http://pmse.scu.edu.cn

MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的研究进展

陈高发[1]，胡德超[1]，苏江林[2]，黄东强[2]，曾祥鸿[1]，张海琛[1]，林 静[3]

（1. 佛山大学 材料与能源学院，广东 佛山 528000；2. 佛山市方普防护技术有限公司，广东 佛山 528313；
3. 五邑大学 应用物理与材料学院，广东 江门 529020）

摘要：随着通讯技术和柔性电子技术的快速发展，智能电子设备的电磁干扰问题日益突出，开发高性能轻量化的电磁屏蔽（EMI）复合材料具有重要的理论和现实研究意义。近年来，二维MXene纳米材料因其优异的导电性、高力学强度、高比表面积和丰富的表面官能团广泛应用于电磁屏蔽橡胶复合材料中，引起了研究者们的广泛关注。文中综述了MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的最新进展，首先介绍了电磁屏蔽机理和MXene纳米片的制备方法，然后总结了MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的结构和制备方法，最后揭示了MXene在电磁屏蔽橡胶复合材料应用中所面临的挑战，展望了MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的发展前景。

关键词：MXene；电磁屏蔽；橡胶；复合材料

中图分类号：TB33 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）08-0180-11

随着5G时代的到来和柔性电子技术的快速发展，智能电子设备产生的电磁波不可避免地会出现电磁干扰问题，不仅会造成电子设备的数据紊乱、错误甚至丢失，而且会对人类的身体健康造成潜在威胁[1, 2]，高性能电磁屏蔽材料（EMI）的开发已变得迫在眉睫。传统金属，如铜、银、镍等，常被用作EMI材料[3, 4]，但其密度高、柔韧性差，且在长期使用过程中容易腐蚀和氧化，在新一代柔性电子设备中的应用受到了严重限制。与金属基电磁屏蔽材料相比，聚合物基复合材料具有轻质、耐腐蚀、低成本等众多优势，成为智能电子设备中EMI的最佳选择[5]。

橡胶作为国家重要的战略性物资，在国防军工、航空航天、医疗卫生、轨道交通等众多领域有着广泛的应用。为了提高橡胶材料的电磁屏蔽性能，目前常见的方法是在橡胶基体中添加一种或多种导电或导磁的功能填料。其中，MXene是一种二维过渡金属碳（氮）化物，在2011年被首次报道，随后，该新型二维纳米材料被广泛应用于电磁屏蔽领域[6]。目前，MXene已在天然橡胶、丁苯橡胶、硅橡胶等众多电磁屏蔽橡胶复合材料中得到了广泛应用。鉴于此，本文从电磁屏蔽的基本原理出发，总结了MXene的制备方法，系统探讨了MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的研究进展与存在的问题，为后续高性能EMI橡胶复合材料的开发和设计提供了理论基础与研究思路。

1 电磁屏蔽机理

当电磁波穿过屏蔽材料表面时，若材料内部存在自由电子，将反射入射的电磁波，反射程度取决于材料的导电率和电子云密度[7]。为了使材料能够反射电磁波，屏蔽材料应具备高的导电率且附带许多电荷载流子[8]。然而，以反射为主的屏蔽材料在反射电磁波时，反射的电磁波会变成干扰波对材料进行二次入射，如Fig.1(a)所示[9]。MXene作为一种新型

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0138
收稿日期：2024-09-30
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金（2024A1515012452）；国家自然科学基金资助项目（52303074）
通讯联系人：胡德超，主要从事可持续高分子与功能复合材料研究，E-mail: msdchu@fosu.edu.cn；
林静，主要从事能源转换与柔性电子材料研究，E-mail: jinglin@wyu.edu.cn

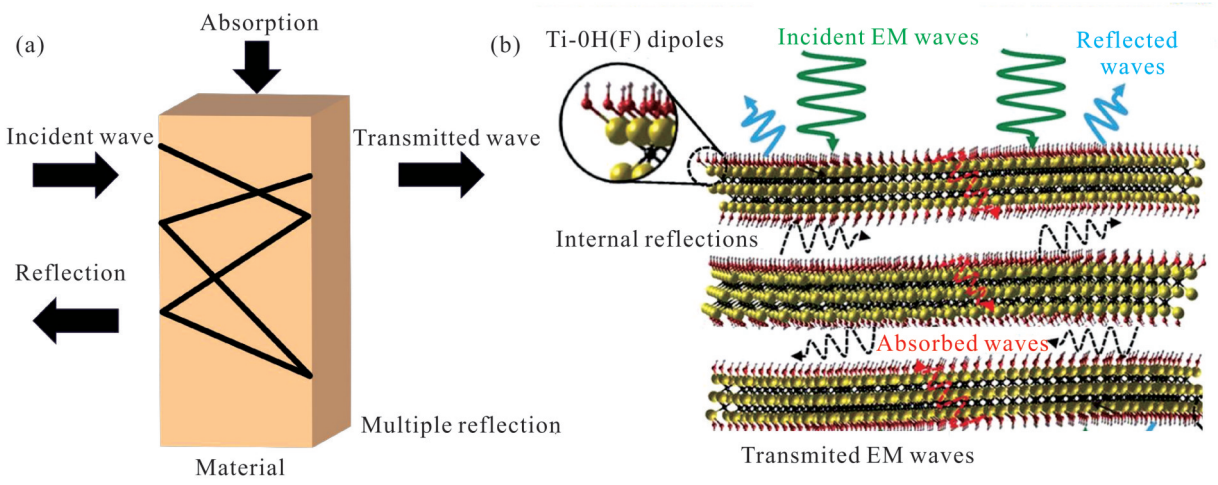


Fig. 1 (a) Schematic of EMI shielding mechanism; (b) schematic of EMI shielding mechanism of MXene [11]

的二维纳米材料，其独特的分层结构能使入射电磁波在材料内部进行多次反射，最后反射的电磁波以热量的形式被吸收或者在材料内部消散，Fig.1(b)展示了MXene材料的电磁屏蔽机制。根据Schelkunoffs理论，总电磁屏蔽效能(EMI *SE*)取决于电磁波在屏蔽材料中传播时的吸收损耗(SE_A)、反射损耗(SE_R)和多次反射损耗(SE_M)[10]。总屏蔽效能(SE_T)可利用式(1)计算：

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (1)$$

2　MXene的制备方法和特点

自MXene问世以来，产生了许多制备二维MXene的方法，Fig.2展示了已在实验中合成MXene的元素周期表和MXene的制备方法时间线[12,13]。从图中可以看出，MXene的种类不断增多，在不同领域发挥了重要的应用，制备方法的不断改进逐渐改善了MXene制备过程中的环境和安全问题。目前，MXene的制备方法主要以蚀刻辅助剥离和化学气相沉积为主。其中，蚀刻辅助剥离要求材料是块状或者层状，主要包括氢氟酸(HF)蚀刻、原位氢氟酸蚀刻、水热碱性蚀刻、熔盐蚀刻等；而化学气相沉积通过材料前驱体在特定环境中的化学反应来制备，实验周期较长，产率较低[14]。因此，目前在聚合物基复合材料中应用的MXene主要是采用蚀刻辅助剥离方法制备的。在蚀刻过程中，弱的金属键M—A被破坏，A位原子被溶解，液相蚀刻剂在M原子表面形成=O，—H和—OH等官能团。研究表明，制备MXene时的蚀刻时间、蚀刻剂前驱体及蚀刻温度都将影响材料的应用性能[15,16]。

