引用格式：单杨，段荣霞，赵芳，等.MXene基材料在电磁屏蔽领域研究进展[J].材料工程，2026，54(7)：117-132.
SHAN Yang，DUAN Rongxia，ZHAO Fang，et al.Research progress in MXene-based materials in electromagnetic interference shielding field[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：117-132.

MXene基材料在电磁屏蔽领域研究进展

单　杨[1]，段荣霞[1]，赵　芳[1*]，程兆刚[1*]，张　颖[1]，夏元佳[2]
（1 陆军工程大学石家庄校区，石家庄 050003；2 海军工程大学，武汉 430032）

摘要：高性能电磁屏蔽材料一直是世界各国信息化建设研究的关键内容之一。MXene是一种新型层状二维结构的过渡金属碳化物/氮化物材料，具有导电性好、比表面积大、表面官能团丰富和力学性能优异等特点，在电磁防护领域具有广阔的应用前景。本文在介绍电磁屏蔽机理及常用电磁屏蔽材料基础上，分别从电磁协同损耗、功能复合、宏观结构设计3个方面总结了目前MXene基材料在电磁屏蔽领域的研究进展，并在极端环境应用和多功能集成方面具有广阔潜力。

关键词：MXene材料；电磁屏蔽；电磁协同；功能复合；宏观结构设计
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000288　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000288
中图分类号：TB34；TB332　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0117-16

Research progress in MXene-based materials in electromagnetic interference shielding field

SHAN Yang[1]，DUAN Rongxia[1]，ZHAO Fang[1*]，CHENG Zhaogang[1*]，ZHANG Ying[1]，XIA Yuanjia[2]
（1 Shijiazhuang Campus of Army Engineering University，Shijiazhuang 050003，China；
2 Naval University of Engineering，Wuhan 430032，China）

Abstract：High-performance electromagnetic interference (EMI) shielding materials have consistently been a focal point in the research endeavors related to informatization construction across the globe. MXene, a novel class of layered two-dimensional transition metal carbide/nitride materials, is characterized by its outstanding electrical conductivity, substantial specific surface area, abundant surface functional groups, and exceptional mechanical properties. These features endow it with vast application potential in the realm of electromagnetic protection. Drawing on an introduction to the EMI shielding mechanism and commonly employed EMI shielding materials, this review comprehensively summarizes the current research advancements of MXene-based materials in the field of EMI shielding from three perspectives: electromagnetic synergistic loss, functional integration, and macro-structure design. Moreover, it highlights the immense potential of MXene-based materials in extreme environment applications and multi-functional integration.

Key words：MXene material；electromagnetic interference shielding；electromagnetic synergy；functional integration；macro-structure design

随着电磁环境的日益复杂，电磁辐射污染，对人体健康和生产生活的影响愈发严重。电磁污染会对长时间暴露在其中的人体的视觉系统、生殖系统、神经系统和免疫系统等造成损害，对地球生态环境产生不良影响，同时也会干扰电子设备的正常运行[1-6]。发展新型高性能电磁屏蔽材料是解决电磁污染的有效手段。电磁屏蔽材料是指能够阻挡或减弱电磁波在屏蔽区域和外界之间的传播，起到屏蔽电磁波作用的材料[7]。目前，电磁屏蔽材料主要包括金属类、碳系、异质复合材料、导电聚合物类等[6-9]。其中，金属类材料具有电导率高、导热性能优异、力学性能强和电磁屏蔽性能好等特点，但其密度普遍较大、易腐蚀以及

吸波频带较窄等，使其应用领域受限，难以满足轻质、宽频的屏蔽需求[10-12]。碳系具有较好的导电性和导热性、低密度、成本低廉，但加工性较差，较难实现低厚度下的优异电磁屏蔽性能[13-14]。异质复合材料主要以陶瓷、木材、水泥和织物等作为基体材料，根据基体的电磁特性，掺杂相应的导电填料和磁性填料以满足综合的电磁屏蔽效能，具备较好的可加工性和可设计性，应用场景广泛[15-25]。导电聚合物类材料则存在掺杂成本较高、掺杂工艺复杂，力学性能难以达到普通高分子材料的水平等问题[26-29]。相较于上述传统材料，二维材料如石墨烯、MXene、氮化硼、二硫化钼等具有独特的微观结构、高的延展性、低的密度和良好的化学稳定性等特点[30-31]。其中，MXene材料同时具备高的电导率和表面活性，并且其独特的层状结构、丰富的表面基团可通过合成工艺调控，赋予材料多样的化学活性和优异的力学性能，使其在电磁屏蔽防护领域脱颖而出，是一种具有广阔应用前景的新型电磁屏蔽材料[32]。4种典型屏蔽材料性能如表1所示[4,13,31,33-50]。

表1 4种典型材料的电磁屏蔽性能

Table 1 EMI shielding performance of four typical materials

Material		Advantage	Disadvantage	Ref.
Metal		Ultrahigh electrical conductivity(10^4-10^6 S/cm); good thermal conductivity(10^2 W/(m·K)); good mechanical properties; high thermal resistance	Poor processibility; easy corrosion; high density	[13,31]
Carbon material	Carbon black	High electrical conductivity(10^2-10^5 S/cm); good thermal conductivity(10^2-10^3 W/(m·K)); light weight; low cost	Poor processibility	[33-35]
	Graphene	Ultrahigh electrical conductivity(<10^6 S/cm); ultrahigh thermal conductivity(10^3 W/(m·K)); high stability	Poor processibility; high cost	[36-39]
	Graphene oxide	Good processibility; high stability; rich surface chemistry (dipole polarization)	Poor conductivity; high cost	[40-43]
MXenes		Good processibility; high electrical conductivity(10^2-10^7 S/m); rich surface chemistry(dipole polarization)	Poor stability/easy oxidation; poor mechanical properties of macroscopic materials; high cost	[4,44-46]
Polymer composite		Good processibility;high stability; high flexibility; light weight; low cost; high potential for multifunction design	Poor thermal resistance; low strength	[13,37,47-50]

1 电磁屏蔽机理分析

电磁屏蔽是指将电磁波通过反射、入射并将其转化为热能或其他能量形式，实现对电磁波的有效衰减，从而起到电磁屏蔽防护等目的[51-54]。当前，实现电磁屏蔽主要以Léon Foucault提出的涡流效应理论、James Clerk Maxwell提出的电磁场理论和Enrico Fermi提出的传输线理论等作为理论支撑。其中，传输线理论计算简便、易于理解而被广泛使用。传输线理论认为，电磁波在接触电磁屏蔽材料时，部分电磁波因阻抗失配在材料表面发生反射；其余部分进入材料内部，分别通过介电损耗和磁损耗等机制吸收转化为其他形式的能量，以及发生多次反射和散射后逐步衰减；剩余未被反射和吸收的电磁波则穿透电磁屏蔽材料进行传播[55-59]。因此，需要通过反射和吸收电磁波来减少或消除电磁干扰能量。电磁屏蔽材料可分为反射型和吸收型两大类。基于传输线模型，Schelkunoffs理论指出：电磁屏蔽材料的屏蔽性能一般用屏蔽效能(shielding effectiveness，SE)衡量，总屏蔽效能(total shielding effectiveness，SE_T)包括反射效能(shielding effectiveness due to reflection，SE_R)、吸收效能(shielding effectiveness due to absorption，SE_A)和多重反射效能(shielding effectiveness due to multiple reflections，SE_M)[53]：

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \tag{1}$$

$$SE_R = 168 - 10\lg\left(\mu_r f/\sigma_r\right) \tag{2}$$

$$SE_A = 1.31t\left(fu_r\gamma_r\right)^{1/2} \tag{3}$$

$$SE_M = 20\lg\left(1 - e^{-2t/\delta}\right) \tag{4}$$

式中：μ_r为屏蔽体相对于真空的磁导率；f为电磁波的频率，Hz；σ_r为屏蔽体相对于纯铜的电导率；t为屏蔽体的厚度，mm；δ为趋肤深度(电磁波穿透材料的深度)，mm。

SE_R是衡量电磁波在材料表面因阻抗失配被反射而衰减的能力，是由电磁波在自由空间与材料之间的阻抗不匹配所引起。根据阻抗匹配原理：当电磁屏蔽材料阻抗等于自由空间的标准阻抗时，电磁波在材料表面不发生发射，全部进入材料内部，小部分再透射出去。一般而言，在低频段时当电磁屏蔽材料的电导率越高、磁导率越低、SE_R越大。

SE_A是衡量电磁波在材料内部因介电损耗和磁损耗单独或共同作用转化为热能而衰减的能力。电磁波进入电磁屏蔽材料后经过介电损耗与磁损耗的方式被逐渐耗散，其中介电损耗主要包括受材料的电导率影响的电导损耗和极化能力影响的极化损耗；磁损耗则主要通过磁共振和涡流损耗的形式衰减。

SE_M是衡量电磁波在材料内部多次反射后相互干涉导致的附加衰减。研究表明，提高电磁屏蔽材料内部多重反射损耗的途径在于增加电磁波的反射次数和延长传输路径。而材料的结构、形貌以及厚度等也是影响SE_M的重要因素[60]。

2　MXene材料及制备方法

MXene是具有极高电导率的新型电磁屏蔽材料，其化学式是$M_{n+1}X_nT_x$（n可取1、2、3），其中，M代表过渡金属元素（Ti、Ni、V等），X代表C或N，T_x则表示其表面的官能团（—F、—OH、═O等）[61]。MXene材料表面带有丰富的官能团和少量缺陷，典型的MXene结构和相关组成元素如图1所示[8]。

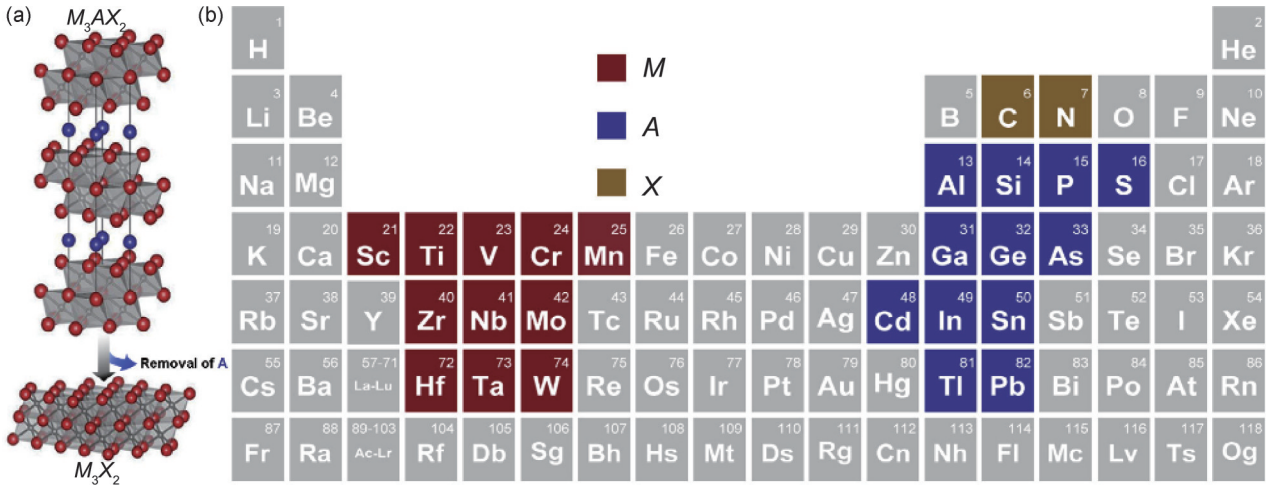


图1　MXenes的结构[8]

