

黄　维　中国科学院院士、俄罗斯科学院外籍院士、美国国家工程院外籍院士，有机光电子专家，被业界誉为“柔性电子学之父”。国家重要人才计划特聘专家，教育部“国家重要人才”特聘教授，国家“杰出青年科学基金”获得者，国家“973”项目首席科学家，国家重点研发计划首席科学家，国家变革性技术专项首席科学家。长期深耕于纳米材料与技术、有机电子与器件等领域，在 SCI 索引杂志上发表学术论文 600 余篇，获得两项国家自然科学奖二等奖、四项教育部高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）自然科学奖一等奖、一项何梁何利“科技进步奖”等多项奖励。

DOI：10.3969/j.issn.1671-024x.2025.03.001

高性能 MXene 复合纤维研究进展

王慧芳[1,2]，孙庚志[1,2]，黄　维[1,2]

（1. 南京工业大学 柔性电子（未来技术）学院/先进材料研究院，南京　210009；2. 南京工业大学 柔性电子全国重点实验室，南京　210009）

摘　要： $Ti_3C_2T_x$ MXene 作为一种新型的二维层状材料，具有优异的力学、电学、电化学、光热转化和生物相容性等特征，被认为是构筑高性能纤维的一种极具前景的材料。然而，在 MXene 纤维组装过程中，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片的自堆叠效应、层间结构缺陷以及界面作用力弱等问题导致 MXene 纤维的力学性能、电学性能和电化学性能远低 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的本征性能。围绕这些问题，详细介绍了 MXene 纤维的制备方法及纤维微纳结构的设计原理，同时讨论了 MXene 纤维力学性能、电学性能和电化学性能的提升策略，总结了高性能 MXene 纤维存在的挑战，并展望了未来发展方向：通过进一步优化电极材料设计、制备工艺及其功能集成，MXene 纤维有望在下一代高性能可穿戴设备和先进功能材料中发挥重要作用。

关键词： MXene 纤维；力学性能；电学性能；电化学性能

中图分类号： TB34　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1671-024X（2025）03-0001-11

Recent advances in high performance MXene composite fibers

WANG Huifang[1,2], SUN Gengzhi[1,2], HUANG Wei[1,2]

（1. School of Flexible Electronics (Future Technologies) & Institute of Advanced Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. State Key Laboratory of Flexible Electronics, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China）

Abstract: $Ti_3C_2T_x$ MXene, as a novel two-dimensional layered material, is considered a promising building block for fiber fabrication due to the outstanding mechanical, electrical, electrochemical, photothermal conversion, and biocompatibility properties. However, the mechanical, electrical, and electrochemical performances of MXene fibers are far lower than intrinsic properties of $Ti_3C_2T_x$ nanosheets because of the self-stacking during the assembling process, interlayer structural defects, and weak interfacial interactions of $Ti_3C_2T_x$ nanosheets. In view of the above-mentioned existing problems, this review elaborates on the spinning of MXene fibers and their microstructure design. Meanwhile, the strategies for improving the mechanical, electrical and electrochemical properties of

收稿日期： 2025-07-05

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（22375092）

通信作者： 孙庚志（1983—　），男，博士，教授，主要研究方向为柔性电子材料与器件。E-mail：iamgzsun@njtech.edu.cn

通信作者： 黄　维（1963—　），男，博士，教授，中国科学院院士，主要研究方向为柔性电子学。E-mail：vc@nwpu.edu.cn

MXene fibers are discussed, the existing challenges of MXene fibers are summarized, and the upcoming trends in MXene fibers are prospected. By further optimizing the design of electrode materials, preparation processes, and their functional integration, MXene fibers are expected to play an important role in next-generation high-performance wearable devices and advanced functional materials.

Key words: MXene fiber; mechanical properties; electrical properties; electrochemical proterties

过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXenes)作为一种新型的二维(2D)层状材料,近年来在能源存储、电磁屏蔽、海水淡化、催化以及生物医学等领域引起了人们的广泛关注[1-3]。其化学通式为 $M_{n+1}X_nT_x$(n = 1~4),其中 M 代表过渡金属元素 Ti、Sc、Zr、Mo、Nb 和V等,X 代表碳或氮,T_x 代表表面官能团—OH、—O、—F、—Cl 和—Br。MXene 的晶体结构中,X 元素原子占据 M 的八面体间隙位置,表面基团 T_x 所占据的位置取决于 T_x 和 M 的化学性质。MXene 材料通常通过选择性刻蚀前驱体 MAX 相中的 A 层(如 Al、Si 等)制备而成[4]。在刻蚀 A 原子层过程中,较弱的 M—A 键(相对于 M—X 键)容易被破坏,导致 M 表面配位不足。随后,M 表面通过接入 T_x 官能团再次快速饱和,最终形成手风琴状 MXene,再进一步剥离处理,可得到单层或少层的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片[5]。在 MXene 家族中,$Ti_3C_2T_x$ 作为首次被发现的 MXene 材料,与碳基材料、导电聚合物材料和过渡金属氧化物/硫属化合物材料相比,具有类金属导电性和比表面积大等特点,以及力学强度和体积比容量高等优势,在电化学储能方面得到广泛应用。此外,丰富的表面官能团赋予 $Ti_3C_2T_x$ 优异的溶液加工特性,可以纺制成连续纤维,被认为是电子纺织品器件中最具潜力的构筑单元材料之一。

近年来,基于 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片或者 $Ti_3C_2T_x$ 纳米与其他功能基元材料进行复合构筑的纤维在智能可穿戴织物微型电子器件领域中展示出巨大的应用前景。早期,研究人员通过将 MXene 分散液涂覆在聚合物纱线基底上获得具有 MXene 涂层的复合纤维。但采用涂覆法制备的 MXene 复合纤维存在 $Ti_3C_2T_x$ 负载量低、涂层脆性以及容易分层等问题,严重影响了 MXene 复合纤维的力学和电化学性能,进而限制了其在柔性可穿戴电子设备中的应用。2018 年,本课题组[6]首次提出采用卷轴法制备具有阿基米德螺旋结构的 MXene/碳纳米管(CNT)纤维,实现了 $Ti_3C_2T_x$ 高含量(质量分数大于95%)的 MXene 复合纤维,但当前加捻卷曲技术受限于纱线长度有限与高生产成本,不利于可扩展制备。2023 年,本课题组[7]通过调节纺丝液流变行为,采用高黏稠度的MXene 浆料为原液,发展了一种无需凝固浴的干法纺丝技术,制备了纯 MXene 纤维。随后,本课题组[8]基于相分离原理的湿法纺丝技术,充分利用了 MXene 的液晶行为,成功实现了连续化制备 MXene 纤维。

本文围绕高性能 MXene 纤维的研究进展进行总结。首先,详细介绍了 MXene 纤维的主要纺制技术路线,包括涂覆法、卷轴法、热拉伸法、干法纺丝法和湿法纺丝法等;然后针对在湿法纺丝过程中 MXene 复合纤维的力学性能、电学性能和电化学性能远低于 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片本征性能的原因进行详细讨论,综述了提升策略;最后总结了目前关于 MXene 纤维存在的主要挑战,并对 MXene 纤维的未来发展和前景进行展望。

1　MXene 复合纤维的制备方法

MXene 因其具有大的比表面积、优异的导电性、高的理论容量以及丰富的表面官能团(—F、—OH、和—O),被认为是纤维状超级电容器的理想材料之一。独特的层状结构和可调的表面化学特性使得 MXene 能够在多种溶剂中稳定分散,从而易于通过自组装过程制备宏观 MXene 纤维[9-12]。目前 MXene 纤维制备方法主要有涂覆法、卷轴法、热拉伸法、湿法纺丝法和干法纺丝法。本节将综述 MXene 纤维的制备方法,并讨论不同制备方法的特点与优势。