2.1　HF蚀刻

利用HF蚀刻MAX制备MXene是一种简单易行的操作方法，主要受蚀刻时间和温度的影响[17]。早在2011年，Gogotsi等首次使用HF蚀刻MAX Ti_3AlC_2相，在室温制备出了二维Ti_3AlC_2材料，蚀刻反应方程如式(2)~(4)

$$Ti_3AlC_2+3HF=Ti_3C_2+AlF_3+3/2H_2 \quad (2)$$

$$Ti_3C_2+2H_2O=Ti_3C_2(OH)_2+H_2 \quad (3)$$

$$Ti_3C_2+2HF=Ti_3C_2F_2+H_2 \quad (4)$$

在蚀刻反应刚发生的时候，MAX中的Al原子层被剥离形成Ti_3C_2，由此产生具有高化学活性的Ti原子，随着蚀刻反应的进行，Ti_3C_2与水和HF反应形成—OH和—F。一般而言，为了减少蚀刻时间，通常可以提高反应温度或者减小MAX的尺寸。此外，反应过程中会产生氢气，需要在通风的反应容器进行实验[18]。Hu等提高蚀刻温度后，利用HF蚀刻在0.5 h内就制备出了高质量的MXene纳米片。Mashtalir等将二甲基亚砜(DMSO)嵌入Ti_3C_2的纳米片间，通过超声处理制备了单层的MXene。

但值得注意的是，HF蚀刻会在MXene表面留下浓度较高的—F，这会对导电性造成不利影响，此外，HF本身具有高的腐蚀性和毒性，会对人身和环境的安全问题带来风险。因此，尽管此方法操作简

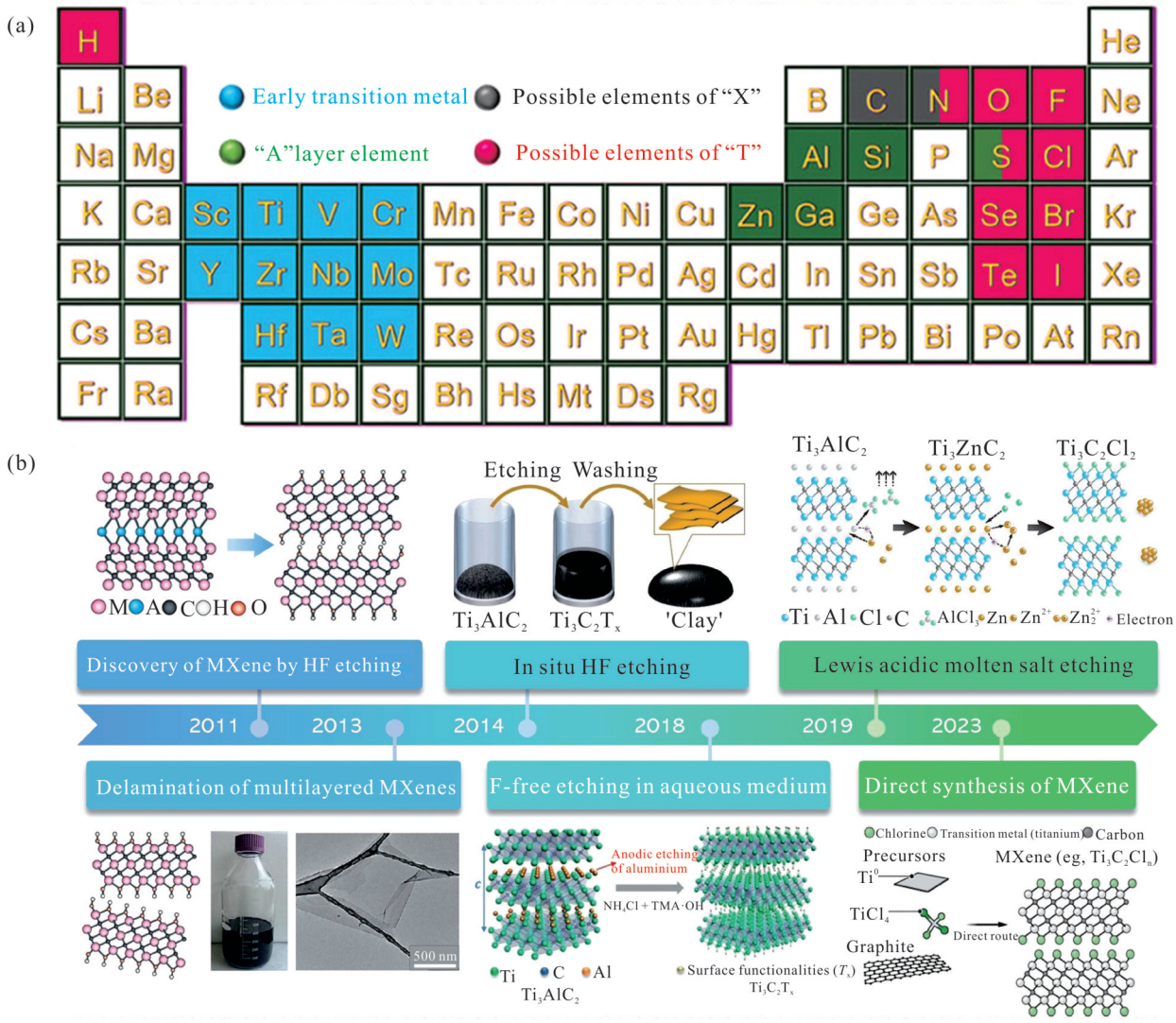


Fig. 2 (a) Periodic table of elements that have been experimentally used in the synthesis of MXene [12]; (b) evolution of MXene synthesis methods[13]

便，但仍需要进一步探索更具潜力的蚀刻方案。

2.2 原位氢氟酸刻蚀

盐酸混合溶液（LiF/KF/NaF+HCl）和氟化氢铵（NH_4HF_2）可以代替HF作为新的蚀刻剂来制备MXene纳米材料[19]。在反应时，盐酸与氟化物盐生成氢氟酸并蚀刻MAX相中的A层原子，同时Li^+和NH_4^+等离子嵌入MXene层，使层间发生膨胀，起到剥离的作用，结合超声使用可以制备出大尺寸的少层/单层MXene[20]。早在2014年，Ghidiu等[21]便开创性的使用LiF和HCl制备出了MXene纳米片，5 μm厚度的MXene薄片导电率高达1500 S/m，其晶格参数也比用HF蚀刻的$Ti_3C_2T_X$高2倍，达到了4 nm。随后，Halim等使用相对温和的蚀刻剂NH_4HF_2对Ti_3AlC_2进行蚀刻，避免了与HF的接触，NH_3和NH_4^+很容易插入到MXene层间，其晶格参数也可达到2.5 nm[22]。Soundiraraju等[23]在2017年使用KF和HCl的混合溶液浸泡Ti_2NT_X粉末1 h后得到Ti_2NT_X，并使用DMSO作为插层剂成功制备出了少层的Ti_2NT_X。与HF蚀刻相比，原位氢氟酸刻蚀反应更加温和、安全、环保，获得的MXene纳米片可通过水下超声和手摇振荡直接制备成单层的MXene，并且该法明显减少了MXene的表面缺陷。