（a）M_3AX_2和M_3X_2的结构；（b）可能的组成元素在元素周期表中的位置

Fig.1　Structure of MXenes[8]

(a)structure of M_3AX_2 and M_3X_2; (b)position of possible component elements in the periodic table

根据金属离子的排列和平面的方向，MXene可分为面内有序和面外有序两种形式，其中，按面内顺序排列的M过渡金属称为面内MXenes，M过渡金属在面外方向上规则对称排列称为面外顺序MXenes。其面内与面外有序排列形式影响电学和力学性能，面内有序结构通过紧密的过渡金属平面排列能实现高电导率与各向异性的电磁屏蔽，适用于高功率的储能与定向屏蔽，而面外有序结构则是利用层间对称堆叠增强量子隧穿效应与层间剪切强度，在柔性电子与宽频屏蔽场景表现卓越。

目前，获得层状结构MXene材料的方法主要有氢氟酸刻蚀法、原位形成氢氟酸（HF）刻蚀法、熔盐法、无氟法和电化学法等[8,61-62]，与其他通过弱范德华力将各层固定在一起的二维材料不同，MAX相中的A层通过M-A的强金属键与MXene层键合。因此，MXene的剥离难度大，用HF刻蚀MAX相Ti_3AlC_2，HF的浓度会影响MXene的刻蚀。研究表明，层状二维结构MXene材料具有优异的电磁屏蔽性能，其机理是当入射电磁波到达MXene表面时，由于其表面上丰富的自由电子，可反射一部分电磁波；剩余电磁波进入MXene层状晶格结构并与致密电子相互作用产生电流，导致欧姆损耗而消耗电磁波。此外，层状结构也有利于增强电磁波的内部多次散射和反射，进一步损耗电磁波。

3　MXene基材料的电磁屏蔽性能调控

MXene材料凭借其类金属的高电导率与可调介

电特性，在电磁屏蔽领域展现显著优势。然而，其高电导率会引发强电磁波反射，导致电磁波“二次污染”，干扰精密电子设备或危害生物体健康。目前，研究聚焦于电磁波损耗机制优化，MXene基材料的电磁屏蔽性能调控主要从电磁协同损耗、功能复合和宏观结构设计3个方面展开，如图2所示。电磁协同损耗增强拓展了损耗路径，功能复合破解了MXene材料本征性能局限的困局，宏观结构设计则着眼优化MXene基电磁屏蔽材料的实际场景应用[57]。

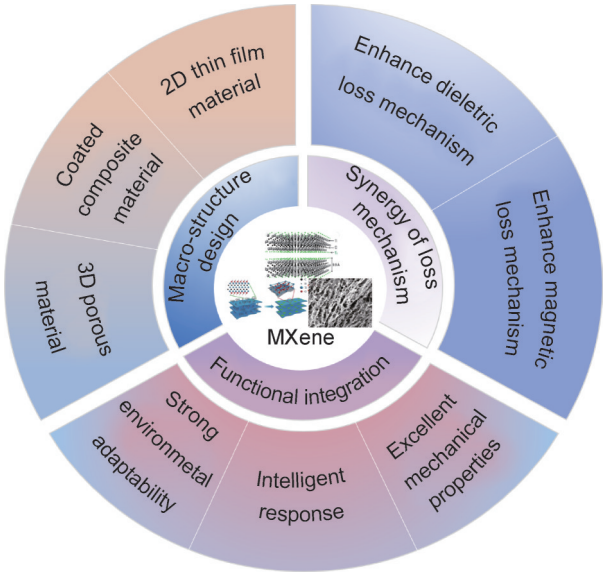


图2 MXene基材料的电磁屏蔽性能调控

Fig.2 Tuning of electromagnetic interference shielding performance of MXene-based materials

3.1 电磁协同损耗

MXene材料属于介电损耗材料。为突破MXene材料单一介电损耗机制的局限，优化其阻抗匹配性能，众多学者通过元素掺杂、端基改性、微观插层、引入导电聚合物等方法来优化MXene基材料的电磁屏蔽机制提升其电磁屏蔽效能[58]。

3.1.1 强化介电损耗机制

材料的介电损耗类型主要包括电导损耗、极化损耗、电离损耗、结构损耗等[63]。利用多组分多重介电损耗机制的协同优化作用改善材料的阻抗匹配性能，是提高MXene基复合材料衰减损耗电磁波能力的有效途径。

端基改性是提升MXene材料介电性能的一个重要手段，主要通过胺基分子、其他有机化合物、聚合物分子、硅烷基偶联剂实现官能化[59,64]。Rajavel等[65]通过MXene（Nb_2CT_X和$Ti_3C_2T_X$）在金属盐$AgNO_3$作用下产生自还原氧化，成功构建了具有多种非均相组件的多层二维MXene/金属氧化物/Ag的三元杂化纳米结构，金属氧化物一方面对MXene的表面进行了氧化改性，转化表面基团形成TiO_2，另一方面，与MXene构成的异质界面通过局域电场畸变-界面极化主导的方式强化了介电损耗性能，同时Ag的等离子体共振进一步协同提升能量耗散。研究表明，该结构在厚度为1 mm时，8～18 GHz的宽频段上电磁屏蔽效能超过65 dB。Feng等[66]在$Ti_3C_2T_X$纳米片中插入Mn^{2+}，发现插层的Mn^{2+}倾向于与含O的基团键合，并扩大$Ti_3C_2T_X$纳米片层间距，有利于在电化学过程中将电解质离子嵌入电极材料层中。与原始纳米片相比，电磁屏蔽效能提升1倍。Xu等[67]利用电荷转移机制在MXene与胺之间构建Ti—N键，形成了掺氮$Ti_3C_2T_X$的新型结构，实现在X频段550 ℃下，电磁屏蔽值最高达到62.15 dB。氮掺杂改性就是在MXene基团表面引入含氮官能团，外来电子的加入有利于提升电导率，增强对电磁波的反射。除了金属氧化物可作为“间隔物”抑制MXene片层堆叠，也可以构成Ag^+和MXene电导率的梯度变化与氮掺杂引入偶极子极化和界面极化进一步增强极化损耗，同时利用多种损耗协同机制解决了高电导率带来的趋肤效应问题。例如，Miao等[68]采用插层设计思路利用电磁力作用除去水中磁性氧化物，将银纳米线（AgNW）插入$Ti_3C_2T_X$MXene纳米片中，合成MXene/AgNW复合材料，插入的纳米材料有效调控了层间距，实现了极化损耗的强化，提升导电性，从而增强电导损耗，通过构建三维导电网络和多级界面效应，实现极化损耗和电导损耗的协同作用，显著提升介电损耗能力。

除了上述几种强化手段，热退火处理可对MXene材料的本征性能实现进一步优化，从而通过提升介电性能达到调控电磁屏蔽性能的目的，Iqbal等[69]在探索Ti_3CNT_X和$Ti_3C_2T_X$对电磁波吸收的损耗机制时，对两种材料进行热退火处理。研究发现，相较于更高电导性的$Ti_3C_2T_X$，Ti_3CNT_X经350 ℃热处理后，表现出远超$Ti_3C_2T_X$的电磁屏蔽性能，厚度为40 μm的Ti_3CNT_XMXene薄膜在8～12 GHz宽频段内的电磁屏蔽值可达112 dB。热退火处理去除了表面的嵌层水、吸附分子以及羟基端基，从而，改善了MXene材料的电导率和诱导孔隙率。利用多组分多重介电损耗机制的协同优化，研究人员突破了传统材料中趋肤效应与损耗类型的限制，可以实现MXene基复合材料的宽频带响应、高稳定性和轻量化等目标，但异质界面的纳米级界面精度的调控有待进一步研究。

3.1.2 强化磁损耗机制

理想的电磁屏蔽材料要求兼具优良的介电损耗

与磁损耗性能。在MXene介电损耗特性基础上，还可以通过在MXene中引入磁性填料来增强磁损耗能力，通过引入磁性材料，如铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)以及金属有机框架材料(MOF)等形成MXene基电磁损耗复合材料，可以有效改善MXene基材料的阻抗匹配性能。同时，MXene基材料丰富的表面官能团能够提供有效的接触路径与磁性材料复合，并且MXene基材料的层状结构能够进一步强化对电磁波的内部多重反射损耗，增强在低频段的电磁屏蔽性能，提升其在宽频段上的电磁屏蔽效果。

Jin 等[70]成功制备 CoNi/$Ti_3C_2T_X$MXene 复合材料，CoNi作为磁性填料，既能很好地形成梯度阻抗界面，并且降低电磁波在材料表面的反射，促使更多电磁波进入材料内部被吸收，将CoNi合金颗粒均匀分布在 $Ti_3C_2T_X$MXene 的片层间。通过优化组分配比后，电磁屏蔽效果明显，经测试当 $Ti_3C_2T_X$MXene 与 CoNi 合金的质量比达到1∶6，厚度为2.2 mm时，有效吸收带宽达3.74 GHz，在8.99 GHz频率下，最小反射损耗值(minimum reflection loss，RLmin)可达到−42.5 dB，在低频段展现出优异的电磁波吸收效果。Zhang等[71]制备的 Fe_3O_4@$Ti_3C_2T_X$型复合材料采用溶剂热技术，在15.7 GHz频率下展现出卓越的吸收能力，RL_{min}达到了−57.2 dB，且厚度为4.2 mm时，有效吸收频带宽度达到1.4 GHz。Huang等[72]通过将六方 $SrFe_{12}O_{19}$薄片组装到 $Ti_3C_2T_X$MXene/MWCNT 衬底中，经简单过滤后成功制造了磁性 $Ti_3C_2T_X$基复合材料。磁性 $Ti_3C_2T_X$基复合材料制备过程和不同 $SrFe_{12}O_{19}$含量下的电磁屏蔽效能如图3所示[72]。通过磁性填料的引入，改善了该薄膜的磁损耗，在改善磁损耗的同时，还可以有效提升均匀性和屏蔽性能。强化介电损耗与电磁双重损耗MXene基电磁屏蔽复合材料屏蔽性能如表2所示[66-67,72-75]。