1.1　涂覆法

涂覆法是制备 MXene 复合纤维的一种简单高效且低成本的方法。首先,将均匀分散的 MXene 分散液通过滴涂、浸涂或喷涂等方式涂覆在纱线(如尼龙纱线、碳纤维和棉织物等)表面,溶剂蒸发后获得具有 MXene 涂层的复合纤维[13]。在此过程中,MXene 分散液的黏度、流变性和亲水性等参数对涂覆的均匀性和黏附性有重要影响[14]。基于上述认识,Hu 等[15]提出将 $Ti_3C_2T_x$ 分散液滴涂在镀银的尼龙表面,并在 50 ℃加热板上干燥,成功制备了 $Ti_3C_2T_x$ 负载量为 0.7 mg/cm 的复合纤维。然而,该方法得到的复合纤维中 $Ti_3C_2T_x$ 的负载量较低。为克服这一问题,Uzun 等[16]开发了一种分步浸渍策略,依次将纤维素纱线先后浸入小尺寸和大尺寸的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片分散液中。其中,小尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片能够渗透至纱线内部以提高负载量,大尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片则因其高的电导率提升了整体性

能，如图 1 所示。通过该方法制备了 $Ti_3C_2T_x$ 负载量为 2.27 mg/cm、导电率为 440 S/cm 的复合纤维。然而，在拉伸过程中，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片容易发生脱落，这表明 $Ti_3C_2T_x$ 与纤维基底材料之间的界面黏附不足。$Ti_3C_2T_x$ 表面含有丰富的官能团（—F、—OH、和—O），可通过氢键或静电作用增强与纱线基底的界面结合力。因此，有必要对纱线材料进行选择和表面改性。此外，尼龙或纤维素纱线虽然可以通过毛细作用增加 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的负载量，但其本身不导电，通常需添加大量导电剂以提升导电性能。相比之下，碳纤维材料具有高导电性，但它的表面化学惰性使其难以与 $Ti_3C_2T_x$ 稳定结合。为了增加 $Ti_3C_2T_x$ 与碳纤维之间的结合力，Coia 等[17]提出在碳纤维表面引入羰基（C═O）官能团，并通过原位组装方法将聚酰亚胺共价有机框架（PI–COF）接枝到碳纤维表面。随后，将改性后的碳纤维浸入 $Ti_3C_2T_x$ 分散液中，通过调控涂层厚度来优化纤维电极的性能。实验结果表明，改性后纤维的拉伸强度和杨氏模量与未改性的碳纤维相比无明显变化，表明改性过程未损害碳纤维的结构完整性。尽管涂层法在制备 MXene 复合纤维方面具有简单高效的优势，但仍存在 $Ti_3C_2T_x$ 负载量低、涂层脆性以及容易分层等问题，严重影响了 MXene 复合纤维的力学和电化学性能，进而限制了其在柔性可穿戴电子设备中的应用。

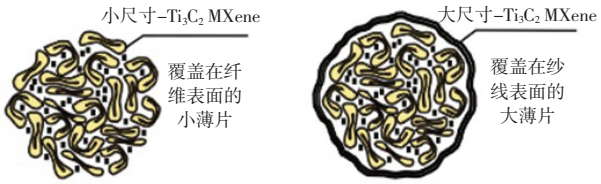


图 1　分步浸渍法制备 MXene 复合纤维

Fig.1　Fabrication of Mxene composite fibers by stepwise impregnation method

1.2　卷轴法

卷轴法是一种将功能材料（如 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片）作为客体，通过滴涂、浸涂或沉积的方法引入可纺纱线主体基底材料中，随后利用加捻卷绕工艺制备任意尺寸 MXene 复合纤维的方法。目前，仅有碳纳米管（CNT）被报道用作承载 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的纱线基材。2018 年，本课题组[6]提出从可纺 CNT 垂直阵列中连续拉出 CNT 纱线薄膜作为基底，将均匀分散的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片铺展于 CNT 薄膜表面，随后利用加捻工艺将涂覆 $Ti_3C_2T_x$ 的 CNT 薄膜卷曲成复合纤维，如图 2 所示。该复合纤维中，$Ti_3C_2T_x$ 的质量分数高达 95%，并呈现出明显的螺纹结构。其中，小直径且高导电的 CNT 提供了高效的导电网络，促进了电子的快速传输，加捻卷曲的开放式微观结构促进了离子的快速迁移，充分发挥了 $Ti_3C_2T_x$ 优异的电化学性能，使其在柔性可穿戴储能器件中展现显著的性能提升。但当前加捻卷曲技术受限于纱线长度有限与高生产成本，不利于可扩展制备。

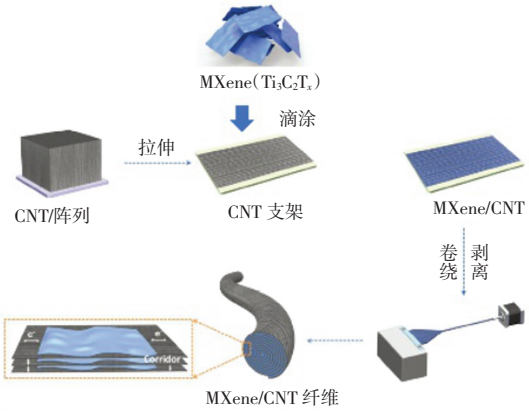


图 2　卷轴法制备 MXene 复合纤维

Fig.2　Fabrication of MXene composite fibers by bisrolling method

1.3　热拉伸法

热拉伸法是一种将宏观材料预制体或多种功能材料进行预制体组装结合，继而在高温条件下施加拉伸载荷，最终形成亚毫米直径、千米级长度且具有复杂内部结构纤维的工艺方法，如图 3 所示[18]。Zhou 等[19]提出将制备好的 MXene 纤维嵌入聚合物管中，利用热拉伸法在 MXene 纤维表面原位生成聚合物保护层，形成封装结构。该皮–芯结构纤维在 50 000 次弯曲循环后，纤维纺织品的电磁屏蔽性能仍保持优异的稳定性。尽管封装保护层提升了 MXene 纤维的力学性能，但由于聚合物皮层通常为绝缘材料，复合纤维仅内部 $Ti_3C_2T_x$ 芯导电，并且额外的热拉伸加工工艺增加了复合纤维制备的复杂性。

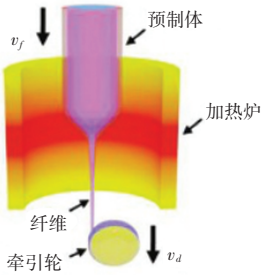


图 3　热拉伸法制备 MXene 复合纤维

Fig.3　Fabrication of MXene composite fibers by thermally drawing method

1.4　湿法纺丝法

基于相分离原理的湿法纺丝技术因操作简单、高效且易于规模化生产的特点，成为连续化制备 MXene 纤维电极最常用的方法。$Ti_3C_2T_x$ 纳米片因其具有大的

比表面积和丰富的表面官能团(如—OH、—O 和—F),在水溶液中表现出良好的分散性。此外,$Ti_3C_2T_x$ 纳米片在纺丝原液中表现出长程有序的液晶行为,有助于纳米片发生定向组装,获得连续纤维。具体而言,首先,将 MXene 纺丝液通过喷丝器注入凝固浴中,微流通道施加的剪切作用会促进 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片进一步取向。在溶剂与非溶剂的双扩散机制作用下,纺丝原液中溶剂与凝固浴中的非良性溶剂之间发生双扩散,诱导均相溶液向凝胶状态转变,从而在凝固浴中形成初生纤维。随后,利用水洗去除残留溶剂,进一步固化纤维,再经过拉伸和干燥处理,最终获得连续的 MXene 纤维。在湿法纺丝过程中,影响纤维结构与性能的因素主要有纺丝原液与凝固浴组分、剪切速率以及后拉伸参数,通过优化纺丝工艺可实现对 MXene 纤维结构和功能的精准调控。本课题组[8]借助湿法纺丝技术将 MXene 胶体通过注射泵挤入乙酸凝固浴中,如图 4 所示,取向后的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间通过静电交联作用,形成连续纤维。需要注意的是,通常需要对化学刻蚀的产物进行多步分离以获得大尺寸单层 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片,进而更好地实现湿法纺丝,不可避免地造成 MAX 前驱体的浪费。