2.3 水热碱性蚀刻

使用含氟酸性溶液制备MXene虽然是一种简单有效的方法，但是蚀刻过程中存在的氟基团可能会引入不想要的性质或反应性，限制了MXene的应用

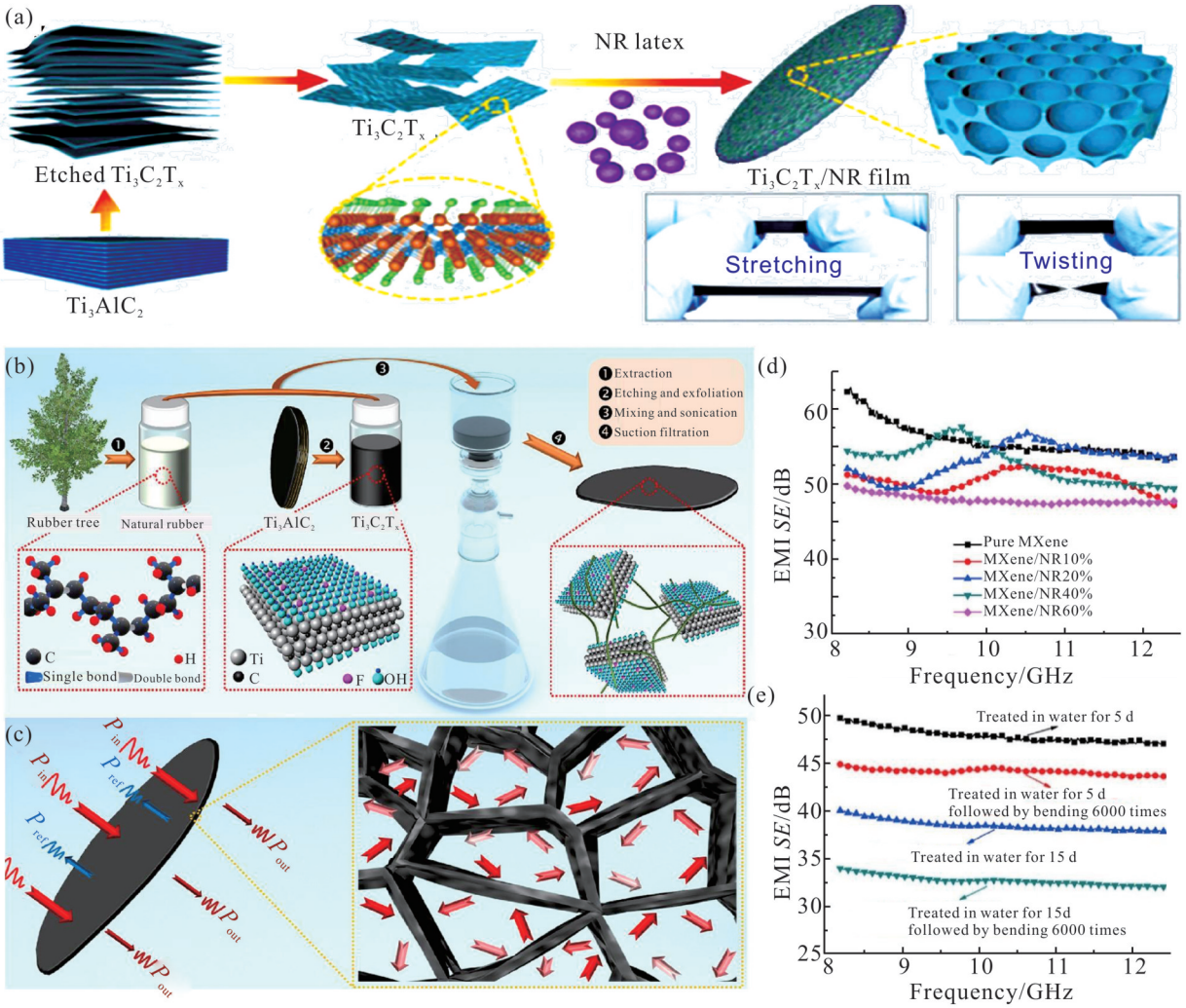


Fig. 3　(a) Schematic illustration of the fabrication process of $Ti_3C_2T_x$/NR composite films[27]; (b) schematic diagram of the preparation of MXene/NR composite films; (c) schematic illustration of microwaves transferring across MXene/NR60% composite films; (d) EMI *SE* for pure MXene and MXene/NR composite films; (e) EMI *SE* of MXene/NR60% after the treatment under water for 5 d and 15 d followed by repeatedly bending for 6000 times[28]

范围。为此，Li等[24]提出了一种水热碱性蚀刻技术，使用氢氧化钠（NaOH）成功地将Ti_3AlC_2中的Al层去除得到了$Ti_3C_2T_X$，纯度达到了92%，将DMSO作为插层剂制备了8~25 μm的少层$Ti_3C_2T_X$薄膜。该水热碱性蚀刻方法可以制备得到无氟高亲水性MXene，环境和安全问题得到有效改善。但值得注意的是，碱性刻蚀技术得到的往往是手风琴结构的多层MXene，需要进一步插层及分层才能得到单层MXene，高浓度碱性和高温反应条件也限制了该方法的广泛应用。

2.4　熔盐蚀刻

液相环境中制备的MXene往往会发生水解、氧化等副反应，为此，2016年，Urbankowski等提出了用熔盐蚀刻制备MXene的方法[25]。首先将Ti_4AlN_3放在550 ℃的氟化物熔盐混合物（LiF、NaF和KF）中蚀刻，然后用四正丁基氢氧化铵（TBAOH）作为插层剂进行剥离，即可得到少层或者单层的Ti_4N_3纳米片，但其纯度和结晶度还有待改善。随后，Liu等对熔盐刻蚀方法进行了改善，提出在空气气氛中制备的新策略[26]。采用低熔点共晶盐作为盐床，由于是液态的熔盐，可以将反应物和空气隔绝开来，既减少了蚀刻时间，也降低了实验成本，有利于MXene的大规模制备和应用。该熔盐蚀刻法避免了水溶液腐蚀法中废液量大、环境污染的缺点，具有广阔的应用前景，但该法制备的MXene的物理化学性能仍需要进一步深入研究。