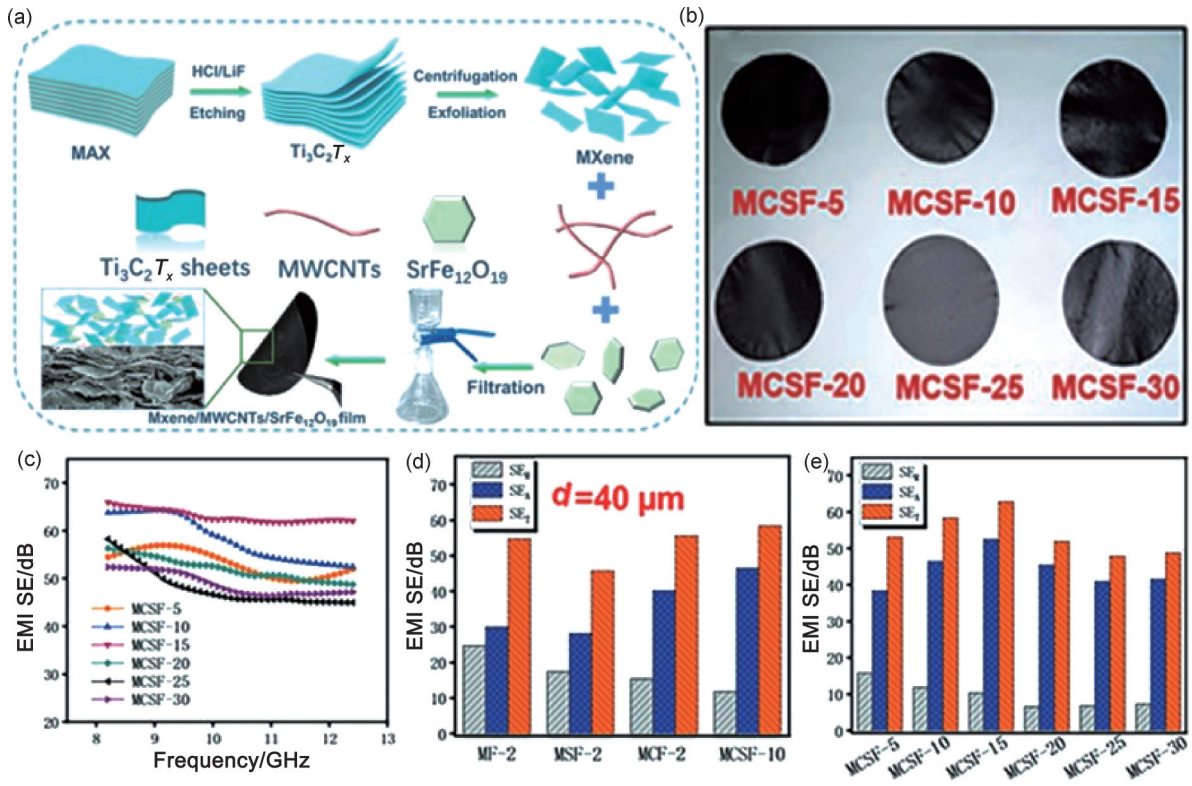


图3　$Ti_3C_2T_X$MXene/MWCNTs/$SrFe_{12}O_{19}$复合材料[72]

(a)制备过程示意图；(b)～(d)不同$SrFe_{12}O_{19}$薄片含量的MCSF系列的数字图像、电磁屏蔽效能、SE_R、SE_A和SE_M值；(e)MF-2、MSF-2、MCF-2、MCSF-10在相同厚度40 μm时的SE_R、SE_A和SE_M值

Fig.3　$Ti_3C_2T_X$MXene/MWCNTs/$SrFe_{12}O_{19}$ composite material[72]

(a)schematic diagram of preparation process；(b)-(d) digital images，electromagnetic interference shielding effectiveness and values of MCSF series with different $SrFe_{12}O_{19}$ content；(e)sum values of MF-2，MSF-2，MCF-2 and MCSF-10 at the same thickness of 40 μm

磁损耗机制能够降低电磁屏蔽反射率，提高对电磁波的吸收，但MXene基材料的介电损耗与磁损耗的耦合效率偏低，磁-介电参数匹配模型仍需完善，相较于MXene材料本征的高电导率而言，导致在低频段因趋肤效应导致电磁波被表面反射而非吸收，阻抗匹配较差，表面官能团的亲水性使MXene表面易氧化，层

表 2 强化介电损耗和磁损耗机制 MXene 基电磁屏蔽材料的屏蔽性能

Table 2 Shielding performance of MXene-based electromagnetic interference shielding materials with enhanced dielectric loss and magnetic loss mechanisms

Material Composite	Material	Thickness/μm	Frequency/GHz	SE/dB	Ref.
Dielectric loss mechanism	Mn^{2+} introduced $Ti_3C_2T_X$ film	2.5	8.2-12.4	44.3	[66]
	Nitrogen-doped $Ti_3C_2T_X$/paraffin comp		8-12.4	62.15	[67]
	$Ti_3C_2T_X$MXene-Al comp film	39	X	⩾80	[73]
Magnetic loss mechanism	$Ti_3C_2T_X$MXene/MWCNTs/$SrFe_{12}O_{19}$ comp film	40	X	62.9	[72]
	Polyvinylidene fluoride(PVDF)/$Ti_3C_2T_X$MXene(10%)/nickel nanochains comp film	100	X	19.3	[74]
		360	X	34.4	
	MWCNTs/Fe_3O_4/$Ti_3C_2T_X$MXene comp film	52	X,Ku	49	[75]

Note: % refers to the mass fraction of MXene; comp: for composite; C-fiber: for carbon fiber; SE: shielding effectiveness

状结构易团聚、低频段的磁损耗缺乏，相较于多损耗机制的复合材料，频带较窄，难以完全胜任宽频段的多种场景应用。

3.2 功能复合

为应对复杂电磁环境、极端场景和绿色安全的应用需求，MXene 基电磁屏蔽材料的应用需求不断多元化，已从单一性能优化转变为电磁-力学-环境-能源多维度的功能集成，从被动防护转变为智能调控一体多能。

3.2.1 力学性能优异的 MXene 基电磁屏蔽材料

在柔性电子器件领域中，要求电磁屏蔽材料能够在 10^4 次弯折后仍保持 90% 以上的屏蔽效能，而在航空航天领域，电磁屏蔽材料则要求需要兼顾轻量化和高强度。

为了使新型 MXene 基电磁屏蔽材料获得优异的力学性能，众多研究者围绕结构创新和功能材料复合等手段开展了大量研究，Yuan 等[76]采用褶皱结构与夹芯设计相结合来制备兼具极大拉伸强度和高电导率的电磁屏蔽复合材料，制备出高柔性可拉伸的 $Ti_3C_2T_X$MXene 包覆静电纺丝聚氨酯(polyurethane, PU)复合材料，在 30% 拉伸变形范围内电磁屏蔽效能可达 20 dB 以上。刘张硕等[77]参考珍珠母微纳米结构，利用简单的溶液共混及真空抽滤方法，混合纤维素纳米晶(cellulose nano crystals, CNC)和 MXene，经层层组装制备了高性能 MXene 基复合薄膜。经测试该薄膜具有 10^4 S/m 的高电导率和优异的电磁屏蔽性能，厚度为 8 μm 时电磁屏蔽效能超过 40 dB，同时，力学性能有了显著提高，拉伸强度从 18 MPa 提高到 57 MPa，韧性从 70 kJ/m^3 提高到 313 kJ/m^3。Liu 等[73]通过引入 Al^{3+} 离子强化 $Ti_3C_2T_X$ 纳米片层间的界面黏附力，该材料的拉伸强度从 28.7 MPa 提高到 83.2 MPa，电导率保持在 2.656×10^5 S/m。经测试，厚度为 39 μm 的 $Ti_3C_2T_X$ 薄膜在 8～12 GHz 宽频段上电磁屏蔽值超过 80 dB。Cao 等[78]借鉴贝壳珍珠层的“砖-泥”仿生结构，将具有高机械强度和极好的柔韧性，通常用作复合材料的增强材料的纤维素纳米纤维(cellulose nano fibers, CNF)与 $Ti_3C_2T_X$(d-$Ti_3C_2T_X$, MXene)通过简单的真空辅助过滤自组装方法进行组装，实现复合纸的二元强化和增韧，使其具有 135.4 MPa 的拉伸强度和 16.7% 的断裂伸长率，以及出色的折叠耐久性。此外，该复合纸在超薄厚度(47 μm)下可达到 739.4 S/m 的高电导率和 2647 dB·cm^2·g^{-1} 的电磁屏蔽性能，实现了电磁屏蔽兼具轻质增韧的多功能化。Duan 等[79]通过简单的电流动力学原子化沉积、逐层堆叠和热压技术制备了一种高强、高韧和耐用的 $Ti_3C_2T_X$MXene/碳纤维织物/热塑性聚氨酯复合材料。首先，将碳纤维织物置于丙酮中回流 24 h，然后用去离子水反复洗涤并干燥，将退浆的碳纤维织物在 70 ℃的浓硝酸溶液中处理 1 h，在其表面引入更多的含氧官能团。通过范德华力和共价键的协同增强作用将复合材料的拉伸强度提高到 170.2 MPa，远高于其他 MXene 基复合材料。此外，$Ti_3C_2T_X$MXene/CFf/TPU 复合材料的电磁屏蔽性能也与 MXene 用量有关，随着 MXene 质量分数的增加，电磁屏蔽效能最高可达 40.4 dB。力学性能优异的 MXene 基材料在电磁屏蔽领域的未来发展前景广阔，但由于 MXene 片层堆叠易导致应力集中，在保持高电导率大于 10^4 S/m 时，复合材料的断裂韧性普遍低于 10 MPa·m$^{1/2}$，存在实现机