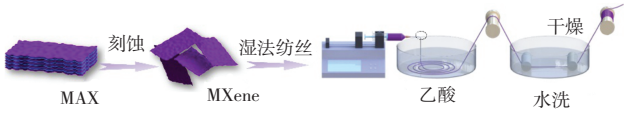


图 4　湿法纺丝法制备 MXene 复合纤维

Fig.4　Fabrication of MXene composite fibers by wet-spinning method

1.5　干法纺丝法

2023 年,本课题组[7]提出了一种干法纺丝策略,通过调控 MXene 沉积物的流变行为,在不使用凝固浴的情况下直接制备 MXene 纤维,如图 5 所示。

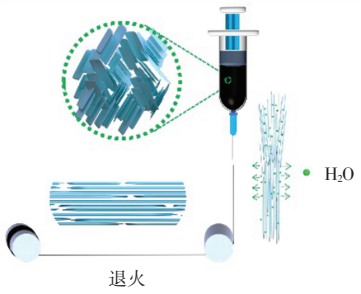


图 5　干法纺丝法制备 MXene 复合纤维

Fig.5　Fabrication of MXene composite fibers by dry-spinning method

该方法省去了分离大尺寸单层 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的复杂过程,提高了刻蚀材料的利用率。该工作还探究了溶剂挥发过程中纤维的收缩行为对 MXene 纤维力学和电化学性能的影响。MXene 纤维在干燥过程中,$Ti_3C_2T_x$ 纳米片因毛细作用力会产生褶皱。当收缩率为 0 时,MXene 纤维的抗拉伸强度达 64 MPa;随着收缩率的增大,MXene 纤维的抗拉伸强度下降,当收缩率达到 15%时,MXene 纤维的抗拉伸强度仅为 19 MPa。在 1 A/cm 的电流密度下,体积比电容高达 948 F/cm^3,且在 10 A/cm 的电流密度下仍有 83%的容量保留率。

涂覆法、卷轴法、热拉伸法和干法纺丝制备 MXene 纤维面临着负载量低、稳定性不足、工艺复杂以及不利于连续规模化制备等问题。目前,湿法纺丝因操作简单、高效且易于规模化生产等优点,在 MXene 纤维领域成为研究和应用最广泛的制备方法,同时纺丝浆料的易加工性为制备高性能纤维提供了可能。

2　MXene 复合纤维的性能提升策略

宏观 MXene 纤维的性能由其基本构筑单位 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的组装结构和界面性质决定。本节重点介绍 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的尺寸、流变性能、液晶行为、凝固浴双扩散动力、界面相互作用与层间距调控对 MXene 复合纤维的力学性能、电学性能和电化学性能的影响,总结了目前文献中报道的改善和提升策略。

2.1　力学性能

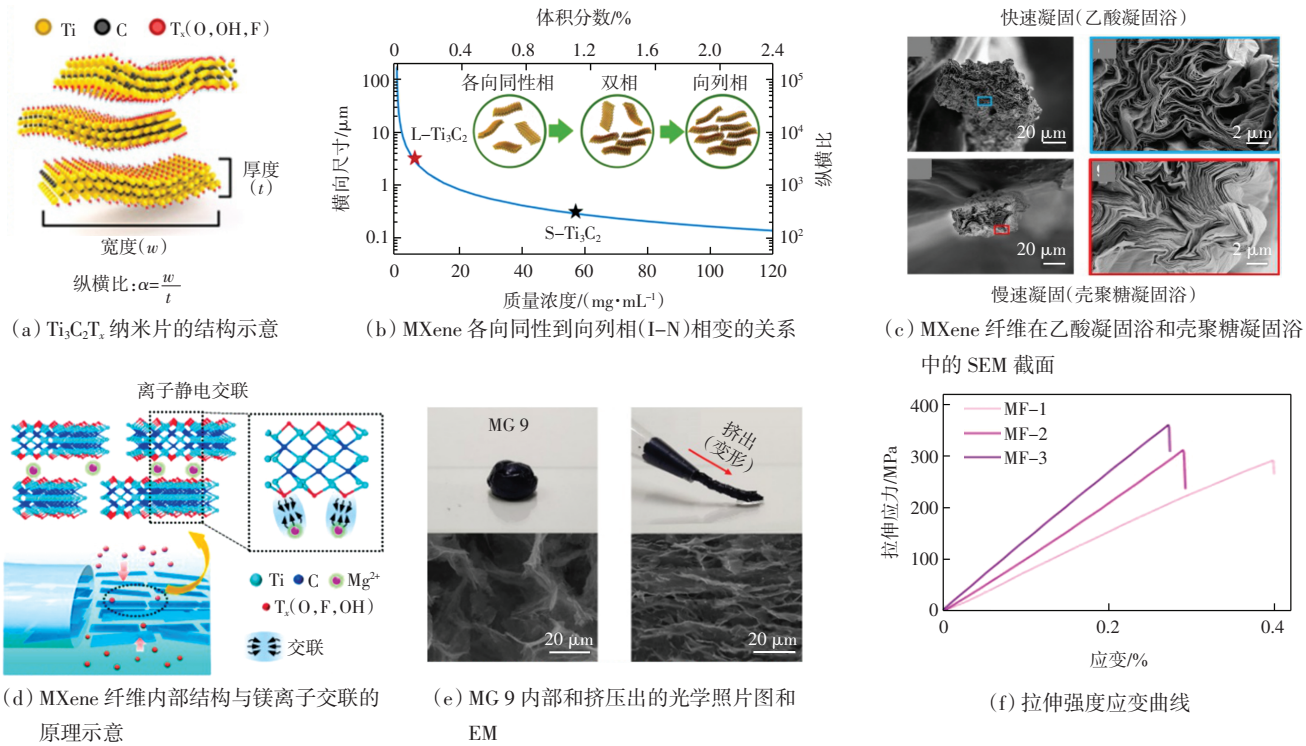
在湿法纺丝过程中,$Ti_3C_2T_x$ 纳米片往往存在取向性不理想和界面相互作用弱等问题,并且因毛细收缩作用产生大量孔隙和褶皱,这些都会导致 MXene 纤维的力学性能远低于理论预测值[20]。为解决这一问题,研究者提出了多种优化策略,包括调控 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的尺寸、流变性质、液晶相行为、凝固浴组分、纳米片取向度、孔隙率以及界面相互作用,以提升 MXene 纤维的力学性能。

2.1.1　微观结构调控

2020 年,Zhang 等[21]和 Eom[22]等提出通过湿法纺丝将 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片组装成宏观纯 MXene 纤维。研究表明纺丝液的液晶相转变行为与 MXene 的尺寸和浓度有关。大尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片在低浓度的 MXene 分散液中即可发生液晶相转变,而小尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片则需在高浓度分散液中才能实现液晶相转变,如图 6(a)和图 6(b)所示。这一现象归因于大尺寸和高浓度MXene 纺丝液能有效抑制纳米片的无序运动,促进长程有序排列和向列相液晶的形成。MXene 纤维的形态、致密程度和纳米片的取向排列等微观结构可通过调节 MXene 液晶油墨的浓度、$Ti_3C_2T_x$ 纳米片的尺寸以及凝

固浴的组分进行精确调控。在剪切力作用下，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片的取向排列更规整，从而更有利于提升 MXene 纤维的力学性能。凝固浴的组分对 MXene 纤维力学性能的优化同样至关重要。凝固浴的双扩散动力学行为直接影响纤维的取向排列，如图 6(c)所示。例如，壳聚糖凝固浴可减缓扩散过程，能够有效减少纤维中的孔隙率，提高 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的堆积密度和取向度，从而增强 MXene 纤维的力学性能。Zhang 等[21]利用平均尺寸为 3.1 μm 的大尺寸 MXene 纺丝液，在壳聚糖凝固浴中制备出具有高取向度(f = 0.72)和 40.5 MPa 拉伸强度的 MXene 纤维。