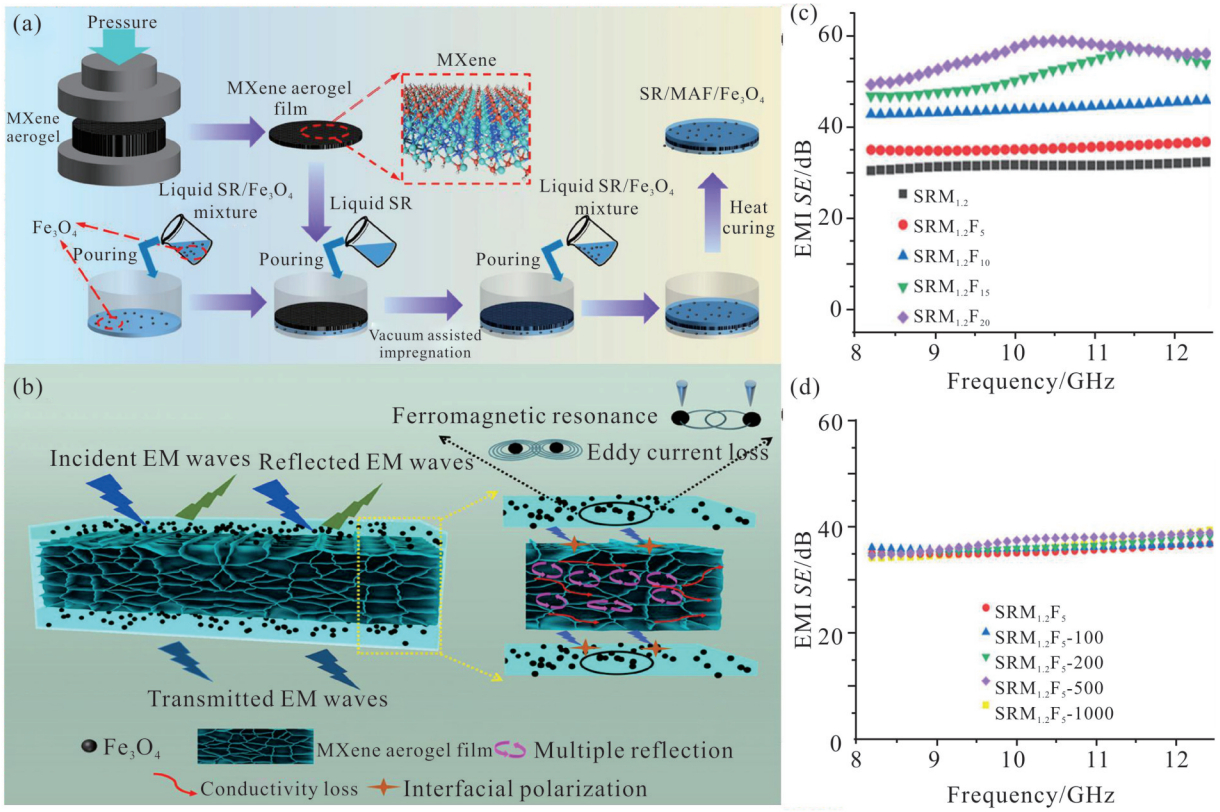


Fig. 4 (a) Schematic diagram of preparation process of sandwich-structured SR/MXene/Fe_3O_4 composites; (b) schematic diagram of electromagnetic shielding mechanism of sandwich- structured SR/MXene/Fe_3O_4 composites; (c) EMI *SE* curves of SRMF composites versus frequency; (d) electromagnetic shielding properties after cyclic bending of SRMF composite[32]

3 MXene在电磁屏蔽橡胶复合材料中的应用

3.1 天然橡胶/MXene电磁屏蔽复合材料

天然橡胶(NR)作为重要的天然高分子材料,具有优异的绝缘性、回弹性和力学性能,广泛用于轮胎和橡胶制品,特别是近年来,功能性NR复合材料的发展引起了研究者们的密切关注。Luo等[27]用带负电的MXene和NR产生的静电斥力构建了MXene分散均匀并互连的3D网络,制备了MXene/NR纳米复合薄膜,如Fig.3(a)所示。纳米复合薄膜在MXene体积分数为6.71%时,其电导率高达1400 S/m,并展现出53.6 dB的优异电磁屏蔽性能、出色的可逆柔韧性和拉伸性。Yang等[28]通过抽滤MXene/NR混合悬浮液的方法制备了柔性的MXene/NR复合薄膜,Fig.3(b)展示了MXene/NR混合悬浮液制备MXene/NR复合膜的流程图,其电磁屏蔽机制如Fig.3(c)所示。结果表明,厚度为131 μm的MXene/NR60%所达到EMI *SE*为54.2 dB,可以阻挡99.9996%的入射电磁波,展现出优异的电磁屏蔽性能(Fig.3(d))。虽然MXene/NR复合薄膜在水中处理15 d并弯曲6000次后EMI *SE*有所降低,但Fig.3(e)所展示的32.8 dB仍然远高于商业EMI屏蔽应用所需的20 dB。Zhao等[29]通过简单的快速成型方法制备的$Ti_3C_2T_X$/NR纳米复合材料实现了互连的导电网络,50 μm厚度的体积分数仅为1.7% MXene的复合薄膜表现出4167 S/m的出色电导率和32.2 dB的EMI *SE*。

Wang等[30]使用天然橡胶作为软基体组装了具有砖浆结构的EMI复合薄膜,经硫化处理后,得到了自支撑的蜂窝状结构$Ti_3C_2T_X$/NR复合薄膜。研究表明,独特的蜂窝结构赋予复合薄膜比砖浆结构更优异的EMI性能和力学性能。NR/$Ti_3C_2T_X$(比例为1:8)复合薄膜的屏蔽效率可以达到99.9998%,其独特的蜂窝状结构使复合薄膜电磁屏蔽达到63.5 dB的优异效果。EMI *SE*的显著增加可归因于以下2个原因:一方面,交联的$Ti_3C_2T_X$/NR复合薄膜产生多个导

电界面，可以更有效地屏蔽电磁波；另一方面，硫化后获得的独特的蜂窝结构可以多次反射、散射和吸收入射电磁波，从而衰减电磁能。此外，蜂窝状$Ti_3C_2T_X$/NR复合薄膜中的独立单元提供了足够的界面极化中心，增强了电磁波的吸收。最终，电磁波几乎完全被吸收并以热能形式消散。

3.2　硅橡胶/MXene电磁屏蔽复合材料

硅橡胶（SR）是一种主链由硅原子和氧原子交替构成的高分子聚合物，不仅具有优异的耐热性、耐寒性、介电性和抗老化性，而且加工性能良好，适用范围广泛。为了赋予硅橡胶优异的EMI性能，Guo等[31]将一维高导电多壁碳纳米管（HEMWCNTs）和Ti_3C_2 MXene添加到硅橡胶基体中，通过调控样品的分层结构，制备出的样品实现了从电磁反射性能到优异吸波性能的转变，其中，样品的电导率高于10^{-4} S/cm，最小反射损失达到−30.19 dB。

