] Sun, T., Liu, Z., Li, S., Liu, H., Chen, F., Wang, K., *et al.* (2021) Effective Improvement on Microwave Absorbing Performance of Epoxy Resin-Based Composites with 3D MXene Foam Prepared by One-Step Impregnation Method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **150**, Article ID: 106594. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106594>