



评 述

静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料研究进展

曾志勇¹, 曹丰¹, 黄建², 张风华³, 钱坤¹, 李文兵^{1*}

1. 江南大学纺织科学与工程学院, 无锡 214122;

2. 南京玻璃纤维研究设计院有限公司, 南京 210012;

3. 哈尔滨工业大学特种环境复合材料技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080

* 联系人: E-mail: wenbingli@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2023-11-30; 接受日期: 2024-04-25; 网络版发表日期: 2024-08-08

国家重点研发计划(编号: 2022YFB3805700)和特种环境复合材料技术国家级重点实验室基金(编号: JCKYS2021603C014)资助项目

摘要 随着电子信息技术的发展, 电磁波污染已经严重影响了人类健康和社会进步, 因此急需开发出一种高效的电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)屏蔽材料. 静电纺丝技术可以制备出柔韧性好的超薄多孔纤维膜, 电磁波能够在纤维膜内部进行多次反射而被消耗. MXene作为一种新型的二维(2D)材料群体, 具有高比表面积、高导电性以及易加工性, 是一种潜在的EMI屏蔽材料. 因此, 将静电纺丝技术和MXene材料相结合, 能够制备出多功能的聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料. 本文首先介绍了静电纺丝技术的概念、原理及其影响因素, 其次, 分析了MXene材料的组成和制备方法, 最后, 讨论了静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料的最新进展并对未来聚合物基MXene增强静电纺丝复合材料在电磁屏蔽领域的发展做出展望.

关键词 静电纺丝技术, 电磁屏蔽, MXene, 纳米纤维

1 引言

由于电子信息技术的飞速进步, 电子设备在人们的日常生活中已经占据了不可或缺的地位, 尤其是5G手机的大量普及以及人工智能技术的迅速发展, 电子设备不仅能给我们的日常生活带来便利, 还能应用于未来的高科技领域^[1]. 然而, 电子设备的普及应用也引发了一个严重问题, 即电磁干扰(EMI)^[2]. EMI的存在会对人体造成难以弥补的损害, 长期处于强电磁辐射环境中, 会显著提高患癌的风险. 此外, EMI还会导致

仪器操作异常、测量失误, 甚至引发机密文件的泄露, 这些都对国家安全构成严重威胁^[3~8]. 因此, 为了解决电磁波辐射所引发的安全问题, 迫切需要研发出具有优异性能的EMI屏蔽材料.

EMI屏蔽材料可以抑制该区域中的电场和磁场, 并有效地控制电磁波从一个区域到另一个区域的传播, 从而达到屏蔽电磁波辐射的效果^[9,10]. 众所周知, 电导率是影响EMI屏蔽的关键因素, 传统的金属屏蔽材料具有大量可移动的自由电子, 会产生高电导率的高密度电子云, 从而反射从外界环境中入射的电磁波,

引用格式: 曾志勇, 曹丰, 黄建, 等. 静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料研究进展. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1496–1518
Zeng Z Y, Cao F, Huang J, et al. Progress in preparation of polymer-based MXene enhanced electromagnetic shielding composites by electrospinning (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1496–1518, doi: 10.1360/SST-2023-0393

主要包括Cu, Fe, Al. 但是, 传统的金属屏蔽材料具有很多缺点, 主要有重量大、密度高、价格昂贵、抗冲击性弱、易腐蚀且耐酸碱性差, 不适合大批量生产以及在恶劣环境中使用^[11~14]. 同时, 金属屏蔽材料表面与空气阻抗极不匹配, 会导致入射的电磁波绝大部分被反射到环境中, 造成二次污染, 因此传统的金属屏蔽材料很难满足实际应用^[15]. 随着人们生活水平的提高以及未来高科技领域的发展, 对EMI屏蔽材料的需求急剧增加, 迫切需要开发出新型EMI屏蔽材料用于解决上述问题. 近几年来, 聚合物屏蔽材料由于具有质量轻、密度低、柔韧性好、吸收效率高和抗氧化能力强等优点吸引了研究人员广泛的关注^[16]. 与传统的金属屏蔽材料相比, 聚合物屏蔽材料的综合性能更好, 有望替代金属屏蔽材料, 在未来具有很大的发展前景^[17~20], 表1将聚合物屏蔽材料与金属屏蔽材料进行了对比.

聚合物屏蔽材料是由聚合物基体和纳米填料组成, 纳米填料作为增强材料赋予聚合物复合材料独特的性能^[7]. 聚合物一般分为两类, 绝缘聚合物和本征导电聚合物^[21]. 绝缘聚合物没有自由电子和离子, 分子由原子通过共价键直接形成, 没有导电性, 主要包括聚苯乙烯(PS)、聚偏氟乙烯(PVDF)、聚丙烯(PP)、聚乙烯醇(PVA)、聚乙烯(PE)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、环氧树脂和聚乙烯吡咯烷酮(PVP)^[22]. 本征导电聚合物是由含有共轭结构的单体聚合而成的高分子材料, 不需要添加任何外部载体就能表现出导电

性^[9], 常见的有聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)、聚噻吩(PTP). 与金属材料相比, 本征导电聚合物具有较低的密度和较好的可塑性, 可以通过化学方法进行修饰和改善其性能^[23]. 常规的纳米填料是指高电导率和高磁导率材料, 高电导率材料主要包括碳纳米纤维(CNF)、碳纳米管(CNT)、石墨烯、银纳米线(AgNWs)和MXene, 高磁导率材料主要有四氧化三铁(Fe_3O_4)和炭黑(CB)^[24]. 将聚合物基体和纳米填料通过各种方式相结合可以形成聚合物基复合材料, 一方面通过形成基体-界面来增强材料性能, 另一方面纳米填料的引入会改变聚合物的结晶度和玻璃化转变温度从而改善材料性能^[25,26].

自从石墨烯材料被发现以来, 二维(2D)纳米材料已被广泛应用于EMI屏蔽领域. 在最近的几年里, 人们开发了许多方法来制备纳米材料, 如自组装^[27]、模板定向合成^[28]、气相沉积^[29]、水热反应^[30]和静电纺丝技术^[31]等. 其中, 静电纺丝技术是生产直径在数十至数百纳米之间的聚合物纳米材料的一种简单而通用的方法, 可以制备质量轻、机械性能优异、比表面积大和柔韧性好的多孔纤维膜. 与纺织技术中的传统纤维不同, 静电纺丝纳米材料一般具有更小的尺寸, 可调控的物理化学性能, 使其在储能、催化和电磁屏蔽等领域具有很大的发展前景^[32]. 许多2D纳米材料, 如石墨烯、黑磷、氮化硼和MXene等都表现出优异的EMI屏蔽性能, 其中MXene作为一种新兴的2D过渡金属碳/氮化物, 是近年来在EMI屏蔽领域的研究热点^[33]. 相较

表 1 聚合物屏蔽材料与金属屏蔽材料进行对比^{[7,9,11-24]a)}
Table 1 The polymer shielding material is compared with the metal shielding material [7,9,11-24]

屏蔽材料类型	优点	缺点	组成	特点	代表性材料
金属屏蔽材料	电导率高 制备工艺简单 来源广泛	重量大 密度高 造成二次污染 耐酸碱性差 易腐蚀	金属	具有大量可移动的自由电子, 会产生高电导率的高密度电子云	Cu, Fe, Al
聚合物屏蔽材料	质量轻 密度低 抗氧化能力强 耐酸碱性好 柔韧性好	电导率低 制备工艺复杂 来源有限	绝缘聚合物	分子由原子通过共价键形成, 没有导电性	PS, PVDF, PP, PVA, PE, PMMA, PVP
			本征导电聚合物	由含有共轭结构的单体聚合而成, 有导电性	PANI, PPy, PTP
			纳米填料	高电导率 高磁导率	CNF, CNT, AgNWs, MXene, Fe_3O_4 , CB

a) PS: Polystyrene; PVDF: Polyvinylidene fluoride; PP: Polypropylene; PVA: Polyvinyl alcohol; PE: Polyethylene; PMMA: Polymethylmethacrylate; PVP: Polyvinyl pyrrolidone; PANI: Polyaniline; PPy: Polypyrrole; PTP: Polythiophene; CNF: Carbon nanofiber; CNT: Carbon nanotube;

于其他2D纳米材料, 新兴的MXene材料具有高化学活性表面、表面亲水性和高导电性等优点, 可以通过吸收、反射和多次反射电磁波来实现电磁屏蔽^[34]. 因此, 将静电纺丝技术和新型2D纳米材料MXene结合在一起可以制备出具有优异电磁屏蔽性能的聚合物基MXene增强复合材料. 这种复合材料具有丰富的多孔结构、质量轻、超薄、柔性好、成本低和易于加工等优点, 并且能够在恶劣环境中达到长期屏蔽电磁波的效果^[35]. 目前, 关于静电纺丝纳米材料的相关文献有很多, 但是将静电纺丝技术和新型2D纳米材料MXene结合起来用于电磁屏蔽的报道相对很少, 因此, 本文首先介绍了静电纺丝技术的概念、原理及其影响因素, 其次, 分析了MXene材料的组成和制备方法, 最后, 讨论了静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料的最新进展并对未来聚合物基MXene增强静电纺丝复合材料在电磁屏蔽领域的发展做出展望.

2 静电纺丝技术

静电纺丝技术, 简称电纺技术, 是通过引入静电力拉伸聚合物流体, 从而使聚合物纤维的直径降至微纳米级别^[36]. 静电纺丝的概念起源于对高分子流体在强电场中的特殊行为的研究和应用, 在此启发下研究者开发出静电纺丝技术, 这种技术能够制备出直径在纳米到微米级范围内的连续纤维, 这已成为近年来制备纳米纤维的主要方法之一^[37].

静电纺丝技术一般可分为溶液静电纺丝和熔体静电纺丝两种, 溶液静电纺丝的原料是聚合物溶液, 通过静电作用力将溶液拉伸成纤维, 而熔体静电纺丝的原料是聚合物熔体, 在高温下进行加工, 然后通过静电纺丝装置拉伸成纤维^[38]. 由于纺丝原料的差异, 聚合物溶液是稀溶液, 导电性较好, 通过溶剂挥发成纤, 而聚合物熔体属于高分子流体, 绝缘性较好, 通过射流和环境热交换固化成纤^[39]. 静电纺丝装置主要包括高压电源、注射器、收集板以及纺丝针头等, 高压电源一般连接在纺丝针头上, 收集板一般接地. 在纺丝针头和收集装置之间形成的高压静电场作用下, 持续微量供给的聚合物溶液能够形成泰勒锥, 从而形成连续的射流后在收集装置上固化成丝^[40]. 随着静电纺丝技术的不断发展, 目前已经出现了各种各样的新型纺丝装

置, 包括用于制造核壳结构纳米纤维的设备^[41]、生产具有三维拓扑结构纳米纤维的设备^[42]、离心静电纺丝设备^[43]、多喷针纳米纺丝机^[44]、无针“纳米蜘蛛”纺丝设备^[45]和气泡式静电纺丝设备^[46]等. 近年来, 聚合物溶液静电纺丝在电磁屏蔽领域的应用越来越多, 本文主要介绍聚合物溶液静电纺丝技术, 图1为静电纺丝的主要设备及纺丝过程^[47].

2.1 静电纺丝的原理

在强静电场中, 聚合物溶液的行为会发生变化. 当没有电场作用时, 溶液主要受重力和表面张力的影响, 使得毛细管末端的液滴保持球形^[48]. 随着电场强度的增加, 静电斥力开始与液体表面张力相互作用. 在静电斥力小于液体表面张力的情况下, 液滴仍能保持球形. 然而, 随着场强的进一步增大, 液滴渐渐变为锥形. 当场强达到临界值时, 静电斥力和液体表面张力处于平衡状态, 形成一个角度为 49.3° 的泰勒锥^[49]. 随着场强继续增大, 静电斥力大于液体表面张力, 促使液滴从泰勒锥末端喷射而出, 迅速飞向收集装置, 最终形成纤维膜. 这就是静电纺丝的基本原理^[50].

2.2 静电纺丝的影响因素

在溶液静电纺丝过程中, 纺丝基质必须呈液态, 即聚合物溶液, 在形成纤维之前, 聚合物溶液会从针头尖端被拉伸出来, 溶液的电性质、表面张力、黏度与所使用溶剂的挥发速率等对所形成的纤维形态都有着重要影响^[51]. 一般来说, 静电纺丝的影响因素主要有溶液参数、工艺参数和环境参数. 溶液参数如黏度、电导率和液体表面张力等会影响纤维的成形和排列情况; 工艺参数如电场强度和进料速率则决定纤维的直径和长度; 而环境参数如温度和湿度则会对静电纺丝过程中的物质传输和纤维成型产生影响^[52], 表2总结了溶液静电纺丝的影响因素. 通常情况下, 静电纺丝过程是带电液滴在不同力作用下依次经历泰勒锥、稳定射流和鞭动不稳定三个主要阶段, 并最终固化在收集设备上^[53]. 在溶液静电纺丝中, 若溶液过浓, 聚合物链之间的缠结会加剧, 导致针头堵塞, 从而影响纤维的成型; 相反, 若溶液过稀, 聚合物链段过短, 产生珠串结构, 这同样不利于纺丝. 因此, 为了成功制备纳米纤维, 合理选择溶质并精确调控聚合物的分子量、溶液浓度以及黏度显得尤为重要^[54].