Li等[32]采用真空辅助浸渍和固化成功制备了具有三明治结构的SR/MXene/Fe_3O_4 (SRMF)复合材料。如Fig.4(a)所示，SRMF复合材料的顶层和底层是含有Fe_3O_4颗粒和SR的磁性层，中间层是由MXene气凝胶薄膜和SR组成的3D导电网络。这种类似三明治的结构使复合材料能够有效屏蔽入射电磁波，并通过“吸收-反射-再吸收”的机制提高电磁波的吸收能力。当入射电磁波接触复合材料表面时，含有SR和Fe_3O_4的磁性层能有效地调节复合材料之间的阻抗匹配，允许更多的电磁波进入复合材料。由于中间层和表面层存在电导率差，部分入射电磁波会被反射到表面层进行二次削弱，而进入中间层的电磁波，由于连续的导电网络，在电磁波的作用下产生微电流[33]，导致入射电磁波被反射多次，并将电磁波转化为热量，进一步被衰减。Fig.4(b)展示了电磁波经历“吸收-反射-再吸收”的过程，其中进入磁性层的部分电磁波首先被吸收，然后被导电层反射并返回磁性层再次被吸收。这种屏蔽过程有效减少了入射电磁波的反射，从而减少了电磁波的二次污染，中间层易氧化的MXene也可以受到磁性层和SR的保护。如Fig.4(c)所示，该三明治结构SR复合材料的电磁屏蔽性能达到55.5 dB。Fig.4(d)表明，SRMF复合材料在1000次弯曲循环后仍保持其优异的EMI屏蔽性能，并表现出良好的拉伸强度。

3.3　聚氨酯弹性体/MXene电磁屏蔽复合材料

热塑性聚氨酯（TPU）具有良好的弹性、柔韧性、耐磨性及优异的化学和热性能，可通过将导电填料引入TPU基体中形成导电网络来提高TPU基体的导电性。Li等[34]采用真空辅助浸渍涂覆的方法在所制备的泡沫骨架上构建了互连的导电网络。如Fig.5(a)所示，将$Ti_3C_2T_X$ MXene纳米片紧密地堆叠在多巴胺改性的TPU骨架上，制备的TPU@PDA/MXene复合泡沫(TPMF)不仅具有密度低、柔韧性好的特点，而且TPU骨架上的MXene纳米片对提升复合材料的导电性和EMI性能非常有效。如Fig.5(b)所示，TPMF表现出72.2 dB的优异EMI *SE*。尽管在长期压缩循环后，由于大应变下三维导电网络受到了不可修复的损伤，TPMF的EMI性能下降，但循环压缩后的EMI *SE*仍远高于商业EMI屏蔽所需的目标值。Gao等[35]通过简单的逐层喷涂技术制备了具有优异EMI和各向异性导热性能的柔性多层MXene/TPU复合薄膜。TPU层的存在既保证了薄膜优异的力学性能，又阻碍了MXene的氧化，52 μm厚度的多层薄膜表现出1600 S/m的高电导率，并且X波段展现出50.7 dB的出色EMI *SE*。当电磁波从第1层MXene传输时，由于TPU层和MXene层之间的高阻抗失配，充当下一个阻挡层的第2层MXene将再次反射传输的电磁波，透射到材料内部的电磁波在接下来的MXene层中一次又一次反射，导致透射率非常低，表现出优异的吸波性能。宋朋威等[36]利用二氧化碳间歇发泡法制备出了三明治结构的TPU/FeCo@CNT/MXene复合泡沫材料，该复合泡沫材料采用铁钴合金改性碳纳米管(FeCo@CNT)和MXene作为上下两层，中间层为易发泡的TPU。入射的电磁波在材料上下层多次反射，最后在磁损耗和介电损耗的多次作用下，大部分电磁波被材料吸收。结果证明，小膨胀倍率下的三明治复合泡沫材料具有更高的电磁屏蔽能力，同时也具有更高的吸收系数，其平均电磁屏蔽效能可达到53.7dB。

Duan等[37]通过电流体动力雾化法、热压和逐层堆积技术制备了一种坚固、灵活和耐用的$Ti_3C_2T_x$ MXene/碳纤维织物/热塑性聚氨酯($Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU)复合材料，如Fig.5(c)所示。范德华力和共价键的协同强化作用使复合材料的拉伸强度提高到