械-电磁性能协同机制的调控矛盾，所以如何实现超强、超韧、超宽频的综合性能提升是未来发展的一个重要课题。

3.2.2　智能响应的MXene基电磁屏蔽材料

在极端环境保护、智能可穿戴设备、通信基站热管理等领域要求材料具有智能响应功能，如满足不同温度和光照条件下的智能光热转换、电热转换等温控需求。

Zhang等[80]利用静电纺丝结合原位聚合法制备具有Janus结构的Fe_3O_4/聚酰亚胺(polyamide acid，PAA)纤维膜，并在纤维膜上沉积$Ti_3C_2T_X$纳米片和热酰亚胺化处理，最终得到了$Ti_3C_2T_X$-(Fe_3O_4/聚酰亚胺(polyimide，PI)复合材料。该材料两侧特性不同：Fe_3O_4/PI侧具有出色的疏水性和绝缘性，而$Ti_3C_2T_X$侧则表现出亲水性和卓越的导电性。当$Ti_3C_2T_X$质量分数为80%时，具有超高的电磁屏蔽性能以及优异的力学性能，其电磁屏蔽效能、拉伸强度和杨氏模量分别达到66 dB、114.5 MPa和5.8 GPa。同时，$Ti_3C_2T_X$侧也具有优异的电热和光热转换性能，当外加电压为4 V时，稳定的表面温度可达到108 ℃；当用200 mW/cm^{2}的模拟太阳光照射时，稳定的表面温度可达到95 ℃。Wang等[81]也成功制备具有Janus结构的MXene/PAA薄膜，实现电磁屏蔽、电热转换和光热转换的多功能集成。该研究中在水溶性聚酰胺酸的合成基础上，采用分层溶液浇铸法结合热退火成功制备。Janus结构赋予了薄膜一面导电一面绝缘的不同特性。当MXene含量为50%时，MXene/PI薄膜电磁屏蔽效能可达57 dB。同时，该薄膜具有优异的电热和光热转换性能，在2 V电压下，MXene/PI薄膜可迅速达到108 ℃的稳定温度。在模拟功率密度为120 mW/cm^{2}的太阳辐射下，表面稳定温度可达87 ℃。此外，MXene/PI薄膜表现出优异的结构稳定性和阻燃性。Xia等[82]通过真空辅助过滤法，将MXene和AgNW组成不对称结构的自支撑状MXene-MXene@AgNWs-MXene-AgNWs(M/MA/M/A)薄膜。该薄膜具有出色的电磁屏蔽性能和焦耳热能力。经检测，当该薄膜厚度为3.64 μm时，在X波段实现41.12 dB的电磁屏蔽效能，厚度增加到9.02 μm时电磁屏蔽效能可达62.08 dB。特别需要注意的是，AgNW形成了完整的导电和热传输框架，可以用超低电压驱动，在0.3～1.0 V的电压下从室温对应的升到56.4～227.7 ℃的高平衡温度区间。由于其具有超低电压驱动的电子加热性能和出色的电磁屏蔽性能，与可再生能源相结合，可以作为人类安全稳定的可穿戴设备、防冻除冰的电子设备的外部绝缘层，相关制备和性能表征如图4所示[82]。目前在5G基站热-电磁协同管理、极地科考装备智能温控隐身等领域，智能响应的MXene基电磁屏蔽材料已进入工程验证阶段。在未来，结合仿生结构设计的智能响应MXene基电磁屏蔽材料需重点突破宽光谱响应与超薄化集成的关键技术瓶颈。

3.2.3　环境适应性强的MXene基电磁屏蔽材料

在高温、抗氧化、自愈合等复杂应用场景下，众多学者也开展了针对MXene基电磁屏蔽材料的环境适应性研究。如火星探测和海洋测绘等极端恶劣环境下，MXene会出现氧化和导电性能下降等问题，从而影响材料电磁屏蔽效果。针对这一问题，储娜等[83]采用简单的刮膜法和热酰亚胺化法制备了综合性能良好的MXene-羧基化碳纳米管(carboxylic carbon nanotubes，CCNT)/聚酰亚胺(PI)复合材料。MXene和CCNT协同作用构筑了良好的导电网络，当MXene和CCNT含量均为12.5%，厚度为80 μm时，可达到5.88 S/cm的电导率和26.49 dB的电磁屏蔽效能，并且在极端恶劣环境下电磁屏蔽效能稳定。此外，还具有53.17 MPa的拉伸强度、超过500 ℃的优异热稳定性和阻燃性能。Cheng等[84]通过氢键诱导自组装制备了一种多功能MXene/聚芳纶复合膜，实现了多频带的宽频电磁屏蔽性能，厚度仅为20 mm时在0.2～1.6 THz的电磁屏蔽值高达52.7 dB以及在8.2～12.4 GHz的电磁屏蔽值达38.9 dB同时由于氢键的作用力赋予该材料493 MPa的力学性能和优异的耐热性，复合膜在各种恶劣环境中同样也表现出出色的耐久性，包括500 ℃的30 s持续的热冲击、抗弯折性能和耐酸/碱/盐腐蚀。

喷射沉积技术被广泛应用于在静电纺丝纤维表面沉积导电填料，可有效地将导电纳米颗粒均匀地覆盖在纤维表面上。利用该技术，可以在静电纺丝纤维上涂覆多种导电纳米颗粒。随着这些颗粒的加入，纤维的表面电阻率会发生变化，进而逐步提升复合材料的电磁屏蔽性能，并且能够进一步提升抗氧化能力。Li等[85]采用静电纺丝与喷雾相结合的方法，成功制备了具有多层多孔网络结构的MXene/聚氨酯(PU)复合材料，电磁屏蔽效能能达到38 dB，MXene本身具有的多层多孔网络结构及其本身优异的导电性和导热性，赋予较好的焦耳加热性能，并且外层的PU能够有效减缓氧气的进入，可一定程度上减少了内层MXene的氧化，提升抗氧化能力，从而保证复合膜的使用寿命。

开发具有额外物理化学特性的轻质聚合物屏蔽膜对于解决复杂的当代安全需求具有重要意义。然而，在分子水平上进行精准结构设计仍然是一个挑战。为此，Bai等[86]组装了一种独特的Janus复合膜，

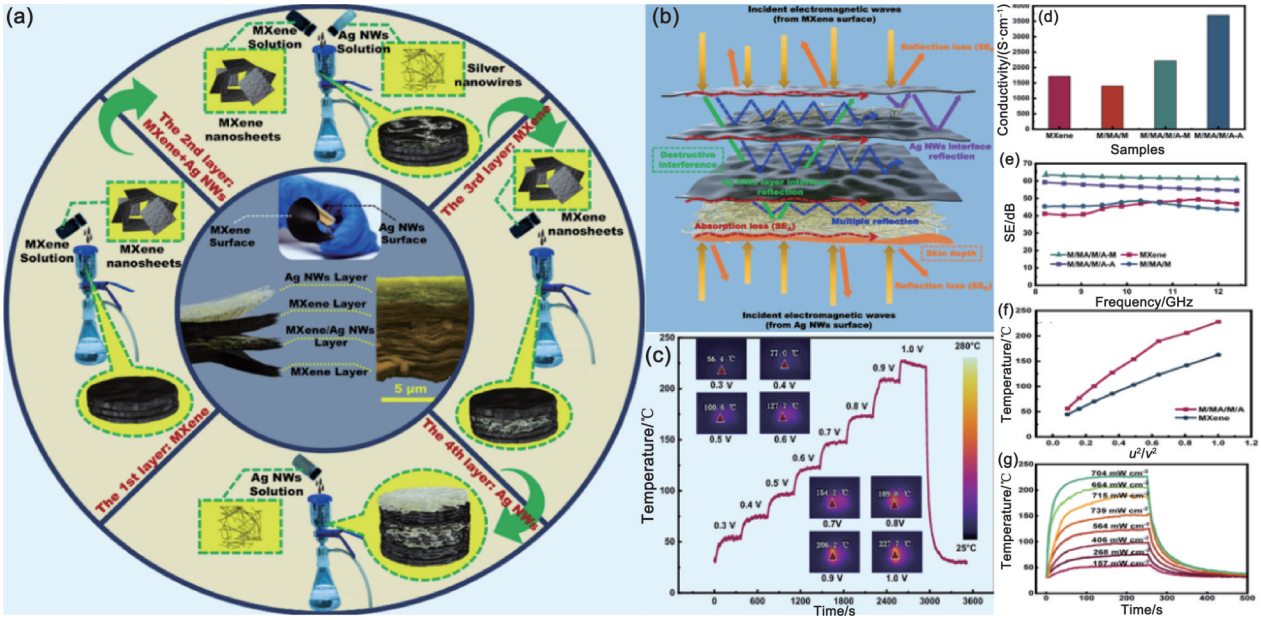


图 4 MXene-MXene@AgNWs-MXene-AgNWs(M/MA/M/A)杂化薄膜[82]

(a)制造和表征示意图;(b)MXene@AgNWs 电磁屏蔽机制图;(c)在不断增加的驱动电压下 M/MA/M/A 薄膜的温度曲线;(d)MXene、M/MA/M、M/MA/M/A-M 和 M/MA/M/A-A 薄膜的 X 波段 EMISE;(e)不同复合膜的电导率;(f)MXene 薄膜和 M/MA/M/A 薄膜的 U2-温度曲线;(g)0.6 V 电压下的 M/MA/M/A 薄膜重复加热曲线

Fig.4 Hybrid film of MXene-MXene@AgNWs-MXene-AgNWs(M/MA/M/A)[82]

(a)schematic diagram of fabrication and characterization;(b)MXene@AgNWs electromagnetic interference shielding mechanism diagram;(c)temperature curves of M/MA/M/A films at increasing driving voltages;(d)X-band EMISE for MXene, M/MA/M, M/MA/M/A-M and M/MA/M/A-A films;(e)conductivity of different composite films;(f)U2-temperature curves for MXene films and M/MA/M/A films;(g)M/MA/M/A film reheating curve at a voltage of 0.6 V

由导电 AgNWs/MXene1D/2D 网络和聚氨酯弹性体(MPHEA)组成,显示出高达 80 dB 的电磁屏蔽效能和显著的红外隐身能力,可在室温至 50 ℃的宽温度范围内工作。此外,膜中赋予的化学交联使其具有优异的机械强度、自愈合能力和优越的黏附力。即使在 40% 的应变下仍能保持大于 20 dB 的电磁屏蔽性能,甚至在机械损伤和自愈合后可以恢复 90% 的屏蔽效率,如图 5 所示[86]。

多功能化的 MXene 基电磁屏蔽材料的研制难点主要集中于性能协同调控、材料加工复杂性和多功能兼容性等方面。如何通过复合功能材料、创新结构设计和优化制备技术来突破这些难点,是推动拓宽 MXene 基材料应用领域的重要课题。一些多功能性的 MXene 基电磁屏蔽材料如表 3 所示[76,78-81,83-86]。

3.3 宏观结构设计

为优化 MXene 基电磁屏蔽材料的实际工程应用,众多学者围绕 MXene 基材料的宏观结构设计开展了大量研究工作。目前常见的宏观结构形式主要有二维薄膜材料、涂敷型复合材料和三维多孔材料,具体包括薄膜、涂层、织物、气凝胶、水凝胶、泡沫等[87-89]。

3.3.1 二维薄膜材料

MXene 材料可通过真空抽滤、旋涂等方式形成具有高度有序的层状排列的致密薄膜[59],该薄膜主要以层压复合结构和逐层组装(layer-by-layer,LBL)设计为主。研究表明,制备工艺是影响二维薄膜电磁屏蔽效能的重要因素[13,68]。吕通等[90]采用原位生成 HF 刻蚀法制备了大片单层低缺陷的 $Ti_3C_2T_X$,并通过真空抽滤法制得 $Ti_3C_2T_X$ 薄膜材料。经测试,该膜材料的电导率高达 3280 S/cm,同时在膜厚为 8 μm 时,电磁屏蔽效能可达 60.6 dB。Chen 等[91]成功制备了不含插层剂残留的纯净 $Ti_3C_2T_X$ 薄膜。该薄膜材料能够在水氧环境中长期存在而不影响电导率和结构完整性,且在厚度为 3 μm 时,具有 60 dB 的电磁屏蔽效能。

