复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

MXene及其复合吸波材料组成与结构的研究进展

朱莉莉 康帅 胡祖明 于俊荣 王彦

Research progress in composition and structure of MXene and its composite wave absorbing materials

ZHU Lili, KANG Shuai, HU Zuming, YU Junrong, WANG Yan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

吸波超材料研究进展
Research progress in metamaterial absorber
复合材料学报. 2021, 38(1): 25–35 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004

铁氧体及其复合吸波材料的研究进展
Research progress of ferrite and its composite absorbing materials
复合材料学报. 2020, 37(11): 2684–2699 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200727.002

石墨烯/酞菁铁复合材料的制备与吸波性能
Preparation and wave absorption properties of graphene/iron phthalocyanine composites
复合材料学报. 2019, 36(1): 39–50 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180524.002

新型碳基磁性复合吸波材料的研究进展
Research progress of new carbon based magnetic composite electromagnetic waveabsorbing materials
复合材料学报. 2020, 37(12): 3004–3016 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.002

空心粉煤灰对铁氧体–炭黑/水泥基复合材料吸波性能的影响
Effects of hollow fly ash on microwave absorbing properties of ferrite–carbon black/cement based composites
复合材料学报. 2017, 34(6): 1381–1387 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170121.002

钩针工艺之于活性碳纤维/环氧树脂电路屏吸波复合材料的设计
Crochet process in design of activated carbon fibers/epoxy circuit screen composites with high microwave absorbing
复合材料学报. 2017, 34(1): 47–52 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160322.006

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 40 卷 第 6 期 6 月 2023 年
Vol. 40 No. 6 Jun 2023

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.002

MXene 及其复合吸波材料组成与结构的研究进展

分享本文

朱莉莉，康帅，胡祖明*，于俊荣，王彦
（东华大学 纤维材料改性国家重点实验室，上海 201620）

摘 要：电子设备的日益普及加剧了电磁波污染问题，开发电磁波吸收材料不仅能够保护人体和精密设备免受电磁波干扰，也能减少电磁波的二次污染，无论民用还是军事上都有巨大研究意义。MXene 是一种新型的具有类石墨烯结构的二维纳米片层材料，具有较大的横纵比、可调节的导电性和丰富的官能团，可用于研究高性能电磁波吸收材料。本文综述了 MXene 的化学组成及其在吸波领域的研究进展，详细介绍了吸波材料的损耗机制，并分别从微观结构和宏观形态对 MXene 基复合吸波材料进行了归纳和分析，最后在损耗机制、结构和多功能等方面对 MXene 及其复合吸波材料的未来发展方向进行了展望。

关键词：MXene；吸波；复合材料；损耗机制；吸波性能

中图分类号：TB34；TB332 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2023)06-3167-20

Research progress in composition and structure of MXene and its composite wave absorbing materials

ZHU Lili , KANG Shuai , HU Zuming* , YU Junrong , WANG Yan
(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The increasing popularity of electronic devices has aggravated the problem of electromagnetic wave pollution, and the development of electromagnetic wave absorbing materials can not only protect the human body and precision equipment from electromagnetic wave interference, but also reduce the secondary pollution of electromagnetic waves, which has great research significance in both civil and military applications. MXene is a novel two-dimensional nanosheet material with graphene-like structure, which has a large aspect ratio, adjustable conductivity and abundant functional groups, and can be used to study high-performance electromagnetic wave absorbing materials. This paper reviews the chemical composition of MXene and its research progress in the field of wave absorption, introduces the loss mechanism of absorbing materials in detail, and summarizes and analyzes MXene-based composite absorbing materials from microstructure and macroscopic morphology respectively, and finally gives an outlook on the future development direction of MXene and its composite absorbing materials in terms of loss mechanism, structure and multifunction.

Keywords: MXene; wave absorption; composite materials; loss mechanism; wave absorption performance

随着科技和人们生活水平的不断提高，电子设备日益普及，使得电磁波在通讯、遥感、空间探测和国防等方面得到了广泛的应用，给生活带来了极大的便利。但是电磁波在产生、传递和接受过程中会产生大量的电磁波辐射，严重危害到人类的身体健康并干扰电子设备的正常运行。电

收稿日期：2022-08-16; **修回日期**：2022-09-13；**录用日期**：2022-10-11；**网络首发时间**：2022-10-14 15:10:35
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.002
基金项目：国家重点研发计划 (2021 YFB3700101)
Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021 YFB3700101)
通信作者：胡祖明，博士，教授，博士生导师，研究方向为高分子材料成型工艺及理论、复合材料 E-mail: hzm@dhu.edu.cn
引用格式：朱莉莉，康帅，胡祖明，等. MXene 及其复合吸波材料组成与结构的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3167-3186.
ZHU Lili, KANG Shuai, HU Zuming, et al. Research progress in composition and structure of MXene and its composite wave absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3167-3186(in Chinese).

磁波吸收材料能保护人体和精密设备免受电磁干扰，同时也能减少电磁波的二次污染，在军事领域中有广泛的应用[1-3]。例如，在武器设备中使用吸波材料，可以有效吸收和衰减进入材料内部的电磁波，并将电磁波的能量以热能的形式耗散达到隐身效果，使敌方的探测设备不易发现或者发现距离缩短[4]。

近年来，对电磁波吸收材料的研究日益增长，根据吸波机制划分，吸波材料主要为介电损耗型、磁损耗型[5]和欧姆损耗型；基于此，越来越多的吸波材料被开发成功。传统的吸波材料有铁氧体[6]、金属氧化物[7]、聚合物[8-9]、石墨烯 (GO)[10]和碳纳米管 (CNTs)[11]等纳米材料，然而，高密度、高成本、低耐腐蚀性、电磁波吸收频率窄等诸多限制因素使材料无法满足在复杂恶劣环境中的需求。此时，一种新型二维材料——过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物，即 MXenes 引起了人们对微波吸收的强烈研究兴趣。MXenes 是一类从 MAX 相中刻蚀掉 A 层制备得到的具有类石墨烯结构的二维纳米片层材料[12]，有较大的纵横比和可调节的导电性能及丰富的官能团，无疑是研究吸波材料的首选。与传统的吸波材料相比，当 GO 和 MXenes 作为填充物加载到基体中制备吸收器时，这些特性使它们在较低填充含量时能实现更强的导电损耗和偏振损耗。而在研究过程中，MXenes 展现出不同于 GO 的特殊优势：(1) MXenes 具有数量可控的层状结构，电磁波在片层之间可实现散射和反射，MXenes 的母体是 MAX 相，一种极具坚韧性的层状导电陶瓷。刻蚀掉 A 层之后，MXenes 表现为由二维片层严格叠层排布的三维类手风琴颗粒。独特的局域化三维个体中排布着超过 1 nm 的真空层间距，可作为多种载流子存储空间，或者活性物质承载位点；(2) MXenes 材料具有高导电性，使其在构建导电网络和产生导电损失方面的效率大于 GO；(3) 刻蚀后产生丰富的表面官能团会引起偶极极化和界面极化等，进而产生更大的极化损耗[13]；其轻质和高导电的介电性能满足新型吸波材料“薄、轻、宽、强”的发展要求，这意味着 MXenes 作为一种新型吸波材料能取代 GO，用于更有效的电磁保护。但对于 MXene 材料而言，低成本、无公害、规模化的稳定制备仍是其广泛应用的基础，相对于石墨烯的大批量制备而言，MXene 目前仍依赖于有害的酸碱刻蚀剂，且成本较高，此外，MXene 在常温常压下极易氧化，导致物象和结构发生破坏，电导率甚至会下降好几个数量级，这种自发的降解在少层的 MXene 粉体或溶液中表现的尤为明显，因此，距离工业化的愿景还存在一定距离。

本文综述了国内外 MXene 及其复合材料在电磁波吸收领域的研究进展，并详细介绍了吸波材料的损耗机制，列举了常见的 MXene 基复合吸波材料的化学组成，主要有 MXene/羰基吸波材料、MXene/磁性纳米粒子吸波材料、MXene/导电聚合物等；并分别从微观结构和宏观形态对 MXene 基复合吸波材料进行了分类，微观结构主要有核壳、多孔和类三明治结构，宏观形态主要分为：MXene 基复合膜、MXene 基气凝胶、MXene 基泡沫及 MXene 基纤维织物等；最后，对目前 MXene 及其复合吸波材料发展中存在的不足进行讨论分析，并对未来的发展方向进行了展望。

1 MXene 材料

1.1 MXene 的化学组成

Naguib 等[14]现了一种新型的纳米材料 MXene，其中 MAX 是一类具有极好延展性的密排六方层状过渡金属碳化物和氮化物结构，可用 $M_{n+1}AX_n$ 表示其化学成分组成，其中 n=1、2 或 3，“M”代表早期过渡金属元素，“A”代表 IIIA~IVA 族元素，“X”代表氮或碳元素。每一层 X 原子都与过渡金属元素 M 紧密结合在一起，每两层 $M_{n+1}X_n$ 之间夹着一层 A 原子，且 M—A 之间的作用力比 M—X之间作用力弱，可以通过氢氟酸 (HF)[15-17](刻蚀机制及形貌变化如图 1 所示)、含氟刻蚀剂[18-21]或加热 (熔盐刻蚀[22]) 等方法去除 A 原子，获得具有特殊表面积的 $M_{n+1}X_nT_x$，其中 T_x 是指表面官能团(如—F、—O 或—OH 等)，为了更直观地表达材料的来源和类石墨烯片层结构，将其命名为 MXene。基于各种过渡金属及其合金与 C 和 N 元素的结合，MXene 家族已存在多种类型的材料，如 $Ti_3C_2T_x$[23]、Ti_2CT_x[24]、$Ti_4N_3T_x$[22]、Nb_2CT_x[25]等，其中研究最广泛的就是 Ti_3AlC_2。从组成上看，根据“M”的不同，部分不含任何表面官能团的 MXene(如 $Ti_{n+1}N_n$ 和 $Ti_{n+1}C_n$ 型) 可具有一定程度的磁性。MXene 纳米片层优异的电导率能引起极强的电磁损耗能力，使其能广泛应用于电磁屏蔽[25]和吸波材料等领域。此外，MXenes 材料因其极高丰富度、可定制性和独特的物理化

学性质及层状微结构而引起了包括电化学、催化、传感、能量富集及生物医学等领域的广泛关注。尤其是在储能领域，MXenes 已经成为继石墨烯家族之后最受欢迎的二维电极候选者。MXenes 在电池和超级电容器开发中展现出了丰富的功能，包括双层和氧化还原型离子存储、离子输运调节、空间位阻、离子重分布、电催化剂、电沉积基底等。因此，这类材料已被用于提高电极、电解质和隔膜的稳定性和性能等方面。

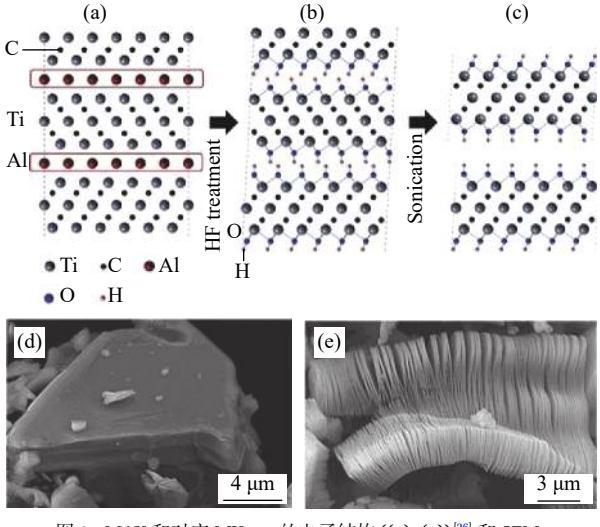


图 1 MAX 和对应 MXene 的电子结构 ((a)~(c))[26] 和 SEM 图像 ((d), (e))[14]

Fig. 1 Electronic structure ((a)-(c))[26]and SEM images ((d), (e))[14]of MAX phase and the corresponding MXene

1.2 MXene 的性能特点

由 HF 刻蚀后的的 MXene 表面会产生 —F、—O、—OH 等端基，值得注意的是，这些“M”和“X”元素的比例及表面端基的存在能够调节 MXene 的性质，使其具有从金属到半导体的性质，同时也为表面修饰提供了位点。

1.2.1 电子特性

MXene 的导电性取决于其组成[12]，其中，表面端基中 —F、—OH 对 MXene 的电子特性表现出相似的影响，主要是由于它们可以接受平衡状态下的单个电子，而 —O 端基则可以接受两个电子，因此，MXene 的电子特性会随着合成方法及表面修饰程度不同而不同。许多理论计算已经证明纯 MXene 具有金属特性，在费米能级附近有大量的电子，例如，Ti_2CO_2 是一种半导体，当含有一些原子序数较高的重金属铬或钨的时候，则被检测到是绝缘体[27-30]。此外，研究较多的 $Ti_3C_2T_x$ 薄片是半导体，其薄片的厚度不同也会导致电阻率和透射率的不同[29]，而其电阻率又会随着温度的降低而增大[30]。因此，在制备过程中应适当注意其温度的影响。

1.2.2 力学性能

MXene 的力学性能受到了“M”种类的影响，例如，MoC_2 进行双轴拉伸时弹性模量能达到 312 GPa，临界应变达到了 0.086，理想强度可达到 20.8 GPa，显示出优异的机械稳定性[31]。值得注意的是， MXene 的固有拉伸-应力特性也可通过表面改性来调节，一般来说，保持 MXene 弹性和强度的关键因素是片层之间的相互作用，这与片层之间的距离成反比[32]。例如，当表面末端为 —OH 时，彼此之间能形成氢键，片层之间的距离要小于末端为 —O、—F 的层间距离，从而产生更多的弹性模量[33]。此外，MXene 薄膜能承受自身重量的 4 000 倍的重量，当和其他材料复合时能够进一步提高其拉伸强度，进而改善材料的力学性能。