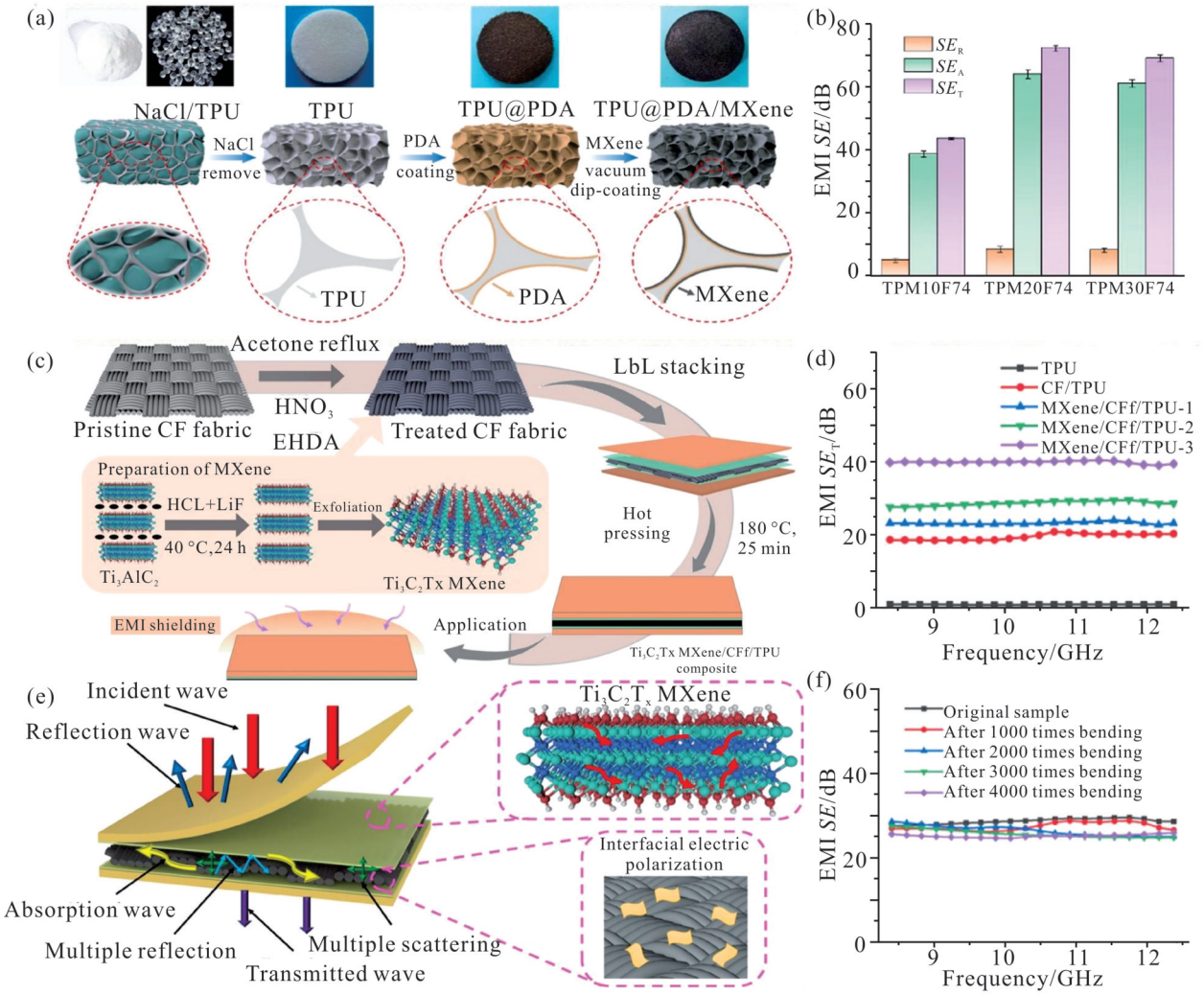


Fig. 5 (a) Schematic illustration of TPMF preparation process; (b) average SE_R, SE_A and SE_T values [34]; (c) schematic of the $Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU composite preparation process; (d) EMI *SE* of $Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU composites with different MXene loading; (e) schematic diagram of EMI shielding mechanism of $Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU composite; (f) EMI shielding performance of $Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU-2 after multiple times bending [37]

了170.2 MPa。此外，通过改变喷雾干燥循环次数，获得了$Ti_3C_2T_x$ MXene负载量为质量分数0.32~1.06%的CF织物，随着MXene质量分数的增加，$Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU复合材料的EMI *SE*得到提高，当$Ti_3C_2T_x$ MXene质量分数为1.06%时，制备的$Ti_3C_2T_x$ MXene/CFf/TPU-3复合材料表现出40.4 dB的EMI *SE*(Fig.5(d))，复合材料夹层结构增强的电磁波吸收能力示意图如Fig.5(e)所示。值得关注的是，即使经过多次弯曲和释放循环，复合材料仍保持了优异的电阻稳定性、EMI *SE*稳定性和柔韧性(Fig.5(f))。

3.4 三元乙丙橡胶/MXene电磁屏蔽复合材料

三元乙丙橡胶(EPDM)具有优异的耐氧化、抗臭氧、抗侵蚀和良好的硫化特性，在耐氧化的高稳定性电磁屏蔽橡胶复合材料中具有重要的应用前景。为了提高EPDM的EMI性能，如Fig.6(a)所示，Lu等[38]采用机械共混与溶液共混相结合的方法制备了MXene/EPDM纳米复合材料，该复合材料具有106.6 S/m的高电导率，当MXene负载量为质量分数6%时，导热系数增加至1.57 W/(m·K)，导热性能的改善减少了材料在恶劣环境中产生的热量，显著提高了材料的可靠性。Fig.6(b, c)表明，MXene质量分数为6%的纳米复合材料在8.2~12.4 GHz频段SE_T达到50 dB。仅仅添加质量分数3%的MXene后，复合材料的电磁屏蔽效能已能满足商业EMI屏蔽应用。

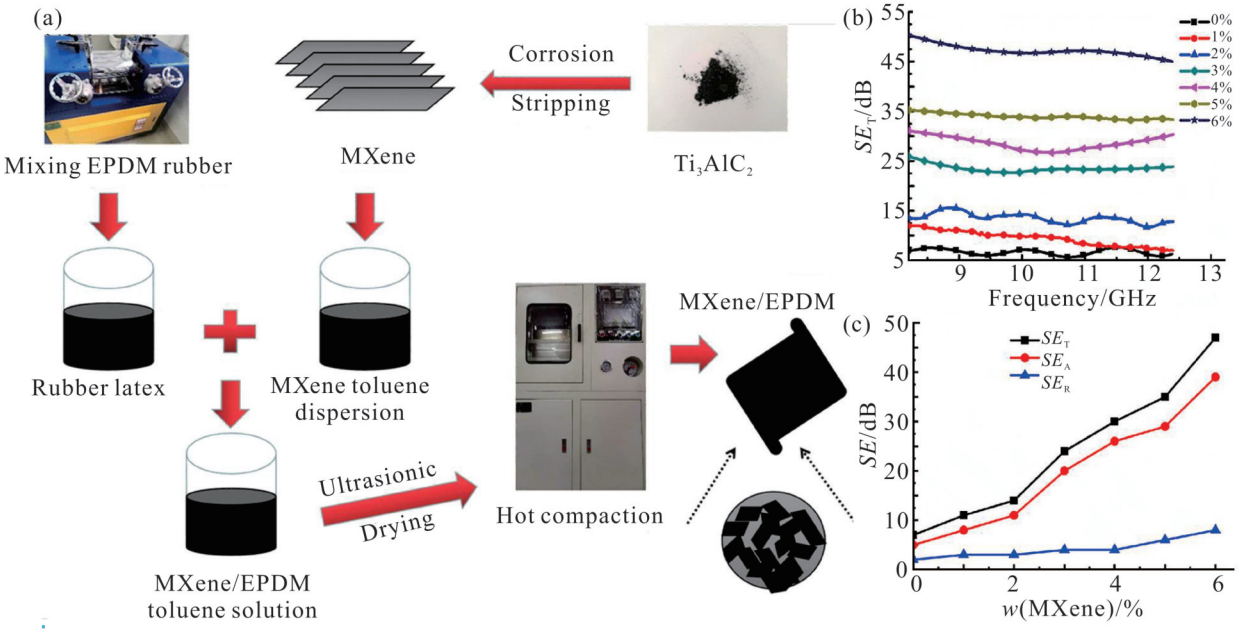


Fig. 6 (a) Schematic illustration of the fabrication process of MXene/EPDM composites; (b) SE_T of MXene/EPDM composites; (c) average SE_A, SE_R and SE_T of MXene/EPDM composites [38]