部分学者尝试在二维 MXene 薄膜片层间添加不同电磁屏蔽材料并通过 LBL 工艺来提升屏蔽效能。Cao 等[78]利用真空抽滤法在 Ti_3CNT_X 片层间引入碳纳米纤维,成功制备了类似“砖泥结构”的 Ti_3CNT_X/碳纳米纤维薄膜,当 Ti_3CNT_X 质量占比为 80% 时,复合薄膜具有最高的电磁屏蔽值,为 25.8 dB。此外,多层结构设计是抑制 MXene 二维纳米片团聚的有效策略,其通过优化层间相互作用和空间排列,显著提升材料性

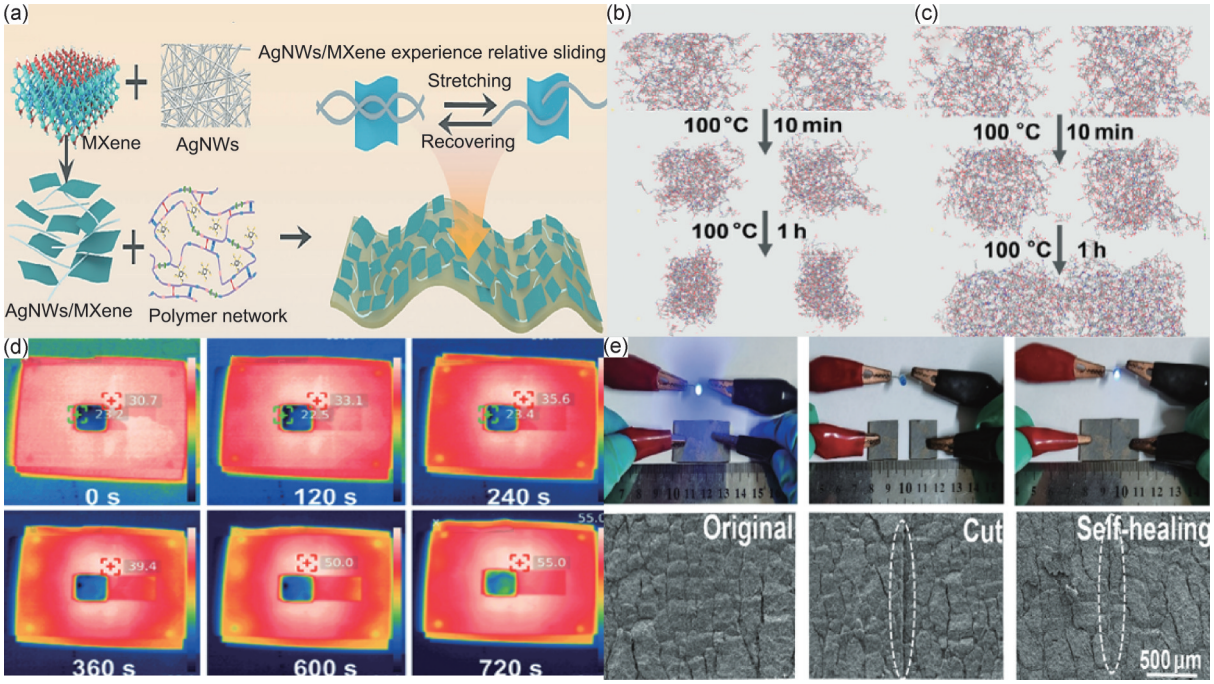


图5　Janus复合薄膜MPHEA@AgNWs/MXene[86]

(a)设计方案和结构特性;(b)无肼氨基甲酸酯键的分子动力学模拟;(c)有肼氨基甲酸酯键的分子动力学模拟;(d)25 ℃环境温度下在超过50 ℃加热下红外隐身能力随时间的变化;(e)复合膜的自修复过程

Fig.5　Janus composite film MPHEA@AgNWs/MXene[86]

(a)design scheme and structural characteristics;(b)molecular dynamics simulation of hydrazine-free carbamate bonds;(c)molecular dynamics simulation with hydrazine carbamate bonds;(d)changes in infrared stealth capability over time at ambient temperatures of 25 ℃ and heating above 50 ℃;(e)self-healing process of composite membrane

表3　多功能性的MXene基电磁屏蔽材料的屏蔽性能

Table 3　Shielding performance of multifunctional MXene-based electromagnetic interference shielding materials

Multifunctional integration	Material	SE/dB	Ref.
Excellent mechanical property	MXene/PU fabric	≥20(X band)	[76]
	d-$Ti_3C_2T_X$/CNF comp paper	SSE =2647 dB·cm^2·g^{-1} (X band)	[78]
	$Ti_3C_2T_X$MXene/CF/TPU fabric	40.4(X band)	[79]
Intelligent response	$Ti_3C_2T_X$(80%)-Fe_3O_4/PI comp films	66(X band)	[80]
	MXene(50%)/PI films	57(X band)	[81]
Strong environmental adaptability	(MXene-CCNT/PI) comp films	26.49(X band)	[83]
	MXene/Polyaramid comp film	52.7(0.2-1.6 THz) 38.9(8.2-12.4 GHz)	[84]
	MXene/PU comp film	38(X band)	[85]
	Janus MPHEA@AgNWs/MXene comp film	80(X band)	[86]

Note:% refers to the mass fraction of MXene;comp: for composite; C-fiber: for carbon fiber;SE:shielding effectiveness;SSE:specific shielding effectiveness

能。主要以调节沉积次数精确控制MXene薄膜的厚度和层数,介电梯度设计以及导电-导磁层复合3种设计为主。Yun等[92]采用层层自组装法构建出具有不同层数的$Ti_3C_2T_X$薄膜,其中单层薄膜可实现20%屏蔽效果,层数达到24层时,电磁屏蔽值可达20 dB。

大部分研究人员则采用异质界面设计来实现多层结构,形成协同增强的复合结构,包括介电梯度设计和导电-导磁层复合两种设计。Weng等[93]采用介电梯度设计思路,利用逐层旋转喷涂法快速组装不同介电性能的$Ti_3C_2T_X$MXene/碳纳米管复合膜,制得的半透明

LBL-MXene-CNT复合膜的电磁屏蔽性能优异，电导率为130 S/cm，比电磁屏蔽效率为58187 dB·cm²·g⁻¹。同样Tian等[94]基于LBL组装方法，兼顾电磁屏蔽效能与多功能性，以MXene为屏蔽核心层，外层包覆柔性或力学增强材料，制备了一种电磁屏蔽性能优并且可实现焦耳加热性能的轻质、耐磨织物——聚苯胺/MXene/碳纤维织物，其厚度低至0.55 mm，在5个循环的LBL组装后电磁屏蔽效能可达26.0 dB。除了上述采用层压复合和LBL工艺制备的几种典型材料外，CMPN（Carbonized MXene@ PAN/Ni）复合膜的制备采用了静电纺丝和喷涂工艺相结合的制备方法实现多层结构设计，制备工艺如图6所示[95]。

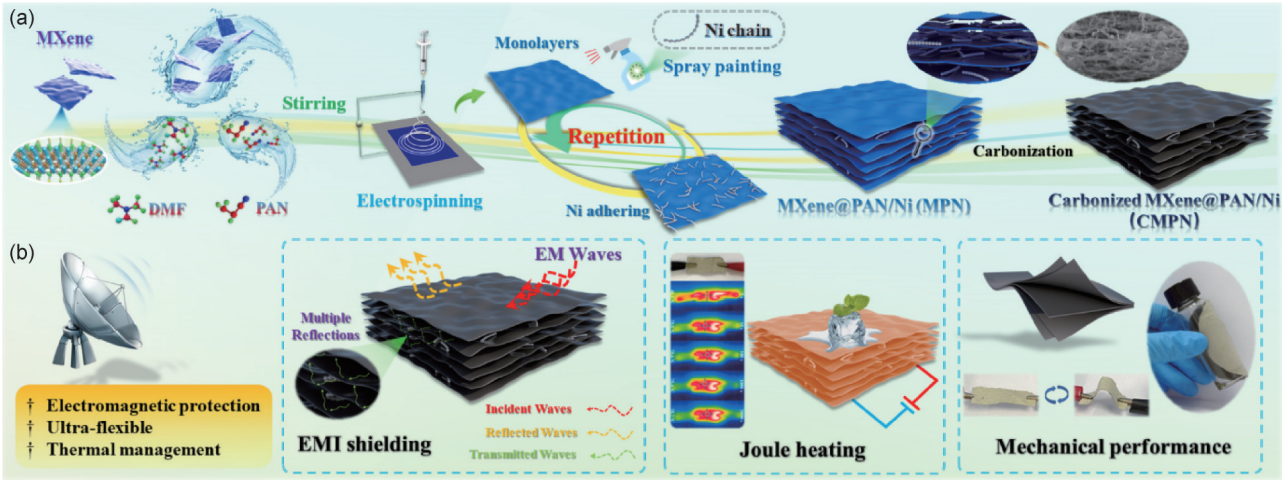


图6 Carbonized MXene@PAN/Ni（CMPN）复合膜的制造工艺示意图[95]

Fig.6 Schematic diagram of manufacturing process of Carbonized MXene@PAN/Ni（CMPN） composite film[95]

MXene薄膜具有高电导性、优异力学性能和高电磁屏蔽性能的优点，但存在溶液刻蚀阶段易产生范德华力和氢键相互作用导致堆叠和团聚带来的稳定性差和分散液再堆积、刻蚀传统方法产率低和逐层组装工艺等依赖精密设备，规模化生产难度大等问题。如果能解决上述问题，将有望进一步扩大在下一代轻便微型电子器件、航空航天以及柔性、高电磁屏蔽性能服装防护等领域的应用。

3.3.2 涂覆型复合材料

涂覆型复合材料主要由电磁屏蔽涂层和基体材料复合而成。涂层具有厚度可调、工艺成本低、易实现功能叠加等优势；基体材料主要有织物、聚合物、金属、木材、水泥等。因此，涂覆型复合材料是一种理想的电磁屏蔽材料实现形式，制备方法主要有逐层法、浸渍法、物理法、喷涂/旋涂法、喷雾干燥法和喷墨打印等。在柔性可穿戴设备领域应用前景广泛，是电磁屏蔽领域中的热点[90,96-99]。