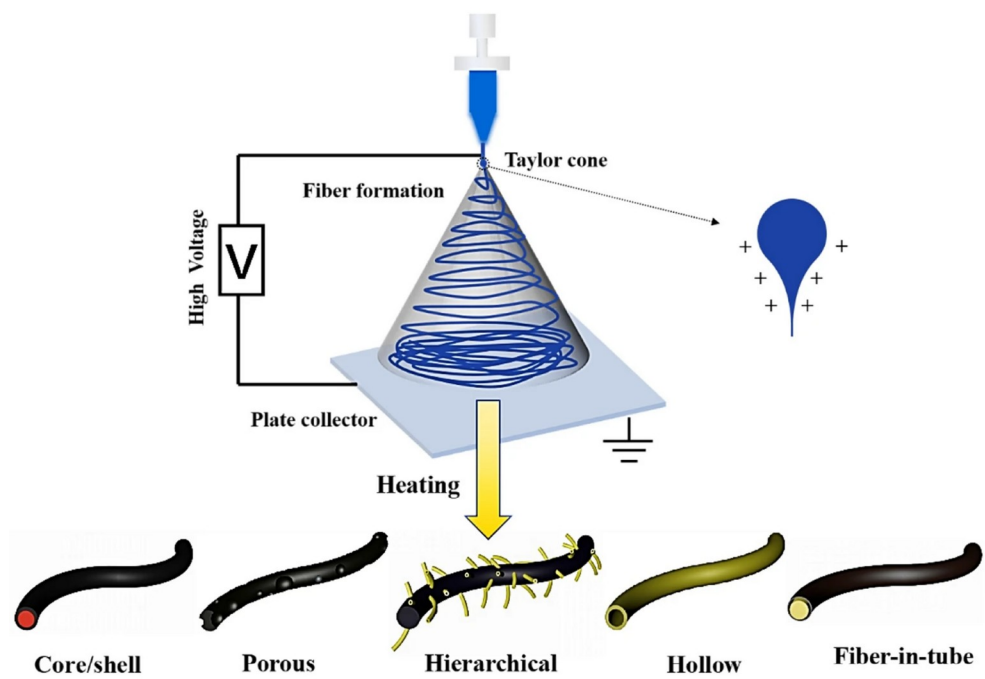


图 1 (网络版彩图)静电纺丝的主要设备及纺丝过程^[47]
Figure 1 (Color online) Main equipment and spinning process of electrospinning ^[47] (Copyright©2021, Springer Nature).

表 2 几种常见材料静电纺丝的影响因素^{a)}
Table 2 The influence of electrospinning on several common materials

纺丝材料	溶液参数	工艺参数	环境参数
	溶液黏度、电导率、液体表面张力	电场强度、进料速率、收集距离	温度、湿度
TPU	20 wt%, DMF/THF	10 kV, 0.3 mm/min, 18 cm	25°C, 45% ^[56]
PVDF	12 wt%, DMF/acetone	14 kV, 0.8 mL/h, 16 cm	25°C, 45% ^[59]
PVA	10 wt%, DIW	20 kV, 0.5 mL/h, 10 cm	25°C, 45% ^[64]
PVP	10 wt%, ethanol	12 kV, 0.05 mL/min, 10 cm	22°C, 25% ^[67]
PI	15 wt%, DMAc	10 kV, 0.36 mL/h, 15 cm	25°C, 35% ^[68]
PAN	18 wt%, DMF	15 kV, 0.2 mL/h, 18 cm	25°C, 45% ^[71]

a) TPU: Thermoplastic polyurethane; PVDF: Polyvinylidene fluoride; PAN: Polyacrylonitrile; PVA: Polyvinyl alcohol; PI: Polyimide; PVP: Polyvinyl pyrrolidone.

2.2.1 溶液参数

溶液参数中，溶质的分子量和浓度对溶液黏度有着重要影响^[55]。静电纺丝时，为了确保能够顺利纺丝，存在最小溶液浓度。当浓度偏低时，聚合物链的缠结程度低，致使聚合物粒子与纤维的混合物产生。然而，随着溶液浓度的提升，聚合物链的缠结程度也随之增强，从而使得黏弹阻力增大。在液体表面张力、电场力以及黏弹阻力的综合作用下，链段更容易被拉伸成长丝，

这样纺出的纤维直径更加均匀。但是，当浓度偏高时，难以形成喷射流，导致无法纺出纤维^[56]。溶质的分子量对聚合物链的长度起决定性作用，而聚合物链的长度又显著影响着其缠结程度。为了确保纺丝的顺利进行，溶液中必须包含分子量足够大的溶质，以形成充足的链缠结。此外，在溶液静电纺丝过程中，聚合物溶液体系的表面张力和电导率同样扮演着重要的角色，对纺丝效果产生重要影响^[57]。在纺丝过程中，液体表面张力和电导率是影响纤维直径的主要因素。表面张

力倾向于保持液滴的球形表面, 以减小射流的表面积; 而电场力则对液滴产生拉伸作用, 倾向于增加射流的表面积. 通过对两者进行合理调控, 可以控制纤维的细化程度, 从而得到理想的纤维形态^[58,59]. 通过向聚合物溶液中加入盐、电解质或导电填料可以实现对溶液带电能力的调控, 进而控制纺丝的形貌和纤维直径^[60]. 另外, 调整溶剂成分或添加剂的比例也是一种调节表面张力有效的手段^[61].

2.2.2 工艺参数

在工艺参数方面, 纺丝电压是静电纺丝过程中的一个关键因素^[62]. 静电纺丝过程中, 形成射流需要一个最低的电压, 即阈值电压. 但是, 当施加的电压远高于这个阈值时, 射流可能会被击穿. 因此, 我们需要将施加的电压控制在一个特定的范围内. 在纺丝过程中, 增加施加的电压会增大液滴所带的库仑力, 促进射流拉伸. 当电压过高时, 还会导致射流二次喷丝. 同时, 过高的电压会导致纤维喷射不稳定, 使得纤维分布不均匀, 进而影响成品的质量^[63,64]. 在静电纺丝过程中, 为了确保溶剂能够充分挥发, 需要设置适当的收集距离. 对于不同的聚合物纺丝, 收集距离的过长或过短都可能导致珠串纤维的形成. 因此, 合理控制收集距离对于纤维尺寸具有重要影响^[65]. 在纺丝过程中, 聚合物溶液的流动速率会影响纤维的成型速率. 通常情况下, 在较低的进料速率下, 溶液射流的速率会变慢, 这为溶剂提供了充分的时间进行挥发. 然而, 在较高的进料速率下, 单位时间内聚合物链段更为聚集, 使得链段难以充分拉伸, 最终导致纤维的直径和孔径会变大^[66-68]. 但是, 如果进料速率过低, 可能会造成纺丝过程中断. 因此, 针对不同聚合物的纺丝过程, 合理控制进料速率对于确保纺丝的顺利进行至关重要^[69].

2.2.3 环境参数

在环境参数方面, 环境的温度和湿度变化对纺丝过程产生显著影响^[70,71]. 不同的温度和湿度会对各种纺丝溶液产生不同的影响, 目前这些具体影响仍在深入研究中. 但可以肯定的是, 在低环境湿度下, 由于空气较为干燥, 溶液更易挥发, 纤维的干燥效果更佳.

总之, 静电纺丝过程中所使用的聚合物溶液至关重要, 因为聚合物的种类直接决定了静电纺丝所得纤维的特性和应用领域^[72]. 在纺丝过程中, 溶质需要具

有足够大的分子量且能够在溶剂中溶解, 同时, 溶剂要有较好的挥发性^[73]. 溶剂种类对纺丝过程有重要影响, 目前使用较多的溶剂有氯仿、乙醇、二甲基甲酰胺(DMF)和二氯甲烷等, 这些溶剂在纺丝过程中可以较快地挥发, 从而确保射流迅速成纤, 但一般都具有毒性, 且残留的溶剂不利于其在生物工程方面的应用^[74]. 因此, 近年来一些水溶性聚合物, 例如羟乙基纤维素、聚乙烯醇、聚乙烯吡咯烷酮等, 以水作为溶剂, 所纺纤维膜无有毒溶剂残留, 更有利于生物应用研发, 但水的挥发性较差, 以水为溶剂对聚合物溶液的浓度有更高的要求^[75].

综上所述, 静电纺丝技术制备的纤维直径通常在 $0.1\sim1\ \mu\text{m}$ 之间, 相较于其他纺织技术所生产的纤维, 其直径更小. 因此, 这种纤维膜拥有更大的比表面积, 同时纤维的精细程度也很高, 尺寸易于控制. 同时, 静电纺丝纤维膜表面易功能化, 可以进行表面涂覆及改性, 从而得到具有多功能的超薄轻质复合纤维膜, 这在电磁屏蔽领域具有极大的应用前景. 传统的金属电磁屏蔽复合材料具有成本昂贵、密度高、质量大和易腐蚀等缺点, 很难满足现实需求, 而聚合物电磁屏蔽复合材料能够有效弥补以上缺陷, 具有成本低、密度低、质量小和耐腐蚀的优点. 更重要的是, 静电纺丝技术制备的电磁屏蔽复合材料相较于其他聚合物电磁屏蔽复合材料, 不仅具有以上优点, 还能够在超薄厚度下利用纤维膜的多孔结构在内部多次反射消耗掉电磁波, 提高吸收比例. 到目前为止, 许多研究都致力于探索具有优异的EMI屏蔽性能的静电纺丝纤维膜, 这是因为它们具有高孔隙率、小直径、良好的机械性能和大量用于耗散电磁波能量的界面.

3 MXene

MXene是一种新兴的2D材料, 属于过渡金属碳化物或氮化物类, 具有亲水表面、高电导率以及优异的机械性能, 因此在海水淡化、催化、微波吸收、电磁干扰屏蔽等领域具有潜在的应用前景^[76].

3.1 MXene材料的组成

MXene的化学式为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$, 其中M是过渡金属, A是元素周期表中的IIIA或IVA族元素, X是C或N, n 等于1、2或3, T_x 表示Ti表面存在的终止官能团, 主要为

-F, -O, -OH等负电性官能团, 如图2(a), 一般来说, MXene是通过刻蚀掉MAX相中的A层得到, MAX是层状碳化物或氮化物, 刻蚀后的MXene是多层结构, 需要剥离为少层或单层才能具有更高的导电性, 图2(b)和(c)分别表示MXene的刻蚀过程及其相对应的微观结构^[77,78]. 至今, 已经发现的MAX多达60种, 其中, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 是最早发现的MXene的一种, 由于其制备相对简单、结构可控和层数可调的优点^[79], 是目前为止研究最为广泛的MXene的一种, 同时, 由于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 具有多种结构和形貌, 如多层、少层、纳米级颗粒、量子点等, 已经在传感器、电催化、光催化、离子吸附、生物医用、微波吸收和电磁干扰屏蔽^[80]等方面取得了一系列的成果, 具有极高的研究价值.

3.2 MXene材料的制备方法

MXene材料有多种类型, 刻蚀是获得多层MXene的常用方法. 常见的刻蚀方法有氢氟酸(HF)刻蚀^[81]、

原位HF刻蚀^[82]、无氟刻蚀^[83]、电化学刻蚀^[84]和熔盐刻蚀^[85].

3.2.1 HF刻蚀

在MXene前驱体的MAX相中, “M”和“A”元素之间存在较强的金属键, 这会导致使用传统的机械剥离方法很难分离MAX层. 但是, 与“M”和“X”之间形成的共价键相比, “M”和“A”之间形成的金属键相对较弱, 从而可以使用HF或含氟刻蚀剂刻蚀掉MAX相中的A层以得到MXene. 但是, 用HF或含氟刻蚀剂刻蚀后的MXene属于多层结构, 且层与层之间具有很强的相互作用, 不易于大量制备单层或少层MXene. 目前, 获取单层或少层MXene的常用方法是通过在多层MXene之间引入插层剂, 例如有机溶剂或金属离子, 随后进行机械剥离.

Rakhi等人^[86]通过HF处理从 Ti_2AlC -MAX相中选择性刻蚀Al层, 制备了二维 Ti_2CT_x -MXene纳米片, 同

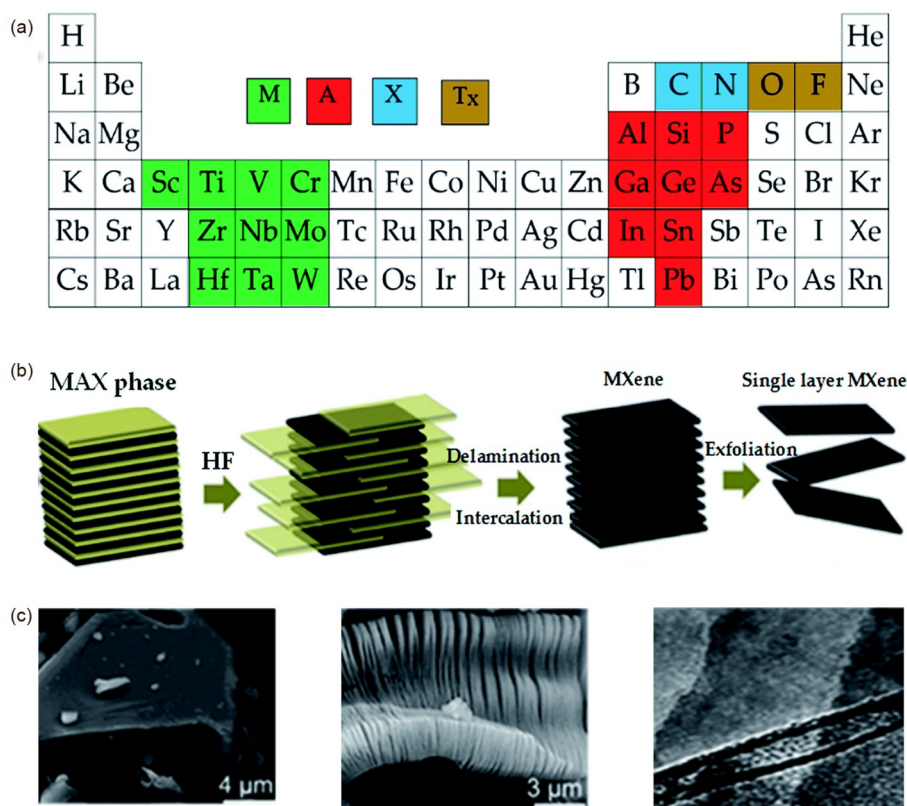


图 2 (网络版彩图) MXene. (a) MXene的组成元素^[78], (b) MXene的刻蚀过程^[78], (c) MXene刻蚀过程中的微观形貌^[78]

Figure 2 (Color online) MXene. (a) Components of MXene^[78] (Copyright©2019, Royal Society of Chemistry); (b) etching process of MXene^[78] (Copyright©2019, Royal Society of Chemistry); (c) microscopic morphology during etching process of MXene^[78] (Copyright©2019, Royal Society of Chemistry).