1.2.3 稳定性

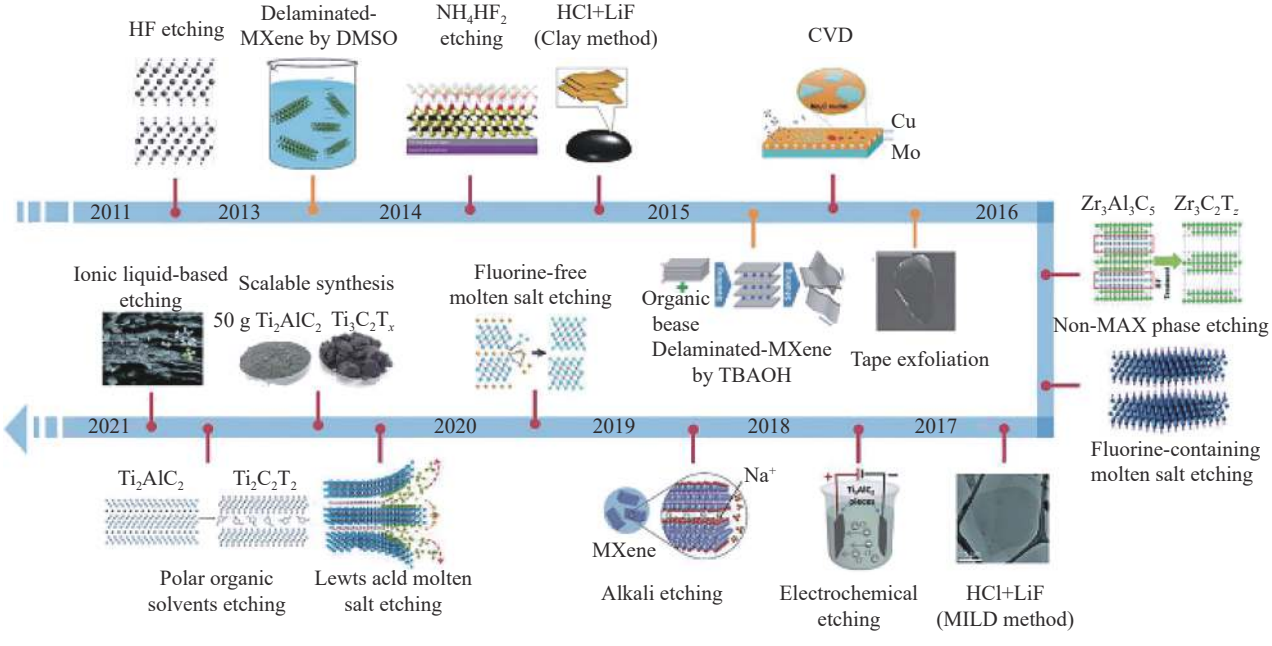
主要包括材料的热稳定性和溶液稳定性，研究表明，MXene 在无氧溶剂中或者干燥的空气中都相对稳定，但容易与氧和水发生反应而被氧化，特别是在光照条件下[34]，氧化一般从边缘开始，易形成金属氧化物纳米晶体 (二氧化钛)，然后在整个表面生长[35-38]。因此，MXene 的保存一般都是在黑暗或者无氧的环境中冷藏。值得注意的是，在存储或后处理过程中，MXene 表面末端会发生变化，例如，—F 基团会由于冲洗或者存储在水中而被羟基取代，相比之下，—O、—OH 的稳定性更好[39]，这些末端的存在提高了材料的吸附能力。因此，MXene 的性能可以通过表面处理、原子掺杂、阳离子或有机分子插层等处理方式，进而改变 MXene 的性能。

除了以上特性以外，二维 MXene 材料还具有优异吸附性、铁磁性、抗菌活性、热电性能、光热转化及电磁波屏蔽及吸收特性，广泛应用在水净化、光和电催化剂、生物传感器、光热治疗及电磁波屏蔽等各个领域。

1.3 MXene 吸波材料的研究现状

MXenes 吸波材料有其独特的化学组成和结构，可以通过制备方法的选择和工艺条件的控制，实现对材料微观结构的设计，从而拓宽电磁波的有效吸收宽度、增强吸收强度、降低材料表观密度，达到拓宽材料多功能一体化的目的，有望制备出

满足“薄、轻、宽、强”的高性能吸波材料。MXenes 的制备方法有很多，图 2 总结了近十年来 MXenes 制备技术的发展历程，其中 LiF、HCl 是最广泛用于合成高质量 MXene 的原位刻蚀剂之一[40]。Ghidiu 等[17] 利用 LiF 和 HCl 的混合溶液在 40℃ 下对 Ti_3AlC_2 进行刻蚀并成功制备了 $Ti_3C_2T_x$ MXene，经过插层处理和超声分散获得了高质量的 $Ti_3C_2T_x$ 单层纳米片，结果表明：与直接使用浓缩的 HF 溶液相比，温和的分层条件可以通过类似的反应刻蚀 A 原子并且危险较小，所获得的薄片有更大的横向尺寸且纳米尺寸缺陷可忽略不计。Zhou 等[41] 利用原位生成 HF 的方法对 MAX 相刻蚀，并通过乙醇超声分离制备了单片层 $Ti_3C_2T_x$ MXene。结果表明：在 6.5 GHz 处，当单层 $Ti_3C_2T_x$ MXene 填充量为 22wt% 时，材料的最大吸收可达到−43.5 dB，且厚度为 1.8 mm 时的有效吸收带宽 EAB(反射损耗 RL<−10 dB) 值为 6.88 GHz，这优于多层 $Ti_3C_2T_x$ MXene 材料，且低填料含量时以介电损耗为主，高填料含量时为导电损耗为主，表现出较强的吸收能力；这主要是由于单层 MXene 具有较大的比表面积，可以提供足够的界面极化和片层之间的反射路径；同时，材料表面结合的大量原子也可以和微波发生无阻抗的相互作用，增加电磁波的衰减。



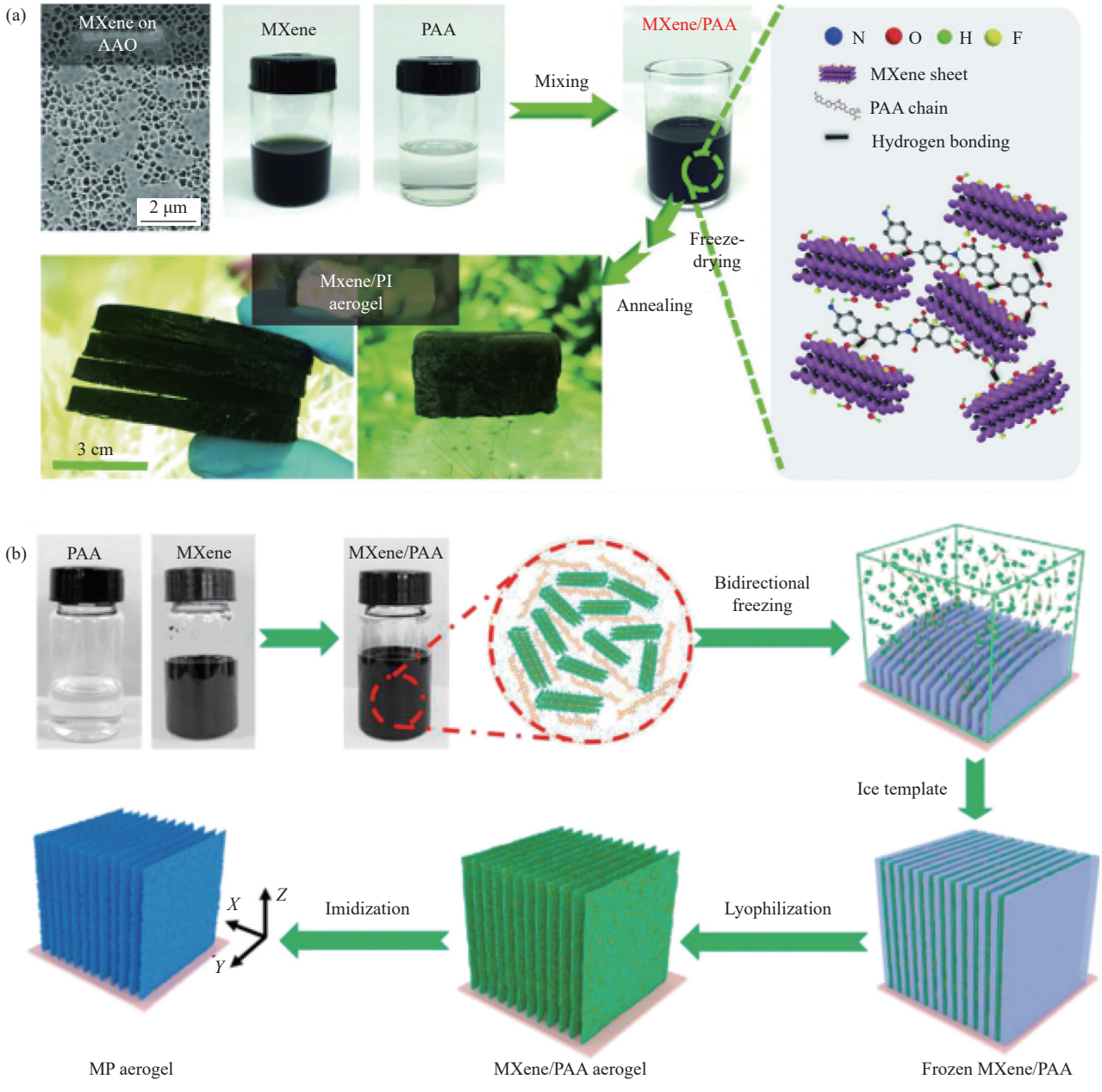
TBAOH—Tetrabutylammonium hydroxide; MILD—Minimal invasive lithography and etching of nanoscale devices; CVD—Chemical vapor deposition; DMSO—Dimethyl sulfoxide

图 2　2011~2021 年 MXene 的制备方法时间线[40]

Fig. 2　Timeline of MXene: A journey from 2011 to 2021[40]

与其他二维材料类似，MXenes 材料自身性能会受到聚集和堆积的影响，且填充量较低时材料的表面性能较差，其自组装能力难以形成坚硬的 3D 多孔结构。为解决上述问题，近年来，对 MXenes 吸波材料的研究从二维结构逐渐向三维结构拓展，Liu 等[42] 引入聚酰亚胺 (PI) 对 MXene 片层界面增强，制备了具有多功能、超导电和轻质特性的 3D MXene 结构 (如图 3(a) 所示)，使其在 9.59 GHz 处的最小 RL 为−45.4 dB，且材料厚度为 2 mm 时，有效吸收带宽 (RL < −10 dB) 为 5.1 GHz，这主要是由于 PI 大分子使 MXene 片层间紧密连接，赋予其结构显著的可逆压缩性和可拉伸性，并使材料表现出优异的抗疲劳性、高导电性、隔热性及热稳定性，实现“薄、轻、宽、强”发展要求的同时，实现了材料多功能方向的发展。Dai 等[43] 在此基础上利用双向冷冻技术构建了各向异性的层状多孔 MXene/PI 气凝胶结构 (如图 3(b) 所示)，由于产生了双向温度梯度且气凝胶结构能有效地传递载荷，使该材料不仅具有稳定可重复的阻力响应，还具有可识别的方向压力敏感性，更重要的是，当厚度为 1.91 mm 时，有效吸收带宽达到 6.5 GHz，几乎覆盖了广播和军用雷达整个 X 波段。

尽管 MXenes 材料的研究取得了新的进展，



AAO—Anodic aluminum oxide; PAA—Polyacrylic acid; MP—MXene/PAA

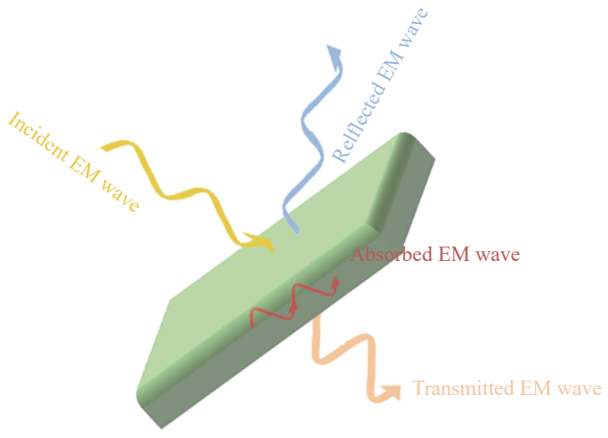
图 3 (a) MXene/聚酰亚胺 (PI) 气凝胶制备示意图[42]；(b) MXene/PI 气凝胶双向冷冻干燥示意图[43]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of MXene/polyimide (PI) aerogel preparation[42]; (b) Schematic diagram of bi-directional freeze drying of MXene/PI aerogel[43]

但其自身的高导电性会产生界面反射高和阻抗匹配差等缺陷，同时，纯 MXenes 材料存在韧性低、易堆积、在含氧气氛中稳定性差等缺陷，使其表面能降低，电子和离子传输减缓，限制了在原始环境中的进一步发展[44]，进而无法满足实际需求；针对以上问题可以提供 3 种解决思路：(1) 改善 MXene 的制备工艺并对其表面进行处理，精准控制 MXene 表面基团和缺陷成度；(2) 可以通过组分调控和结构设计相结合，将 MXene 与低介电损耗材料复合，制备吸波性能优异的吸波器，从而改善阻抗匹配特性并提高电磁波衰减能力；(3) 通过热处理工艺制备 MXene 基衍生物来实现更好的吸波性能。