Uzun等[99]利用浸涂易于扩展的优势，采用浸渍法将传统的棉麻织物浸涂在无添加剂的$Ti_3C_2T_X$MXene水性染料中制备用于电磁干扰屏蔽的高导电织物。织物的$Ti_3C_2T_X$负载量和电导率随着浸涂循环次数的增加而增加。仅经过4次浸涂循环后，$Ti_3C_2T_X$涂层（<15%）棉麻织物的电磁屏蔽效能在X波段范围内达到了40 dB，当浸涂循环次数增加至24次时，$Ti_3C_2T_X$质量占比分别为54%的棉织物和48%的亚麻织物，其总电磁屏蔽效能均提升到至80 dB。在具备优良电磁屏蔽性能的同时，还具有长期稳定性。经试验在环境条件下将织物存放2年后，$Ti_3C_2T_X$涂层棉和亚麻织物的平均电磁屏蔽效能分别仅下降了约8%和约13%。Wang等[100]通过将聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）织物浸入到聚吡咯（PPy）/$Ti_3C_2T_X$-MXene悬浮液中，然后涂覆有机硅制备出一种电磁屏蔽纺织品。所得到的多功能纺织品具有约1000 S/m的高导电性，并且该三层织物在1.3 mm的厚度下具有90 dB的优异电磁屏蔽效能。薄硅酮涂层使具有亲水性的PPy/MXene装饰纺织品产生疏水效应，实现保持纺织品透气性的同时具有优异的防水性能。物理混合法和喷涂/旋涂法也是常用的制备方法，Chang等[101]通过简单浇铸和疏水改性喷涂的方法制备了超薄柔性多功能性的电磁屏蔽MXene/AgNWs/ PEDOT:PSS涂层。该涂层在厚度为10 μm的电磁屏蔽效能达到31.5 dB。涂层同样赋予了出色的电/光热转换能力、优异的疏水性、出色的界面附着力和机械耐磨性，所以MXene/聚合物复合材料非常适合涂料应用。对于在寒冷和高湿度环境中的高功率和高频电子设备起到较好的保护作用。

涂覆型复合材料具有较好的工业基础和制备技术，但立足现有技术，规模化生产带来的高昂成本也

是限制MXene基材料发展的一个因素，为了更好地与MXene相互作用，需要通过引入越来越多的官能团来修饰聚合物基体或MXene。最后，构建轻质高效的涂覆型复合材料是未来的主要研究目标之一[97]。

3.3.3　三维多孔材料

三维多孔MXene基材料不仅可有效实现电磁屏蔽材料在实际应用中的轻量化，还可通过微纳米孔提升对入射电磁波的吸收，同时构建更多的活性位点，提升其电化学性能。目前常采用自组装法、模板法、化学发泡工艺等方式来制备三维多孔材料。

Lin等[102]利用离子扩散诱导凝胶化方法制备出具有良好强度、柔性和疏水性的MXene泡沫。离子扩散诱导凝胶化，并结合了自组装的动态特性与离子调控的精准性来制孔，其独特的交联多孔结构使得轻质MXene泡沫在潮湿环境中具有良好的可折叠性、耐用性和稳定性。在85 μm厚度下电磁屏蔽值为51 dB。Zhao等[47]利用氧化石墨烯辅助水热组装和定向冷冻方法制备出高导电多孔三维气凝胶。当$Ti_3C_2T_X$体积分数为0.74%时，电导率和电磁屏蔽值分别高达695.9 S/m和56.4 dB。多孔结构在有效提升电磁屏蔽效能的同时，还能实现高稳定性以及低占比，从而带来一定程度上成本的降低。

除了自组装法，研究人员还采用模板法来制孔，Yang等[46]通过冰模板冷冻和盐析方法制备过度金属碳化物(Ti_3C_2-MXene)/聚乙烯醇仿生水凝胶，其蜂窝状排列的多孔结构使得该水凝胶中MXene仅在0.86%的体积占比时，具有在8.2～12.4 GHz宽频带的电磁屏蔽效能达57 dB的优良性能。Sambyal等[103]利用双向冷冻法制备超轻高强度$Ti_3C_2T_X$/CNTs复合气凝胶，实现了在X波段上，厚度为3 mm时电磁屏蔽值为103.9 dB的优异性能。

化学发泡是通过发泡剂分解或反应释放气体，在材料内部形成多孔结构的工艺。Liu等[104]通过将MXene片组装成膜，然后使用肼诱导的发泡工艺，提升发泡速率，并且泡孔尺寸和分布可控，成功制备具有柔性和疏水性的MXene泡沫，与未发泡的薄膜相比，轻质MXene泡沫实现了70 dB的电磁屏蔽效能，屏蔽性能提升较大。

三维多孔MXene基材料具有轻质、高疏水性、高电磁屏蔽效能等优点，但在实现高质量孔的制备上受到3方面限制：第一，制孔工艺要求高，产量受技术限制，目前仍未实现大批量生产；第二，实现高孔隙率的同时会降低材料力学性能，使其韧性下降；第三，在高温、强腐蚀复杂环境中易发生材料的孔道坍塌，稳定性较差。未来可以通过创新制备技术、结合智能算法等实现三维孔结构的优化，推动其在高端制造与绿色安全生产的规模化应用。不同宏观结构设计的MXene基电磁屏蔽材料性能指标如表4所示[35,46-47,68,78,90-92,99-100,104-107]。

4　结束语

从多机制协同、功能复合、宏观结构设计3个方面优化调控MXene基电磁屏蔽材料的综合性能，仍面临多重挑战，亟待解决的问题包括以下方面：

(1)MXene基电磁屏蔽材料在实现“薄”的材料厚度时面临材料选配、微观力作用等问题，MXene材料纳米片层易发生堆叠，结构设计时骨架材料的厚度限制整体减薄。

(2)MXene基电磁屏蔽材料在追求“轻”的量化指标上受填料密度限制，结合多孔结构设计时，制备方式较为复杂，且易降低力学性能，极大地影响了实际场景应用。

(3)MXene基电磁屏蔽材料在突破“宽”的频段限制时实现高电导性MXene材料本征特性与阻抗匹配的平衡具有挑战性，有效吸收带宽较窄，单一导电网络难以匹配宽频电磁波阻抗。

(4)MXene基电磁屏蔽材料在突破“强”的电屏蔽性能时，存在微观结构、表面官能团和多因素耦合作用的电磁屏蔽损耗机制的影响机理探究还不够深入，如热处理后形成的超材料样结构对电磁波吸收的增益机制还尚未可知。

基于以上存在的问题和挑战，未来主要围绕微观影响机制、综合性能调控和制备工艺精准控制3个方面开展：

(1)MXene基电磁屏蔽材料的微观影响机制研究。通过改变MXene的元素组成和表面官能团种类，探索具有独特电磁性能的新型MXene材料，同时结合端基改性，元素掺杂等手段研究表面基团和接触位点对电磁屏蔽性能提升的作用。

(2)MXene基电磁屏蔽材料的综合性能提升研究。通过探究性能协同调控机理、创新结构设计、破解MXene片层堆叠中应力集中等问题，制备集电磁屏蔽性能好、环境适应性强、自修复能力突出于一体的MXene基电磁屏蔽材料，满足航空航天、国防等前沿领域的需求。且多种功能协调适配的MXene基电磁屏蔽材料是未来投入实际应用的关键一步。

(3)MXene基材料的制备工艺精细化推进。可通过精确控制MXene的片层尺寸、层数、堆叠方式等，进一步优化其内部的导电网络和极化机制，增强对电磁波的反射和吸收能力。同时进行多组分协同，探索

表 4 宏观结构设计的 MXene 基电磁屏蔽材料的屏蔽性能

Table 4 Shielding performance of MXene-based electromagnetic interference shielding materials in macroscopic structure design

Macroscopic structure	Material	Thickness/μm	Frequency band/GHz	SE/dB	Ref.
Two-dimensional thin film structure	$Ti_3C_2T_X$(90%)/sodium alginate comp film	8	8-12.8	57	[35]
	MXene/AgNW comp film		X	SSE =16724 dB·cm^2·g^{-1}	[68]
	$Ti_3C_2T_X$(80%)/CNF comp film		X	25.8	[78]
	Pristine $Ti_3C_2T_X$ film	8	X	60.6	[90]
		3	X	≥60	[91]
	24-layer $Ti_3C_2T_X$ film		X	20	[92]
	CNF@MXene multilayer film	35	X,Ka	40	[105]
Coated composite material	$Ti_3C_2T_X$-coated(54%) cotton fabrics	310	X	80	[99]
	$Ti_3C_2T_X$-coated(48%) linen fabrics	350	X	80	
	MXene-decorated polyester textiles	1300	X	90	[100]
	Polyaniline/MXene/C-fiber fabric	550	X	26	[106]
Three-dimensional porous structure	Porous $Ti_3C_2T_X$ MXene (0.86%*)/PVA bio-inspired hydrogel		8.2-12.4	57	[46]
	MXene foam	85	200-2000	51	[47]
	$Ti_3C_2T_X$(0.74%*) aerogel		X	56.4-70.5	[47]
	3D Porous $Ti_3C_2T_X$/CNTs composite aerogel	3000	X	103.9	[104]
	$Ti_3C_2T_X$/graphene hybrid foam	3000	X	50.7	[107]

Note: % refers to the mass fraction of MXene; %* refers to the volume fraction of MXene; comp: for composite; C-fiber: for carbon fiber; SE: shielding effectiveness; SSE: specific shielding effectiveness

与其他高性能电磁功能材料的复合方式，为实现电磁屏蔽材料的“薄、轻、宽、强”与优异的综合性能提供可能。

参考文献

[1] 王帆，张金才，程芳琴. 电磁屏蔽涂料的研究进展[J]. 功能材料，2022，53(1):1033-1040.
WANG F，ZHANG J C，CHENG F Q. Development of electromagnetic shielding coatings[J]. Journal of Fun-ctional Materials，2022，53(1)：1033-1040.

[2] 吴明，钱芳芳，陆飞. 区域雷电防护中电磁辐射污染抑制方法研究[J]. 环境科学与管理，2021，46(9)：70-74.
WU M，QIAN F F，LU F. Research on suppression method of electromagnetic radiation pollution in regional lightning protection [J]. Environmental Science and Management，2021，46 (9)：70-74.

[3] MATTHEW U O，KAZAURE J S. Chemical polarization effects of electromagnetic field radiation from the novel 5G network deployment at ultrahigh frequency [J]. Health and Technology，2021，11(2)：305-317.

[4] WAN S，LI X，CHEN Y，et al. High-strength scalable MXene films through bridging-induced densification[J]. Science，2021，374 (6563)：96-99.

[5] WANG J，MING W，CHEN L，et al. MoS2 Lubricate-toughened MXene/ANF composites for multifunctional electromagnetic interference shielding[J]. Nano-Micro Letters，2025，17 (1)：36.

[6] LIAO L，JIANG D，ZHENG K，et al. Industry-scale and environmentally stable $Ti_3C_2T_X$MXene based film for flexible energy storage devices[J]. Advanced Functional Materials，2021，31(35)：2103960.