时, MXene片保留了母体 Ti_2AlC -MAX相的六方对称性。类似地, 对其他种类的MXene也有研究, Huang等人^[87]采用HF刻蚀 Ti_3AlC_2 制备了 Ti_3C_2 -MXene, 并对 Ti_3C_2 进行了简单的溶剂热处理, 在处理过程中会产生 TiO_2 和 Ti_2C , 图3(a)表示 Ti_3AlC_2 的刻蚀过程。根据FTIR和XRD的结果, 发现 TiO_2 和 Ti_2C 的形成会增加所制备的 Ti_3C_2 -MXene的层间距, 从而提高MXene的吸附性能。这种由HF刻蚀制成的MXene可以在各种pH条件下吸收双氯芬酸钠(DCF), 并保持较高的吸附速率, 因此在环境保护方面具有重要应用价值。在HF刻蚀过程中, 研究人员发现不同刻蚀条件对刻蚀效果会产生不同的影响效果。因此, Munir等人^[88]为了探索从MAX相中有效的剥离出MXene, 研究了刻蚀剂HF的浓度、中间插层剂和超声处理时间对合成过程的影响, 对不同参数处理得到的MXene纳米片进行XRD, FTIR, SEM, AFM和拉曼光谱分析, 发现用30%的HF溶液刻蚀后, 再用二甲基亚砜(DMSO)进行插层, 最后超声135 min会得到结构较好的少层MXene纳米片, 图3(b)~(d)表示不同刻蚀条件的处理过程。尽管HF刻蚀MXene的效果比较好, 且对HF刻蚀的相关研究很多, 但是刻蚀过程中存在很大的风险, 极大地限制了这种方法的大量使用。

3.2.2 原位HF刻蚀

由于HF具有高度腐蚀性, 在刻蚀过程中存在一定的危险性, 会给研究人员带来安全威胁, 因此迫切需要使用对人体温和的刻蚀剂来制备MXene。

Kim等人^[89]分别研究了HF刻蚀和原位HF刻蚀对制备MXene的不同影响, 图3(e)表示两种不同方法刻蚀的机理图。原位HF刻蚀中的HF是由LiF和HCl逐渐反应生成的, 所以原位HF刻蚀的HF的浓度要比HF刻蚀低很多, 这会导致刻蚀时间变长。HF直接刻蚀的强度大于LiF和HCl反应的刻蚀强度, 能够穿透单个晶界, 会导致 Ti_3AlC_2 颗粒中的多晶颗粒被破碎成单个单晶颗粒。相比之下, 使用LiF和HCl刻蚀时, 多晶颗粒即使在刻蚀24 h后仍保持完整。与HF刻蚀方法相比, LiF和HCl刻蚀可以在刻蚀过程中预插入 Li^+ , 从而增加MXene层间距并削弱了层与层之间的相互作用, 以便于在超声过程中得到少层或单层MXene。因此, 原位HF刻蚀被视为一种新颖、安全且高效的方法来制备MXene。所制得的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 不仅电导率高, 还展现出卓越

的亲水性和出色的成膜特性。由于原位HF刻蚀相对于HF刻蚀具有很大的优势, 这吸引了众多科研人员采用这种方法制备MXene。

Sheng等人^[90]首次成功制备了含MXene的水性聚氨酯(WPU)防腐涂料, 通过HF原位刻蚀MAX相材料, 并进一步通过水分子(DIW)插层, 超声剥离后获得单层MXene纳米片。在引入MXene纳米片后, WPU涂层可以实现增强紫外线阻挡和提高耐腐蚀性的双重目标。在此基础上, Ashok等人^[91]开发了 NH_4OH 辅助原位HF刻蚀技术, 先用LiF和HCl合成HF对MXene进行刻蚀, 然后通过添加不同浓度的 NH_4OH 溶液对其进行改性, 最后使用聚偏氟乙烯(PVDF)膜在真空中过滤胶体分散液。通过碱性溶液辅助稀释MXene分散液能够快速控制pH, 并改善化合物的结构、形态和光学性质。同时, 在反应过程中形成的 NH_4F 不仅会减少MXene表面的氧化, 还能够继续刻蚀溶液中剩余MAX相中的Al层, 从而得到高质量高产率的MXene。研究发现, 在添加 NH_4OH 后所制备的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -MXene的结构特征明显优于HF刻蚀的样品, 尤其在XRD中MXene的特征峰更为明显。这种氨溶液的加入改善了温和的原位HF刻蚀技术, 使MXene分层明显, 且在自然环境中更稳定地抗氧化, 延长了使用寿命。目前, 由于原位HF刻蚀方法比较成熟, 能够安全高效地制备MXene, 吸引了研究人员的广泛关注, 已成为MXene制备的主流方法, 在未来这种方法肯定能得到进一步的改进和完善。

3.2.3 无氟刻蚀

尽管氟基试剂一直是MXene制备的主流试剂, 且HF原位刻蚀相对于HF刻蚀更加温和, 也更加安全, 但含氟刻蚀剂仍具有一定的毒性, 对人体存在危害, 还会使得刻蚀后层状MXene易于堆叠。近年来, 无氟刻蚀技术引起了研究人员的注意。

Xue等人^[92]首先采用无氟化学联合球磨法制备了具有独特分级多孔结构的 Ti_3C_2 , 用四甲基氢氧化铵(TMAOH)和LiCl作为刻蚀剂, 在球磨提供的机械应力的作用下, TMAOH可以起到刻蚀和插层的双重作用。同时, 氯离子的存在会阻碍 Ti_3C_2 中钛原子的氧化。采用这种方法所制备的 Ti_3C_2 显示出显著增加的比表面积, 比传统用HF处理获得的 Ti_3C_2 的比表面积高8倍, 表现出优异的电化学性能。因为多孔结构和无氟端基的存在, 这种独特的 Ti_3C_2 将是负载其他功能材料的理想

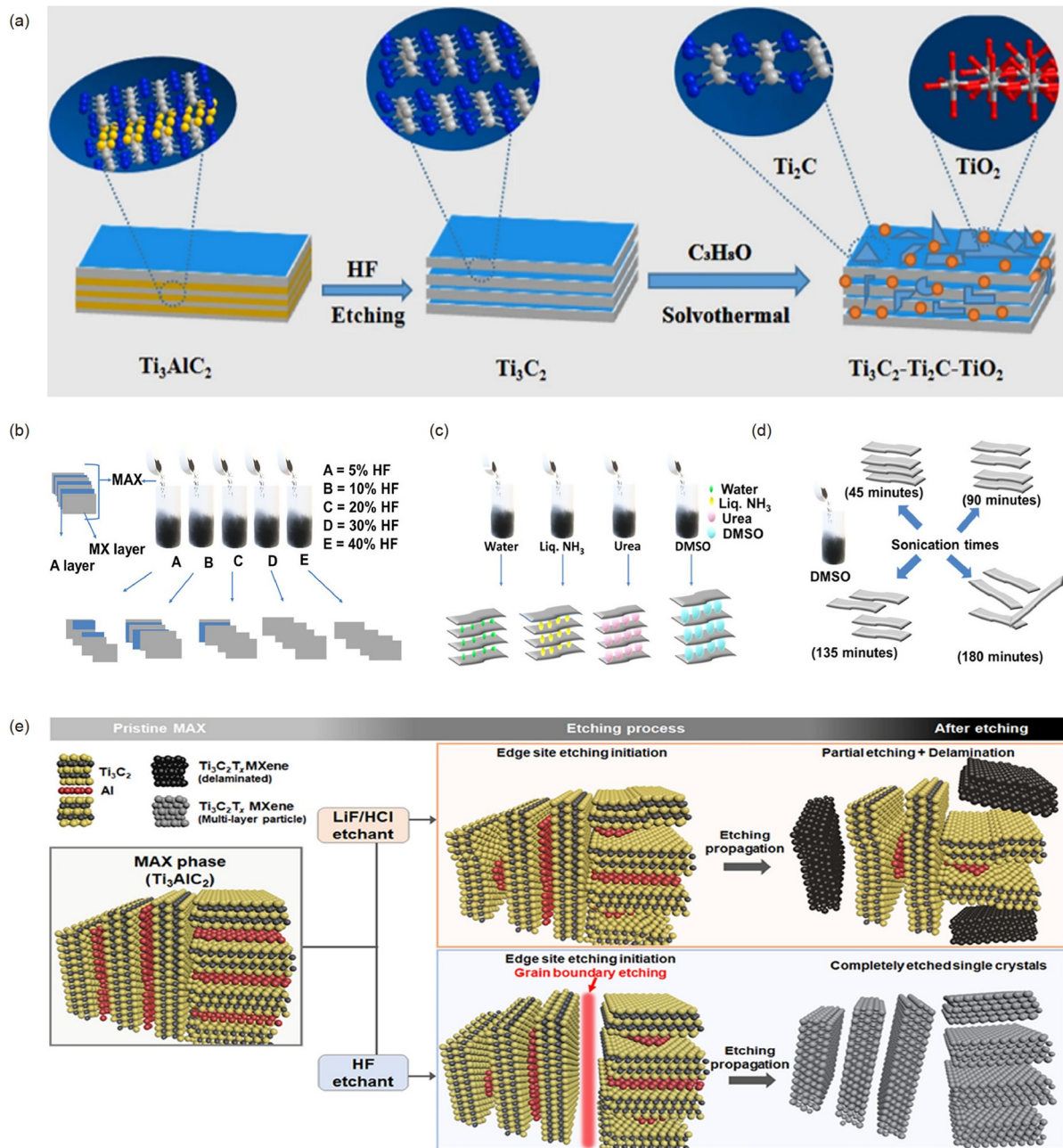


图 3 (网络版彩图) HF刻蚀和原位HF刻蚀. (a) HF刻蚀 Ti_3AlC_2 的过程^[87]; (b) 不同浓度的HF进行处理^[88]; (c) 不同种类的插层剂进行处理^[88]; (d) 不同超声时间进行处理^[88]; (e) HF刻蚀和原位HF刻蚀的机理演示^[89]

Figure 3 (Color online) HF etching and in situ HF etching. (a) Process of HF etching Ti_3AlC_2 [87] (Copyright©2023, Springer Nature); (b) treatment with different concentrations of HF [88] (Copyright©2020, American Chemical Society); (c) treatment with different kinds of intercalators [88] (Copyright©2020, American Chemical Society); (d) treatment with different ultrasonic times [88] (Copyright©2020, American Chemical Society); (e) mechanism demonstration of HF etching and in situ HF etching [89] (Copyright©2021, American Chemical Society).

基底, 图4(a)表示无氟刻蚀的机理图. Mayyahi等人^[93]开发了一种简便、无氟、高效的制备 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-OH}$ 的方

法, NaOH辅助刻蚀MAX相中Al层的同时, 再插入联胺(N_2H_4)及其衍生物以生产少层MXene. 该工艺不需要

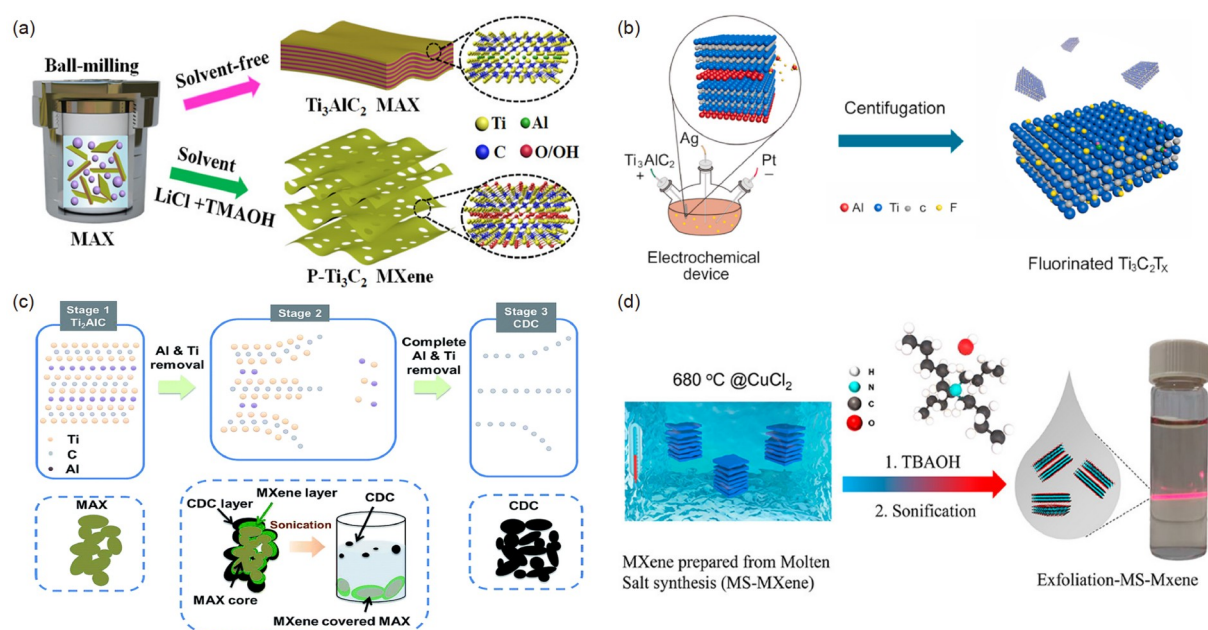


图4 (网络版彩图)其他刻蚀方法。(a) 无氟刻蚀的机理图^[92]; (b) 电化学刻蚀的机理图^[97]; (c) 电化学刻蚀的过程^[99]; (d) 熔盐刻蚀的机理图^[101]

Figure 4 (Color online) Other etching methods. (a) Mechanism diagram of fluorine-free etching ^[92] (Copyright©2020, American Chemical Society); (b) mechanism diagram of electrochemical etching ^[97] (Copyright©2021, Elsevier); (c) process of electrochemical etching ^[99] (Copyright©2017, Royal Society of Chemistry); (d) mechanism diagram of molten salt etching ^[101] (Copyright©2022, American Chemical Society).