喷丝口的设计对纤维内部片层取向度和宏观纤维的形貌也有重要影响。喷丝口的断面结构和尺寸直接决定了纺丝流体在喷丝口时的剪切力和内壁压力，进而影响纤维的密实程度和片层取向度。Li 等[23]通过优化喷嘴断面结构和牵引速率，诱导 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片形成高度取向度(f = 0.86)结构的 MXene 纤维纳米带，如图 6(d)所示。当 MXene 纺丝液通过扁平通道时，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片沿纤维轴向排列，减少了纤维中的褶皱和孔隙等缺陷。经过牵伸处理后，MXene 纤维内部片层排列更加致密，消除了不规则孔隙。同时，镁离子与 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面的含氧官能团通过静电相互作用增强了相邻 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间的结合力，使纤维的抗拉强度达到 118.0 MPa。为了进一步提高纯 MXene 纤维的力学强度，Shin 等[24]提出通过控制 pH 值增强 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间的静电相互作用，形成稳定的 $Ti_3C_2T_x$ 凝胶三维网络结构。MXene 凝胶在外部剪切应力作用下沿特定方向稳定变形(图 6(e))，随后通过湿法纺丝组装成凝胶纤维，经拉伸力自发转变为高度取向排列的纤维，其拉伸强度高达 344.0 MPa，如图 6(f)所示。



(a) $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的结构示意　(b) MXene 各向同性到向列相(I–N)相变的关系　(c) MXene 纤维在乙酸凝固浴和壳聚糖凝固浴中的 SEM 截面

(d) MXene 纤维内部结构与镁离子交联的原理示意　(e) MG 9 内部和挤压出的光学照片图和 EM　(f) 拉伸强度应变曲线

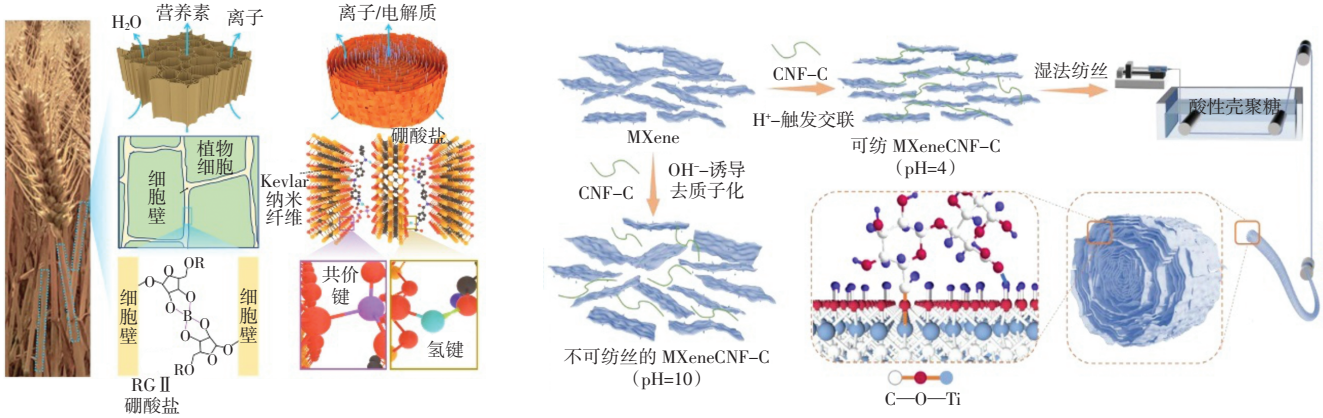
图 6　通过微观结构调控实现 MXene 纤维力学性能的提升

Fig.6　Enhancement of mechanical properties of MXene composite fibers through microstructure regulation

2.1.2　界面相互作用调控

虽然上述研究表明，通过降低孔隙率、提高致密堆积结构以及优化片层取向度可以改善 MXene 纤维力学性能，但由于 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片间较弱的界面相互作用，纯 MXene 纤维的力学性能仍远未达到柔性可穿戴电子设备对高性能纤维的需求。为此，研究人员提出了通过构筑不同类型的界面相互作用(如氢键、共价键或者离子键)进一步增强相邻 MXene 片层间的应力传递效率，从而提升 MXene 纤维的力学性能。具体而言，研究人员通过引入聚合物(PEDOT∶PSS)[25]、聚乙烯醇(PVA)[19]、氧化石墨烯(GO)[26]、纳米晶纤维素(CNC)[27]、芳纶纳米纤维(ANF)[28]和纤维素纳米纤维(CNF)[29]等功能添加剂，利用其表面的羟基基团与 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面的含氧官能团形成氢键，从而填充并连接 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间的大尺寸孔隙，增强界面相互作用，进而提高 MXene 复合纤维的力学性能。本课题组[30]受自然界中高等植物启发，提出了一种仿生界面交联策略，如图 7(a)所示，利用 Kevlar 与 MXene 之间的氢键作用赋予湿纺原液

更加显著的液晶行为，改善了纤维中 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的取向，并利用硼酸酯键共价桥联相邻的 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片，进一步增强 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片间的力学传递效率，提升了 MXene 复合纤维的抗拉伸强度（243.0 MPa）。2025 年本课题组[31]通过调节纺丝液 pH 值，成功在 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面接枝聚合物分子，获得了酸性体系稳定分散的 MXene 液晶相纺丝原液，显著提升纤维取向性（图 7(b)）。选用长径比较大的羧基化纤维素纳米纤维（CNF–C）作为添加剂，通过调节纺丝液 pH 值，CNF–C 和 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间通过亲和取代和脱水反应生成氢键和 Ti—O—C 共价键构建了高取向性（f = 0.63）和高抗拉伸强度（258.0 MPa）的 MXene 复合纤维。



（a）氢键–共价键协同增强的 MXene 基复合纤维电极制备示意　　（b）湿法纺丝制备 MCC 复合纤维示意

图 7　通过界面相互作用实现 MXene 纤维力学性能的提升

Fig.7　Enhancement of mechanical properties of MXene composite fibers through regulation of interfacial interactions

2.2　电学性能

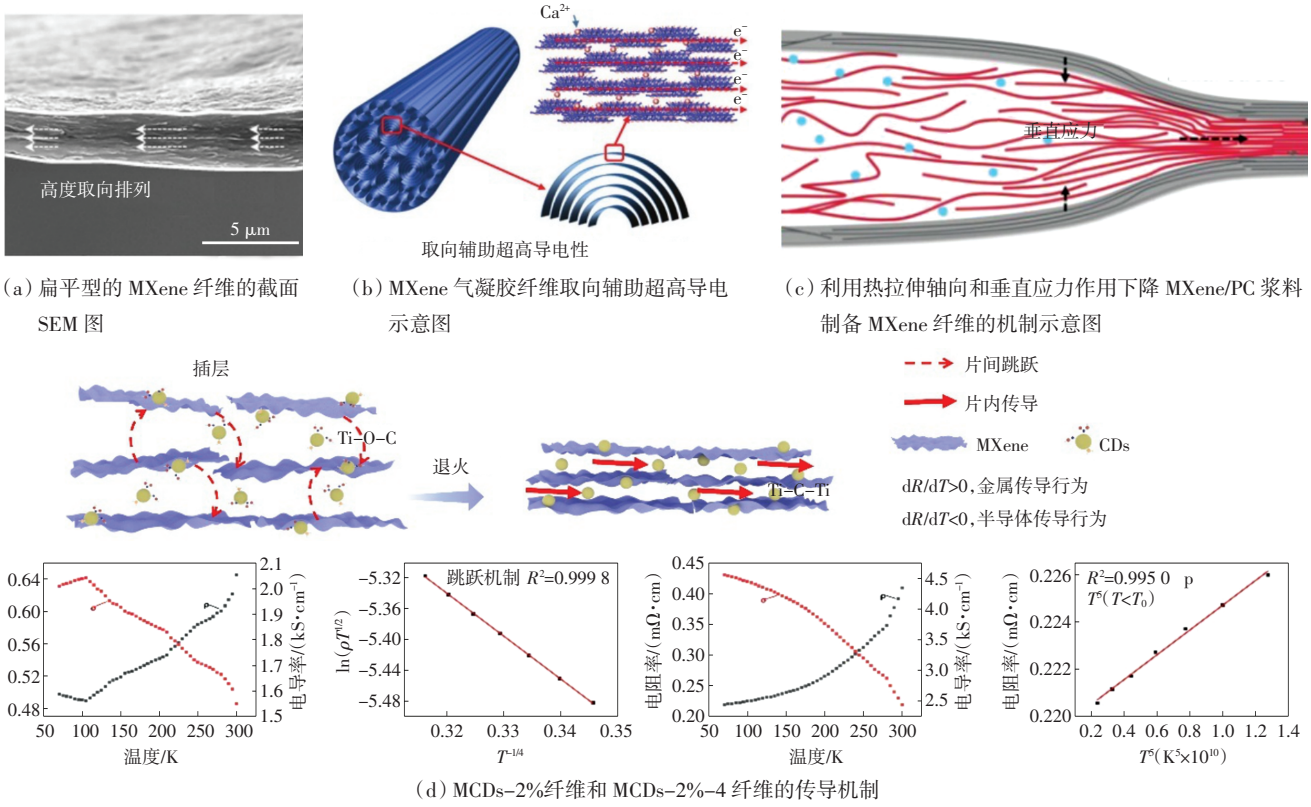
MXene 纤维的电导率与 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的本征电导率（11 000 S/cm）[32]存在显著差距的主要原因可以归结于湿纺丝过程中凝固浴内溶剂的双扩散机制导致纤维内部形成松散堆积结构，从而降低了电子传导效率。近年来，研究者提出了多种策略以提高 MXene 纤维的导电性，主要包括致密化结构设计和表面官能团调控。