[7] WANG J，LI Q，LI K，et al. Ultra-high electrical conductivity in filler-free polymeric hydrogels toward thermos-electrics and electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Materials，2022，34 (12)：2109904.

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

[9] HU G，CEN Z，XIONG Y，et al. Progress of high performance Ti_3C_2TxMXene nano-composite films for electro-magnetic interference shielding[J]. Nanoscale，2023，15(12)：5579-5597.

[10] 黎嘉威，马泽南，贺爱娜，等. 金属电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 宁波大学学报(理工版)，2022，35(4)：93-108.
LI J W，MA Z N，HE A N，et al. Recent progress of metal electromagnetic shielding materials[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)，2022，35(4)：93-108.

[11] 王建忠，奚正平，汤慧萍，等. 金属纤维电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2011，40(9)：1688-1692.
WANGJ Z，XI Z P，TANG H P，et al. Research progress of electromagnetic shielding material of metal fiber[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2011，40(9)：1688-1692.

[12] 王思敏，修慧娟，尹鼎文，等. 非对称结构电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 电子元件与材料，2023，42(11)：1277-1288.
WANG S M，XIU H J，YIN D W，et al. Research progress of

electromagnetic shielding materials with asymmetric structures [J], Electronic Components and Materials, 2023, 42(11):1277-1288.

[13] LIU J, YU M Y, YU Z Z, et al. Design and advanced manufacturing of electromagnetic interference shielding materials[J]. Materials Today, 2023, 66: 245-272.

[14] CHEN M, ZHU J, ZHANG K, et al. Carbon nanofiber/ polyaniline composite aerogel with excellent electro-magnetic interference shielding, low thermal conductivity, and extremely low heat release[J]. Nano Micro Letters, 2025, 17(1): 80.

[15] GEETHA S, SATHEESH KUMAR K K, RAO C R K, et al. EMI shielding: methods and materials-a review [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(4): 2073-2086.

[16] ZHU H, LUO W, CIESIELSKI P N, et al. Wood-derived materials for green electronics, biological devices, and energy applications[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(16): 9305-9374.

[17] MA X, SHEN B, ZHANG L, et al. Novel straw-derived carbon materials for electromagnetic interference shielding: a waste-to-wealth and sustainable initiative[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(10): 9663-9670.

[18] 李博, 张晏清, 张雄. 电磁屏蔽泡沫混凝土的性能研究[J]. 材料导报, 2014, 28(12): 119-122.
LI B, ZHANG Y Q, ZHANG X. Study on electromagnetic shielding foam concrete[J]. Materials Review, 2014, 28(12): 119-122.

[19] FARCAS C, GALAO O, NAVARRO R, et al. Heating and deicing function in conductive concrete and cement paste with the hybrid addition of carbon nanotubes and graphite products[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(4): 45010.

[20] LI X, LI M, LU X, et al. A sheath-core shaped ZrO_2-SiC/SiO_2 fiber felt with continuously distributed SiC for broad-band electromagnetic absorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 419: 129414.

[21] ZHOU Y, ZHAO B, CHEN H, et al. Electromagnetic wave absorbing properties of TMCs (TM=Ti, Zr, Hf, Nb and Ta) and high entropy ($Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2}$)C [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 74: 105-118.

[22] 牛翔宇, 凌新龙. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(02): 109-118.
NIU X Y, LING X L. Research progress of electromagnetic shielding materials[J], Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(02): 109-118.

[23] 徐鑫玉, 沈梦霞, 张正亮, 等. 基于木材的电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 中国造纸, 2023, 42(11): 30-38.
XU X Y, SHEN M X, ZHANG Z L, et al. Research progress of wood-based electromagnetic shielding materials[J], China Pulp and Paper, 2023, 42(11): 30-38.

[24] 严明, 陆颖健, 高屹. 水泥基电磁屏蔽材料的现状分析[J]. 价值工程, 2019, 38(21): 151-154.
YAN M, LU Y J, GAO Y. Analysis of the current situation of cement-based electromagnetic shielding materials[J]. Value Engineering, 2019, 38(21): 151-154.

[25] 彭佳. 水泥基电磁屏蔽与吸波材料研究综述[J]. 混凝土世界, 2022(12): 72-76.
PENG J. Review on cement-based electromagnetic wave shielding and absorbing materials [J]. China Concrete, 2022 (12): 72-76.

[26] GUPTA T K, SINGH B P, MATHUR R B, et al. Multi-walled carbon nanotube-graphene-polyaniline multiphase nanocomposite with superior electromagnetic shielding effectiveness [J]. Nanoscale, 2014, 6(2): 842-851.

[27] 李新, 陆萍, 汪立海. 导电聚合物在电磁屏蔽材料中的应用进展[J]. 广东化工, 2018, 45(6): 133-134.
LI X, LU P, ZHANG L H. The application progress of conductive polymer in electromagnetic shielding material[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(6): 133-134.

[28] WANG M, TANG X H, CAI J H, et al. Construction, mechanism and prospective of conductive polymer compos-ites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: a review[J]. Carbon, 2021, 177: 377-402.

[29] 张文博, 王佳宁, 卫林峰, 等. 功能型聚合物基电磁屏蔽材料的制备及应用[J]. 化学进展, 2023, 35(7): 1065-1076.
ZHANG W B, WANG J N, WEI L F, et al. Preparation and application of functional polymer-based electromagnetic shielding materials [J]. Progress in Chemistry, 2023, 35 (7): 1065-1076.

[30] OLIVEIRA F M, GUSMÃO R. Recent advances in the electromagnetic interference shielding of 2D materials beyond graphene [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2020, 2 (10): 3048-3071.

[31] LIU J, ZHAO Z, ZHANG L. Toward the application of electromagnetic wave absorption by two-dimension materials [J]. Journal of Materials Science-Materials in Electronics, 2021, 32(21): 25562-25576.

[32] VERMA R, THAKUR P, CHAUHAN A, et al. A review on MXene and its' composites for electromagnetic interference (EMI) shielding applications[J]. Carbon, 2023, 208: 170-190.

[33] JIA L C, ZHOU C G, SUN W J, et al. Water-based conductive ink for highly efficient electromagnetic interference shielding coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123368.

[34] LIU H, WU S, YOU C, et al. Recent progress in morphological engineering of carbon materials for electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2021, 172: 569-596.

[35] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[J]. Science, 2016, 353(6304): 1137-1140.

[36] CHUNG D D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. Carbon, 2001, 39(2): 279-285.

[37] ABBASI H, ANTUNES M, VELASCO J I. Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding [J]. Progress in Materials Science, 2019, 103: 319-373.

[38] DU X, SKACHKO I, BARKER A, et al. Approaching ballistic transport in suspended graphene [J]. Nature Nano-technology, 2008, 3(8): 491-495.

[39] HONG S K, KIM K Y, KIM T Y, et al. Electromagnetic inter-

ference shielding effectiveness of monolayer graphene[J]. Nanotechnology, 2012, 23(45): 455704.
[40] KUMAR P, SHAHZAD F, YU S, et al. Large-area reduced graphene oxide thin film with excellent thermal conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. Carbon, 2015, 94: 494-500.
[41] WAN S, LI Y, MU J, et al. Sequentially bridged graphene sheets with high strength, toughness, and electrical conductivity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 (21): 5359-5364.
[42] WAN Y J, ZHU P L, YU S H, et al. Ultralight, super-elastic and volume-preserving cellulose fiber/graphene aerogel for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2017, 115: 629-639.
[43] WAN S, CHEN Y, WANG Y, et al. Ultrastrong graphene films via long-chain π-bridging[J]. Matter, 2019, 1(2): 389-401.
[44] YOST D C, FRIEDMAN A L, HANBICKI A T, et al. 2D monolayers for superior transparent electromagnetic interference shielding[J]. ACS Nano, 2022, 16(6): 9498-9509.
[45] HAN M, SHUCK C E, RAKHMANOV R, et al. Beyond $Ti_3C_2T_X$: MXenes for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Nano, 2020, 14(4): 5008-5016.
[46] YANG Y, WU N, LI B, et al. Biomimetic porous MXene sediment-based hydrogel for high-performance and multifunctional electromagnetic interference shielding[J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 15042-15052.
[47] ZHAO S, ZHANG H B, LUO J Q, et al. Highly electrically conductive three-dimensional $Ti_3C_2T_X$ MXene/reduced graphene oxide hybrid aerogels with excellent electro-magnetic interference shielding performances[J]. ACS Nano, 2018, 12(11): 11193-11202.
[48] REN F, LI Z, XU L, et al. Large-scale preparation of segregated PLA/carbon nanotube composite with high efficient electromagnetic interference shielding and favourable mechanical properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 155: 405-413.
[49] WAN S, LI X, WANG Y, et al. Strong sequentially bridged MXene sheets[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(44): 27154-27161.
[50] ZHAO H. The microstructure and property of a titanium-carbon steel clad plate prepared using explosive welding[J]. Metals, 2022, 12(1): 129.
[51] PENG M, QIN F. Clarification of basic concepts for electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. Journal of Applied Physics. 2021; 130 (22): 225108.
[52] CHUNG D D L. Materials for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(3): 350-354.
[53] WANG H, LI S, LIU M, et al. Review on shielding mechanism and structural design of electromagnetic interference shielding composites [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(6): 2100032.
[54] 张明伟, 曲冠达, 庞梦瑶, 等. 电磁屏蔽机理及涂敷/结构型吸波复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊1): 62-70.
ZHANG M W, QU G D, PANG M Y, et al. Research progress of electromagnetic shielding mechanism and coated /structural absorbing composite materials[J]. Materials Reports, 2021, 35 (Suppl 1): 62-70.
[55] 孔静, 高鸿, 李岩, 等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9055-9063.
KONG J, GAO H, LI Y, et al. Research progress of electromagnetic shielding mechanism and lightweight and broadband wave-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9055-9063.
[56] 张晨洋, 张富勇, 刘元军, 等. 电磁屏蔽涂层织物的屏蔽机理及研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2020, 37(2): 91-98.
ZHANG C Y, ZHANG F Y, LIU Y J, et al. Shielding mechanism and research progress of electromagnetic shielding coating fabric[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2020, 37 (2): 91-98.
[57] XIE Y, LIU S, HUANG K, et al. Ultra-broadband strong electromagnetic interference shielding with ferromagnetic graphene quartz fabric[J]. Advanced Materials, 2022, 34(30): 2202982.
[58] GRADONI G, MICHELI D, MARIANI PRIMIANI V, et al. Determination of the electrical conductivity of carbon/carbon at high microwave frequencies[J]. Carbon, 2013, 54: 76-85.
[59] ZHANG X, QIAO J, JIANG Y, et al. Carbon-based MOF derivatives: emerging efficient electromagnetic wave absorption agents[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 135.
[60] YANG K, CUI Y, LIU Z, et al. Design of core - shell structure NC@MoS_2 hierarchical nanotubes as high-performance electromagnetic wave absorber [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131308.
[61] 刘学斌, 林志强, 万艳君, 等. 低反射MXene基电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(3): 412-426.
LIU X B, LIN Z Q, WAN Y J, et al. Research progress of MXene-based electromagnetic interference shielding materials with low reflectivity[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(3): 412-426.
[62] 崔美荣, 吕雅玲, 钱鑫, 等. MXene典型特性及其在碳纤维复合材料中应用的研究进展[J]. 高分子通报, 2025, 38(1): 58-74.
CUI M R, LV Y L, QIAN X, et al. Research progress on typical characteristic of MXene and its application in carbon fiber composites[J]. Polymer Bulletin, 2025, 38(1): 58-74.
[63] QUAN B, GU W, SHENG J, et al. From intrinsic dielectric loss to geometry patterns: dual-principles strategy for ultrabroad band microwave absorption[J]. Nano Research, 2021, 14(5): 1495-1501.
[64] ZHANG S, ZHANG G, FANG L, et al. Surface-modification strategy to produce highly anticorrosive $Ti_3C_2T_X$ MXene-based polymer composite coatings: a mini-review[J]. Materials, 2025, 18(3): 653.
[65] RAJAVEL K, HU Y, ZHU P, et al. MXene/metal oxides-ag ternary nanostructures for electromagnetic interference shielding [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 399: 125791.
[66] FENG X, NING J, WANG B, et al. Functional integrated electromagnetic interference shielding in flexible micro-