使用含氟化合物, 且无需合成后处理即可生产 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-OH}$ 纳米片。

目前关于无氟刻蚀的方法还有很多, 例如, Jawaid等人^[94]借助无水介质中的卤素(Br_2 , I_2 , ICl , IBr)来合成MXene。由于卤素元素与Al具有高反应性, 在无水溶剂中MXene的表面能够与有机分子杂交进行改性, 且反应的副产物可以通过添加稳定剂盐来整合, 所得纯化的卤化MXene可分散在常见的有机溶剂中, 这也为无氟刻蚀技术提供了新的思路。由于MXene水分散液容易氧化, Xue等人^[95]利用无氟试剂(TMAOH)刻蚀 Ti_2AlC 粉末, 得到富含氧基团的 Ti_2C , 大大提高了分层 Ti_2C 水溶液的稳定性。分层后的O- Ti_2C 水溶液可稳定保存30 d, 远高于HCl和LiF刻蚀后的F- Ti_2C (24 h内完全氧化)。这项工作大大延长了 Ti_2CT_x 的使用寿命, 为O- Ti_2C MXenes的大规模应用和性能提升奠定了基础。另外, Xie等人^[96]提出了一种高浓度NaOH溶液与NaClO溶液混合作为刻蚀剂制备无氟 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的方法。基于碱辅助水热法, 以 Ti_3AlC_2 为原料, 在刻蚀过程中加入10% NaClO水溶液作为氧化剂, 加速刻蚀, 原位生成导电性能优异的 TiO_2 。当氧化时间为12 h, NaClO用

量为0.2 mL时, MXene中Ti元素氧化原位生成的 TiO_2 颗粒均匀分布在材料表面和层间, 有效地抑制了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 层间的堆积问题, 提高了材料的比表面积。此外, 这种制备方法有效减少了实验过程中不必要的损失, 并且在整个实验过程中不使用剧毒、电化学惰性的含氟溶液, 为绿色高效制备MXene复合材料提供了新的途径。

3.2.4 电化学刻蚀

除了无氟刻蚀外, 另一种很有前途的刻蚀方法是层状材料的电化学刻蚀, 近年来, 通过电化学刻蚀制备MXene也引起了研究人员的注意。

Yin等人^[97]提出了一种绿色温和的电化学剥离方法来合成 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{F}_x$, 并同步控制其表面的氟化程度。在刻蚀过程中, 使用一种非水离子液体([BMIM][PF₆])作为电解质, 所制备的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{F}_x$ 再用CF和 TiF_3 基团进行氟化。由于这两种基团具有较好的电化学活性, 确保了MXene基阳极锂离子电池的循环稳定性, 图4(b)表示电化学刻蚀的机理图。Shen等人^[98]通过熔盐辅助电化学刻蚀法, 将电子作为反应介质, 制备了无氟的

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Cl}_2$. 在 LiCl-KCl 盐中保持2.0 V的电解电压, 由于电化学和热化学的综合作用, 最终产物为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Cl}_2$, 在进一步加入各种无机盐后, 可以将表面末端基团从-Cl原位反应为-O或-S, 大大缩短了反应步骤, 丰富了表面末端基团的种类. 并且, 该过程合成后不会产生酸性废液, 盐可重复利用, 是一种绿色可持续的制备MXene的方法. 类似地, Sun等人^[99]在稀盐酸中从多孔 Ti_2AlC 电极上电化学刻蚀Al层, 进而在 Ti_2AlC 上形成一层 Ti_2CT_x -MXene. 通过这种方法制备的MXene仅存在Cl基团和一些常见的基团, 如-O和-OH, 图4(c)表示电化学刻蚀的过程.

Nouseen等人^[100]创造性地将3D打印技术与MXene的合成过程相结合, 为MXene的大规模生产和长期储存提供新的前景. 首先, 通过熔融沉积制造(FDM)3D打印技术制备新型的MAX(Ti_3AlC_2)/聚乳酸(PLA)长丝, 然后将3D打印的MAX/PLA长丝置于HCl和NaOH的混合溶液中进行电化学刻蚀, 最终得到的产物在光电化学析氢反应(HER)和电容性能方面表现出良好的性能. 总的来说, 这项工作展示了大规模制造MAX/PLA长丝和电化学蚀刻MAX电极的生产路径, 而不使用有毒的HF进行能量转换和储能应用. 与HF刻蚀方法相比, 电化学刻蚀在安全性方面表现更优, 无需苛刻的反应条件, 同时避免了含氟化合物的使用.

3.2.5 熔盐刻蚀

考虑到HF刻蚀方法的危险性和对环境的不友好, 人们一直致力于开发避免使用HF的新方法, 而熔盐刻蚀是最近开发的一种新方法.

Liu等人^[101]报道了通过嵌入有机分子四丁基氢氧化铵(TBAOH), 然后进行超声分离处理, 成功剥离得到熔盐MXene, 图4(d)表示熔盐刻蚀的机理图. 在嵌入TBAOH之前, 将 Ti_3AlC_2 和 CuCl_2 在 680°C 下混合反应以除去Al层, 紧接着将生成的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Cl}_2$ 粉末进一步浸泡在过硫酸铵(APS)氧化溶液中用来除去Cu颗粒. 这种新型的刻蚀方法很独特, 具有一定的创新性, 目前还处于研究的初始阶段, 吸引了大量研究人员的关注. Ou等人^[102]通过连续的离子插层, 可以有效地控制熔盐刻蚀MXene的层间结构. 该过程先将MXene浸入LiOH溶液中, 然后再浸入NaOH和KOH的混合碱性溶液中, 使较小的Li离子预插层, 促进随后较大的Na离子和K离子连续插层. 这种方案制备的Li/Na/K-MXene

具有明显的储锂能力, 提高了熔盐刻蚀MXene的电化学性能和储能能力.

Arole等人^[103]通过熔盐刻蚀和KOH洗涤制备了水分散性好的MXene, 与酸刻蚀的MXene相比, 熔盐刻蚀的MXene氧化很慢, 这可能是因为经过KOH处理后MXene表面含氧端基的量大量减少. 同时, Arole等人^[104]使用熔盐(SnF_2)刻蚀生产水分散 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片, 弥补了传统熔盐刻蚀导致MXene不溶于水的缺点. 在熔盐(SnF_2)刻蚀过程中, SnF_2 在MXene层之间扩散形成副产物 AlF_3 和Sn, 并将层分开. 这项研究开辟了一种新的、安全的、工业上可行的方法来制造可分散的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片. 类似地, Xi等人^[105]采用熔盐刻蚀法制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Ni}$ 复合材料, 并保存着完整的手风琴结构, 同时Ni纳米颗粒均匀地固定在层间和表面, 可以有效防止 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 堆积. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 与Ni纳米粒子的协同作用使复合材料具有良好的导电性、超高的比表面积和优异的稳定性. 熔盐刻蚀作为一种新型的MXene制备方法, 使用熔盐代替HF作为刻蚀剂, 制备过程中的危险性更小, 同时还解决了水性刻蚀法废液量大和环境污染大的问题.

目前, 关于MXene材料的研究越来越多, 制备方法开始出现多样化, 但是应用最多的还是原位HF刻蚀. 相对于HF刻蚀, 原位HF刻蚀极大地降低了制备风险, 且工艺比较成熟, 产率相对可控, 研究人员在实验室阶段大都采用此种方法合成MXene及其复合材料. 而其他三种方法相对于原位HF刻蚀, 在制备方案的安全性或MXene的多样性方面具有一定的改进, 但实际应用相对来说很少, 一方面是因为这些方法研究的比较晚, 还处于探索阶段, 另一方面是因为这些方法制备的MXene不仅对刻蚀前的原料具有选择性, 还在后续的应用中具有一定的局限性, 例如, 电化学刻蚀得到的MXene在电容器以及储能方面的应用价值更大, 但在其他领域的应用价值相对要小一点. 因此, 研究人员在使用原位HF刻蚀法制备MXene时, 也应该不断对无氟刻蚀、电化学刻蚀以及熔盐刻蚀方法进行改进, 在确保高产率和低风险的情况下, 对不同MXene的种类进行探索, 打破MXene少批次生产的局限性, 并且拓宽MXene的应用范围. 相信在不久的将来, MXene材料的制备方法会更加完善, 且在众多领域都展现出巨大的应用价值. 表3为MXene的制备方法和具体的工艺参数.

表 3 MXene的制备方法和具体的工艺参数

Table 3 The preparation methods and specific process parameters of MXene

制备方法	刻蚀剂	插层剂	参考文献
HF刻蚀法	HF	DMSO, Metal ion	[86~88]
原位HF刻蚀法	LiF, HCl	DIW, NH ₄ OH, LiF	[89~91]
无氟刻蚀法	TMAOH, LiCl, NaOH, NaClO, Br ₂ , I ₂ , ICl, IBr	TMAOH, N ₂ H ₄	[92~96]
电化学刻蚀法	[BMIM][PF ₆], LiCl-KCl, HCl, NaOH	Inorganic salts	[97~100]
熔盐刻蚀法	CuCl ₂ , SnF ₂	NaOH, KOH, AlF ₃	[101~104]

4 静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料

静电纺丝技术制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料是当前的研究热点, 而利用静电纺丝技术经过一步法直接制备出聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料的研究很少, 绝大部分研究都是对静电纺丝薄膜进行后处理制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料, 这是因为在一般情况下, 通过静电纺丝技术直接制备的薄膜不具有或者具有较低的电磁屏蔽性能, 且功能比较单一, 往往满足不了实际应用的需求. 因此, 需要将静电纺丝薄膜经过特殊的后处理才能满足现实要求, 常见的处理技术有浸渍沉积技术、喷射沉积技术和真空沉积技术.

4.1 一步法静电纺丝制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料

一步法静电纺丝制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料就是将MXene与静电纺丝溶液共混直接制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料. 同时, 通过调整复合膜的结构与层数, 可以实现MXene在复合材料中应力集中较小的情况下具有较高的导电性.

Liu等人^[106]采用一步法静电纺丝技术制备出内嵌MXene的新型电磁屏蔽聚偏氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)复合材料, 其合成过程如图5(a)所示. MXene嵌入纳米纤维的独特结构使MXene/PVDF-HFP复合材料具有良好的疏水性、透气性、增强的力学性能、优异的耐腐蚀性和柔韧性. 当厚度为95 μm 时, 复合材料在整个X波段具有极好的特定电磁屏蔽效能, 高达160 dB/mm, 且拉伸强度能达到20 MPa. 此外, 复合材料在腐蚀溶液中长期浸泡时, 其电磁屏蔽性能几乎没

有下降. 这项研究对未来探索设计出具有优异机械稳定性和环境稳定性的MXene基可穿戴EMI屏蔽材料具有重要意义. Zhang等人^[107]报道了一种具有三层结构的静电纺丝复合膜, 上下层为Fe₃O₄/聚乙烯醇, 中间层为Ti₃C₂T_x/聚乙烯醇, 这些层通过热压技术紧密结合在一起. 这种复合膜的导电性能非常出色, 其电导率达到了120 S/m, 并在X波段展现出了40 dB的屏蔽效能, 远高于用共混静电纺丝技术制备的(Fe₃O₄/Ti₃C₂T_x)/PVA电磁屏蔽复合膜(21 dB). 这种新型夹层复合材料具有令人满意的电磁屏蔽性能、热导率和力学性能, 在智能和便携式器件领域具有极大的发展前景. 目前, 关于将MXene与静电纺丝溶液共混直接制备电磁屏蔽复合材料的研究很少, 主要是因为纤维膜中MXene纳米片很难均匀分布. MXene含量较低时无法在聚合物中构建完整的导电通路; MXene含量较高时容易发生团聚, 严重影响纤维的机械性能, 并限制电磁屏蔽性能的进一步提升. 因此, 为了实现较高的电磁屏蔽性能, 研究人员开始通过后处理技术将MXene与静电纺丝纤维膜相结合制备出具有优异电磁屏蔽性能的多功能复合材料.

4.2 多步法静电纺丝制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料

多步法静电纺丝制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料就是对静电纺丝纤维膜进行后处理加工, 使其表面能够沉积MXene. 这种处理方法可以有效地弥补一步法静电纺丝制备聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料的缺点, 即在MXene含量较低时, 导电网络仍然比较完整, 从而使复合材料获得较高的导电性; 反之, 高MXene含量下也不会出现大量团聚, 减少应力集中. 常见的处理技术有浸渍沉积技术、喷射沉积技术

和真空沉积技术。

4.2.1 浸渍沉积技术

浸渍沉积技术是一种制备静电纺丝复合材料的简单工艺, 浸渍溶液可以通过浸渍沉积紧密地包裹在纤维表面, 这是因为静电纺丝纤维的高表面积可以使得浸渍溶液更好地接触纤维。利用浸渍沉积技术, 在静电纺丝纤维表面覆盖一层功能涂层, 这种方法可以有效地阻挡电磁波。

Zhang等人^[108]报道了一种多层结构的静电纺丝复

合材料, 这种材料不仅具有良好的柔韧性, 还具备优异的机械性能。该研究团队采用“静电纺丝-浸渍沉积-热压技术”的工艺流程, 巧妙地将不同尺寸的纳米填料进行分层组合, 构建出网络结构, 从而成功制备了具有一维银纳米线(AgNWs)网络和二维MXene网络的夹层结构复合膜, 图5(b)表示WPU-Ti₃C₂T_x/WPU-AgNWs/WPU-Ti₃C₂T_x复合材料的合成过程。研究发现, 在AgNWs含量逐渐增加的情况下, 复合膜不仅维持了其出色的柔韧性与机械性能, 同时还展现出了卓越的电磁屏蔽效能, 厚度为150 μm的夹层复合膜的拉伸强度