2.2.1　致密化结构设计

2020 年，Zhang 等[21]利用大尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片在壳聚糖凝固浴中组装制备了具有高取向度和致密性的 MXene 纤维。该纤维的电导率高达 7 750 S/cm，是相同条件下小尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片制备的 MXene 纤维电导率的 2 倍。Eom 等[22]也通过大尺寸 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片组装成纯 MXene 纤维，利用加快纺丝速率和 NH^{4+} 交联，制备了高取向且致密的 MXene 纤维，其电导率为 7 713 S/cm。Li 等[23]则通过扁平通道和 Mg^{2+} 交联策略制备了具有密实结构的扁平带状纤维，电导率为 7 200 S/cm，如图 8(a)所示。其中，Mg^{2+} 在 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片组装过程中不仅消除表面的静电斥力，还诱导片层形成有序排列，从而构建了更致密的微观结构，加快电子传输。此外，干燥过程对纤维微观结构的形成也是至关重要。Li 等[33]通过动态溶胶–凝胶纺丝结合超临界 CO_2 干燥技术制备了 MXene 气凝胶纤维，如图 8(b)所示，该纤维内部呈现出连续均匀的多孔网络结构，表面形貌相对致密，电导率为 104 S/m。Zhou 等[34]通过流体辅助热拉伸技术制备了宏观紧凑的超致密 MXene 纤维，如图 8(c)所示，由于热拉伸诱导的应力，外层环烯烃共聚物和内层 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间形成了片状互锁结构，从而实现了超紧凑的 MXene 纤维，其电导率高达11 959 S/m。虽然交联剂的引入可以显著增强界面结合力，提升 MXene 纤维的力学性能，但是这一过程会降低电子在纳米片之间的传输效率。

2.2.2　表面官能团调控

除高度有序和致密化结构排列外，表面官能团的调控也是提升 MXene 纤维电子传输的关键参数。理论计算表明，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面官能团（T_x）的调控会影响费米能级态密度（DOS），进而影响 MXene 纤维的导电性[35]。通过去除表面官能团（—F 和—OH），可以增加载流子浓度并加快电子迁移速率，从而提升 $Ti_3C_2T_x$ 片层间的电导率。2024 年，本课题组[36]提出通过同时优化层间距和片内/片间交联，提升电子在 MXene 纳米片之间快速传递的研究思路。如图 8(d)所示，在实验上，热处理可有效降低—F 官能团的含量，从而降低电阻并提高电导率，这一现象与密度泛函理论（DFT）计算结果预测一致。热处理后，$Ti_3C_2T_x$ 表现出金属行为，进一步证实了表面官能团的调控和 Ti—O 键向 Ti—C 的转化更有利于 MXene 纤维本征结构的恢复，增强 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片片间/片内的交联，实现快速电子传输。



（a）扁平型的 MXene 纤维的截面 SEM 图　（b）MXene 气凝胶纤维取向辅助超高导电示意图　（c）利用热拉伸轴向和垂直应力作用下降 MXene/PC 浆料制备 MXene 纤维的机制示意图

（d）MCDs–2%纤维和 MCDs–2%–4 纤维的传导机制

图 8　MXene 纤维的电学性能调控策略

Fig.8　Optimization strategies for electrical performance of MXene fibers

2.3　电化学性能

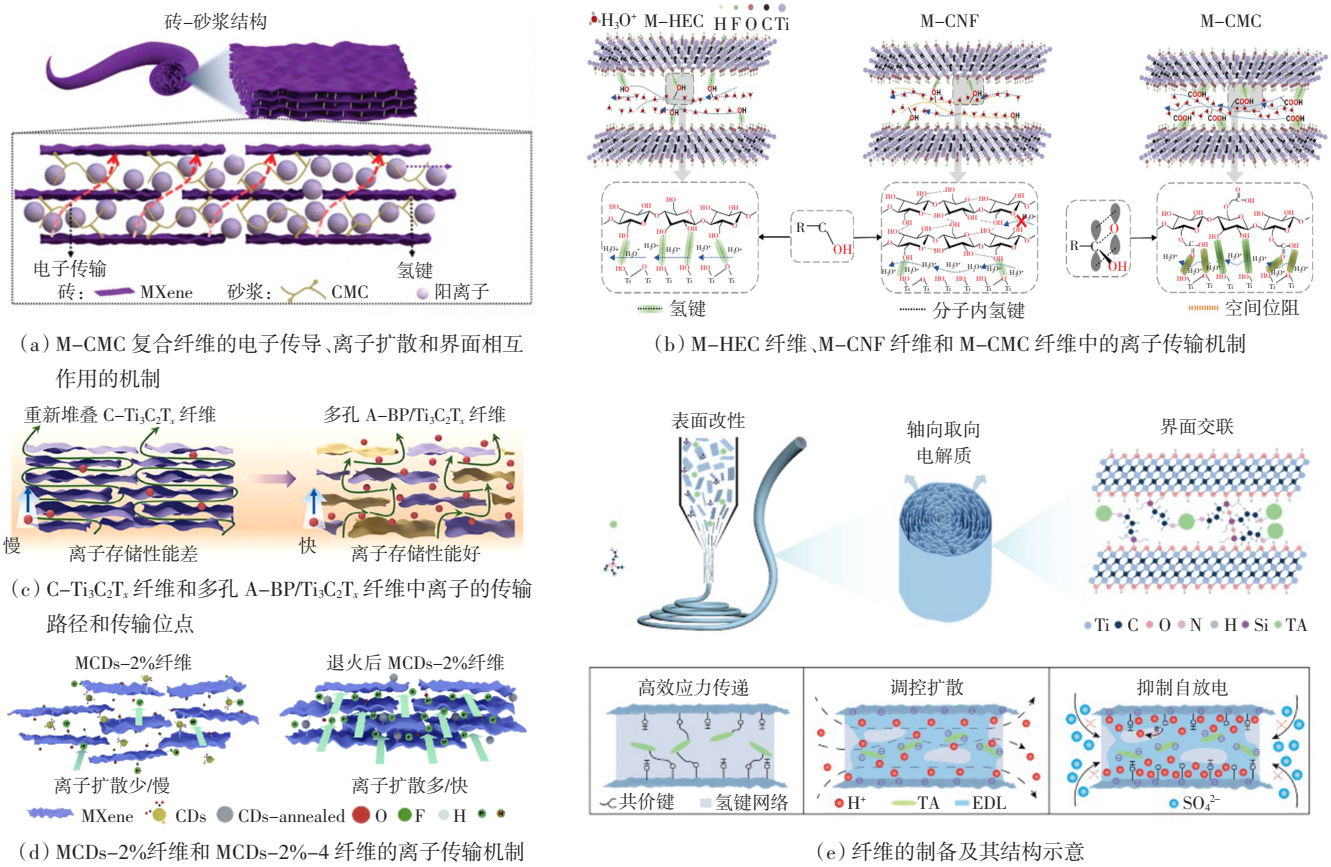
$Ti_3C_2T_x$MXene 纤维的电荷存储能力主要由表面 Ti 的氧化还原反应和可利用活性位点数量共同决定。然而，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片的自堆叠现象以及非电化学活性的表面功能团（—F）严重限制了 MXene 纤维的电化学性能[37]。针对这一问题，研究人员一般采用增大层间距、设计多孔结构以及调控表面官能团的策略来提升 MXene 纤维的电化学性能。