2 电磁波损耗机制

电磁波入射到材料表面时会有 3 种情况产生，如图 4 所示，一部分电磁波刚接触到材料表面后就会发生反射，一部分可以直接透过材料，还有



EM—Electromagnetism

图 4　电磁波吸收机制示意图

Fig. 4　Schematic diagram of electromagnetic wave absorption mechanism

一部分进入材料内部后在结构和组分的作用下经过多次反射和折射而散失[45]，研究表明，良好的电磁波吸收器应具有较好的阻抗匹配性能和优异的电磁波衰减性能，使更多的电磁波能够进入到材料内部进行衰减，从而减少电磁波的污染。研究阻抗匹配机制下的电磁波衰减能力是目前研究员所关注的热点，电磁波的损耗机制可分为介电损耗、磁损耗和欧姆损耗，大多数情况下，材料的吸波性能是多重损耗机制共同作用的结果。

2.1　介电损耗

研究过程中发现，介电损耗主要是由界面极化、偶极子极化、缺陷诱导极化和导电损耗 4 种机制引起的，相应的损耗机制如图 5 所示。在实验中可通过调节界面大小、缺陷和偶极子的浓度及电导率来调节相应极化强度，增强对电磁波的损耗。

界面极化又叫做麦克斯韦-瓦格纳 (Maxwell-Wagner) 极化效应[46]，是指均质或异质界面处，组分极性和电导率的不同会导致在外场作用下，电子在界面处发生聚集。目前的研究中主要有两种界面极化形式，一种是均质 (A/A 或 B/B 组分)

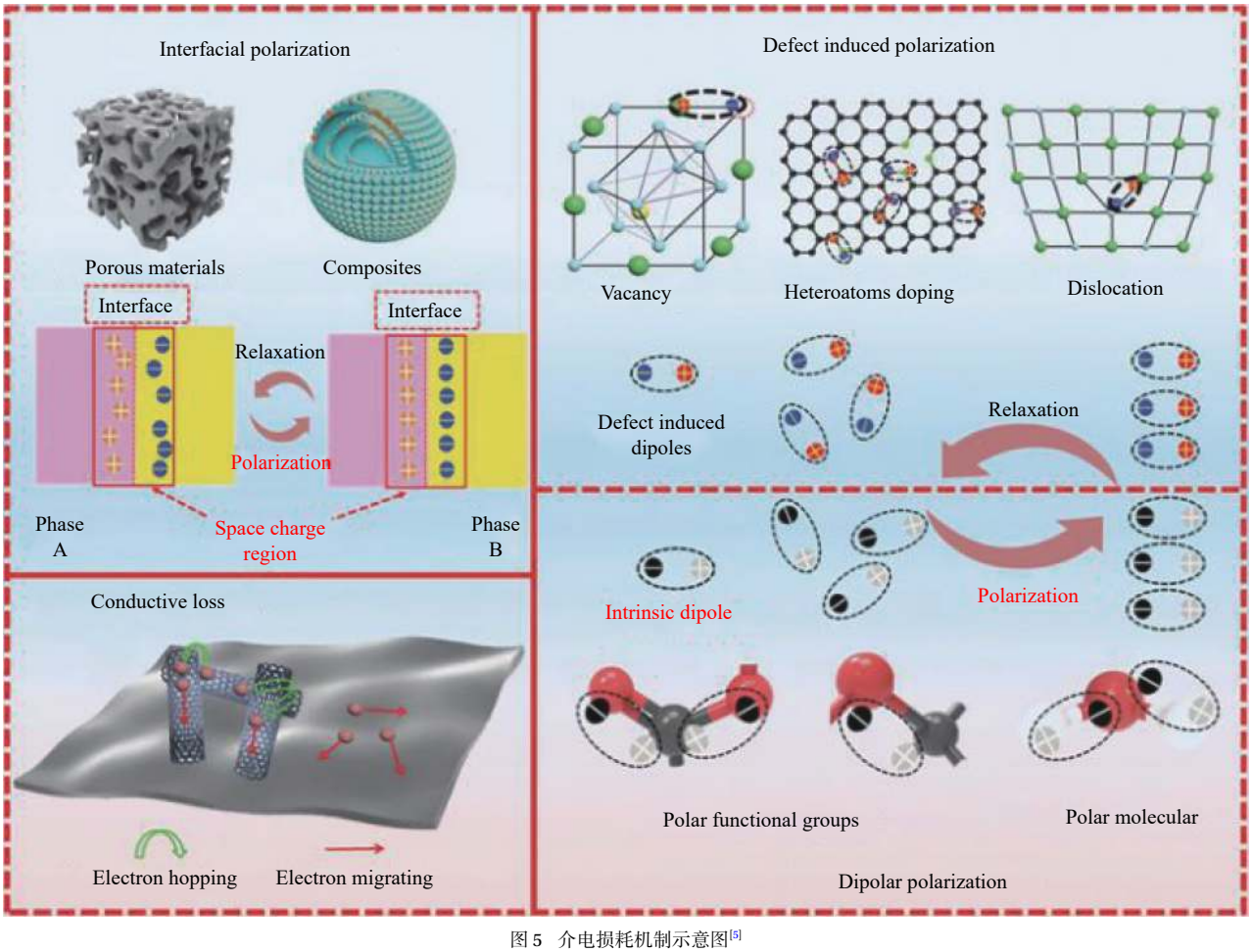


图 5　介电损耗机制示意图[5]

Fig. 5　Schematic illustrations to dielectric loss mechanisms[5]

或异质界面 (A/B 组分) 引起的极化，对于多组分的复合材料来说，异质界面能引起更强的界面极化；另一种是多孔或中空材料与其中的空气介质引起的界面极化，多孔的结构设计不仅能够制备轻质的吸收器，改善阻抗匹配特性，还能增大吸收材料与空气的接触面积，产生更多的界面极化从而增强对电磁波的吸收[47]。

偶极极化是指固有偶极子在电场的作用下发生重排产生的极化，尤其是极性分子或极性官能团作为偶极子时，在电磁场发生变化时会产生偶极极化和弛豫过程，进而消耗电磁波能量。但吸波器在高温煅烧过程中，一些极性分子如水分子会被消除，因此，极性官能团起着关键性的作用。例如，碳纤维、碳纳米管、MXene[48-49] 及石墨烯[50-51] 等碳质材料中的官能团能产生强烈的偶极极化，因此，可以在实验过程中接枝极性官能团来增强偶极极化，进而增大对电磁波的衰减能力。

通常情况下，材料的缺陷有点缺陷、一维缺陷、平面缺陷，这些缺陷部位能够捕获载流子，使电荷平衡受到破坏，产生与偶极极化作用类似的缺陷诱导极化，造成电磁波的损耗[52-54]。点缺陷中研究较多的是氧空位和杂原子掺杂，含氧的材料中普遍存在空位，这些空位就能捕获载流子，引起极化效应，一般情况下，可以通过热处理、还原处理或阳离子掺杂等方式调节氧空位的浓度，进而增强极化[55-67]。对于杂原子掺杂方面，研究较多的有 F、N、P、B 等杂原子，这些原子的掺杂能引入氧空位进而增大电磁波的极化损失。例如 Shao 等[58] 通过电弧放电的方法制备了 N 原子掺杂的石墨涂层钴纳米颗粒，有效地优化了阻抗匹配和由介电损耗和磁损耗引起的自然损耗。

电磁波在传播的时候能够产生传导电流，电流传播时受到电阻的作用会产生焦耳热，进而引起电磁波的耗散，这种损耗叫做导电损耗。导电损耗一般存在于高导电材料当中，如石墨烯、碳纤维、碳纳米管等碳材料和聚吡咯、聚苯胺[59] 等高导电聚合物，但是过高的电导率往往会引起阻抗不匹配的现象，所以高导电材料一般要和其他材料进行复合，优化阻抗匹配的同时，增大电磁波的损耗。导电损耗一般和电导率有关，因此，可以增加高导电组分的填充比或者设计三维导电网络，促进电子的跳跃过程[60]。

2.2 磁损耗

磁损耗是指磁性组分在磁化或反磁化过程中，外界对其做的功中部分以热能的形式散失，从而达到对电磁波的耗散的效果[61]。磁损耗主要存在磁滞损耗、铁磁共振、涡流共振 3 种机制。

磁滞损耗主要是由畴壁内磁矩的不可逆转动引起的磁感应强度随着磁场强度而发生变化的滞后效应，其损耗功率与外加磁场频率有关；涡流损耗主要是当电磁波作用于铁氧体材料时其内部产生焦耳热，造成的能量损耗，理论上，涡流损耗越大越有利于能量的耗散，但过大的涡流损耗使得磁场仅存在于材料表面，电磁波难以进入材料内部，因此，通过降低尺寸或者增大电阻来削弱涡流损耗是十分必要的。

磁损耗型吸波材料的磁导率 > 1，相比于其他两类 (介电损耗型和欧姆损耗型) 吸波材料可以同时具备介电损耗和磁损耗能力，多种吸收机制的协同作用有利于增强电磁波的吸收能力，因此，磁性吸波材料成为研究最为广泛的吸波材料。

目前，关于磁损耗材料研究最多的主要是铁氧体和磁性金属粒子，其中铁氧体一般是指铁族元素与其他一种或多种适当的金属元素共同组成的复合化合物，这类吸波材料不仅具有较好的介电性能，同时又有较强的磁损耗效应，其电导率可达到 10^2~10^8 Ω/m，按照晶体结构类型可将其分为尖晶石型铁氧体、石榴石型铁氧体和六方晶系铁氧体 3 种类型；磁性金属粒子具有高磁导率和一定的温度稳定性，一般分为羰基金属微粉类和蒸发或还原有机醇盐得到的磁性金属微粉类吸波材料[62-65]。研究较多的磁损耗型填料主要有 Fe、Co、Ni、Fe_3O_4、铁镍合金 (FeNi)、$ZnFe_2O_4$ 等，单一组分材料的吸波性能并不能满足“薄、轻、宽、强”的发展要求，往往需要结构的设计及与其他组分复合才能达到优化阻抗匹配，增强电磁波吸收的效果。与介电损耗相比，磁损耗型的材料在高温下保持电荷的能力较弱，损耗效率易受到高温和高密度的影响，相关的机制和模型还存在一些挑战。

2.3 欧姆损耗

当交变电场作用在吸波材料时，材料内部将电磁能转变成热能而产生的损耗叫做欧姆损耗也叫导电损耗[63]。导电损耗很大程度上取决于材料的导电性，传统的导电材料主要有金属、碳纤维、MXene、导电高分子聚合物等，合理的结构设计和较高的电导率能产生多重效应，有利于将大部

分电磁波能量转变成热能的形式耗散。在电磁波辐射下，导电吸波材料的吸收原理是基于材料本身中的电子迁移或者跃迁对电磁波的衰减。图 6 显示空心 ZnFeO@PANI 纳米球能有效提高聚苯胺 (PANI) 的分散性，并产生更多有利于电子传输的导电路径，从而改善导电损耗。其导电损耗机制是电磁波能诱导电动势的产生从而引起电子迁移，在感应电动势的存在下，电子发生方向运动，使电磁波产生欧姆损耗，并将能量转换成热。电子跃迁是温度的函数。电子在高温下被激活并跳过势垒，导致传导损失增加。金属材料通过自由电子的运动形成电流，一部分能量转化为热量，在电阻的存在下损失。为了更大限度地提高电磁波的衰减率，材料应具有良好的导电性和载流子的运动能力。然而，高导电率并不是提高电磁衰减的唯一标准，导电网络的形成是实现整体高电导率的主要前提[66]。

目前吸波材料研究领域对于吸波材料的电磁波损耗机制分析仍停留在损耗机制类型的判断和定性分析中，由于吸波材料成分和结构的多样性，目前仍没有普适性的电磁波损耗机制量化评价公式，尚难以做到对于吸波材料中不同损耗机制对电磁波能量吸收贡献的量化分析。此外，研究人员在揭示传导损耗和极化损耗在电磁能量衰减中的作用时，也设计了基于电磁能量转换机制的原型装置，为电磁能源的利用提供了新的思路[68]。

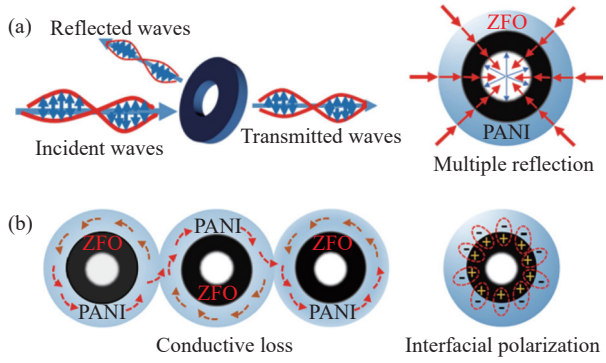


图 6　空心 ZnFeO@聚苯胺 (PANI) 复合材料的吸波机制示意图[65]

Fig. 6　Schematic diagram of possible MA mechanisms for hollow ZnFeO@polyaniline (PANI) composites[65]

2.4　MXene 的吸波机制

MXene 具有良好的电导率、特殊的表面积、丰富的表面官能团和良好的加工及复合性能，使其可以作为电磁波吸收材料。Lipatov 等[69] 的研究表明多片层的 $Ti_3C_2T_x$ 电阻率比单片层的 $Ti_3C_2T_x$ 高一个数量级。MXene 的主要导电机制如图 7 所示，每一层的 MXene 都可以看作是一个导电组件，多片层的 MXene 彼此之间相互堆叠，形成导电网络，电子吸收电磁能之后可以移动到层间或者表面，这些移动的电子在与晶格发生碰撞时会消耗能量。当 MXene 存在缺陷时，部分电子受到电磁