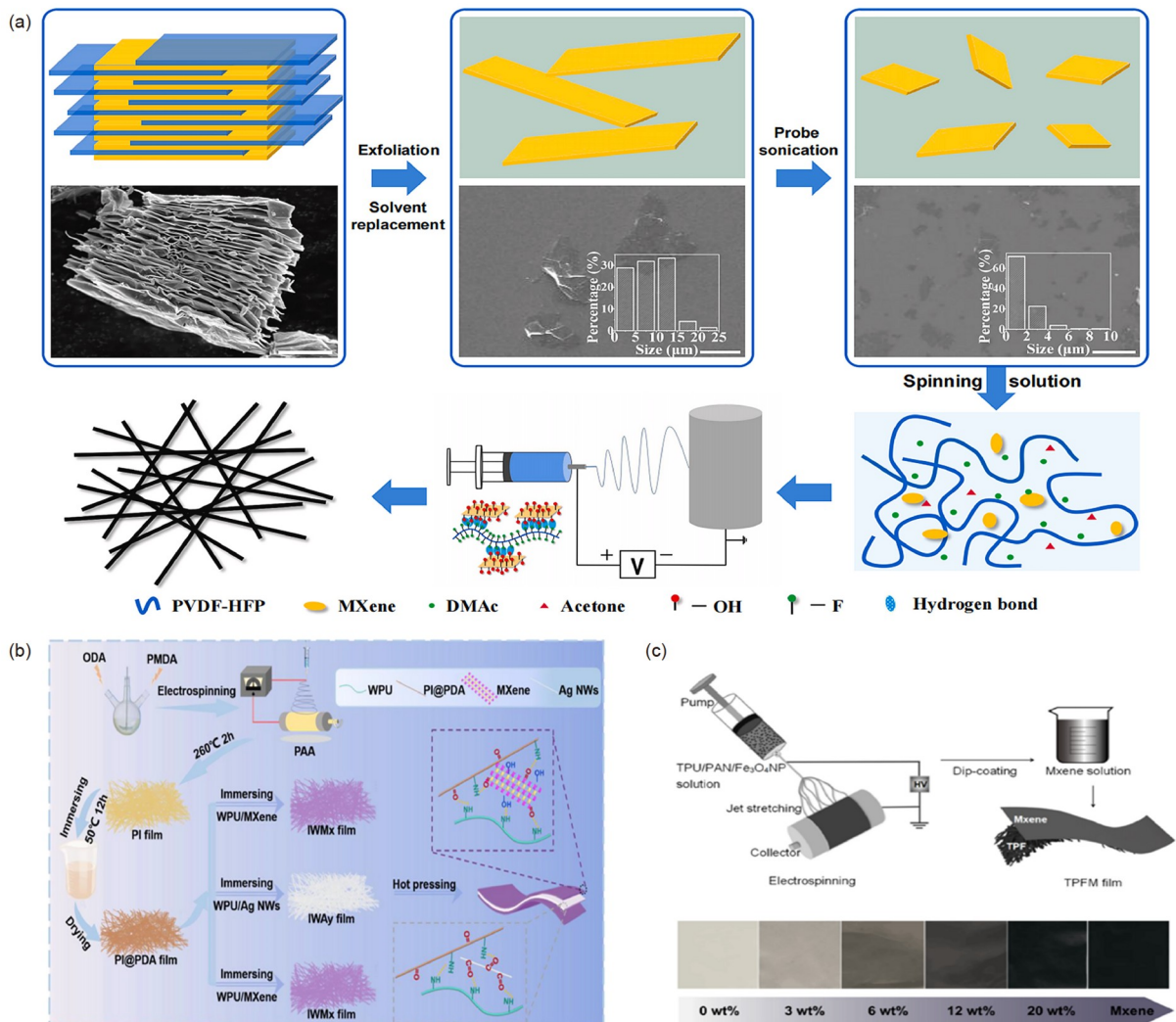


图 5 (网络版彩图) (a) MXene/PVDF-HFP复合材料的合成过程^[106]; (b) WPU-Ti₃C₂T_x/WPU-AgNWs/WPU-Ti₃C₂T_x复合材料的合成过程^[108]; (c) TPU/PAN/Fe₃O₄/MXene复合材料的合成过程^[109]

Figure 5 (Color online) (a) Synthesis process of MXene/PVDF-HFP composite ^[106] (Copyright © 2022, Elsevier); (b) synthesis process of WPU-Ti₃C₂T_x/WPU-AgNWs/WPU-Ti₃C₂T_x composite ^[108] (Copyright©2023, Elsevier); (c) synthesis process of TPU/PAN/Fe₃O₄/MXene composite ^[109] (Copyright©2022, Multidisciplinary Digital Publishing Institute).

和屏蔽效能可分别达到39.82 MPa和79.54 dB. 因此, 这种具有超高电磁屏蔽性能和拉伸性能的夹层结构聚酰亚胺(PI)复合膜在新一代电子产品中展现出巨大的应用前景.

Miao等人^[109]采用静电纺丝技术制备了一种独特的热塑性聚氨酯/聚丙烯腈/三氧化二铁(TPU/PAN/Fe₃O₄)纤维膜, 然后通过简单的浸渍工艺将MXene分散液沉积在其表面得到TPU/PAN/Fe₃O₄/MXene复合膜, 其制备工艺如图5(c)所示. 在静电纺丝过程中, Fe₃O₄纳米颗粒均匀地附着在TPU/PAN纤维上, 能达到18.9 emu/g (1 emu/g=1 A m²/kg)的高磁化强度, 使纤维膜具有有效的电磁屏蔽性能. 由于PAN的大分子链与MXene表面的官能团之间会产生氢键, 因此将MXene负载到TPU/PAN/Fe₃O₄纤维膜上能够进一步增强纤维膜的电磁屏蔽性能, 在X波段达到32.5 dB的优异电磁屏蔽效能, 且500次重复弯曲后仍能保持屏蔽性能. 静电纺丝技术能够有效地将Fe₃O₄纳米颗粒均匀分散在纤维上, 同时这些磁性纳米颗粒与MXene纳米片相互影响, 共同发挥出卓越的电磁屏蔽性能. TPU/PAN/Fe₃O₄/MXene电磁屏蔽复合材料的轻质化和稳定的机械性能表明它未来有望应用于柔性智能可穿戴电子设备中. 通过浸渍沉积技术将MXene有效地沉积在纤维膜表面可以实现较高的电磁屏蔽性能, 上述的相关研究中还分别向复合材料中加入导电性AgNWs和导磁性Fe₃O₄以进一步增强电磁屏蔽性能, 这种方法对未来构建聚合物基MXene增强电磁屏蔽复合材料的研究进展具有重要意义.

4.2.2 喷射沉积技术

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, 它能有效地将导电纳米颗粒均匀地覆盖在纤维表面上. 利用这一技术, 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EMI屏蔽性能.

Li等人^[110]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)复合膜, 图6(a)表示MXene/PU复合材料的合成过程. MXene/PU复合膜的电磁屏蔽效能能达到38 dB, 即使在拉伸20%的情况下该复合膜的EMI屏蔽能力仍能超过商业标准. 由于MXene具有多层多孔网络结构

及其本身优异的导电性和导热性, 使得MXene/PU复合膜具出较好的焦耳加热性能, 比如更低的电压驱动和更快的热响应. 此外, 外层的PU能够有效减缓氧气的进入, 一定程度上减少了内层MXene的氧化, 从而保证复合膜的使用寿命. 静电纺丝结合喷射沉积技术是一种常见的制备电磁屏蔽复合膜的方法, 当层与层之间结合力较弱时就需要引入热压工艺, 促进层与层之间紧密结合, 例如, Zhang等人^[111]利用“静电纺丝-喷射沉积-热压技术”制备了一种具有良好热稳定性和高韧性的“三明治结构”EMI屏蔽膜, 夹层膜由两层相同的银纳米线-聚酰亚胺(AgNWs-PI)纤维膜和一层高导电的MXene纳米片组成, 图6(b)表示AgNWs-PI/MXene/AgNWs-PI复合材料的合成过程. 该复合膜具有极好的电磁屏蔽性能, 在X波段能达到40.73 dB. 研究发现, 将AgNWs-PI/MXene/AgNWs-PI复合膜长期放置在强酸、强碱以及海水中, 其电磁屏蔽性能几乎保持不变, 这是因为PI的存在使复合膜具有优异的机械性能、热稳定性和高温耐久性, 同时, 独特的夹层结构使该材料具有优异的隔热性能和阻燃性能, 使其在恶劣环境中具有耐用性. 因此, 这种柔性多功能EMI屏蔽膜在恶劣环境中具有巨大的应用潜力.

Yang等人^[112]报道了一种具备双重功能的静电纺丝复合膜, 这种膜结合了MXene纳米片和Fe₃O₄纳米颗粒, 展现出卓越的电磁屏蔽性能. 在厚度为33 μm时, 该复合膜在X波段实现了高达43.83 dB的出色屏蔽效能, 这得益于其优良的多孔结构、Fe₃O₄纳米颗粒的磁损耗特性以及MXene的介电损耗特性. 双功能纤维膜表现出高灵敏度, 具有快速的响应时间和长期稳定性. Li等人^[113]采用连续静电纺丝和简单喷涂相结合的方法制备了一种Janus型结构的相变复合膜, 具有优异的电磁屏蔽效能, 可达87.8 dB. 这种复合膜在具有优异屏蔽效能的同时, 还具有相变热调节、辐射冷却、焦耳加热等性能. 在高温环境下, 高发射率使复合膜具有显著的降低表面温度的能力, 而在夜间或寒冷环境下, 仅需要1.5 V的电压即可为人体维持长期的热舒适温度. Zhai等人^[114]通过静电纺丝和喷射沉积技术制备了热塑性聚氨酯/聚多巴胺/银纳米颗粒/MXene(TPU/PDA/AgNPs/MXene)多功能复合膜, 图6(c)表示其制备过程. 一方面, PDA保护AgNPs免受氧化, 增强AgNPs与TPU之间的结合, 另一方面, MXene可以提高电磁屏蔽和应变传感性能. 当厚度为150 μm时, 多功能纤维膜

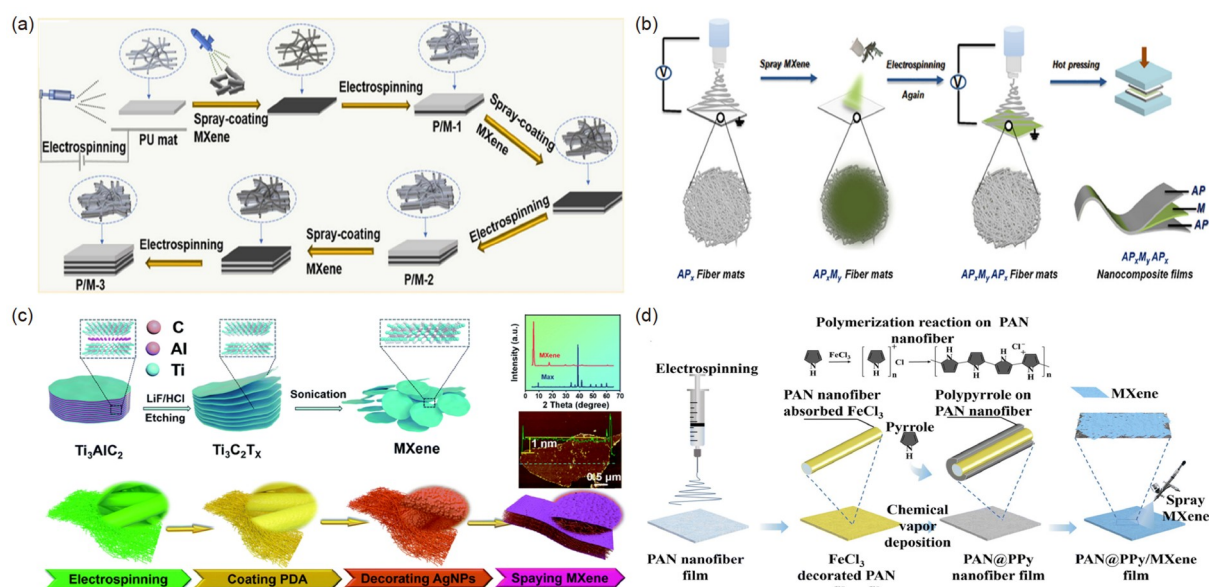


图 6 (网络版彩图)(a) MXene/PU复合材料的合成过程^[110]; (b) AgNWs-PI/MXene/AgNWs-PI复合材料的合成过程^[111]; (c) TPU/PDA/AgNPs/MXene复合材料的合成过程^[114]; (d) PAN@PPy/MXene复合材料的合成过程^[115]
Figure 6 (Color online) (a) Synthesis process of MXene/PU composite ^[110] (Copyright © 2023, Elsevier); (b) synthesis process of AgNWs-PI/MXene/AgNWs-PI composite ^[111] (Copyright©2021, American Chemical Society); (c) synthesis process of TPU/PDA/AgNPs/MXene composite ^[114] (Copyright©2021, Royal Society of Chemistry); (d) synthesis process of PAN@PPy/MXene composite ^[115] (Copyright©2022, Royal Society of Chemistry).

在X波段具有108.8 dB的EMI屏蔽效能。这种智能可穿戴复合膜未来在电磁波防护、电疗、人机交互等方面具有广阔的应用前景，特别是对孕妇的防护尤为重要。Wu等人^[115]利用静电纺丝技术制备聚丙烯腈(PAN)纳米纤维膜，然后通过气相沉积涂覆聚吡咯(PPy)，得到一个连续的三维(3D)导电网络PAN@PPy，如图6(d)所示。最后，在PAN@PPy复合膜上喷涂具有高导电性的MXene纳米片，以提高其电磁屏蔽性能。当厚度为55 μm 时，PAN@PPy/MXene复合膜在X波段具有32 dB的EMI屏蔽效能，同时，在4 V的输入电压下，复合膜的温度可高达170.5°C，并具有快速响应、稳定和长期的焦耳加热性能，这表明在智能可穿戴设备中具有潜在应用价值。

4.2.3 真空沉积技术

真空沉积技术利用真空过滤实现目标沉积，通过基材与目标沉积物之间的相互作用，确保二者紧密结合。利用此技术，导电层会在纤维表面逐层积累，进而构建一道高效的EMI屏蔽膜，使射入的电磁波能在纤维内部得到有效耗散。

Cheng等人^[116]受豆荚结构启发制备了MXene/

PPNs/MXene/TPUEM复合材料。这项研究的亮点是在复合材料的顶层构建三明治结构，其中内层的MXene层是通过真空过滤沉积在纤维表面，而外层的MXene层是通过喷射沉积技术附着在纤维表面，如图7(a)所示。该复合材料主要依靠表面反射和内部吸收来实现电磁衰减，其EMI屏蔽效能为20.2 dB。此外，由复合材料组装的压力传感器具有1.0 V的低工作电压，177.3 kPa的高灵敏度，0~30.4 kPa的宽传感范围和137 ms的快速响应时间，具有监测人体关节运动、语音识别和手腕脉搏的能力。该研究为电磁屏蔽与压力传感复合材料的制备提供了一种新颖的方法，对多功能智能可穿戴设备的发展具有积极的推动作用。Yang等人^[117]采用静电纺丝、真空过滤以及热压技术，成功制备了一种三明治结构的电磁屏蔽复合膜。复合膜的高导电性来源于银纳米线(AgNWs)和MXene的相互作用，其制备过程如图7(b)所示。PVDF-AgNWs复合膜在X波段展现出45.4 dB的优异屏蔽效能。MXene的加入进一步优化了AgNWs导电网络的连通性，从而有效提升了整体的导电性能，制备的PVDF-AgNWs/MXene复合膜展现出47.8 dB的出色电磁屏蔽效能，并且经过2000次的弯曲循环测试后，其屏蔽性能仅略有降低。