2.3.1 增大层间距

在湿法纺丝组装 MXene 纤维过程中，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片会发生堆积现象，导致层间距窄，阻碍离子传输，造成可利用活性位点较少，进而导致输出电容和倍率性能下降。2023 年，本课题组[8]受贻贝结构启发，提出一种基于界面结合与层间距协同调控的方法，设计了具有高电化学性能的 MXene–CMC（M–CMC）复合纤维，如图 9（a）所示。通过在 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间引入 CMC，有效抑制了纳米片的自堆叠，获得了适合离子传输的层间距，暴露更多的活性位点，提升了离子的反应扩散动力学，从而提高了纤维电荷存储能力。2025 年，本课题组[38]进一步提出利用不同含氧官能团的高分子链在 MXene 层间形成的氢键网络不同，实现电解质离子传输动力学的调控。如图 9（b）所示，纤维素纳米纤维（CNF）与 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片形成过量的氢键与强烈的分子内相互作用导致纤维紧密聚集，严重抑制质子的传输。而羧基取代的羧甲基纤维素（CMC），由于—COO^- 较大的空间位阻进一步限制了质子的传输。羟乙基纤维素具有尺寸适中的基团和中等的吸附能力，可以减少空间位阻效应，促进质子的快速传输。Yin 等[39]则利用不同金属阳离子插层策略优化层间距，增大离子传输通道，增加可用于化学反应的活性位点，提升电化学性能。研究结果表明，Mn^{2+}修饰的 $Ti_3C_2T_x$ 电极在 1 mV/s 扫速下表现出 1 428.5 F/cm³ 的体积比电容，是纯 $Ti_3C_2T_x$ 电极的 1.5 倍。DFT 理论计算表明，金属阳离子（Li^+、Na^+、K^+、Mn^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{2+}、Al^{3+}）的插层能力会影响 $Ti_3C_2T_x$ 表面的官能团取向。其中，Mn^{2+}表现出最大的形成能差，对活性—O 官能团具有最大的驱动力，从而提升了 $Ti_3C_2T_x$ 的电化学性能。

2.3.2　构建多孔结构

除了增大层间距外，构建多孔结构以增强界面电荷转移也是提升 MXene 纤维电化学性能的有效方法。Tang 等[40]提出了一种基于静电自组装和微流控纺丝方法，制备了分级多孔异质结构的黑磷/$Ti_3C_2T_x$ MXene 气凝胶（A–BP/$Ti_3C_2T_x$）纤维。该纤维具有相互连接的高孔隙率离子扩散通道，同时保持了优异的界面耦合作



（a）M–CMC 复合纤维的电子传导、离子扩散和界面相互作用的机制

（b）M–HEC 纤维、M–CNF 纤维和 M–CMC 纤维中的离子传输机制

（c）C–$Ti_3C_2T_x$ 纤维和多孔 A–BP/$Ti_3C_2T_x$ 纤维中离子的传输路径和传输位点

（d）MCDs–2%纤维和 MCDs–2%–4 纤维的离子传输机制

（e）纤维的制备及其结构示意

图 9　MXene 纤维的电化学性能调控策略

Fig.9　Optimization strategies for electrochemical performance of MXene fibers

用和结构稳定性（图 9（c））。DFT 计算和实验证明，A–BP/$Ti_3C_2T_x$ 纤维表现出低的 H^+扩散能垒、高的 H^+吸附能、快的界面电子传导以及优异的结构稳定性。在1 A/g 电流密度下，其比电容值达到 369 F/g；即使在 20 A/g 电流密度下，比电容仍保持在 214 F/g，表明该纤维具有快速的离子扩散动力学和优异的倍率性能。

2.3.3　调控表面官能团

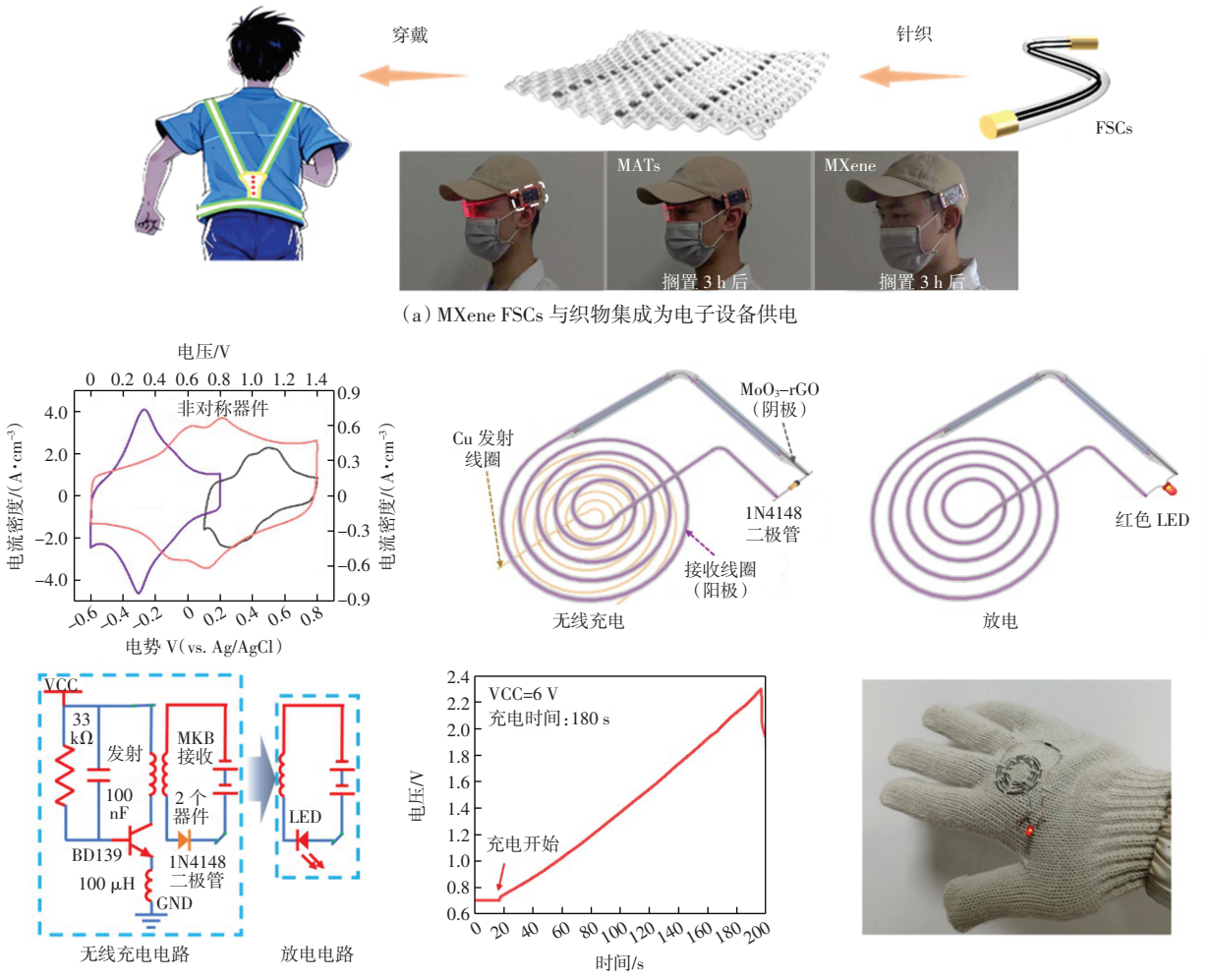
湿化学法刻蚀 $Ti_3C_2T_x$ 时引入的—F 表面基团会阻碍 MXene 纤维的电化学性能。为解决这一问题，本课题组[38]提出通过热处理去除 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面官能团—F，导致层间致密性增加，从而增加了表面电荷积累（图 9（d））。在 2 A/cm³ 的电流密度下，MCDs–2%–4（碳量子点质量分数为 2%，MXene–CDs–2%在 400 ℃（氩气/氢气）下退火）纤维电极的最佳体积比电容值为 1 597 F/cm³，相较于纯 MXene 纤维（432 F/cm³）提升了 3.7 倍。虽然热处理导致 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片层间距变小，但是 MCDs–2%–4 纤维比 MCDs–2%（碳量子点质量分数为 2%，MXene–CDs–2%）纤维具有更高的导电性和更低的电荷转移电阻，表现出最快的离子扩散速率。Shimada 等[41]利用 DFT 计算系统地研究了 $Ti_3C_2T_x$ 电极的原子级双电层结构与卤素官能团的关系。研究发现，卤素官能团中卤素原子的原子数越大（I > Br > Cl > F），对双电层电容的贡献也越大。这种电容的提升归因于卤素原子较低的价电子数和电负性，促进了电极表面的静电电荷积累。这一发现为设计具有更高电容的 MXene 纤维提供了重要的理论基础。除此之外，MXene 纤维易发生严重的自放电行为，根据能量存储机制，没有任何限制的电荷会消散到较低的自由能状态，电压衰减 50%会导致 75%的能量损失。鉴于此，在 2025 年，本课题组[42]提出通过调控界面静电场分布加快离子传输速率的策略。如图 9（e）所示，由于单宁酸（TA）富含酚羟基而呈现负电性，当它被引入 MXene 体系时可有效提升层间空间电荷密度。原始 MXene 由于其电负性仅在表面形成电双层（EDL）；空间电荷引入后，生成的 EDL 与表面 EDL 产生交叠。这种连续的 EDL 结构有利于阳离子的选择性传输，也有效增大了离子扩散通道、离子可及表面以及离子扩散动力学。负电性分子的引入能够增强 MXene 层间对阴离子的排斥力和对阳离子的吸引力，从而显著抑制 MXene 纤维超级电容器的自放电。在 1 A/cm³ 电流密度下，MAT5（单宁酸（TA）质量分数为 5%，MXene–硅烷偶联剂（APTES）–单宁酸（TA））纤维比容量高达1 573.0 F/cm³，表现出