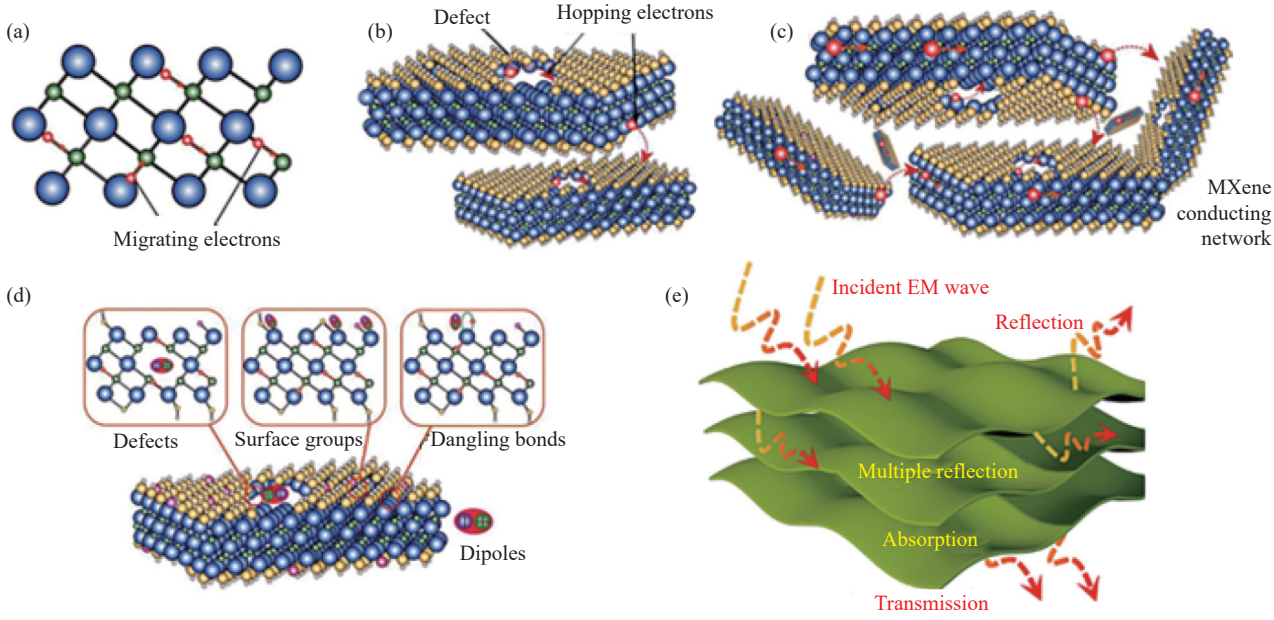


图 7　(a) 在 MXene 的导电碳化物核心中迁移的电子；(b) 缺陷和纳米片层间跳跃电子的传输；(c) MXene 导电网络中电子的传输；(d) MXene 片层上的偶极极化；(e) MXene 的多重反射图[68]

Fig. 7　(a) Migrating electrons in conductive carbide core of MXene; (b) Hopping electron transport in defects and between nanosheets; (c) Electron transport in a MXene conductive network; (d) Dipolar polarizations in MXene conductive network; (e) Multi-refection diagram of MXene[68]

波的激发后能够越过缺陷，实现电子的跳跃，当 MXene 片层间的距离较小时，也可以实现不同片层之间的跳跃。因此，较高的导电性成为 MXene 作为吸波材料的重要因素。

此外，MXene 作为吸波材料最关键的因素在于自身的介电损耗特性。MXene 被刻蚀后会不可避免引入许多表面官能团，一方面这些官能团将引起电荷不对称分布，进而有利于偶极子的构建，形成偶极极化效应，当 MXene 与其他材料复合时，会在界面产生极化效应，并增强电磁波的吸收；另一方面表面官能团含量增加会使电导率下降，但同时产生的缺陷能增加 MXene 中电子跃迁时的能量损失。然而，官能团的引入使 MXene 表现出非磁性，在磁场中其磁导率不会随着磁场频率的变化而发生变化[51,69]。当“M”为 Cr 或 Mn 时，此类 MXene 可表现出磁性，由此可见，恰当的表面处理能够影响材料的磁性能。

3 MXene 基复合吸波材料

迄今为止，MXene 已成功地和多种材料进行复合，如碳纳米管[70]、硫化物[71]、石墨烯[72]、金属 (金属氧化物)[73-75]、纳米球[76] 和聚合物[77] 等材料，这些材料可对应不同的电磁波损耗机制，能有效地调节阻抗匹配和增强电磁波的吸收。此外，通过设计不同的微观结构和宏观形态也可使 MXene 基复合吸波材料的应用更加广泛。

3.1 MXene/碳基吸波材料

碳材料因具有特殊的微观结构、较强的介电性能、密度低、电导率高、化学稳定性好及易与其他材料复合等特点，使其在雷达隐身领域有着较广泛的应用前景。常用的碳基材料主要有石墨烯、碳纳米管、碳纤维等，但纯碳基材料具有较高的介电常数，阻抗匹配较差，电磁波较难进入材料内部进而导致吸波性能较弱；此外，碳基材料还有易聚集，难以在基体中均匀分散等缺点。为了制备高性能复合吸波材料，通常将碳基材料作为载体与其他组分共同调节电磁参数，以达到高性能的吸波效果。Li 等[63] 利用牺牲模板法制备了石墨烯骨架包裹 MXene 球的空心核壳结构，两种介质通过氢键相互连接，优化了阻抗匹配，该结构能有效地降低材料的密度，防止纳米材料聚集的同时也有利于导电网络的形成。更为重要的是，还原氧化石墨烯 (rGO)/$Ti_3C_2T_x$ 泡沫表现出了优于所有报道 的泡沫基同类产品的优异的电磁波吸收性能，其 EAB 可覆盖整个 X 波段。研究人员还发现将具有高介电性能的一维碳纳米管与二维片层的 MXenes 材料相结合是提高电磁波吸收性能的另一种有效途径，例如研究人员用化学气相沉积 (CVD) 工艺成功制备了具有分层夹层结构的 MXene/CNTs 纳米复合材料，MXenes 上原位生长 CNTs 后仍保持多层结构并与之相互连接形成导电网络，不仅为载流子的传播提供更多导电路径，同时也能产生多种极化效应，均有利于电磁波的耗散[78]。与原始 $Ti_3C_2T_x$ 相比，该纳米复合材料表现出更高的吸收强度 (最小反射系数达到 −52.9 dB)，更广泛的吸收带宽 (4.46 GHz)，更低的填料负载 (35wt%) 和更薄的厚度 (仅为 1.55 mm)，为进一步扩展二维 MXene 材料在电磁波吸收领域的应用提供了有效途径。

3.2 MXenes/磁性纳米粒子吸波材料

纳米颗粒是指尺寸不超过 100 nm 的颗粒，目前研究的主要形式有聚合物、金属 (金属氧化物) 颗粒、碳颗粒及陶瓷颗粒等，纳米颗粒不仅具有较高的磁饱和度，还具有耐高温、强耐腐蚀性等特性，使其在吸波材料中具有广泛的应用。一方面具有磁性的纳米颗粒与高介电性能的 MXenes 材料的结合能有效地调节阻抗匹配，使材料具有吸波、透波及偏振等特性；另一方面具有巨大比表面积的纳米颗粒可以在 MXenes 片层上原位生长，增大界面间相互作用的同时还具有协同电磁效应，进一步提高对电磁波的损耗强度，纳米粒子与结构材料的复合是一种极具发展前途的吸波材料。

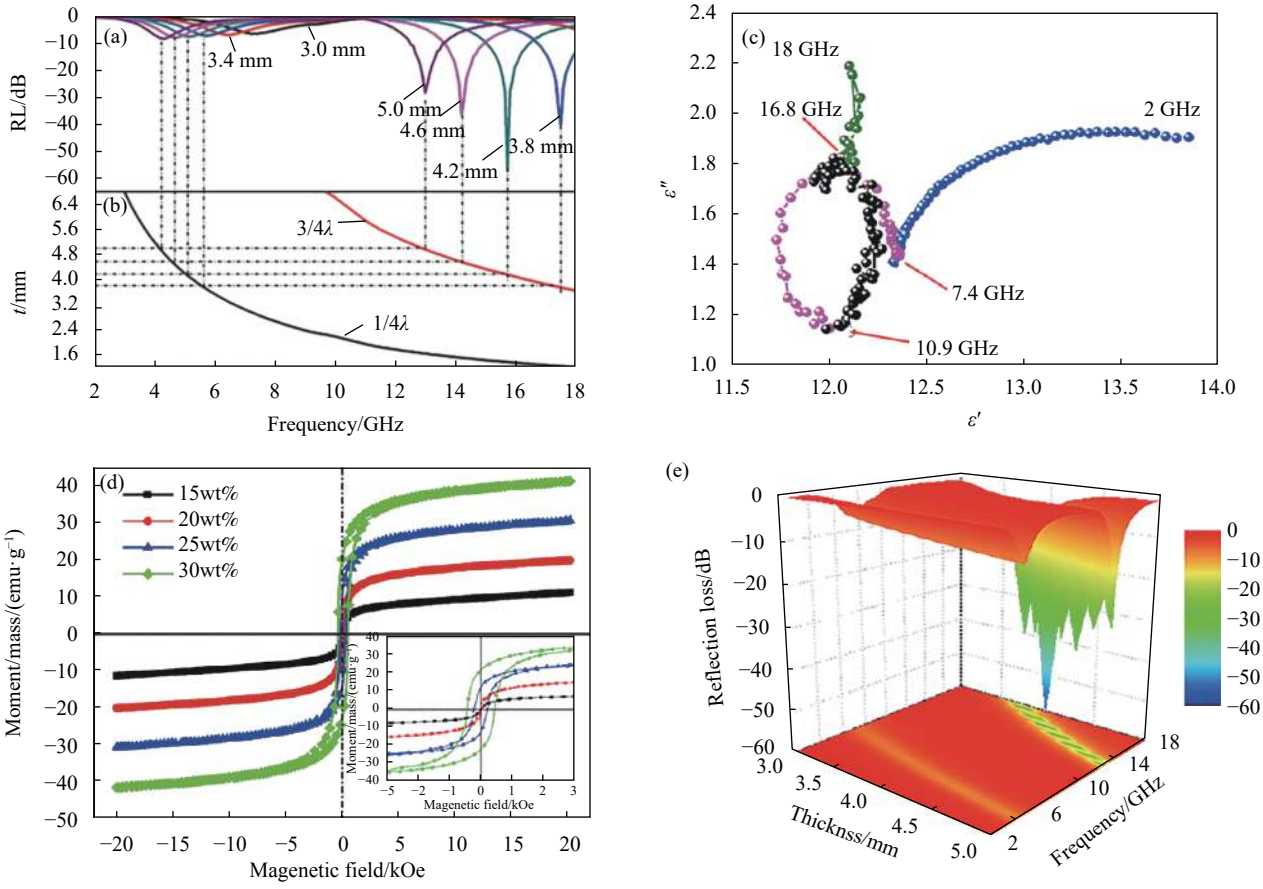
Liang 等[51] 通过共溶剂热法将 Ni 纳米颗粒成功负载在 MXene 片层上，再利用聚偏氟乙烯 (PVDF) 作为吸收基体材料研究了 Ni@MXene 复合材料的吸波能力，该方法能广泛推广到其他的磁性金属纳米颗粒 (钴、钴镍合金等) 的形成。实验结果表表明，在 8.4 GHz 处的最小反射损失 RL= −52.6 dB、有效吸收带宽 EAB 为 3.7 GHz，包括 71% 的 X 波段，通过调整样品厚度，可实现整个 X 波段的全覆盖，这主要是由于 MXene 表面带有负电荷能够吸附 Ni^{2+}，不仅为 Ni 纳米颗粒的生长提供了成核位点还能防止纳米颗粒间的聚集，导致复合材料具有优异的阻抗匹配，使更多的电磁波能够进入材料内部；此外，Ni 粒子本身能够引起自然共振和交换共振来削弱电磁波且相邻的纳米颗粒之间也能产生磁耦合效应，阻碍电磁波进一步

传输；纳米粒子与 MXene 片层之间为非均质界面存在巨大的介电损耗，各组分之间的协同作用使得电磁波反射强度几乎为零，在雷达领域极具应用前景。

除了磁性纳米金属粒子外，磁性金属氧化物也能进一步改善吸波性能。Zhang 等[79] 通过简单的溶剂热法使 Fe_3O_4 粒子在 MXene 层间和表面进行原位生长，在 200℃ 高温下，溶剂热过程为 $Ti_3C_2T_x$ MXene 提供了一个还原环境，使材料免受高温氧化的同时仍能保持一定的稳定性。Fe_3O_4 颗粒在 $Ti_3C_2T_x$ MXene 片层上均匀分散，有效地避免了由于自身强大的表面张力和强磁偶极子之间相互作用而产生的聚集作用；此外，Fe_3O_4 的含量也与吸波性能有关，如图 8(d) 所示，当其填充量从 20wt% 增加到 25wt% 时，材料具有明显的磁滞回线，表明其具有较强的磁损耗，有利于提高吸波强度,。磁性金属氧化物的引入不仅增强了磁损耗机制，而且大量界面的存在促进了界面极化和德拜弛豫现象，并通过降低介电常数提高了阻抗匹配。特别是在高频范围，$Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ 材料在 15.7 GHz 处的有效吸收带宽为 1.4 GHz，最小 RL 值达到了 −57.2 dB，厚度为 4.2 mm，获得了良好的电磁波吸收性能。该项工作为 MXene 的改性和高性能 MXene 基微波吸收材料的开发提供了一种简单而新颖的策略。