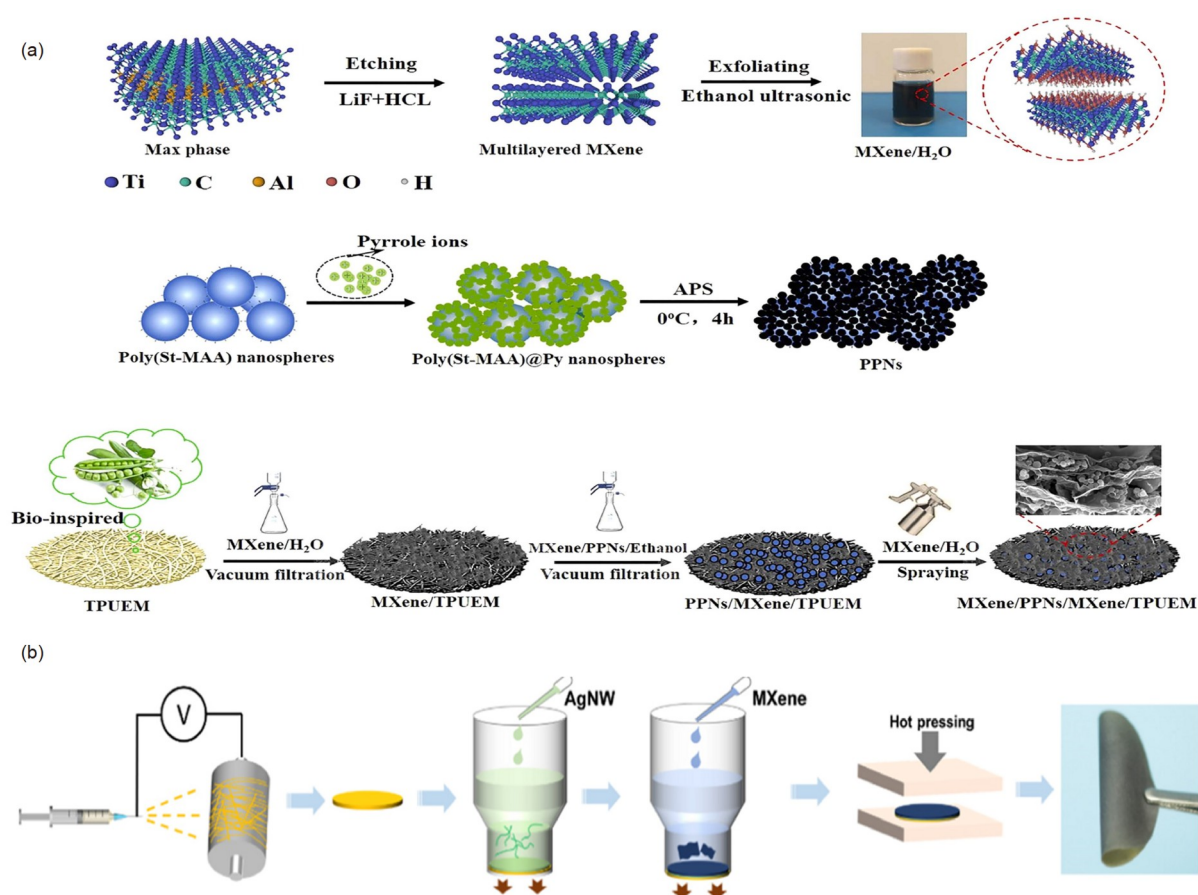


图7 (网络版彩图) (a) MXene/PPNs/MXene/TPUEM复合材料的合成过程^[116], (b) PVDF-AgNWs/MXene复合材料的合成过程^[117]

Figure 7 (Color online) (a) The synthesis process of MXene/PPNs/MXene/TPUEM composite ^[116] (Copyright©2023, Elsevier); (b) the synthesis process of PVDF-AgNWs/MXene composite ^[117] (Copyright©2021, American Chemical Society).

此外, 该复合膜还表现出卓越的焦耳加热性能, 仅需 2.5 V 的电压就能使其表面温度提升至 77°C. 因此, 这种三明治结构复合膜具有增强的电磁屏蔽和焦耳加热性能, 可用于极端条件下的柔性电子设备. Zhang 等人^[118]通过静电纺丝结合原位聚合的方法, 成功合成了 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PAA}$ 纤维膜. 随后, 利用真空过滤法, 在 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PAA}$ 纤维膜表面沉积了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片, 并通过热酰亚胺化处理, 最终得到了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-(\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PI})$ 复合膜. 这种复合膜的两侧展现出完全不同的特性: $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PI}$ 侧具有出色的疏水性和绝缘性, 而 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 侧则表现出亲水性和卓越的导电性. 当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量为 80 wt% 时, 复合膜具有超高的电磁屏蔽性能以及力学性能, 其 EMI 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, 复合膜的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 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°C; 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°C.

5 结论与展望

本文首先介绍了静电纺丝的概念、原理和影响因素, 主要从溶液参数、工艺参数和环境参数三个方面深入总结了静电纺丝的影响因素, 然后详细介绍了 MXene 的元素组成和制备方法, 主要有 HF 刻蚀、原位 HF 刻蚀、无氟刻蚀、电化学刻蚀以及熔盐刻蚀, 最后讨论了用于电磁屏蔽的聚合物基 MXene 增强静电纺丝复合材料的后处理方法, 主要包括浸渍沉积技术、喷射沉积技术和真空沉积技术.

在电子信息技术快速发展的新时代, 研究人员对电磁屏蔽复合材料的研究如火如荼, 新兴的聚合物基电磁屏蔽材料有望取代金属基电磁屏蔽材料. 其中, MXene以其独特的物理化学性能成为EMI领域的研究热点, 将MXene纳米片和静电纺丝聚合物结合在一起能制备出具有超高EMI性能的复合材料. 聚合物基

MXene增强静电纺丝复合材料不仅具有屏蔽效能高、柔韧性好、质量轻和易于制备等优点, 还具有防腐蚀、耐高温、疏水、自清洁等优良性能. 但是, 在实际应用过程中制备出高性能多功能的聚合物基MXene增强静电纺丝复合材料仍然具有很大的挑战, 主要从以下几点分析与展望. 表4对比了本文中静电纺丝聚

表 4 本文中静电纺丝聚合物基MXene增强复合材料与其他常见聚合物基MXene增强复合材料的电磁屏蔽性能对比^{a)}

Table 4 The electromagnetic shielding properties of electrospun polymer-based MXene-enhanced composites are compared with those of other common polymer-based MXene-enhanced composites in this paper

Materials	Loading	SE (dB)	<i>d</i> (mm)	Refs.
Polymer-based MXene enhanced electromagnetic shielding composites were prepared by electrospinning				
MXene/PVDF-HFP	24 wt%	15.2	0.095	[106]
(Fe ₃ O ₄ /PVA)-(Ti ₃ C ₂ T _x /PVA)-(Fe ₃ O ₄ /PVA)	13.30%	40	0.075	[107]
WPU-Ti ₃ C ₂ T _x /WPU-AgNWs/WPU-Ti ₃ C ₂ T _x	20 mg/mL	79.54	0.15	[108]
TPU/PAN/Fe ₃ O ₄ /MXene	5 mg/mL	32.5	0.45	[109]
Ti ₃ C ₂ T _x /PU	3 mg/mL	38	—	[110]
AgNWs-PI/Ti ₃ C ₂ T _x /AgNWs-PI	15 mg/mL	40.73	0.1	[111]
PPAN-M-Fe ₃ O ₄	—	43.83	—	[112]
MXene/PLA/PVA/PCC	—	87.8	0.033	[113]
TPU/PDA/AgNPs/MXene	—	108.8	—	[114]
PAN@PPy/MXene	—	32	0.15	[115]
MXene/PPNs/MXene/TPUEM	46.78 wt%	20.2	0.055	[116]
PVDF-AgNW/MXene	2.5 mg/mL	47.8	—	[117]
Ti ₃ C ₂ T _x -(Fe ₃ O ₄ /PI)	80 wt%	66	—	[118]
Polymer-based MXene enhanced electromagnetic shielding composites were prepared by other techniques				
WA/Ti ₃ C ₂ T _x /Wood	1.31 mg/cm ²	31.1	—	[119]
Ti ₃ C ₂ T _x /BC	76.9 wt%	37.3	0.004	[120]
elastomer/Ti ₃ C ₂ T _x	19.6 vol%	49	1	[121]
Ti ₃ C ₂ T _x /CS	0.1322 vol%	61.4	3	[122]
rGO/Ti ₃ C ₂ T _x	100 mg/mL	83.3	7	[123]
TOCNFs/CNT/Ti ₃ C ₂ T _x	60 wt%	20.5	0.012	[124]
Fe ₃ O ₄ @CNT/Ti ₃ C ₂ T _x /c-ANF/PI	8 wt%	67.42	6.6	[125]
FA-CNF/Ti ₃ C ₂ T _x /FA-CNF	1:2	63.8	—	[126]
HPG/AgNWs/Ti ₃ C ₂ T _x	—	45	0.0483	[127]
WPU/NR/MXene	5.48 vol%	76.1	0.336	[128]
graphene/MXene	—	96.3	0.1	[129]
WCF/MXene	1 mg/mL	43.7	1.93	[130]
MTMS-M/FG	14.5 mg/cm ²	57.8	0.5	[131]

a) PVDF-HFP: Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene); PVA: Polyvinyl alcohol; WPU: Waterborne polyurethane; AgNWs: Silver nanowires; TPU: Thermoplastic polyurethane; PAN: Polyacrylonitrile; PU: Polyurethane; PI: Polyimide; PPAN: Polydopamine-polyacrylonitrile; PLA: Polylactic acid; PCC: Phase change capsules; PDA: Polydopamine; AgNPs: Ag nanoparticles; PPy: Polypyrrole; PPNs: Poly(styrene-co-methacrylic acid)/polypyrrole nanospheres; TPUEM: Thermoplastic polyurethane electrospinning membrane; PVDF: Poly(vinylidene fluoride); WA: Waterborne acrylic resin; BC: Bacterial cellulose; CS: Chitosan; rGO: Reduced graphene oxide; TOCNFs: Tempo-oxidized cellulose nanofibrils; CNT: Carbon nanotube; c-ANF: Cross-linked aramid nanofiber; FA-CNF: Fe₃O₄@porous carbon-cellulose nanofiber; HPG: Honeycomb porous graphene; NR: Natural rubber; WCF: Waste cotton fabrics; MTMS: Methyltrimethoxysilane; FC: Fabric grid.

合物基MXene增强复合材料与其他常见聚合物基MXene增强复合材料的电磁屏蔽性能。

(1) 聚合物基电磁屏蔽材料主要由聚合物基体以及导电或导磁纳米填料构成, 而其中最核心的部分便是导电或导磁填料的选择。目前, MXene作为一种新兴的导电填料, 由于其优异的电导率和孔隙率吸引了广泛的关注。但是, MXene的制备方法还不够成熟, 制备工艺比较复杂, 具有一定的危险性, 且产率一般不高, 这些不足限制了MXene的大批次生产及应用。因此, 迫切需要研究人员探索出安全、高效和环保的制备方法。此外, 几乎所有MXene基聚合物复合材料的研究都是在 $Ti_3C_2T_x$ 的基础上进行的, 所以有必要将研究扩展到MXene家族的其他成员, 如 Ti_3C_2 、 Ti_2C 、 Mo_2TiC_2 、 $Mo_2Ti_2C_3$ 和 Ti_3CN 等。同时, MXene的元素组成, 层状结构和过渡金属排列对其电磁屏蔽性能的影响也需要进一步研究。

(2) 静电纺丝技术可以将高分子聚合物和MXene纳米片相结合, 制备出具有出色的EMI屏蔽性能的复合材料, 在拉伸、防腐、耐高温、疏水和自清洁等领域也具有优异的性能。静电纺丝纳米纤维具有柔韧性好、质量轻、成本低和制备方便等优点, 通过调节纺丝溶液和纺丝环境, 可以制备出多种电纺纳米纤维。此外, 电纺纳米纤维和MXene纳米片可以以不同的方式结合, 实现EMI屏蔽和热管理等优异的综合性能。但是, MXene纳米片和静电纺丝纳米纤维之间存在界面结合力弱的问题, 且MXene在纤维表面分布不均匀, 目前可以通过真空过滤来改善, 但仍需要研究出更多的方法来应对, 例如通过化学反应使MXene与纤维膜

紧密结合。同时, MXene比较容易氧化, 应该尽量降低复合材料中MXene暴露在空气中的比例, 例如可以采用夹层结构设计或者在MXene层表面构建防水涂层等。

(3) 导电性是影响聚合物基电磁屏蔽复合材料屏蔽性能的关键因素之一, 本征导电聚合物相对于绝缘聚合物具有更高的电导率, 但是绝大多数屏蔽材料的基体都是绝缘聚合物, 主要因为本征导电聚合物成膜性较差, 可纺性不足, 因此, 加强对本征导电聚合物性能的研究和改善具有很大的研究价值。除了导电性, 复合材料的结构设计对其EMI屏蔽性能也起着重要作用。一方面, 静电纺丝纳米纤维膜本身具有良好的孔隙率和渗透性, 当电磁波射入时, 会被内部多次反射消耗在纤维间隙中。另一方面, 优化结构设计可以促进电磁波在材料内部多次反射消耗掉, 减少二次污染, 例如, 通过构建中空结构, 利用同轴静电纺丝技术可以制备出具有多孔结构和较高比表面积的中空结构纳米纤维。这种结构使得电磁波在纤维表面发生多次反射, 进而有效提升了EMI屏蔽性能。因此, 静电纺丝MXene纳米片/聚合物复合材料是一种很有前途的电磁波吸收材料。

综上所述, MXene是最新和发展最快的EMI屏蔽材料, 静电纺丝技术可以制备聚合物基MXene增强复合材料。通过对材料结构进行精准构建和优化, 可以获得超高电磁屏蔽效能、质轻、透气性好以及力学性能优异的复合材料。目前, 聚合物基MXene增强静电纺丝电磁屏蔽复合材料的研究仍处于起步阶段, 在未来将具有巨大的研究价值和发展潜力。

参考文献

- 1 Guo H, Chen Y, Li Y, et al. Electrospun fibrous materials and their applications for electromagnetic interference shielding: A review. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2021, 143: 106309
- 2 Cheng Y, Zhu W, Lu X, et al. Recent progress of electrospun nanofibrous materials for electromagnetic interference shielding. *Compos Commun*, 2021, 27: 100823
- 3 Liu M C, Dong J, Zhao X, et al. Nano-structure of Ag/PANI on surface of aramid fabric and electromagnetic shielding performance of fabric (in Chinese). *J Mater Eng*, 2023, 51: 66–74 [刘茂晨, 董杰, 赵昕, 等. Ag/PANI在芳纶织物表面的纳米构筑及织物电磁屏蔽性能. *材料工程*, 2023, 51: 66–74]
- 4 Chen L, Guo K, Zeng S L, et al. Cross-stacking aligned non-woven fabrics with automatic self-healing properties for electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 2020, 162: 445–454
- 5 Li M Z, Li E, Pan Y M, et al. Research and application of electromagnetic shielding conductive coating (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2024, 41: 572–591 [李明展, 李恩, 潘亚敏, 等. 电磁屏蔽导电涂料的研究与应用. *复合材料学报*, 2024, 41: 572–591]