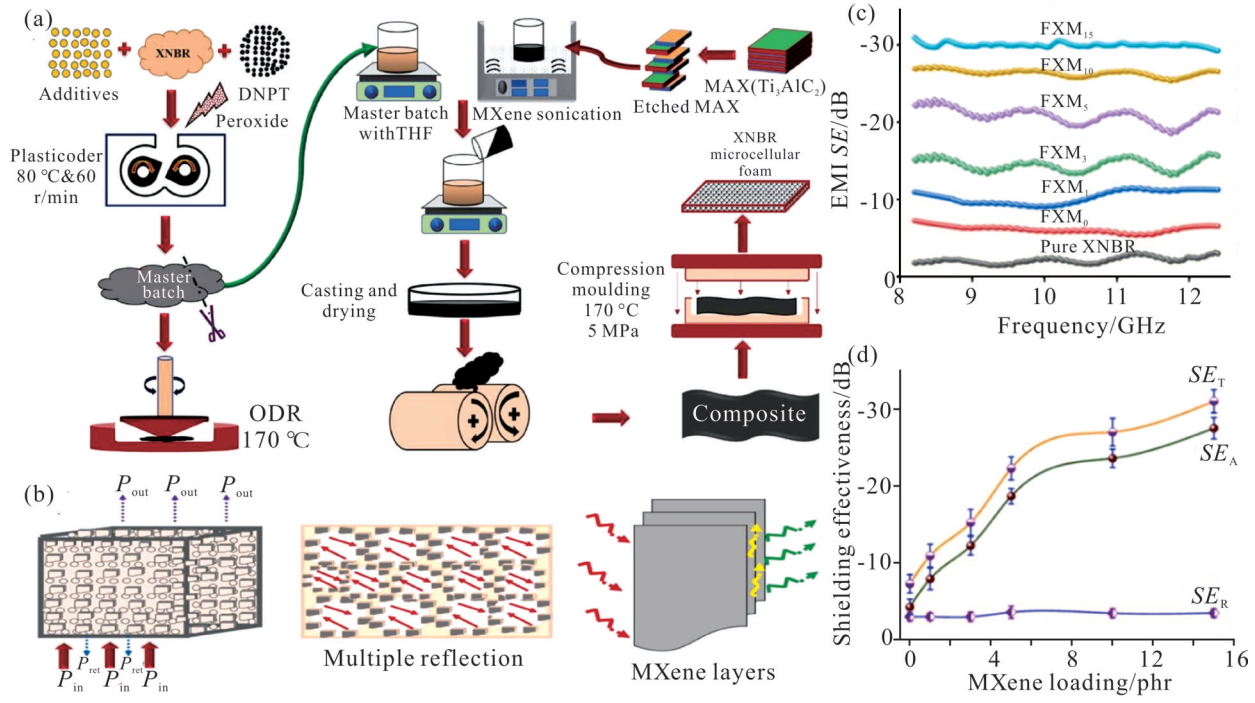


Fig. 7 (a) Schematic illustration of the fabrication of the XNBR/MXene foam composites; (b) schematic illustration of proposed electromagnetic wave dissipation process in the MXene/XNBR foam composites; (c) EMI shielding behaviour of pristine XNBR and XNBR/MXene foam composites as a function of frequency; (d) SE_T, SE_R, and SE_A of foam composites with increasing MXene loading at a frequency of 12 GHz [40]

3.5 丁腈橡胶/MXene电磁屏蔽复合材料

丁腈橡胶（NBR）中丙烯腈的引入有效提高了其分子极性和结构稳定性，与上述大多数的非极性橡胶相比，更容易与MXene形成良好的界面结合。Aakyiir等[39]制备了可拉伸、力学强度高的NBR/MXene纳米复合材料，在添加体积分数19.6% MXene的情况下，1 mm的纳米复合薄膜获得了49 dB的EMI *SE*。此外，由于纳米填料的表面改性作用，纳米复合薄膜不仅表现出出色的EMI *SE*，而且具有良好的物理力学强度和拉伸性，当MXene体积分数为14%时，纳米复合材料的拉伸强度和模量分别为(25.94±0.81) MPa和(10.94±0.64) MPa，均显著高于纯NBR弹性体。随后，Das等[40]通过将羧基丁腈橡胶（XNBR）与多层MXene纳米片相结合开发出了高柔韧性且耐用的弹性泡沫复合材料，Fig.7(a)描述了高柔韧性MXene基XNBR复合材料的制备过程。将MXene纳米薄片掺入XNBR基质中形成了互连导电通路，这种结构赋予弹性泡沫复合材料优异的导电性、电磁屏蔽性能和良好的热特性。Fig.7(b)展示了MXene基XNBR复合材料的电磁屏蔽机制，当复合材料厚度为1 mm时，含有15 phr MXene纳米片的泡沫复合材料在8.2~12.4 GHz频率范围内表现出30.9 dB的EMI *SE*(Fig.7(c))，且当MXene负载量为5 phr时，泡沫复合材料表现出5.51×10^{-4} S/m的直流电导率和0.65 W/(m·K)的热导率。Fig.7(d)展示了复合材料在12 GHz频率下随着MXene负载量的增加而变化的SE_T，SE_R和SE_A。这项研究首次开发并评估了过氧化物交联的XNBR/MXene微孔泡沫复合材料在电磁辐射屏蔽应用中的有效性，为MXene基电磁屏蔽复合材料的应用拓展了方向。

4 结语及展望

MXene作为一种新型二维纳米材料，因其优异的导电性、高比表面积和良好的物理力学性能，广泛应用于电磁屏蔽橡胶复合材料中。本文总结了MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料的最新进展，阐述了MXene对不同橡胶复合材料导电、电磁屏蔽和力学性能的影响，研究表明，MXene在新一代轻质高性能电磁屏蔽橡胶复合材料中具有广阔的应用前景。尽管MXene基电磁屏蔽橡胶复合材料已取得重要的研究成果，但目前仍需在以下几个方面开展深入的研究。(1) MXene在空气中极易发生氧化，虽然橡胶基体与MXene的结合在一定程度上能够提高MXene的储存稳定性，但高温硫化过程中不可避免地会对其造成影响，因此，仍需进一步探索提高MXene稳定性的新方法；此外，如何降低MXene的成本以解决制备过程中的污染问题也亟需深入研究。(2)极性MXene与NR、硅橡胶等非极性橡胶之间的界面结合对复合材料的电磁屏蔽性能、力学性能等至关重要，如何改善MXene在橡胶基体中的均匀分散，调控MXene在橡胶基体中的取向分布，增强其界面结合作用，也是目前需要解决的瓶颈问题。(3) 在改善橡胶复合材料电磁屏蔽性能的同时，还需要从应用场景出发，兼顾橡胶复合材料的力学性能、热稳定性能、防老化性能、导热性能、阻燃性能等，满足不同领域的应用环境。

参考文献：

[1] Xiang Z, Wang Y, Yin X, *et al*. Microwave absorption performance of porous heterogeneous SiC/SiO_2 microspheres[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138742.

[2] Nazir A, Yu H, Wang L, *et al*. Recent progress in the modification of carbon materials and their application in composites for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 8699-8719.

[3] Choi Y S, Yoo Y H, Kim J G, *et al*. A comparison of the corrosion resistance of Cu-Ni-stainless steel multilayers used for EMI shielding[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201: 3775-3782.

[4] De Temmerman L. New metallized materials for EMI/RFI shielding[J]. Journal of Coated Fabrics, 1992, 21: 191-198.

[5] 王庆宇, 温变英. 功能填料表面修饰对聚合物基复合材料电磁屏蔽性能影响研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(1): 151-158.
Wang Q Y, Wen B Y. Recent process on effect of surface modification of functional fillers on the electromagnetic interference shielding property of polymer-based composites[J]. Polymer Materials & Engineering, 2024, 40(1): 151-158.

[6] 梅婷, 冉娅, 蔡雄睿, 等. 基于MXene电磁屏蔽材料的研究[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2280-2293.
Mei T, Ran Y, Cai X R, *et al*. Research on electromagnetic shielding materials based on MXene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2280-2293.

[7] Iqbal A, Shahzad F, Hantanasirisakul K, *et al*. Anomalous

absorption of electromagnetic waves by 2D transition metal carbonitride $Ti_3C_NT_x$ (MXene)[J]. Science, 2020, 369: 446-450.

[8] 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.