3.3 MXene/导电聚合物

聚合物成本较低、毒性小，与 MXene 结合后能进一步提高材料的稳定性、导电性和力学性能，



ε'—Real part of the dielectric constant; ε''—Imaginary part of the dielectric constant; λ—Electromagnetic wave wavelength

图 8 (a) 不同厚度的 $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ 复合材料 (25wt%) 的反射损失 (RL) 曲线的频率依赖性；(b) 在 l/4 模型下，$Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ 复合材料 (25wt%) 的吸收体厚度 (t_m) 与峰值频率 (f_m) 的模拟结果；(c) $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$(25wt%) 的典型科尔-科尔半圆；(d) 不同 Fe_3O_4 含量的 $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ 复合材料的磁滞回线；(e) 30wt% 含量的 Fe_3O_4 反射损失值的三维图表示[79]

Fig. 8 (a) Frequency dependence of reflection loss (RL) curves for $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ composite (25wt%) with different thicknesses; (b) Simulations of the absorber thickness (t_m) versus peak frequency (f_m) for the $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ composite (25wt%) under the l/4 model; (c) Typical Cole-Cole semicircles of $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ composite (25wt%); (d) Magentic hysteresis loops of $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ composites with various Fe_3O_4 contents; (e) Three-dimensional representation of reflection loss values for 30wt% content of ferric tetroxide[79]

因此被广泛应用于制备 MXene 基复合材料。MXene 和导电聚合物都具有良好的导电性，形成交织导电网络时产生的缺陷能增大欧姆损失，而 MXene 表面大量的极性官能团也易发生偶极极化，此外，由于电导率的不同，在接触面上形成了电荷的不均匀分布，加强了界面损失。两种材料的复合加强了电磁波的损失。Wei 等[80] 通过苯胺单体在 MXene 表面和内层上的原位聚合制备了具有多层夹层结构的 MXene/聚苯胺 (PANI) 复合吸波材料； 由于 Ti 的多层结构和介电性能，当厚度为 1.8 mm 时，在 13.8 GHz 处，最大反射损失可达到–56.30 dB，有效吸收带宽 (>90%) 范围从 X 波段 (8~12.4 GHz) 到 Ku 波段 (12.4~18 GHz)，可调厚度为 1.5~2.6 mm。进入材料内部的电磁波遇到片层结构后会在内部经历多次反射而被削减；MXene 片层上吸附的聚苯胺会导致电导率的损失和偶极极化，进而增加介电损耗；此外，多层结构的 MXene/PANI 能形成更多的导电通路，使 MXene/PANI 的每一层都可以等效于一个电阻-电容电路模型，因此，电磁波在内部以多种方式被削弱而达到较好的吸收性能。

需要指出的是，MXenes 为活性过渡金属材料，表面官能团和缺陷的存在导致其在没有任何保护的环境下的稳定性较差，为解决这个问题，一种有效的途径就是对 MXenes 表面进行化学改性，一方面希望能获得更加稳定的 MXenes 材料，另一方面是能够增强 MXene 与聚合物之间的相互作用，延长复合材料的使用寿命。

3.4 微观结构设计

吸波材料通常是由吸波剂和透波基质组成，单独调控吸波剂的组分和含量一般难以调控阻抗匹配特性和电磁波衰减能力，此时，进行结构设计能进一步优化材料的吸波性能。结构设计可遵从 3 种设计理念：(1) 在高介电损耗材料中引入低介电常数的材料来改善材料的阻抗匹配特性；(2) 尽可能多的增加异质界面来增大界面极化损耗能力；(3) 构建层层堆叠结构，增大电磁波在片层间的反射和散射路径。目前，吸波材料中常见的结构类型主要有核壳、多孔、三明治结构。

3.4.1 核壳结构

核壳结构一般包括核层和外壳层，彼此通过化学键或其他相互作用包覆形成的有序组装结构的复合材料，其具有明显的协同效应[81]，且能够兼具内核材料及外层异质材料的物化特性，能够使多种材料电磁性能匹配互补。Liu 等[82] 通过导电微球聚吡咯 (PPy) 对 $Ti_3C_2T_x$ MXenes 进行改性，制备了新的核壳状分层结构复合材料，显著提高了材料的吸波性能，结果显示，$Ti_3C_2T_x$ MXene 与 PPy 微球具有良好的协同效应，如图 9 所示材料在 7.6 GHz 处且厚度为 3.6 mm 时的最小反射损耗 (RL_{min}) 为 –49.5 dB，有效吸收带宽为 5.14 GHz，最宽有效吸收带宽可达 6.3 GHz(8.55~15.18 GHz)。除此之外，核壳结构还能改善提升材料的耐高温、耐腐蚀及抗氧化等综合特性，从而提高了材料的环境适应性，扩大了在吸波领域的应用前景。如，将二氧化硅包覆的二氧化锰纳米棒与未用二氧化硅包覆的二氧化锰纳米棒相比，其耐高温性能和对电磁波损耗性能得到了很大改善[83-84]。除了传统的球状结构以外，核壳结构还包括片层状结构、纳米环状结构、树枝状结构及其他不规整的构型等。还有一种常见的结构形式是在纤维的外部通过镀层的方法生长出壳层结构，例如通过化学镀法在玄武岩纤维外面镀上镍，极大地改善了复合材料的电磁性能，进而提高了材料的吸波性能。

3.4.2 多孔结构

与实体材料相比，多孔材料的密度较小、比表面积大，根据孔的尺寸一般可以分为微米孔和纳米孔。电磁波可以在孔洞中发生多重反射，增大电磁波的传输距离，进而增强电磁波的损耗。多孔结构易于调控，常引入到介电损耗材料中改善吸波性能。Wang 等[85] 通过水热法和冷冻干燥处理，制备了三维多孔 MXene $Ti_3C_2T_x$@RGO 混合气凝胶，该气凝胶 8.2 GHz 处的最大反射损耗为 –31.2 dB，当厚度仅为 2.05 mm 时的有效吸收带宽为 5.4 GHz，优异的吸波性能归因于多孔结构的存在极大地改善了材料的阻抗匹配特性，且层层结构的堆叠有利于电磁波在内部的多重反射损耗。此外，多孔结构还可以与中空结构相结合，Wei 等[86] 通过化学气相沉积法和刻蚀等工艺制备了具有低密度和高比表面积的超轻多孔/中空纳米盒，仅用 3wt% 的填料即可实现优异的稀吸波性能，在厚度为 2.2 mm 时，最佳反射损耗为–30.46 dB。

3.4.3 多层类三明治结构

类三明治结构可以提供丰富的异质界面，增强材料的界面极化损耗能力，有利于电磁波在材料内部的多重反射。为了减少电磁波在材料表层

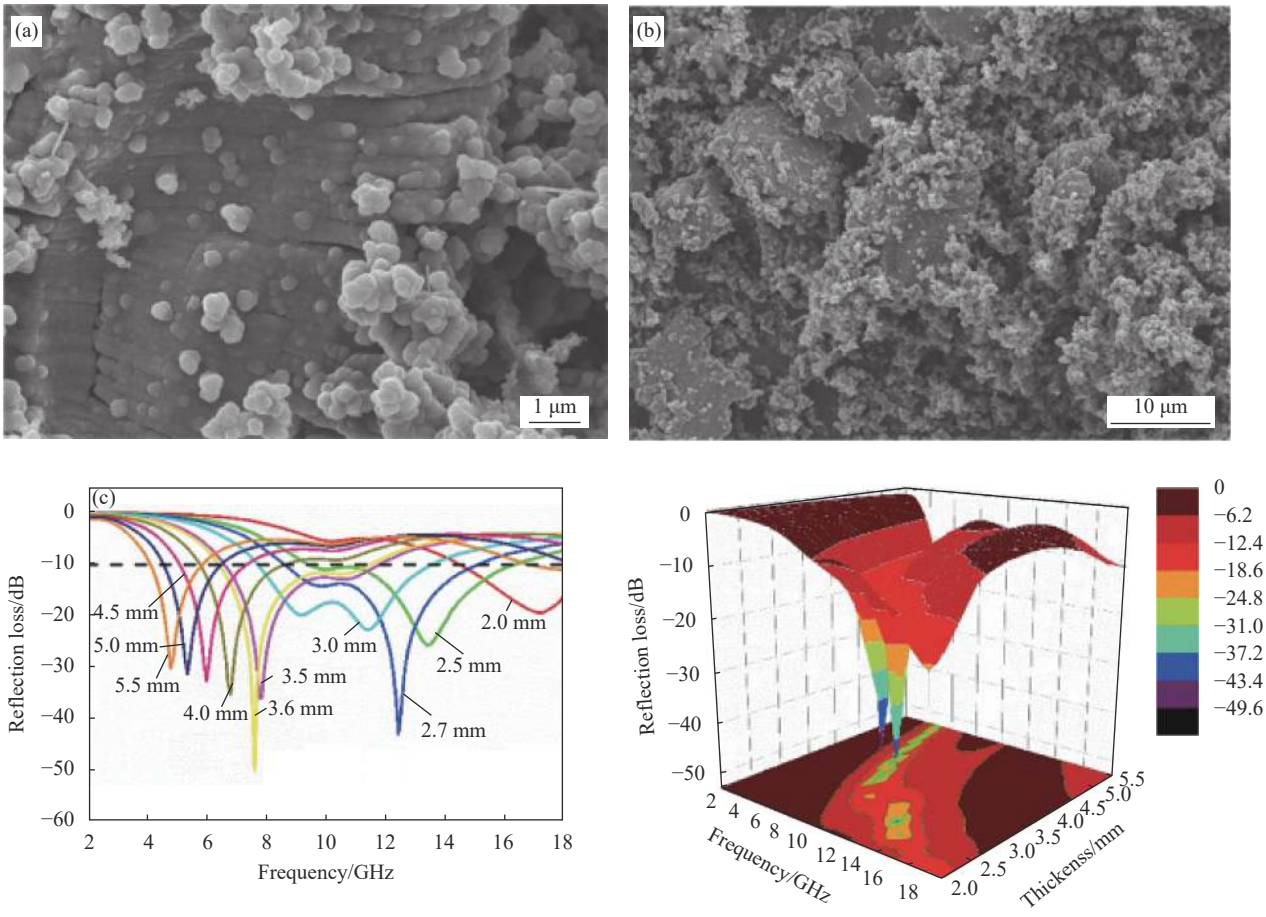


图 9 ((a), (b)) $Ti_3C_2T_x$@聚吡咯 (PPy)-1 的 SEM 图像；(c) $Ti_3C_2T_x$@PPy-2 复合材料 RL 值的理论计算图和三维视图[82]

Fig. 9 ((a), (b)) SEM images of $Ti_3C_2T_x$@polypyrrole (PPy)-1; (c) Theoretical calculation and three-dimensional view of RL values of $Ti_3C_2T_x$@PPy-2 composites[82]

的反射，增强电磁波的吸收，最外层通常采用阻抗匹配性能良好的涂层，内部采用损耗能力强的涂层。由于 MXene 和石墨烯具有天然的多层结构，因此被大量应用于构建三明治结构型吸波材料中。Han 等[87] 将 $Ti_3C_2T_x$ MXene 作为前驱体，在 800℃ 的 CO_2 气氛中煅烧后制备了一种三明治结构的 $Ti_3C_2T_x$ 衍生物 C/TiO_2，该 MXene 衍生复合材料保留了 MXene 的三明治层状结构，该结构有利于电磁波在材料内部的多重反射和散射，且丰富的界面和结构缺陷极大地增强了材料的极化弛豫损耗能力。材料厚度为 1.7 mm 时的最强反射损耗为 –36 dB，有效吸收带宽 EAB 为 5.6 GHz。研究人员[85] 制备了具有分层三明治结构的新型石墨烯/Fe_3O_4/碳纳米管复合材料。该结构有效地阻止了石墨烯的团聚，且实现了超轻和超强吸收的特性。该复合材料的最小反射损耗为–50 dB，有效吸收带宽为 4 GHz。

除了这 3 种结构以外，还有其他结构的存在，例如，Wang 等[88] 通过将花状金属-有机骨架材料 (MOF) 衍生物与二维柔性 MXene 薄片结合，成功制备了 MOF 衍生物/MXene 交联网络，花状结构引起的界面极化和三维网络结构引起的电导率的损失使复合材料有显著的吸波效果，当 CoO/$Ti_3C_2T_x$ MXene-15 配比时，厚度为 1.90 mm 时的最小反射损失为–52.3 dB，相应的有效吸收带宽为 4.88 GHz。三维交联网状结构的构建也是实现高效微波吸收剂的有效策略。

3.5 宏观形态设计

3.5.1 MXene 基薄膜

MXene 基薄膜的成功制备改善了材料自身力学性能的同时也进一步提高了其电磁屏蔽和电化学性能。有机聚合物的加入，进一步增强了拉伸过程中 MXene 与聚合物之间的摩擦能损耗，从而改善了材料的韧性。此外，聚合物的加入不仅能降低杂化薄膜的电导率，有效地减少了由于阻抗不匹配引起的界面反射，从而增大了膜内对电磁