- 6 Qi H, Wang G, Hu Y, et al. Conjugate electro-spinning towards Janus nanofibers array synchronously endowed with conductive anisotropy, magnetism and luminescence. *Mater Today Commun*, 2022, 33: 104765
- 7 Wang Y, Zhao W, Tan L, et al. Review of polymer-based composites for electromagnetic shielding application. *Molecules*, 2023, 28: 5628
- 8 Liu Z S, Liu J, Dai Y, et al. Bioinspired ultrathin MXene/CNC composite film for electromagnetic interference shielding (in Chinese). *J Inorg Mater*, 2020, 35: 99–104 [刘张硕, 刘骥, 戴洋, 等. 仿生构筑超薄MXene/CNC电磁屏蔽复合薄膜. *无机材料学报*, 2020, 35: 99–104]
- 9 Zhao Y, Li C, Lang T, et al. Research progress on intrinsically conductive polymers and conductive polymer-based composites for electromagnetic shielding. *Molecules*, 2023, 28: 7647
- 10 Yin J, Bai Y, Lu J, et al. Enhanced mechanical performances and high-conductivity of rGO/PEDOT:PSS/PVA composite fiber films via electrospinning strategy. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2022, 643: 128791
- 11 Lumnitzer E, Jurgovska E L, Andrejiova M, et al. Application of metal shielding materials to protect buildings occupants from exposure to the electromagnetic fields. *Materials*, 2023, 16: 5438
- 12 Zhang R, Lv W, Zhu R, et al. Metal-organic framework-derived high-performance polypyrrole/Ni-CAT/PI fiber paper-based electromagnetic shielding composites for high-frequency electromagnetic wave absorption. *Polym Compos*, 2022, 43: 8904–8913
- 13 Frah M A A, Pavlushkina T, Babinova A, et al. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials. *J Phys-Conf Ser*, 2021, 2056: 012058
- 14 Zhang F H, Dong X Y, Liu Y J, et al. Research update on electroactive shape memory polymer composites and their applications (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1019–1041 [张风华, 董心宇, 刘彦菊, 等. 电驱动形状记忆聚合物复合材料及其应用进展. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 1019–1041]
- 15 Budumuru S, Anuradha M S. Electromagnetic shielding and mechanical properties of AL6061 metal matrix composite at X-band for oblique incidence. *Adv Compos Hybrid Mater*, 2021, 4: 1113–1121
- 16 Kruželák J, Kvasničáková A, Hložeková K, et al. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Adv*, 2021, 3: 123–172
- 17 Wei W, Zhang P, Cao F, et al. Ultrathin flexible electrospun EVA nanofiber composite with electrothermally-driven shape memory effect for electromagnetic interference shielding. *Chem Eng J*, 2022, 446: 137135
- 18 Wang L, Wang J, Zheng L, et al. Submicron porous gradient TPU/MWCNT foam with electromagnetic shielding performance. *ACS Appl Polym Mater*, 2023, 5: 9987–9996
- 19 Li W B, Wei W T, Li J R, et al. Research progress of shape memory polymer fibers and reinforced composites (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2022, 39: 77–96 [李文兵, 魏婉婷, 李金蝶, 等. 形状记忆聚合物纤维及增强复合材料的研究进展. *复合材料学报*, 2022, 39: 77–96]
- 20 Yang J F, Liu S, Fan Q, et al. Research progress of lightweight polymer electromagnetic shielding materials (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2023, 40: 3785–3794 [杨继飞, 刘珊, 樊峤, 等. 轻质聚合物基电磁屏蔽材料的研究进展. *复合材料学报*, 2023, 40: 3785–3794]
- 21 Retailleau C, Alaa Eddine J, Ndagijimana F, et al. Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials. *Compos Sci Tech*, 2022, 221: 109351
- 22 Gao C, Shi Y, Huang R, et al. Creating multilayer-structured polystyrene composites for enhanced fire safety and electromagnetic shielding. *Compos Part B-Eng*, 2022, 242: 110068
- 23 Sarkar B, Li X D, Quenneville E, et al. Lightweight and flexible conducting polymer sponges and hydrogels for electromagnetic interference shielding. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 16558–16565
- 24 Fan X, Gao Q, Gao Y, et al. Microcellular epoxy/graphene nanocomposites with outstanding electromagnetic interference shielding and mechanical performance by overcoming nanofiller loading/dispersion dichotomy. *Compos Sci Tech*, 2021, 215: 109000
- 25 Liu S, Qin S, Jiang Y, et al. Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2021, 145: 106376
- 26 Zhang Y, Gu J. A perspective for developing polymer-based electromagnetic interference shielding composites. *Nano-Micro Lett*, 2022, 14: 89
- 27 Guo L, Yang J, Wang H, et al. Multistage self-assembled nanomaterials for cancer immunotherapy. *Molecules*, 2023, 28: 7750
- 28 Zhang F, Chen W, Wang L, et al. Low-cost and environmental-friendly route for synthesizing nano-rod aluminosilicate MAZ zeolite. *Molecules*, 2022, 27: 7930
- 29 Li X, Rafie A, Kalra V, et al. Deposition behavior of polyaniline on carbon nanofibers by oxidative chemical vapor deposition. *Langmuir*, 2020, 36: 13079–13086

- 30 Chen Y, Zhao Y, Liu H, et al. Crab shell-derived SnS_2/C and FeS_2/C carbon composites as anodes for high-performance sodium-ion batteries. [ACS Omega](#), 2023, 8: 9145–9153
- 31 Bao Y, Zhao H H, Gao L, et al. Research progress of electrospinning flame retardant nanofiber (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2023, 42: 1–14 [鲍艳, 赵海航, 高璐, 等. 静电纺丝阻燃纳米纤维的研究进展. *复合材料学报*, 2023, 42: 1–14]
- 32 Li Y, Zhu J, Cheng H, et al. Developments of advanced electrospinning techniques: A critical review. [Adv Mater Technol](#), 2021, 6: 2100410
- 33 Wang L, Cheng J, Zou Y, et al. Current advances and future perspectives of MXene-based electromagnetic interference shielding materials. [Adv Compos Hybrid Mater](#), 2023, 6: 172
- 34 Zhang Y R, Wang B C, Gao S L, et al. Electrospun MXene nanosheet/polymer composites for electromagnetic shielding and microwave absorption: A review. [ACS Appl Nano Mater](#), 2022, 5: 12320–12342
- 35 Mercante L A, Andre R S, Facure M H M, et al. Recent progress in conductive electrospun materials for flexible electronics: Energy, sensing, and electromagnetic shielding applications. [Chem Eng J](#), 2023, 465: 142847
- 36 Li L, Chen Z, Pan F, et al. Electrospinning technology on one dimensional microwave absorbers: Fundamentals, current progress, and perspectives. [Chem Eng J](#), 2023, 470: 144236
- 37 Nadaf A, Gupta A, Hasan N, et al. Recent update on electrospinning and electrospun nanofibers: Current trends and their applications. [RSC Adv](#), 2022, 12: 23808–23828
- 38 Wang Z X, Wang H, Xiong J J, et al. Fabrication and in vitro evaluation of PCL/gelatin hierarchical scaffolds based on melt electrospinning writing and solution electrospinning for bone regeneration. *Biomater Adv*, 2021, 128: 112287
- 39 Ostheller M E, Balakrishnan N K, Beukenberg K, et al. Pilot-scale melt electrospinning of polybutylene succinate fiber mats for a biobased and biodegradable face mask. [Polymers](#), 2023, 15: 2936
- 40 Kim Y, Wu X, Lee C, et al. Characterization of PI/PVDF-TrFE composite nanofiber-based triboelectric nanogenerators depending on the type of the electrospinning system. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2021, 13: 36967–36975
- 41 Shi Y, Cao X, Zhu Z, et al. Fabrication of cellulose acetate/gelatin-eugenol core-shell structured nanofiber films for active packaging materials. [Colloids Surfs B-Biointerfaces](#), 2022, 218: 112743
- 42 Yan M, Huang F, Zhao X, et al. Constructing three-dimensional topological Zn deposition for long-life aqueous Zn-ion batteries. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2022, 14: 51010–51017
- 43 Zheng Y, Man Z, Zhang Y, et al. High-performance stretchable supercapacitors based on centrifugal electrospinning-directed hetero-structured graphene-polyaniline hierarchical fabric. [Adv Fiber Mater](#), 2023, 5: 1759–1772
- 44 Zhu Z, Zheng G F, Zhang R, et al. Nanofibrous membrane through multi-needle electrospinning with multi-physical field coupling. [Mater Res Express](#), 2021, 8: 075012
- 45 Schulte-Werning L V, Murugaiah A, Singh B, et al. Multifunctional nanofibrous dressing with antimicrobial and anti-inflammatory properties prepared by needle-free electrospinning. [Pharmaceutics](#), 2021, 13: 1527
- 46 Li Y, Dong A, He J. Innovation of critical bubble electrospinning and its mechanism. [Polymers](#), 2020, 12: 304
- 47 Li C, Qiu M, Li R, et al. Electrospinning engineering enables high-performance sodium-ion batteries. [Adv Fiber Mater](#), 2022, 4: 43–65
- 48 Zhan L, Deng J, Ke Q, et al. Grooved fibers: Preparation principles through electrospinning and potential applications. [Adv Fiber Mater](#), 2022, 4: 203–213
- 49 Yarin A L, Koombhongse S, Reneker D H. Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers. *J Appl Phys*, 2001, 90: 4836–4846
- 50 Lian S, Lamprou D, Zhao M. Electrospinning technologies for the delivery of Biopharmaceuticals: Current status and future trends. *Int J Pharm*, 2024, 651: 123641
- 51 Behroozi A H, Al-Shaeli M, Vatanpour V. Fabrication and modification of nanofiltration membranes by solution electrospinning technique: A review of influential factors and applications in water treatment. [Desalination](#), 2023, 558: 116638
- 52 Wang Y, Khan M A, Chen K, et al. Electrospinning of natural biopolymers for innovative food applications: A review. [Food Bioprocess Technol](#), 2023, 16: 704–725
- 53 Choi S, Shin D, Chang J. Nanoscale fiber deposition via surface charge migration at air-to-polymer liquid interface in near-field electrospinning. [ACS Appl Polym Mater](#), 2020, 2: 2761–2768
- 54 Ziyadi H, Baghali M, Bagherianfar M, et al. An investigation of factors affecting the electrospinning of poly(vinyl alcohol)/kefiran composite

- nanofibers. *Adv Compos Hybrid Mater*, 2021, 4: 768–779
- 55 Nonato R C, Morales A R, Vieira A F M, et al. Solution parameters in the manufacture of ceramic ZnO nanofibers made by electrospinning. *Appl Phys A*, 2016, 122: 244
- 56 Gee S, Johnson B, Smith A L. Optimizing electrospinning parameters for piezoelectric PVDF nanofiber membranes. *J Membrane Sci*, 2018, 563: 804–812
- 57 Badaraev A D, Tran T H, Drozd A G, et al. Effect of PLGA concentration in electrospinning solution on biocompatibility, morphology and mechanical properties of nonwoven scaffolds. *Technologies*, 2023, 11: 137
- 58 Li J X, Gao M, Tan L, et al. Adsorption treatment of wastewater by electrospun nanofiber membranes: A review (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2022, 39: 1378–1394 [李佳欣, 高铭, 谭淋, 等. 静电纺丝纳米纤维膜材料吸附处理废水中污染物的研究进展. *复合材料学报*, 2022, 39: 1378–1394]
- 59 Tian Y, Huang M, Wang Y, et al. Ultra-stretchable, sensitive and breathable electronic skin based on TPU electrospinning fibrous membrane with microcrack structure for human motion monitoring and self-powered application. *Chem Eng J*, 2024, 480: 147899
- 60 Sobola D, Kaspar P, Částková K, et al. PVDF fibers modification by nitrate salts doping. *Polymers*, 2021, 13: 2439
- 61 Fang W, Yang S, Yuan T Q, et al. Effects of various surfactants on alkali lignin electrospinning ability and spun fibers. *Ind Eng Chem Res*, 2017, 56: 9551–9559
- 62 Wu Y K, Wang L, Fan J, et al. A double-switching voltage: Controlling multiple jets in electrospinning. *Mater Lett*, 2018, 233: 359–362
- 63 Liu Z, Ju K, Wang Z, et al. Electrospun jets number and nanofiber morphology effected by voltage value: Numerical simulation and experimental verification. *Nanoscale Res Lett*, 2019, 14: 310
- 64 Ge J C, Wu G, Yoon S K, et al. Study on the preparation and lipophilic properties of polyvinyl alcohol (PVA) nanofiber membranes via green electrospinning. *Nanomaterials*, 2021, 11: 2514
- 65 Wang X H, Liu T, Huang L, et al. Research progress for preparation of composite nanofiber electromagnetic shielding and absorbing materials by electrostatic spinning technology (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2023, 40: 1300–1310 [王喜花, 刘涛, 黄丽, 等. 静电纺丝技术制备复合纳米纤维电磁屏蔽及吸波材料的研究进展. *复合材料学报*, 2023, 40: 1300–1310]
- 66 Najafi S J, Nosrati H, Shokrieh M M, et al. The effect of electrospinning parameters on the morphology of glass nanofibers. *J Textile Inst*, 2020, 111: 941–949
- 67 Zhu L, Zhu W, Hu X, et al. PVP/highly dispersed agnps nanofibers using ultrasonic-assisted electrospinning. *Polymers*, 2022, 14: 599
- 68 Kim Y, Wu X, Oh J H. Fabrication of triboelectric nanogenerators based on electrospun polyimide nanofibers membrane. *Sci Rep*, 2020, 10: 2742
- 69 R G K, Rajan T P. A review on electrospinning of natural bio herbs blended with polyvinyl alcohol nanofibres for biomedical applications. *J Nat Fibers*, 2022, 19: 11984–12003
- 70 Gong X, Kalantari M, Aslanzadeh S, et al. Interfacial interactions and electrospinning of cellulose nanocrystals dispersions in polymer solutions: A review. *J Dispersion Sci Tech*, 2022, 43: 945–977
- 71 Niu L, Zhang B, Sun J, et al. Fabrication of photocatalytic PAN nanofiber membrane loading with TiO₂@RGO by electro-spinning & electro-spraying. *Compos Part B-Eng*, 2023, 266: 111046
- 72 Wang S G, Xu X, Chen Y K, et al. Preparation of multifunctional polyvinyl alcohol microspheres by electrospinning and its properties and application (in Chinese). *Acta Mater Comp Sin*, 2021, 38: 1960–1973 [王世革, 徐霞, 陈永康, 等. 静电纺丝法制备多功能聚乙烯醇微球及其性能和应用. *复合材料学报*, 2021, 38: 1960–1973]
- 73 Avossa J, Herwig G, Toncelli C, et al. Electrospinning based on benign solvents: Current definitions, implications and strategies. *Green Chem*, 2022, 24: 2347–2375
- 74 Zheng Q, Yu M, Wang W, et al. Enhanced microwave absorption performance of Fe/C nanofibers by adjusting the magnetic particle size using different electrospinning solvents. *Ceramics Int*, 2020, 46: 28603–28612
- 75 Vargas-Campos L, Figueroa-Cárdenas J D, Tochihiuti-Vázquez D, et al. Study of the dextrose equivalent of maltodextrins in electrospinning using an ethanol/water mixture as the electrospinning solvent. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108498
- 76 Anasori B, Naguib M. Two-dimensional MXenes. *MRS Bull*, 2023, 48: 238–244
- 77 Tan T L, Jin H M, Sullivan M B, et al. High-throughput survey of ordering configurations in MXene alloys across compositions and temperatures. *ACS Nano*, 2017, 11: 4407–4418