[9] Guan H, Chung D. Radio- wave electrical conductivity and absorption- dominant interaction with radio wave of exfoliated-graphite- based flexible graphite, with relevance to electromagnetic shielding and antennas[J]. Carbon, 2020, 157: 549-562.

[10] Schulz R B, Plantz V, Brush D. Shielding theory and practice[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30: 187-201.

[11] Shahzad F, Alhabeb M, Hatter C B, *et al*. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[J]. Science, 2016, 353: 1137-1140.

[12] Wei Y, Zhang P, Soomro R A, *et al*. Advances in the synthesis of 2D MXenes[J]. Advanced Materials, 2021, 33: 2103148.

[13] Jiang M, Wang D, Kim Y H, *et al*. Evolution of surface chemistry in two- dimensional mxenes: from mixed to tunable uniform terminations[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2024, 136: e202409480.

[14] Cao M S, 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.

[15] Srivastava P, Mishra A, Mizuseki H, *et al*. Mechanistic insight into the chemical exfoliation and functionalization of Ti_3C_2 MXene[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8: 24256-24264.

[16] Mariano M, Mashtalir O, Antonio F Q, *et al*. Solution-processed titanium carbide MXene films examined as highly transparent conductors[J]. Nanoscale, 2016, 8: 16371-1638.

[17] 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: 4207-4207.

[18] 易美荣, 覃靖国, 刘子征, 等. 二维层状$Ti_3C_2T_x$的制备方法及其摩擦学应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2201-2219.

Yi M R, Qin J G, Liu Z Z, *et al*. Research progress of preparation and tribological application of two- dimensional layered $Ti_3C_2T_x$ [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2201-2219.

[19] Zhang T, Pan L, Tang H, *et al*. Synthesis of two- dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene using HCl + LiF etchant: enhanced exfoliation and delamination[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 818-826.

[20] Wang L, Cheng J, Zou Y, *et al*. Current advances and future perspectives of MXene- based electromagnetic interference shielding materials[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6: 172.

[21] Ghidiu M, Naguib M, Shi C, *et al*. Synthesis and characterization of two- dimensional N_4C_3 (MXene) [J]. Chemical Communications, 2014, 50: 9517-9520.

[22] 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: 2374-2381.

[23] Soundiraraju B, George B K. Two- dimensional titanium nitride (Ti_2N) MXene: synthesis, characterization, and potential application as surface- enhanced Raman scattering substrate[J]. ACS Nano, 2017, 11: 8892-5900.

[24] 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: 6115-6119.

[25] Urbankowski P, Anasori B, Makaryan T, *et al*. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene)[J]. Nanoscale, 2016, 8: 11385-11391.

[26] Ma G, Shao H, Xu J, *et al*. Li- ion storage properties of two-dimensional titanium- carbide synthesized via fast one- pot method in air atmosphere[J]. Nature Communications, 2021, 12: 5085.

[27] Luo J Q, Zhao S, Zhang H B, *et al*. Flexible, stretchable and electrically conductive MXene/natural rubber nanocomposite films for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Composites Science and Technology, 2019, 182: 107754.

[28] Yang W, Liu J J, Wang L L, *et al*. Multifunctional MXene/natural rubber composite films with exceptional flexibility and durability [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 188: 107875.

[29] Ye Z, Zhao D, Liu F, *et al*. Flexible and highly conductive $Ti_3C_2T_x$/natural rubber composites with interconnected networks for high- performance electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 180: 108067.

[30] Wang Y, Liu R, Zhang J, *et al*. Vulcanization of $Ti_3C_2T_x$ MXene/natural rubber composite films for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. Applied Surface Science, 2021, 546: 149143.

[31] Guo X, Liu L, Ding N, *et al*. Transformation from electromagnetic inflection to absorption of silicone rubber and accordion- shaped Ti_3C_2 MXene composites by highly electric conductive multi- walled carbon nanotubes[J]. Polymers, 2023, 15: 2332.

[32] Li H, Ru X, Song Y, *et al*. Flexible sandwich-structured silicone rubber/MXene/Fe_3O_4 composites for tunable electromagnetic interference shielding[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61: 11766-11776.

[33] Jun Y S, Hyun B G, Hamidinejad M, *et al*. Maintaining electrical conductivity of microcellular MWCNT/TPU composites after deformation[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 223: 109113.

[34] Li Z, Sun Y, Zhou B, *et al*. Flexible thermoplastic polyurethane/MXene foams for compressible electromagnetic interference shielding[J]. Materials Today Physics, 2023, 32: 101017.

[35] Gao Q, Pan Y, Zheng G, *et al*. Flexible multilayered MXene/thermoplastic polyurethane films with excellent electromagnetic interference shielding, thermal conductivity, and management performances[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2021, 4: 274-285.

[36] 宋朋威, 王晓涵, 廖霞. 具有频率选择性的TPU/FeCo@CNT/MXene复合泡沫材料的制备与电磁屏蔽性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(9): 132-137.
Song P W, Wang X H, Liao X. Preparation and electromagnetic interference shielding properties of frequency- selective TPU/FeCo@CNT/MXene composite foam[J]. Polymer Materials & Engineering, 2022, 38(9): 132-137.

[37] 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..

[38] Lu S, Li B, Ma K, *et al*. Flexible MXene/EPDM rubber with excellent thermal conductivity and electromagnetic interference performance[J]. Applied Physics A, 2020, 126: 1-12.

[39] Aakyiir M, Kingu M A S, Araby S, *et al*. Stretchable, mechanically resilient, and high electromagnetic shielding polymer/MXene nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 50509.

[40] Das P, Katheria A, Nayak J, *et al*. Stretchable and lightweight 2D MXene- based elastomeric composite foam for suppressing electromagnetic interference[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 976: 173011.

Progress on Research of MXene-Based Electromagnetic Shielding Rubber Composites

Gaofa Chen[1], Dechao Hu[1], Jianglin Su[2], Dongqiang Huang[2], Xianghong Zeng[1], Haichen Zhang[1], Jing Lin[3]
(*1. School of Materials and Energy, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. Foshan Fangpu Dipping Technology Co., Ltd., Foshan 528313, China; 3. School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen 529020, China*)

ABSTRACT: With the rapid development of communication technology and flexible electronic technology, the electromagnetic interference problem of smart electronic devices has become increasingly prominent. Developing high- performance and lightweight electromagnetic interference shielding (EMI) composites has important theoretical and practical research significance. In the past few years, two-dimensional MXene nanomaterials have been widely used in electromagnetic shielding rubber composites due to their excellent conductivity, high mechanical strength, high specific surface area and abundant surface functional groups, which have attracted extensive attention from researchers. In this paper, the latest progress of MXene-based electromagnetic shielding rubber composites was reviewed. Firstly, the electromagnetic shielding mechanism and the preparation methods of MXene nanosheets were introduced. Then the structure and fabrication of MXene-based electromagnetic shielding rubber composites were summarized. Finally, the challenges of MXene applying in electromagnetic shielding rubber composites were revealed, and the development prospect of MXene-based electromagnetic shielding rubber composites was prospected.

Keywords: MXene; electromagnetic shielding; rubber; composites