波的吸收，也能防止薄片的重新堆积，有利于提高电化学性能。

MXene/聚合物复合材料具有优异的导电性、力学性能及优异的热稳定性，MXene/聚合物膜就是其中一种基本形式。聚合物的引入能有效地缓解 MXene 片层之间的堆积，防止片层被氧化的同时能够提高材料的稳定性。Ji 等[89] 利用流延成形工艺和层压铸膜的方式制备了不同 MXene 含量 (2.5wt%~17.5wt%) 的 $Ti_3C_2T_x$MXene/聚合物膜(MPFs) 并设计了多层结构的阻抗梯度吸收剂，该结构由阻抗匹配层、吸收层和屏蔽层组成，其中 MXene 的含量直接决定了 MPFs 材料的电磁波反射、吸收及屏蔽的能力 (MPFs 对电磁波的影响如图 10 所示)。研究表明，通过对每层厚度进行微调就能实现 X 波段的全部覆盖，且 RL_{min} 可达到 −25.8 dB。He 等[90] 通过 M-$Ti_3C_2T_x$ 与羟乙基纤维素 (HEC) 的过滤辅助自组装，成功制备了柔性绿色多层 $Ti_3C_2T_x$/羟乙基纤维素 (M-$Ti_3C_2T_x$/HEC) 复合膜，该复合膜表现出优异的电磁干扰屏蔽特性，根据介电损耗分析表明，进入薄膜的电磁波主要以电子迁移引起的热能的形式耗散，此外，多层堆积厚度的影响表明，随着堆积厚度的减小，薄膜主要呈现以吸收为主的电磁干扰屏蔽趋势，该项工作为 MXene 基储能和绿色电磁干扰屏蔽材料的利用提供了新的研究思路。

随着对 MXenes 的物理、化学性能的深入研究及对柔性多功能材料需求的不断增加，有关 MXenes 基薄膜综合性能的研究也越来越广泛，越来越多的研究者开始关注在控制电磁屏蔽干扰和超级电容器性能方面的研究[91]。

3.5.2 MXene 基气凝胶

传统的粉末状吸收材料通常需要在高填充量下才能达到相应的吸波性能，但往往导致物理团聚且使材料密度较高。为解决这一问题，孔隙度高、比表面积大的宏观三维多孔气凝胶结构已发展成为轻质电磁波吸收 (EMA) 材料，该结构既能调节介电损耗和阻抗匹配，又能提高电磁波吸收频率的宽度，从而获得优异的 EMA 性能[92]。同时，空心多面体骨架的形成有效地阻止了二维 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片层的重叠，进一步扩大了特殊的表面积，有利于传导损失和极化损失[93]。

Cheng 等[94] 通过合成工艺制备了 $Ti_3C_2T_x$ MXene 纳米片，然后在超声分散的作用下将羧甲基纤维素 (CMC) 加入其水溶液当中，经过磁力搅拌获得均匀的 MXene/CMC 溶液，最终通过冷冻干燥技术制备了 MXene/CMC 气凝胶。Xu 等[95] 选择壳聚糖 (CS) 和 GO 作为气凝胶骨架并将 Co 离子引入，利用定向冷冻干燥和碳化的方法成功制备了嵌有 Co@C 纳米颗粒的 3D 蜂窝状碳气凝胶。值得注意的是，该结构具有优异的 EAM 性能，当

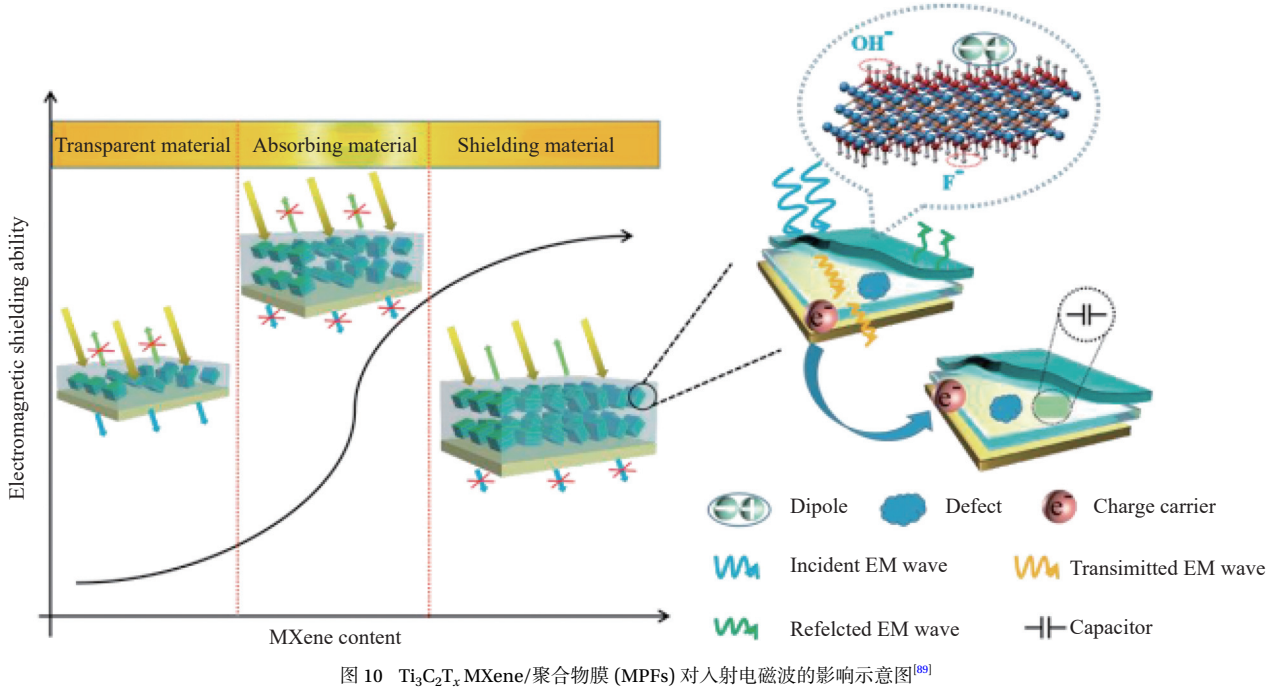


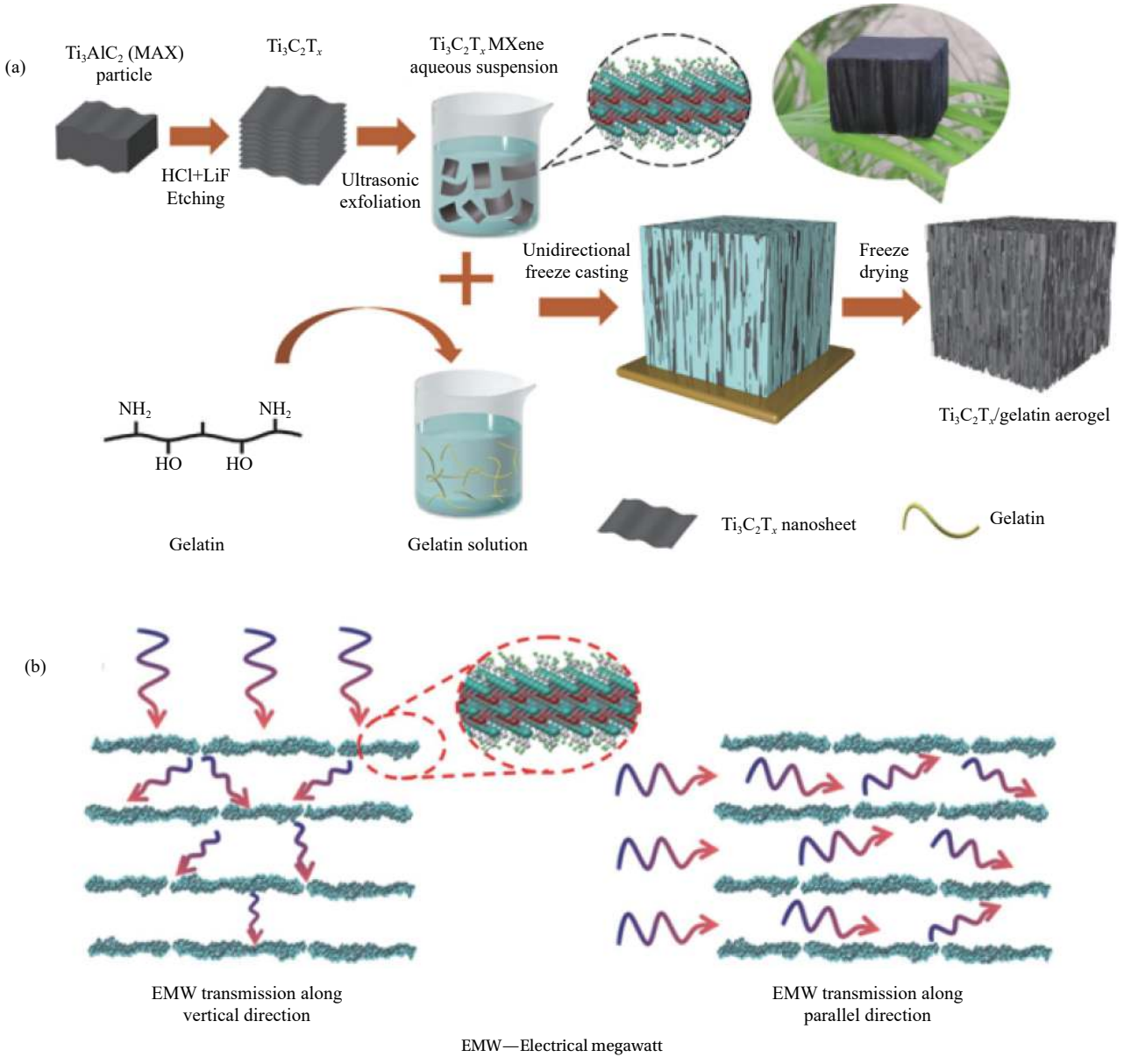
图 10 $Ti_3C_2T_x$ MXene/聚合物膜 (MPFs) 对入射电磁波的影响示意图[89]

Fig. 10 Schematic diagram of the effect of polymer membranes (MPFs) on incident EM wave[89]

厚度为 1.5 mm 时，有效吸收带宽 (>90%) 为 4.02 GHz(13.12~17.14 GHz)，强吸收达到–45.02 dB；此外优化后的气凝胶具有低密度、阻燃、抗压缩、高热管理等性能，实现了材料的多功能方向发展。Yang 等[96] 在 MXene 片层间引入明胶作为“化学胶”，再加入甲醛使明胶分子交联，利用单向冷冻干燥法成功制备了具有各向异性力学性能的 3D Mxene@明胶纳米复合气凝胶单向排列的微观结构 (如图 11 所示)，因此材料表现出显著的各向异性的 EMA 性能且平行方向的性能优于垂直方向，当 MXene 填充量为 45wt% 时，在 14.04 GHz 处的最小反射损失为 –59.5 dB，有效吸收带宽为 6.24 GHz。气凝胶结构内部有较多孔洞，在形成超轻特性的同时使电磁波进入后能实现多次反射和折射，有利于削弱电磁波；此外，孔洞结构中存在大量的空气，有助于实现隔热的特性，因此也成为军事设备实现雷达隐身和红外隐身双重效果或保护电子设备免受高温攻击的关键。

3.5.3 MXene 基纤维织物

近年来，智能可穿戴设备已发展成为一项新兴的技术且需求量不断增加，其中导电材料起着关键性的作用；MXene 材料具有高导电性，同时



EMW—Electrical megawatt

图 11 (a) $Ti_3C_2T_x$ MXene/明胶复合气凝胶制备示意图；(b) 各向异性气凝胶电磁波损耗示意图[97]

Fig. 11 (a) Schematic illustration of the preparation process of the $Ti_3C_2T_x$ MXene@gelatin composite aerogel; (b) Schematic illumination of the anisotropic electromagnetic wave dissipation properties[97]

其表面基团能促进与纤维织物的紧密结合，已被广泛用于柔性和可穿戴电子设备的研究中。Wang 等[97]用浸渍和水热法设计了 $Ti_3C_2T_x$ MXene/Ni 链/ZnO 混合纳米结构 (其制备过程如图 12(a) 所示)，其中 MXene 纳米片与棉纤维表面紧密结合使其具有较高的介电性能，MXenes 表面生长的 ZnO 可以缓解电磁波反射，通过改变 ZnO 列阵中混合的磁性镍链的个数，可以调节电磁参数 (电磁波吸收机制如图 12(b) 所示)；得到的织物在 8.3 GHz 处，当厚度为 2.8 mm 时，最大吸收可达到 –35.1 dB，其 EAB 可覆盖整个 X 波段，从而实现了较强的电磁波衰减能力和较宽的吸收带宽。Zhang 等利用喷雾干燥涂层法将二维 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片均匀的沉积在纤维织物表面，通过改变喷涂干燥的周期能控制 MXene 的含量和导电网络形成的程度，由于其特殊的制备工艺，使材料保留了柔性和透气性。MXene 材料的使用为研究多功能纺织品可穿戴设备的设计提供了新的思路。

3.5.4 MXene 基泡沫

新型吸波材料为满足“薄、轻、宽、强”的发展需求，除了在宏观上形成气凝胶结构外，还可以进行微观结构设计在满足较大吸收强度和宽度的同时实现厚度薄、质量轻的目标，尤其是多孔的泡沫纳米结构；一方面能降低密度，优化阻抗匹配，另一方面能够避免纳米结构的聚集，促进导电网络的形成。Li 等[98]利用溶剂热实现了铁酞菁/Fe_3O_4 在石墨烯骨架上的自组装，经过高温退火成功制备了耐腐蚀的石墨烯基碳涂层铁 (Fe@C) 磁性复合泡沫。该泡沫材料有稳定的微波吸收性能，其最大吸收强度可达到 –72.46 dB，但降低材料密度的同时，不可避免地增加了材料的厚度。为解决“轻”、“薄”不相容的问题，Li 等[63]用牺牲模板法将 rGO 包裹 MXene 制备了空心核壳结构和三维大孔泡沫，当厚度为 3.2 mm 时，EAB 可覆盖整个 X 波段，而密度仅为 0.0033 g·cm^{-3}。Cheng 等[99]通过静电自组装和浸涂吸附等工艺成功制备了 Ni/MXene 三维泡沫结构，有利于构建导电网络来调节阻抗匹配、磁损耗和介电损耗，实现电磁波的强吸收、红外隐身和阻燃于一身的多功能性。