- 78 Malaki M, Maleki A, Varma R S. MXenes and ultrasonication. *J Mater Chem A*, 2019, 7: 10843–10857
- 79 Ji B, Fan S, Ma X, et al. Electromagnetic shielding behavior of heat-treated $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene accompanied by structural and phase changes. *Carbon*, 2020, 165: 150–162
- 80 Gao L, Li C, Huang W, et al. MXene/polymer membranes: Synthesis, properties, and emerging applications. *Chem Mater*, 2020, 32: 1703–1747
- 81 Shu Y. Study on etching process of fused silica with concentrated HF. *Optik*, 2019, 178: 544–549
- 82 Okawa A, Yang M, Hasegawa T, et al. Gas sensing performance of Nb_2CT_x synthesized by hydrothermal assisted *in-situ* HF generation etching method. *Discov Mater*, 2023, 3: 12
- 83 Zhan S, Dong B, Wang H, et al. A novel approach for bulk micromachining of 4H-SiC by tool-based electrolytic plasma etching in HF-free aqueous solution. *J Eur Ceramic Soc*, 2021, 41: 5075–5087
- 84 Zhang Y, Yuan M, Cai B, et al. Morphologies of porous silicon etched by the electrochemical etching method with alcohols additives. *Optik*, 2016, 127: 3009–3012
- 85 Hu S, Lv L, Yang G, et al. Improvement in hydrogen storage performance of Mg by mechanical grinding with molten salt etching $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Cl}$. *Prog Nat Sci-Mater Int*, 2023, 33: 211–224
- 86 Rakhi R B, Ahmed B, Hedhili M N, et al. Effect of postetch annealing gas composition on the structural and electrochemical properties of Ti_2CT_x MXene electrodes for supercapacitor applications. *Chem Mater*, 2015, 27: 5314–5323
- 87 Huang X, Mu W, Chang C. Two-dimensional Ti_3C_2 MXene-derived $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-Ti}_2\text{C-TiO}_2$ materials for improved diclofenac sodium adsorption performance. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, 30: 52157–52168
- 88 Munir S, Rasheed A, Rasheed T, et al. Exploring the influence of critical parameters for the effective synthesis of high-quality 2D MXene. *ACS Omega*, 2020, 5: 26845–26854
- 89 Kim Y J, Kim S J, Seo D, et al. Etching mechanism of monoatomic aluminum layers during MXene synthesis. *Chem Mater*, 2021, 33: 6346–6355
- 90 Sheng X, Li S, Huang H, et al. Anticorrosive and UV-blocking waterborne polyurethane composite coating containing novel two-dimensional Ti_3C_2 MXene nanosheets. *J Mater Sci*, 2020, 56: 4212–4224
- 91 Ashok A, Saseendran S B, Asha A S. Synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene from the Ti_3AlC_2 MAX phase with enhanced optical and morphological properties by using ammonia solution with the *in-situ* HF forming method. *Phys Scr*, 2022, 97: 025807
- 92 Xue N, Li X, Zhang M, et al. Chemical-combined ball-milling synthesis of fluorine-free porous MXene for high-performance lithium ion batteries. *ACS Appl Energy Mater*, 2020, 3: 10234–10241
- 93 Mayyahi A A, Sarker S, Everhart B M, et al. One-step fluorine-free synthesis of delaminated, OH-terminated Ti_3C_2 : High photocatalytic NO_x storage selectivity enabled by coupling TiO_2 and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-OH}$. *Mater Today Commun*, 2022, 32: 103835
- 94 Jawaid A, Hassan A, Neher G, et al. Halogen etch of Ti_3AlC_2 MAX phase for MXene fabrication. *ACS Nano*, 2021, 15: 2771–2777
- 95 Xue N, Li X, Han L, et al. Fluorine-free synthesis of ambient-stable delaminated Ti_2CT_x (MXene). *J Mater Chem A*, 2022, 10: 7960–7967
- 96 Xie K, Wang J, Xu K, et al. In-situ synthesis of fluorine-free MXene/ TiO_2 composite for high-performance supercapacitor. *Arabian J Chem*, 2024, 17: 105551
- 97 Yin T, Li Y, Wang R, et al. Synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{F}_x$ MXene with controllable fluorination by electrochemical etching for lithium-ion batteries applications. *Ceramics Int*, 2021, 47: 28642–28649
- 98 Shen M, Jiang W, Liang K, et al. One-pot green process to synthesize MXene with controllable surface terminations using molten salts. *Angew Chem Int Ed*, 2021, 60: 27013–27018
- 99 Sun W, Shah S A, Chen Y, et al. Electrochemical etching of Ti_2AlC to Ti_2CT_x (MXene) in low-concentration hydrochloric acid solution. *J Mater Chem A*, 2017, 5: 21663–21668
- 100 Nouseen S, Ghosh K, Pumera M. 3D printing of MAX/PLA filament: Electrochemical in-situ etching for enhanced energy conversion and storage. *Electrochem Commun*, 2024, 160: 107652
- 101 Liu L, Orbay M, Luo S, et al. Exfoliation and delamination of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene prepared *via* molten salt etching route. *ACS Nano*, 2022, 16: 111–118
- 102 Ou Y, Zhang P, Soomro R A, et al. Enhancing the lithium storage properties of molten salt-etched $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ through sequential intercalation of alkali ions. *Inorg Chem Front*, 2024, 11: 1423–1433
- 103 Arole K, Blivin J W, Bruce A M, et al. Exfoliation, delamination, and oxidation stability of molten salt etched Nb_2CT_2 MXene nanosheets.

- Chem Commun*, 2022, 58: 10202–10205
- 104 Arole K, Blivin J W, Saha S, et al. Water-dispersible $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanosheets by molten salt etching. *iScience*, 2021, 24: 103403
 - 105 Xi W, Guo T, Xie Z, et al. Molten salt etching synthesis of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{Ni}$ composites for highly efficient capacitive deionization. *Desalination*, 2024, 574: 117241
 - 106 Liu L, Guo R, Gao J, et al. Mechanically and environmentally robust composite nanofibers with embedded MXene for wearable shielding of electromagnetic wave. *Compos Commun*, 2022, 30: 101094
 - 107 Zhang Y, Ruan K, Gu J. Flexible sandwich-structured electromagnetic interference shielding nanocomposite films with excellent thermal conductivities. *Small*, 2021, 17: 2101951
 - 108 Zhang Y, Gao Q, Sheng X, et al. Flexible, robust, sandwich structure polyimide composite film with alternative MXene and Ag NWs layers for electromagnetic interference shielding. *J Mater Sci Tech*, 2023, 159: 194–203
 - 109 Miao Z, Chen X, Zhou H, et al. Interfacing MXene flakes on a magnetic fiber network as a stretchable, flexible, electromagnetic shielding fabric. *Nanomaterials*, 2022, 12: 20
 - 110 Li X, Yang M, Qin W, et al. MXene-based multilayered flexible strain sensor integrating electromagnetic shielding and Joule heat. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2023, 658: 130706
 - 111 Zhang S, Wu J, Liu J, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanosheets sandwiched between Ag nanowire-polyimide fiber mats for electromagnetic interference shielding. *ACS Appl Nano Mater*, 2021, 4: 13976–13985
 - 112 Yang M, Yang Z, Lv C, et al. Electrospun bifunctional MXene-based electronic skins with high performance electromagnetic shielding and pressure sensing. *Compos Sci Tech*, 2022, 221: 109313
 - 113 Li X, Sheng X, Fang Y, et al. Wearable janus-type film with integrated all-season active/passive thermal management, thermal camouflage, and ultra-high electromagnetic shielding efficiency tunable by origami process. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2212776
 - 114 Zhai W, Wang C, Wang S, et al. Ultra-stretchable and multifunctional wearable electronics for superior electromagnetic interference shielding, electrical therapy and biomotion monitoring. *J Mater Chem A*, 2021, 9: 7238–7247
 - 115 Wu F, Tian Z, Hu P, et al. Lightweight and flexible PAN@PPy/MXene films with outstanding electromagnetic interference shielding and Joule heating performance. *Nanoscale*, 2022, 14: 18133–18142
 - 116 Cheng H, Yang C, Chu J, et al. Multifunctional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/nanospheres/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/thermoplastic polyurethane electrospinning membrane inspired by bean pod structure for EMI shielding and pressure sensing. *Sens Actuat A-Phys*, 2023, 353: 114226
 - 117 Yang S, Yan D X, Li Y, et al. Flexible Poly(vinylidene fluoride)-MXene/silver nanowire electromagnetic shielding films with joule heating performance. *Ind Eng Chem Res*, 2021, 60: 9824–9832
 - 118 Zhang Y, Ma Z, Ruan K, et al. Multifunctional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-(\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{polyimide})$ composite films with Janus structure for outstanding electromagnetic interference shielding and superior visual thermal management. *Nano Res*, 2022, 15: 5601–5609
 - 119 Wei Y, Dai Z, Zhang Y, et al. Multifunctional waterproof MXene-coated wood with high electromagnetic shielding performance. *Cellulose*, 2022, 29: 5883–5893
 - 120 Wan Y, Xiong P, Liu J, et al. Ultrathin, Strong, and Highly Flexible $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/bacterial cellulose composite films for high-performance electromagnetic interference shielding. *ACS Nano*, 2021, 15: 8439–8449
 - 121 Aakyiir M, Kingu M A S, Araby S, et al. Stretchable, mechanically resilient, and high electromagnetic shielding polymer/MXene nanocomposites. *J Appl Polym Sci*, 2021, 22: 138
 - 122 Wu S, Chen D, Han W, et al. Ultralight and hydrophobic MXene/chitosan-derived hybrid carbon aerogel with hierarchical pore structure for durable electromagnetic interference shielding and thermal insulation. *Chem Eng J*, 2022, 446: 137093
 - 123 Zheng X, Tang J, Wang P, et al. Interfused core-shell heterogeneous graphene/MXene fiber aerogel for high-performance and durable electromagnetic interference shielding. *J Colloid Interface Sci*, 2022, 628: 994–1003
 - 124 Wang B, Li Y, Zhang W, et al. Ultrathin cellulose nanofiber/carbon nanotube/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ film for electromagnetic interference shielding and energy storage. *Carbohydrate Polym*, 2022, 286: 119302
 - 125 Zhu L, Mo R, Yin C G, et al. Synergistically constructed electromagnetic network of magnetic particle-decorated carbon nanotubes and MXene for efficient electromagnetic shielding. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 56120–56131
 - 126 Guo Z, Ren P, Wang J, et al. Multifunctional sandwich-structured magnetic-electric composite films with Joule heating capacities toward absorption-dominant electromagnetic interference shielding. *Compos Part B-Eng*, 2022, 236: 109836

- 127 Xu J, Li R, Ji S, et al. Multifunctional graphene microstructures inspired by honeycomb for ultrahigh performance electromagnetic interference shielding and wearable applications. *ACS Nano*, 2021, 15: 8907–8918
- 128 Jiao C, Deng Z, Min P, et al. Photothermal healable, stretchable, and conductive MXene composite films for efficient electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 2022, 198: 179–187
- 129 Li H, Ng Z K, Tay R Y, et al. Flexible graphene/MXene composite thin films for high-performance electromagnetic interference shielding and joule heating. *ACS Appl Nano Mater*, 2023, 6: 16730–16739
- 130 Zhai J, Cui C, Li A, et al. Waste cotton fabric/MXene composite aerogel with heat generation and insulation for efficient electromagnetic interference shielding. *Ceramics Int*, 2022, 48: 13464–13474
- 131 Jia X, Shen B, Zhang L, et al. Waterproof MXene-decorated wood-pulp fabrics for high-efficiency electromagnetic interference shielding and Joule heating. *Compos Part B-Eng*, 2020, 198: 108250

Progress in the preparation of polymer-based MXene-enhanced electromagnetic shielding composites by electrospinning

ZENG ZhiYong¹, CAO Feng¹, HUANG Jian², ZHANG FengHua³, QIAN Kun¹ & LI WenBing¹

¹School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

²Nanjing Fiberglass Research & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

³National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin 150080, China

With the development of electronic information technology, electromagnetic wave pollution has affected human health and social progress seriously, so it is urgent to develop an efficient electromagnetic interference (EMI) shielding material. The electrospinning technology can prepare flexible ultra-thin porous fiber film, and the electromagnetic waves can be reflected in the fiber film for many times and be consumed. As a new type of two-dimensional (2D) material group, MXene is a potential EMI shielding material with a high specific surface area, high electrical conductivity and easy processing. Therefore, by combining electrospinning technology with MXene material, multifunctional polymer based MXene enhanced electromagnetic shielding composites can be prepared. This paper first introduces the concept, principle and influencing factors of electrospinning technology, then analyzes the composition and preparation methods of MXene material, and finally, the latest progress in the preparation of polymer-based MXene-enhanced electromagnetic shielding composites by electrospinning is discussed, and the future development of polymer-based MXene enhanced electrospinning composites in the field of electromagnetic shielding is prospected.

electrospinning technology, electromagnetic shielding, MXene, nanofibers

doi: [10.1360/SST-2023-0393](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0393)