supercapacitors by cation-intercalation typed $Ti_3C_2T_X$ MXene[J]. Nano Energy, 2020, 72: 104741.

[67] XU X, WANG Y, YUE Y, et al. Dopants versus defects: intense confrontation of nitrogen-doped $Ti_3C_2T_X$ for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. Composites Communications, 2022, 35: 101301.

[68] MIAO M, LIU R, THAIBOONROD S, et al. Silver nanowires intercalating $Ti_3C_2T_X$ MXene composite films with excellent flexibility for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(9): 3120-3126.

[69] IQBAL A, SHAHZAD F, HANTANASIRISAKUL K, et al. Anomalous absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride Ti_3CNT_x(MXene)[J]. Science, 2020, 369: 446-450.

[70] JIN D, CHEN H, DU Y, et al. Magnetic CoNi nanoparticles-decoated $Ti_3C_2T_X$ MXene as excellent electromagnetic wave absorber[J]. Materials Science and Engineering B, 2022, 286: 116026.

[71] 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.

[72] HUANG M, WANG L, LI X, et al. Magnetic interacted interaction effect in MXene skeleton: enhanced thermal-generation for electromagnetic interference shielding[J]. Small, 2022, 18(27): 2201587.

[73] LIU Z, ZHANG Y, ZHANG H B, et al. Electrically conductive aluminum ionreinforced MXene films for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(5): 1673-1678.

[74] WANG S, LI D, JIANG L. Synergistic effects between MXenes and Ni chains in flexible and ultrathin electromagnetic interference shielding films[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(19): 1900961.

[75] LIU H, WANG Z, YANG Y, et al. Thermally conductive MWCNTs/Fe_3O_4/Ti_3C_2TMXene multi-layer films for broad band electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2022, 130: 75-85.

[76] YUAN W, YANG J, YIN F, et al. Flexible and stretchable MXene/polyurethane fabrics with delicate wrinkle structure design for effective electromagnetic interference shielding at a dynamic stretching process[J]. Composites Communications, 2020, 19: 90-98.

[77] 刘张硕, 刘骥, 戴洋, 等. 仿生构筑超薄 MXene/CNC 电磁屏蔽复合薄膜[J].无机材料学报, 2025, 38(1): 58-74.
LIU Z S, LIU J, DAI Y, et al. Bioinspired ultrathin MXene/CNC composite film for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Inorganic Materials, 2025, 38(1): 58-74.

[78] CAO W T, CHEN F F, ZHU Y J, et al. Binary strengthening and toughening of MXene/cellulose nanofiber composite paper with nacre-inspired structure and superior electromagnetic interference shielding properties[J]. ACS Nano, 2018, 12(5): 4583-4593.

[79] DUAN N, SHI Z, WANG Z, et al. Mechanically robust $Ti_3C_2T_x$MXene/carbon fiber fabric/thermoplastic polyurethane composite for efficient electromagnetic interference shielding applications[J]. Materials & Design, 2022, 214: 110382.

[80] ZHANG Y, MA Z, RUAN K, et al. Multifunctional $Ti_3C_2T_x$-(Fe_3O_4/polyimide) composite films with janus structure for outstanding electromagnetic interference shielding and superior visual thermal management[J]. Nano Research, 2022, 15(6): 5601-5609.

[81] WANG L, YANG Z, LANG L, et al. Flexible multifunctional MXene/polyimide films with janus structure for superior electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(1): 26.

[82] XIA Z, ZHANG T, TIAN L, et al. Flexible MXene hybrid films with a tuned silver nanowire framework for electromagnetic interference shielding and ultralow voltage-driven joule heating[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(4): 3748-3760.

[83] 储娜, 骆春佳, 晁敏, 等. 多功能MXene-CCNT/聚酰亚胺电磁屏蔽薄膜的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4146-4159.
CHU N, LUO C J, CHAO M, et al. Preparation and properties of multifunctional MXene-CCNT/polyimide electromagnetic shielding films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4146-4159.

[84] CHENG Z, CAO Y, WANG R, et al. Multifunctional MXene-based composite films with simultaneous terahertz/gigahertz wave shielding performance for future 6G communication[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(11): 5593-5605.

[85] LI X, YANG M, QIN W, et al. MXene-based multilayered flexible strain sensor integrating electromagnetic shielding and joule heat[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 658: 130706.

[86] BAI Y, ZHANG B, MA J, et al. Adhesion strategy for cross-linking AgNWs/MXene janus membrane: stretchable and self-healing electromagnetic shielding and infrared stealth capabilities[J]. Small, 2025, 21(5): 2408950.

[87] HU S, LI S, XU W, et al. Rapid preparation, thermal stability and electromagnetic interference shielding properties of two-dimensional Ti_3C_2MXene[J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 19902-19909.

[88] ZHOU A, LIU Y, LI S, et al. From structural ceramics to 2D materials with multi-applications: a review on the development from MAX phases to MXenes[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(6): 1194-1242.

[89] RONCHI R M, ARANTES J T, SANTOS S F. Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: current status and perspectives[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 18167-18188.

[90] 吕通, 张恩爽, 原因, 等. 大片单层低缺陷MXene的制备及其膜材料的电磁屏蔽性能[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(10): 2059-2066.
LYU T, ZHANG E S, YUAN Y, et al. Preparation of large-size single layer MXene with low defect and electromagnetic shielding performance of MXene film[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2019, 40(10): 2059-2066.

[91] CHEN H, WEN Y, QI Y, et al. Pristine titanium carbide MXene films with environmentally stable conductivity and superior mechanical strength[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(5): 1906996.

[92] YUN T, KIM H, IQBAL A, et al. Electromagnetic shielding of monolayer MXene assemblies[J]. Advanced Materials, 2020, 32(9): 1906769.

[93] WENG G, LI J, ALHABEB M, et al. Layer-by-layer assembly of cross-functional semi-transparent MXene-carbon nanotubes composite films for next-generation electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(44): 1803360.

[94] TIAN M, DU M, QU L, et al. Electromagnetic interference shielding cotton fabrics with high electrical conductivity and electrical heating behavior *via* layer-by-layer self-assembly route[J]. RSC Advances, 2017, 7(68): 42641-42652.

[95] HE M, QIAN W, LI H, et al. Ultrathin and flexible carbonized MXene@PAN/Ni films with alternating multi-layered structure for superior EMI shielding, joule heating and mechanical performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 159777.

[96] WANG Y, WANG W, YU D. Three-phase heterostructures f-$NiFe_2O_4$/PANI/PI EMI shielding fabric with high microwave absorption performance[J]. Applied Surface Science, 2017, 425: 518-525.

[97] AN W, XUE R, YUAN P, et al. Design strategies of MXene-based coatings towards multifunctional application[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 46: 104083.

[98] GUO M, PAN Y, WANG W, et al. MXene-coated polystyrene microparticles for amorphous photonic crystal coating with enhanced color saturation, flame retardancy, and electromagnetic interference shielding[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 198: 108902.

[99] UZUN S, HAN M, STROBEL C J, et al. Highly conductive and scalable Ti_3C_2T-coated fabrics for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Carbon, 2021, 174: 382-389.

[100] WANG Q, ZHANG H, LIU J, et al. Multifunctional and water-resistant MXene-decorated polyester textiles with outstanding electromagnetic interference shielding and joule heating performances[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(7): 1806819.

[101] CHANG G, ZENG L, XIE L, et al. Ultrathin multifunctional electromagnetic interference shielding MXene/AgNWs/PEDOT:PSS coatings with superior electro/photothermal transition ability and water repellency[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 470: 144033.

[102] LIN Z, LIU J, PENG W, et al. Highly stable 3D $Ti_3C_2T_x$ MXene-based foam architectures toward high-performance terahertz radiation shielding[J]. ACS Nano, 2020, 14(2): 2109-2117.

[103] SAMBYAL P, IQBAL A, HONG J, et al. Ultralight and mechanically robust $Ti_3C_2T_x$ hybrid aerogel reinforced by carbon nanotubes for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(41): 38046-38054.

[104] LIU J, ZHANG H, SUN R, et al. Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding[J]. Advanced Materials, 2017, 29(38): 1702367.

[105] ZHOU B, ZHANG Z, LI Y, et al. Flexible, robust, and multifunctional electromagnetic interference shielding film with alternating cellulose nanofiber and MXene layers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(4): 4895-4905.

[106] YIN G, WANG Y, WANG W, et al. Multilayer structured PANI/MXene/CF fabric for electromagnetic interference shielding constructed by layer-by-layer strategy[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 601: 125047.

[107] FAN Z, WANG D, YUAN Y, et al. A lightweight and conductive MXene/graphene hybrid foam for superior electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122696.

基金项目:省部级研究项目(LJ20232B030190);2024年度陆军工程大学石家庄校区自主立项科研项目(校教[2024]11号)

收稿日期:2025-05-21;**录用日期**:2025-07-01

通讯作者:赵芳(1982—),女,教授,硕士,主要研究方向为军用功能材料,联系地址:河北省石家庄市新华区和平西路97号(050003),E-mail:jxxyzf2023@aeu.edu.cn;程兆刚(1979—),男,教授,硕士,主要研究方向为军用功能材料,联系地址:河北省石家庄市新华区和平西路97号(050003),E-mail:jxxyczg2023@aeu.edu.cn

(本文责编:张宝玲)