4 结论与展望

为进一步实现“薄、轻、宽、强”的发展目标，需将单一的 MXene 材料与其他成分进行复合，通过对组分和结构的设计，使复合吸波材料向着高性能、多功能的方向发展，同时应进一步探索在吸波过程中电磁能向热能的转化机制，并深入研究基于此结构设计的热点发电机的原理和应用，进而拓宽 MXene 复合材料的应用范围。尽管，目前对 MXene 在吸波领域上的研究取得了新的进展，因此，未来复合吸波材料的发展可以从以下几个方面进行尝试：

(1) 材料制备方面：目前存在的主要挑战是如何使用有效的剥离技术来控制 MXene 片层的厚度和尺寸，其开发安全、制备成本低、产量高的刻蚀方法仍是一个亟待解决的问题。MXene 在长期使用中是不稳定的，需要进一步探讨氧化的机制及如何有效的延缓氧化的速度；

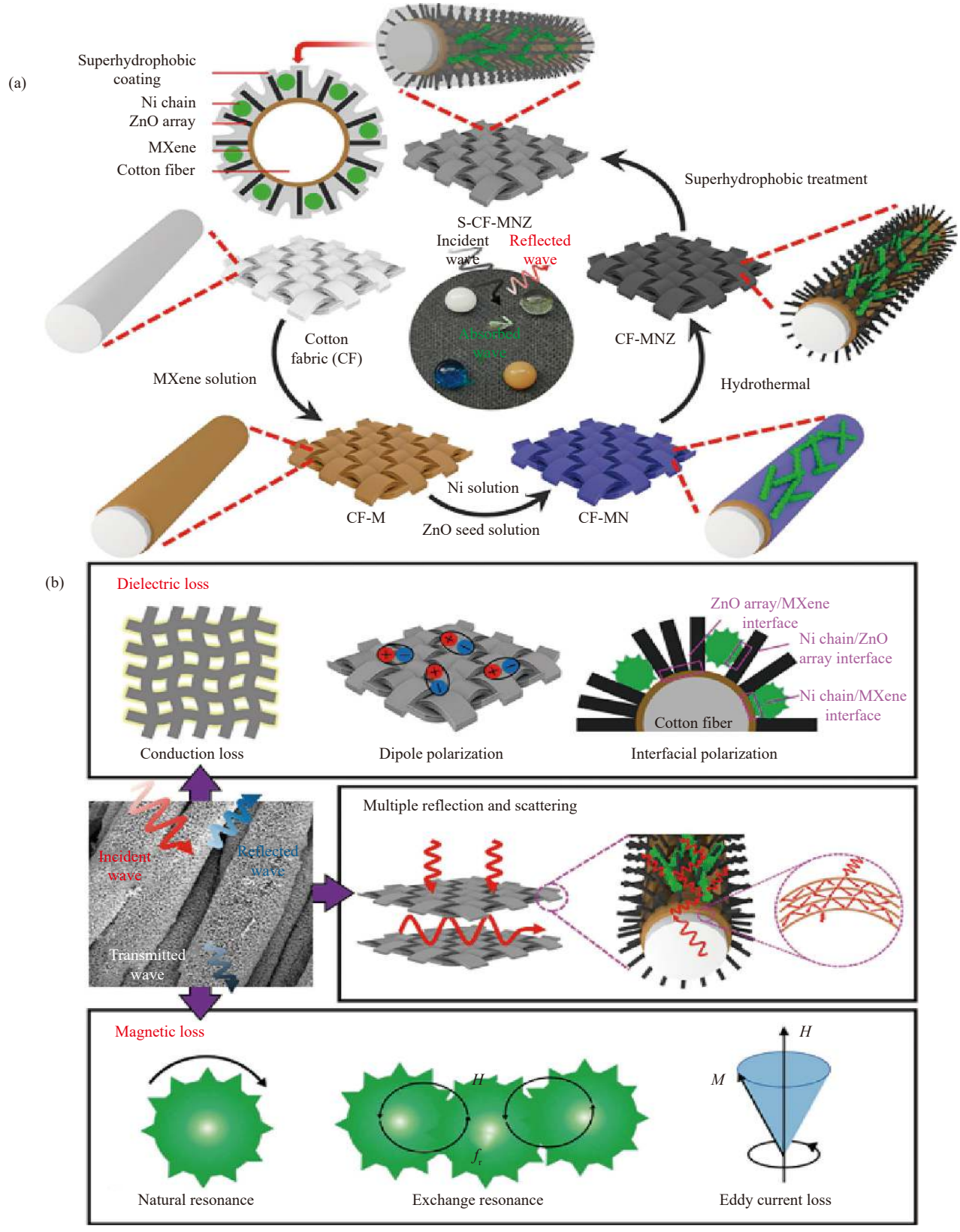
(2) 电磁波损耗机制方面。尤其是在缺陷诱导极化的研究中，目前研究较多的是阴离子空位引起的缺陷，如氧空位和硫空位，对阳离子空位的研究较少，在未来发展中，可以进一步阐明阳离子空位产生的影响。此外，界面极化效应也可以通过改变组分间的接触面积或者改变外部刺激条件 (如加压、电场等) 来实现；

(3) 结构模型方面。单独一层吸波材料并不能达到很好的吸波效果，需要进行合理的结构设计，可以在宏观上建立三维多孔结构、蜂窝状结构或者多层结构，微观上建立中空结构或者核-壳结构等，利用界面极化效应增大电磁波的多重反射和吸收，同时减轻材料的重量；

(4) 多功能方面。为了适应复杂环境，延长材料的使用寿命，在优化材料吸波性能的同时使其具有更多的功能，如耐油/水性、自清洁性、隔热、红外隐身、柔性、耐腐蚀等特性，拓宽了其应用领域；同时，材料的功能性应朝着智能化的方向发展，如材料受到破坏时，应具有一定的自愈能力，当材料废弃到环境中去时，可以实现自然降解等特性，除此之外，还应进一步探索其应用场景；

(5) 为了实现对电磁波的有效吸收，必须使电磁波更多的进入材料内部，由于吸收材料的厚度是电磁波的 1/4 波长的奇数倍，所以有必要探讨适当的透波层和吸波层的厚度的设计。

(6) MXene 的亲水特性限制了与其他复合材料的结合，目前的介质局限于水，关于有机介质还有待研究。



S—Superhydrophobic treatment; M—MXene; MN—MXene/Ni chain; MNZ—MXene/Ni chain/ZnO; M—Magnetization density; H—Magnetic field strength; f_r—Frequency

图 12 (a) MXene/Ni 链/ZnO 阵列棉织物的制备工艺示意图；(b) MXene/Ni 链/ZnO 阵列棉织物的电磁波吸收机制示意图[95]

Fig. 12 (a) Schematic illustration of preparation process of MXene/Ni chain/ZnO array cotton fabrics; (b) Schematic illustration of electromagnetic wave absorption mechanisms of MXene/Ni chain/ZnO array cotton fabrics[95]

参考文献：

[1] GAO Z, XU B, MA M, et al. Electrostatic self-assembly synthesis of $ZnFe_2O_4$ quantum dots ($ZnFe_2O_4$@C) and electromagnetic microwave absorption[J]. Composites Part B: Engineering，2019，179：107417.

[2] WANG L, SHI X, ZHANG J, et al. Lightweight and robust rGO/sugarcane derived hybrid carbon foams with outstanding EMI shielding performance[J]. Journal of Materials Science & Technology，2020，52：119-126.

[3] LIU J, LIANG H, ZHANG Y, et al. Facile synthesis of ellipsoid-like $MgCo_2O_4/Co_3O_4$ composites for strong wideband microwave absorption application[J]. Composites Part B: Engineering，2019，176：107240.

[4] HE P, CAO M S, CAO W Q, et al. Developing MXenes from wireless communication to electromagnetic attenuation[J]. Nano-Micro Letters，2021，13(1)：194-227.

[5] QIN M, ZHANG L, WU H. Dielectric loss mechanism in electromagnetic wave absorbing materials[J]. Advanced Science，2022，9(10)：2105553.

[6] ZHU X, DONG Y, PAN F, et al. Covalent organic framework-derived hollow core-shell Fe/Fe_3O_4@ porous carbon composites with corrosion resistance for lightweight and efficient microwave absorption[J]. Composites Communications，2021，25：100731.

[7] DONG Y, ZHU X, PAN F, et al. Mace-like carbon fiber/ZnO nanorod composite derived from typhaorientalis for lightweight and high-efficient electromagnetic wave absorber[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials，2021，4(4)：1002-1014.

[8] ONO K, SHINTANI H, YANO O, et al. Absorption of 10-MHz to 110-MHz ultrasonic waves by solutions of polystyrene[J]. Polymer Journal，1973，5(2)：164-175.

[9] YE Z, LI Z, ROBERTS J A, et al. Electromagnetic wave-absorption properties of carbon nanotubes-epoxy composites at microwave frequencies[J]. Journal of Applied Physics，2010，108(5)：054315.

[10] LIU Z, XIANG Z, DENG B, et al. Rational design of hierarchical porous Fe_3O_4/RGO composites with light-weight and high-efficiency microwave absorption[J]. Composites Communications，2020，22：100492.

[11] XIANG Z, DENG B, HUANG C, et al. Rational design of hollow nanosphere γ-Fe_2O_3/MWCNTs composites with enhanced electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Alloys and Compounds，2020，822：153570.

[12] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals: Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2[J]. Advanced Materials，2011，23(37)：4248-4253.

[13] CAO M, CAI Y Z, HE P, et al. 2D MXenes: Electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal，2019，359：1265-1302.

[14] NAGUIB M, MASHTALIR O, CARLE J, et al. Two-dimensional transition metal carbides[J]. ACS Nano，2012，6(2)：1322-1331.

[15] XIAO Y, HWANG J Y, SUN Y K. Transition metal carbide-based materials: Synthesis and applications in electrochemical energy storage[J]. Journal of Materials Chemistry A，2016，4(27)：10379-10393.

[16] WANG X, KAJIYAMA S, IINUMA H, et al. Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-on hybrid capacitors[J]. Nature Communications，2015，6(1)：1-6.

[17] GHIDIU M, LUKATSKAYA M R, ZHAO M Q, et al. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay'with high volumetric capacitance[J]. Nature，2014，516(7529)：78-81.

[18] LUKATSKAYA M R, KOTA S, LIN Z, et al. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides[J]. Nature Energy，2017，2(8)：1-6.

[19] KARLSSON L H, BIRCH J, HALIM J, et al. Atomically resolved structural and chemical investigation of single MXene sheets[J]. Nano Letters，2015，15(8)：4955-4960.

[20] PENG C, WEI P, CHEN X, et al. A hydrothermal etching route to synthesis of 2D MXene (Ti_3C_2, Nb_2C): Enhanced exfoliation and improved adsorption performance[J]. Ceramics International，2018，44(15)：18886-18893.

[21] LI T, YAO L, LIU Q, 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.

[22] URBANKOWSKI P, ANASORI B, MAKARYAN T, et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene)[J]. Nanoscale，2016，8(22)：11385-11391.

[23] LIPATOV A, LU H, ALHABEB M, et al. Elastic properties of 2D $Ti_3C_2T_x$ MXene monolayers and bilayers[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaat0491.

[24] LAI S, JEON J, JANG S K, et al. Surface group modifcation and carrier transport properties of layered transition metal carbides (Ti_2CT_x, T: -OH, -F and -O)[J]. Nanoscale, 2015, 7(46): 19390–19396.

[25] JIN Z, FANG Y, WANG X, et al. Ultra-efficient electromagnetic wave absorption with ethanol-thermally treated two-dimensional Nb_2CT_x nanosheets[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2019，537：306-315.

[26] 方永盛, 曹茂盛. $Ti_3C_2T_x$杂化物: 基于导电网络调控的高效电磁屏蔽材料和器件[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2021, 38(4)：421-432.
FANG Yongsheng, CAO Maosheng. $Ti_3C_2T_x$ hybrids: Efficient electromagnetic shielding materials and devices based on conductive network modulation[J]. Journal of Natural Sciences, Heilongjiang Univesity，2021，38(4)：421-432(in Chinese).

[27] BONACCORSO F, COLOMBO L, YU G, et al. Graphene, re-

lated two-dimensional crystals, and hybrid systems for energy conversion and storage[J]. Science, 2015, 347(6217): 1246501.

[28] DILLON A D, GHIDIU M J, KRICK A L, et al. Highly conductive optical quality solution-processed films of 2D titanium carbide[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(23): 4162-4168.

[29] FASHANDI H, IVÁDY V, EKLUND P, et al. Dirac points with giant spin-orbit splitting in the electronic structure of two-dimensional transition-metal carbides[J]. Physical Review B, 2015, 92(15): 155142.

[30] KHAZAEI M, RANJBAR A, ARAI M, et al. Topological insulators in the ordered double transition metals $M_2'M''C_2$ MXenes (M′= Mo, W; M''=Ti, Zr, Hf)[J]. Physical Review B, 2016, 94(12): 125152.

[31] ZHAO S, KANG W, XUE J. MXene nanoribbons[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(4): 879-888.

[32] HALIM J, LUKATSKAYA M R, COOK K M, et al. Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films[J]. Chemistry of Materials, 2014, 26(7): 2374-2381.

[33] ZHA X H, YIN J, ZHOU Y, et al. Intrinsic structural, electrical, thermal, and mechanical properties of the promising conductor Mo_2C MXene[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(28): 15082-15088.

[34] BAI Y, ZHOU K, SRIKANTH N, et al. Dependence of elastic and optical properties on surface terminated groups in two-dimensional MXene monolayers: A first-principles study[J]. RSC Advances, 2016, 6(42): 35731-35739.