优异的倍率性能（在 15 A/cm³ 高电流密度下仍能保持 83.6%的容量）。由 MAT5 纤维构建的器件的自放电表现也得到了明显改善,其电压降至初始值的 1/2 所需的时间是未经修饰 MXene 电极的 2 倍。

3　MXene 纤维的应用

上述对 MXene 纤维电学、力学以及电化学性能的讨论可以证实 MXene 纤维是一种在柔性可穿戴储能器件领域极具前景的高性能电极材料。MXene 纤维超级电容器通过化学反应存储电荷，兼具高能量密度、柔性结构和优异的循环稳定性,在柔性电子设备中展现出极具吸引力的应用潜力。Zheng 等[18]通过在乙酸凝固中湿法纺丝制备了 Ac–MXene 纤维,并将其覆盖凝胶状电解质，构建了对称结构的纤维超级电容器原型。该器件的工作电压为 0.8 V，体积功率密度为 401.9 mW/cm³ 时,体积能量密度为 77.6 mW·h/cm³。2 个器件串联能够将输出电压扩展到 1.6 V;2 个器件并联可以在相同的电流密度和工作电压下,延长充放电时间至单个器件的 2 倍。这一结果表明,该纤维超级电容器具有良好的可扩展性,为柔性电子设备的能源供应提供了重要支持。Zhu 等[43]通过微流控法一步合成了具有层间电活性共价有机框架(COF–LZU1)垂直排列的 VA–MXene 分级有序杂化纤维。将其组装成纤维超级电容器编织入手套中,能够为数字显示器提供充足的能源供应。此外,该器件还可与传感器集成,用于脉冲信号的实时监测,展示了其在可穿戴检测领域的应用潜力。本课题组[8]将太阳能电池与仿贻贝结构 M–CMC 复合纤维组装的纤维超级电容器集成到织物中构建自供电系统,为可穿戴设备供电。实验表明,太阳光照可为柔性织物中的纤维超级电容器充电,充入的电量能够点亮一个光电二极管(LED)10 s。作为概念演示，将纤维器件与织物结合可为电子设备供电(图 10(a))[31,42]。

为进一步提升纤维电容器的能量密度，本课题组[30]设计了以 MoO_3–rGO 纤维为正极,MKB(MXene–



(a) MXene FSCs 与织物集成为电子设备供电

(b) 无线充电式纤维储能器件的构筑及其可穿戴应用

图 10　MXene 纤维在柔性可穿戴储能器件领域的应用

Fig.10　Applications of MXene fibers in field of flexible wearable energy storage devices

芳纶纤维(Kevlar)–硼酸酯(B))纤维为负极,3 mol/L H_2SO_4/PVA 为凝胶电解质的全固态非对称超级电容器(图 10 (b))。该器件的工作电压窗扩大至 1.4 V,在 10 A/cm^3 电流密度下经过 10 000 次循环后, 容量保留率达 80.2%, 并实现了 3 494.8 mW/cm^3 高功率密度和 41.4 mW·h/cm^3 能量密度。此外,利用 MXene 纤维的高导电性,一方面编织线圈电路,另一方面充当电荷存储材料,实现与无线充电的功能集成,证明其在可穿戴织物电子系统中具有潜在的应用前景。

4　结束语

$Ti_3C_2T_x$ MXene 因其优异的金属导电性、高的体积容量以及丰富的表面官能团,被认为是实现规模化纤维制备和多功能电子纺织器件应用的最具潜力的结构构筑单元。本文主要介绍了 MXene 纤维的制备方法, 重点围绕湿法纺丝过程中 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片尺寸、流变性能、液晶相行为、凝固浴组分、纳米片层排列取向、界面交联作用、表面官能团和层间距等关键参数对 MXene 纤维的力学、电学及电化学性能的影响规律展开讨论,指出通过调控 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片的尺寸、流变性质、液晶相行为、凝固浴组分、纳米片取向度、孔隙率以及界面相互作用可提升 MXene 纤维的综合性能,有望在保证可穿戴应用的前提下,提升 MXene 纤维的电荷存储能力。MXene 复合纤维除了在可穿戴储能器件中取得了一定的研究进展, 还因其优异的导电性、磁性、光吸收性以及生物相容性在电磁屏蔽、健康监测、传感、焦耳加热、光学和生物医学等领域展现出巨大的应用价值。通过进一步优化电极材料设计、制备工艺及其功能集成,MXene 纤维有望在下一代高性能可穿戴设备和先进功能材料中发挥重要作用。

参考文献:

[1] ZOU J, WU J, WANG Y Z, et al. Additive–mediated intercalation and surface modification of MXenes[J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(8): 2972–2990.

[2] YANG J, LI M Z, FANG S L, et al. Water–induced strong isotropic MXene–bridged graphene sheets for electrochemical energy storage[J]. Science, 2024, 383(6684): 771–777.

[3] VAHIDMOHAMMADI A, ROSEN J, GOGOTSI Y. The world of two–dimensional carbides and nitrides (MXenes)[J]. Science, 2021, 372(6547): eabf1581.

[4] HUSSAIN I, HANAN A, BIBI F, et al. Non–Ti (M2X and M3X2) MXenes for energy storage/conversion[J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(34): 2401650.

[5] LIM K R G, SHEKHIREV M, WYATT B C, et al. Fundamentals of MXene synthesis[J]. Nature Synthesis, 2022, 1(8): 601–614.

[6] YU C Y, GONG Y J, CHEN R Y, et al. A solid–state fibriform supercapacitor boosted by host–guest hybridization between the carbon nanotube scaffold and MXene nanosheets[J]. Small, 2018, 14(29): 1801203.