[35] COME J, XIE Y, NAGUIB M, et al. Nanoscale elastic changes in 2D $Ti_3C_2T_x$ (MXene) pseudocapacitive electrodes[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(9): 1502290.

[36] MASHTALIR O, COOK K M, MOCHALIN V N, et al. Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(35): 14334-14338.

[37] WANG K, ZHOU Y, XU W, et al. Fabrication and thermal stability of two-dimensional carbide Ti_3C_2 nanosheets[J]. Ceramics International, 2016, 42(7): 8419-8424.

[38] NAGUIB M, MASHTALIR O, LUKATSKAYA M R, et al. One-step synthesis of nanocrystalline transition metal oxides on thin sheets of disordered graphitic carbon by oxidation of MXenes[J]. Chemical Communications, 2014, 50(56): 7420-7423.

[39] XIE Y, NAGUIB M, MOCHALIN V N, et al. Role of surface structure on Li-ion energy storage capacity of two-dimensional transition-metal carbides[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(17): 6385-6394.

[40] WEI Y, ZHANG P, SOOMRO R A, et al. Advances in the synthesis of 2D MXenes[J]. Advanced Materials, 2021, 33(39): 2103148.

[41] ZHOU X, WEN J, WANG Z, et al. Broadband high-performance microwave absorption of the single-layer $Ti_3C_2T_x$ MXene[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 115: 148-155.

[42] LIU J, ZHANG H B, XIE X, et al. Multifunctional, superelastic, and lightweight MXene/polyimide aerogels[J]. Small, 2018, 14(45): 1802479.

[43] DAI Y, WU X, LIU Z, et al. Highly sensitive, robust and anisotropic MXene aerogels for efficient broadband microwave absorption[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200: 108263.

[44] BARSOUM M W. MAX phases: Properties of machinable ternary carbides and nitrides[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.

[45] YUE Y, LIU N, MA Y, et al. Highly self-healable 3D micro super capacitor with MXene-graphene composite aerogel[J]. ACS Nano, 2018, 12(5): 4224-4232.

[46] 陈国红, 周芳灵, 赵丽平, 等. 铁氧体磁性材料的吸波机制及改善吸波性能的研究进展[J]. 化工进展, 2015, 34(11): 3965-3969.
CHEN Guohong, ZHOU Fangling, ZHAO Liping, et al. Absorbing mechanism of ferrite magnetic materials and the research progress in improving the wave absorbing property[J]. Chemical Industry and Engineering Progree, 2015, 34(11): 3965-3969(in Chinese).

[47] KURIAKOSE M, LONGUEMART S, DEPRIESTER M, et al. Maxwell-Wagner-Sillars effects on the thermal-transport properties of polymer-dispersed liquid crystals[J]. Physical Review E, 2014, 89(2): 022511.

[48] XIANG Z, ZHU X, DONG Y Y, et al. Enhanced electromagnetic wave absorption of magnetic Co nanoparticles/CNTs/EG porous composites with waterproof, flame-retardant and thermal management functions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(32): 17538-17552.

[49] BHATTACHARYYA R, SINGH V K, BHATTACHAR-YYA S, et al. Defect reconstructions in graphene for excellent broadband absorption properties with enhanced bandwidth[J]. Applied Surface Science, 2021, 537: 147840.

[50] DENG B, LIU Z, PAN F, et al. Electrostatically self-assembled two-dimensional magnetized MXene/hollow Fe_3O_4 nanoparticle hybrids with high electromagnetic absorption performance and improved impendence matching[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(6): 3500-3510.

[51] LIANG L, YANG R, HAN G, et al. Enhanced electromagnetic wave-absorbing performance of magnetic nanoparticles-anchored 2D $Ti_3C_2T_x$ MXene[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 12(2): 2644-2654.

[52] WANG Q, LEI Y, WANG D, et al. Defect engineering in earth-abundant electrocatalysts for CO_2 and N_2 reduction[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(6): 1730-1750.

[53] ZHANG Y, TAO L, XIE C, et al. Defect engineering on electrode materials for rechargeable batteries[J]. Advanced Materials，2020，32(7)：1905923.

[54] HU Z, WU Z, HAN C, et al. Two-dimensional transition metal dichalcogenides: Interface and defect engineering[J]. Chemical Society Reviews，2018，47(9)：3100-3128.

[55] BAEK K, LEE S Y, DOH S G, et al. Axial oxygen vacancy-regulated microwave absorption in micron-sized tetragonal $BaTiO_3$ particles[J]. Journal of Materials Chemistry C，2018，6(36)：9749-9755.

[56] WEN B, CAO M S, HOU Z L, et al. Temperature dependent microwave attenuation behavior for carbon-nanotube/silica composites[J]. Carbon，2013，65：124-139.

[57] LIU Y, ZHU D, FENG G, et al. Effects of Ni^{2+}, Zr^{4+}, or Ti^{4+} doping on the electromagnetic and microwave absorption properties of $CaMnO_3$ particles[J]. Ceramics International，2021，47(14)：19995-20002.

[58] SHAO X, WANG T, GAN Z, et al. Tailoring of N-doped graphite coated cobalt nanoparticles via arc discharge enables the high microwave absorption[J]. Carbon，2021，177：171-180.

[59] FANG Y S, HE P, CAI Y Z, et al. Bifunctional $Ti_3C_2T_x$-CNT/PANI composite with excellent electromagnetic shielding and supercapacitive performance[J]. Ceramics International，2021，47(18)：25531-25540.

[60] 王超. 改性羰基铁粉复合材料的制备与吸波性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
WANG Chao. Preparation and microwave absorption properties of modified carbonyl iron powder composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008(in Chinese).

[61] GUO Z, LI A, SUN Z, et al. Negative permittivity behavior in microwave frequency from cellulose-derived carbon nanofibers[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials，2022，5(1)：50-57.

[62] 王相元, 钱鉴, 伍瑞新, 等. 微波吸收材料的分块设计方法[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2001, 37(5)：625-629.
WANG Xiangyuan, QIAN Jian, WU Ruixin, et al. Block design method of microwave absorbing materials[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science)，2001，37(5)：625-629(in Chinese).

[63] LI X, YIN X, SONG C, et al. Self-assembly core-shell graphene-bridged hollow MXenes spheres 3D foam with ultrahigh specific EM absorption performance[J]. Advanced Functional Materials，2018，28(41)：1803938.

[64] LIU Y, WANG W, YING Y, et al. Binder-free layered Ti_3C_2/CNTs nanocomposite anodes with enhanced capacity and long-cycle life for lithium-ion batteries[J]. Dalton Transactions，2015，44(16)：7123-7126.

[65] HUO J, WANG L, YU H. Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Materials Science，2009，44(15)：3917-3927.

[66] ARIEF I, BHATTACHARJEE Y, PRAKASH O, et al. Tunable CoNi microstructures in flexible multilayered polymer films can shield electromagnetic radiation[J]. Composites Part B: Engineering，2019，177：107283.

[67] SHANG Q, FENG H, LIU J, et al. Constructing and optimizing hollow $Zn_xFe_{3-x}O_4$@polyaniline composites as high-performance microwave absorbers[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2021，584：80-91.

[68] HE P, CAO M S, SHU J C, et al. Atomic layer tailoring titanium carbide MXene to tune transport and polarization for utilization of electromagnetic energy beyond solar and chemical energy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2019，11(13)：12535-12543.

[69] LIPATOV A, ALHABEB M, LUKATSKAYA M R, et al. Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti_3C_2 MXene flakes[J]. Advanced Electronic Materials，2016，2(12)：1600255.

[70] XIE Y, KENT P R C. Hybrid density functional study of structural and electronic properties of functionalized $Ti_{n+1}X_n$ (X=C, N) monolayers[J]. Physical Review B，2013，87(23)：235441.

[71] ZHAO M Q, XIE X, REN C E, et al. Hollow MXene spheres and 3D macroporous MXene frameworks for Na ion storage[J]. Advanced Materials，2017，29(37)：1702410.

[72] LI X, DAI Y, MA Y, et al. Intriguing electronic properties of two-dimensional MoS_2/TM_2CO_2 (TM=Ti, Zr, or Hf) heterobilayers: Type-II semiconductors with tunable band gaps[J]. Nanotechnology，2015，26(13)：135703.

[73] XU C, SONG S, LIU Z, et al. Strongly coupled high quality graphene/2D superconducting Mo_2C vertical heterostructures with aligned orientation[J]. ACS Nano，2017，11(6)：5906-5914.

[74] PANDEY R P, RASOOL K, MADHAVAN V E, et al. Ultrahigh-flux and fouling-resistant membranes based on layered silver/MXene ($Ti_3C_2T_x$) nanosheets[J]. Journal of Materials Chemistry A，2018，6(8)：3522-3533.

[75] AN X, WANG W, WANG J, et al. The synergetic effects of Ti_3C_2 MXene and Pt as co-catalysts for highly efficient photocatalytic hydrogen evolution over g-C_3N_4[J]. Physical Chemistry Chemical Physics，2018，20(16)：11405-11411.

[76] LORENCOVA L, BERTOK T, FILIP J, et al. Highly stable $Ti_3C_2T_x$ (MXene)/Pt nanoparticles-modified glassy carbon electrode for H_2O_2 and small molecules sensing applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical，2018，263：360-368.

[77] GUO X, ZHANG J, SONG J, et al. MXene encapsulated titanium oxide nanospheres for ultra-stable and fast sodium storage[J]. Energy Storage Materials，2018，14：306-313.

[78] LI X, YIN X, HAN M, et al. Ti_3C_2 MXenes modified with in situ grown carbon nanotubes for enhanced electromagnet-

ic wave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(16): 4068-4074.

[79] ZHANG X, WANG H, HU R, et al. Novel solvothermal preparation and enhanced microwave absorption properties of $Ti_3C_2T_x$ MXene modified by in situ coated Fe_3O_4 nanoparticles[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 383-391.

[80] WEI H, DONG J, FANG X, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene/polyaniline (PANI) sandwich intercalation structure composites constructed for microwave absorption[J]. Composites Science and Technology, 2019, 169: 52-59.

[81] TIAN C, DU Y, XU P, et al. Constructing uniform core-shell PPy@PANI composites with tunable shell thickness toward enhancement in microwave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(36): 20090-20099.

[82] LIU T, LIU N, AN Q, et al. Designed construction of $Ti_3C_2T_x$@ PPY composites with enhanced microwave absorption performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 802: 445-457.

[83] SHI X, CAO M, FANG X. B-MnO_2/SiO_2 core-shell nanorods: Synthesis and dielectric properties[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2011, 11(8): 6953-6958.

[84] SHI X L, CAO M S, FANG X Y, et al. High-temperature dielectric properties and enhanced temperature-response attenuation of β-MnO_2 nanorods[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(22): 223112.

[85] WANG L, LIU H, LV X, et al. Facile synthesis 3D porous MXene $Ti_3C_2T_x$@RGO composite aerogel with excellent dielectric loss and electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 828: 154251.

[86] WEI S, SHI Z, WEI W, et al. Facile preparation of ultralight porous carbon hollow nanoboxes for electro-magnetic wave absorption[J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 28014-28020.

[87] HAN M, YIN X, LI X, et al. Laminated and two-dimensional carbon-supported microwave absorbers derived from MXenes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(23): 20038-20045.

[88] WANG H Y, SUN X, WANG G S. A MXene-modulated 3D crosslinking network of hierarchical flower-like MOF derivatives towards ultra-efficient microwave absorption properties[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(43): 24571-24581.

[89] JI B, FAN S, KOU S, et al. Microwave absorption properties of multilayer impedance gradient absorber consisting of $Ti_3C_2T_X$ MXene/polymer films[J]. Carbon, 2021, 181: 130-142.

[90] HE P, CAO M S, CAI Y Z, et al. Self-assembling flexible 2D carbide MXene film with tunable integrated electron migration and group relaxation toward energy storage and green EMI shielding[J]. Carbon, 2020, 157: 80-89.

[91] HE P, LIU Z Y, MAO G B, et al. MXene films: Toward high-performance electromagnetic interference shielding and supercapacitor electrode[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 157: 106935.

[92] SONG Q, YE F, KONG L, et al. Graphene and MXene nanomaterials: Toward high-performance electromagnetic wave absorption in gigahertz band range[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(31): 2000475.

[93] WANG H Y, SUN X B, YANG S H, et al. 3D ultralight hollow NiCo compound@MXene composites for tunable and high-efficient microwave absorption[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 206.

[94] CHENG Y, ZHU W, LU X, et al. Lightweight and flexible MXene/carboxymethyl cellulose aerogel for electromagnetic shielding, energy harvest and self-powered sensing[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107229.

[95] XU J, ZHANG X, ZHAO Z, et al. Lightweight, fire-retardant, and anti-compressed honeycombed-like carbon aerogels for thermal management and high-efficiency electromagnetic absorbing properties[J]. Small, 2021, 17(33): 2102032.

[96] YANG M, YUAN Y, LI Y, et al. Anisotropic electromagnetic absorption of aligned $Ti_3C_2T_x$ MXene/gelatin nanocomposite aerogels[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(29): 33128-33138.

[97] WANG S, LI D, ZHOU Y, et al. Hierarchical $Ti_3C_2T_x$ MXene/Ni chain/ZnO array hybrid nanostructures on cotton fabric for durable self-cleaning and enhanced microwave absorption[J]. ACS Nano, 2020, 14(7): 8634-8645.

[98] LI S, TANG X, ZHANG Y, et al. Corrosion-resistant graphene-based magnetic composite foams for efficient electromagnetic absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8297-8310.

[99] CHENG H, PAN Y, WANG X, et al. Ni flower/MXene-melamine foam derived 3D magnetic/conductive networks for ultra-efficient microwave absorption and infrared stealth[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14(1): 1-16.