[7] XIA Z M, DAI H H, CHANG J, et al. Rheology engineering for dry–spinning robust N–doped MXene sediment fibers toward efficient charge storage[J]. Small, 2023, 19(48): 2304687.

[8] WANG H F, WANG Y R, CHANG J, et al. Nacre–inspired strong MXene/cellulose fiber with superior supercapacitive performance via synergizing the interfacial bonding and interlayer spacing[J]. Nano Letters, 2023, 23(12): 5663–5672.

[9] ZHOU X H, WANG Z, XIONG T, et al. Fiber crossbars: An emerging architecture of smart electronic textiles[J]. Advanced Materials, 2023, 35(51): 2370364.

[10] QUAN J X, JIANG X P, DING T, et al. Recent progress in MXene fiber: Materials, fabrication techniques, and potential applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158320.

[11] AHMED A, HOSSAIN M M, ADAK B, et al. Recent advances in 2D MXene integrated smart–textile interfaces for multifunctional applications[J]. Chemistry of Materials, 2020, 32(24): 10296–10320.

[12] QIN S, USMAN K A S, HEGH D, et al. Development and applications of MXene–based functional fibers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(31): 36655–36669.

[13] HE J Q, LU C H, JIANG H B, et al. Scalable production of high–performing woven lithium–ion fibre batteries[J]. Nature, 2021, 597(7874): 57–63.

[14] LEVITT A, ZHANG J Z, DION G, et al. MXene–based fibers, yarns, and fabrics for wearable energy storage devices[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(47): 2000739.

[15] HU M M, LI Z J, LI G X, et al. All–solid–state flexible fiber–based MXene supercapacitors[J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(10): 1700143.

[16] UZUN S, SEYEDIN S, STOLTZFUS A L, et al. Knittable and washable multifunctional MXene–coated cellulose yarns[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(45): 1905015.

[17] COIA P, DHARMASIRI B, HAYNE D J, et al. Utilization of $Ti_3C_2T_x$ MXenes on carbonyl functionalized carbon fiber electrodes[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 507: 160502.

[18] ZHENG Y C, WANG Y L, ZHAO J P, et al. Electrostatic interfacial cross–linking and structurally oriented fiber constructed by surface–modified 2D MXene for high–performance flexible pseudocapacitive storage[J]. ACS Nano, 2023, 17(3): 2487–2496.

[19] ZHOU T Z, YU Y Z, HE B, et al. Ultra–compact MXene fibers by continuous and controllable synergy of interfacial interactions and thermal drawing–induced stresses[J]. Nature Com-

munications, 2022, 13: 4564.

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

[21] ZHANG J Z, UZUN S, SEYEDIN S, et al. Additive-free MXene liquid crystals and fibers[J]. ACS Central Science, 2020, 6(2): 254-265.

[22] EOM W, SHIN H, AMBADE R B, et al. Large-scale wet-spinning of highly electroconductive MXene fibers[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2825.

[23] LI S, FAN Z D, WU G Q, et al. Assembly of nanofluidic MXene fibers with enhanced ionic transport and capacitive charge storage by flake orientation[J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 7821-7832.

[24] SHIN H, EOM W, LEE K H, et al. Highly electroconductive and mechanically strong $Ti_3C_2T_x$ MXene fibers using a deformable MXene gel[J]. ACS Nano, 2021, 15(2): 3320-3329.

[25] ZHANG J Z, SEYEDIN S, QIN S, et al. Highly conductive $Ti_3C_2T_x$ MXene hybrid fibers for flexible and elastic fiber-shaped supercapacitors[J]. Small, 2019, 15(8): 1804732.

[26] JIANG X P, DING T, QUAN J X, et al. Confined hydrothermal assembly of hierarchical porous MXene/RGO composite fibers with enhanced oxidation resistance for high-performance wearable supercapacitors[J]. Small, 2025, 21(14): 2412378.

[27] USMAN K A S, ZHANG J Z, QIN S, et al. Inducing liquid crystallinity in dilute MXene dispersions for facile processing of multifunctional fibers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(9): 4770-4781.

[28] LIU Q, ZHAO A R, HE X X, et al. Full-temperature all-solid-state $Ti_3C_2T_x$/aramid fiber supercapacitor with optimal balance of capacitive performance and flexibility[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(22): 2010944.

[29] FU J S, LI Y C, ZHOU T Z, et al. Large stroke radially oriented MXene composite fiber tensile artificial muscles[J]. Science Advances, 2025, 11(2): eadt1560.

[30] DAI H H, CHANG J, YANG J, et al. Bio-inspired interfacial engineering of MXene fibers toward synergistic improvement in mechanical strength and electrochemical performance[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(11): 2312654.

[31] PAN L M, WANG H F, ZHOU J B, et al. Spinning dope modulation via pH-triggered multiscale sheet-wire linkages for constructing strong $Ti_3C_2T_x$ MXene fibers with high volumetric capacitance[J]. Advanced Functional Materials, 2025, n/a(n/a): 2505247.

[32] ANASORI B, LUKATSKAYA M R, GOGOTSI Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2: 16098.

[33] LI Y Z, ZHANG X T. Electrically conductive, optically responsive, and highly orientated $Ti_3C_2T_x$ MXene aerogel fibers[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(4): 2107767.

[34] ZHOU T Z, CAO C, YUAN S X, et al. Interlocking-governed ultra-strong and highly conductive MXene fibers through fluidics-assisted thermal drawing[J]. Advanced Materials, 2023, 35(51): 2305807.

[35] SCHULTZ T, FREY N C, HANTANASIRISAKUL K, et al. Surface termination dependent work function and electronic properties of $Ti_3C_2T_x$ MXene [J]. Chemistry of Materials, 2019, 31(17): 6590-6597.

[36] WANG H F, ZHAO W D, ZHANG Z T, et al. Synergizing electron and ion transports of $Ti_3C_2T_x$ MXene fiber via dot-sheet heterostructure and covalent Ti—C—Ti cross-linking for efficient charge storage and thermal management[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(48): 2408508.

[37] LIU N, LI Q Q, WAN H J, et al. High-temperature stability in air of $Ti_3C_2T_x$ MXene-based composite with extracted bentonite[J]. Nature Communications, 2022, 13: 5551.

[38] WANG H F, ZHAO W D, GUO Y, et al. Interlayer manipulation for accelerating ion diffusion kinetics in $Ti_3C_2T_x$ MXene fiber toward enhanced supercapacitance with high rate capability[J]. Nano Letters, 2025, 25(16): 6405-6413.

[39] YIN X D, ZHENG W, TANG H F, et al. Unraveling cation intercalation mechanism in MXene for enhanced supercapacitor performance[J]. Energy Storage Materials, 2024, 72: 103688.

[40] TANG Q Q, ZHANG Y, ZHU X L, et al. Hierarchically porous and hetero-structured black phosphorus/$Ti_3C_2T_x$ MXene aerogel fiber for wearable supercapacitors with implantable capability[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(51): 2410005.

[41] SHIMADA T, TAKENAKA N, ANDO Y, et al. Relationship between electric double-layer structure of MXene electrode and its surface functional groups[J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(5): 2069-2075.

[42] ZHOU J B, DAI H H, WANG H F, et al. Biomimetic interfacial manipulation in $Ti_3C_2T_x$ fibers toward strengthened interlayer cross-linking, regulated ion diffusion and suppressed self-discharge[J]. Small, 2025, 21(25): 2502658.

[43] ZHU X L, ZHANG Y, MAN Z M, et al. Microfluidic-assembled covalent organic Frameworks@$Ti_3C_2T_x$ MXene vertical fibers for high-performance electrochemical supercapacitors[J]. Advanced Materials, 2023, 35(46): 2307186.

本文引文格式:

王慧芳,孙庚志,黄维. 高性能 MXene 复合纤维研究进展[J]. 天津工业大学学报,2025, 44(3): 1-11.

WANG H F,SUN G Z,HUANG W. Recent advances in high performance MXene composite fibers[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(3): 1-11(in Chinese).