



MXene/生物质复合材料的结构设计策略与储能性能优化

田运凤, 吴慧琼, 苏俊丞, 李朝霞, 苏 琼

(环境友好复合材料国家民委重点实验室, 甘肃省生物质功能复合材料工程研究中心, 甘肃省
高校环境友好复合材料及生物质利用重点实验室, 甘肃省表界面化学基础学科研究中心,
西北民族大学化工学院, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: MXene 材料因兼具高电导率、丰富的表面官能团和优异的离子传输能力, 在超级电容器等储能领域展现出广阔应用前景。然而, MXene 薄膜因其片层易自堆叠、结构稳定性不足及离子扩散受限等问题, 制约了其性能的进一步提升。生物质材料来源广泛、可持续性强, 且通常具有多级孔结构、良好润湿性、力学柔性及杂原子原位掺杂等优势, 为构筑高性能储能电极提供了丰富的调控空间。将 MXene 与生物质材料复合, 可在抑制片层堆叠、优化界面结构、拓宽离子传输通道及提升电化学活性等方面实现协同增强。本文系统综述了 MXene 的制备方法及 MXene/生物质复合材料的复合方法, 重点围绕层间结构调控、多级孔结构设计、导电网络构建、力学性能增强及界面耦合机制等方面总结了 MXene/生物质复合材料的结构设计策略及其对储能性能的影响规律。在此基础上, 进一步对 MXene/生物质复合材料在绿色制备、界面构效关系解析、器件集成及实际应用等方面面临的挑战与发展方向进行了展望, 为高性能绿色储能材料的设计与应用提供参考。

关键词: MXene; 生物质; 结构设计; 储能性能; 超级电容器

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0530

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-3909-19

Structural design strategies and energy storage performance optimization of MXene/biomass composites

TIAN Yunfeng, WU Huiqiong, SU Juncheng, LI Zhaoxia, SU Qiong

(Key Laboratory of Environment-Friendly Composite Materials of the State Ethnic Affairs Commission, Gansu Provincial Biomass Functional Composite Materials Engineering Research Center, Key Laboratory of Utility of Environmental Friendly Composite Materials and Biomass in Universities of Gansu Province, Gansu Provincial Chemistry Basic Science Research Center for Surface and Interface, School of Chemical Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: MXene materials have emerged as promising candidates for energy storage applications, particularly in supercapacitors, by virtue of their excellent electrical conductivity, rich surface functional groups, and superior ion transport capability. However, MXene films still suffer from critical limitations, including the facile restacking of nanosheets, poor structural

收稿日期: 2026-06-22; 修改稿日期: 2026-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金 (22165025, 21968032); 甘肃省自然科学基金重点项目 (25JRRA037); 甘肃省高校产业支撑计划项目 (2024CYZC-04); 西北民族大学化学创新团队建设 (1001660139, 1001660141); 中央高校基本科研业务费项目 (31920240074); 西北民族大学科学研究项目 (xbmuyjrc2020004)。

第一作者: 田运凤 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生物质复合电极材料的研究, E-mail: 2822289934@qq.com; **通信作者:** 苏琼, 教授, 主要从事功能复合材料的研究, E-mail: hgsq@xbmu.edu.cn; 李朝霞, 讲师, 研究方向为环境友好生物质复合材料的开发与电化学性能研究, E-mail: 1623321223@qq.com。

引用本文: 田运凤, 吴慧琼, 苏俊丞, 等. MXene/生物质复合材料的结构设计策略与储能性能优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 3909-3927.

Citation: TIAN Yunfeng, WU Huiqiong, SU Juncheng, et al. Structural design strategies and energy storage performance optimization of MXene/biomass composites[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(10): 3909-3927.

stability, and constrained ion diffusion kinetics, which severely impede the further optimization of their electrochemical performance. Biomass materials possess distinct advantages of abundant reserves, superior sustainability, and unique structural and functional characteristics, such as hierarchical porous architectures, favorable surface wettability, excellent mechanical flexibility, and in-situ heteroatom doping, providing enormous potential for the structural design and performance modulation of high-performance energy storage electrodes. The hybridization of MXene with biomass materials enables prominent synergistic effects, which effectively suppress nanosheet restacking, optimize interfacial structures, expand ion transport channels, and enhance electrochemical activity. This paper systematically reviews the synthetic strategies of MXene and the fabrication approaches of MXene/biomass composites. The structural design tactics of MXene/biomass composites and their underlying mechanisms for boosting energy storage performance are comprehensively summarized, with emphases on interlayer structure regulation, hierarchical pore construction, conductive network fabrication, mechanical property enhancement, and interfacial coupling modulation. Furthermore, the current challenges and future development directions of MXene/biomass composites are discussed from the perspectives of green and sustainable synthesis, interfacial structure-activity relationship analysis, device integration, and practical application. This review provides valuable references for the rational design and efficient utilization of high-performance and eco-friendly energy storage materials.

Keywords: MXene; biomass; structural design; energy storage performance; supercapacitors

随着全球能源需求持续增长以及环境问题日益突出, 高效清洁能源及先进储能技术的发展已成为实现可持续发展的重要方向^[1-2]。超级电容器作为一类典型的电化学储能器件, 具有功率密度高、充放电速率快、循环寿命长以及安全性高等优点, 在电动交通辅助电源、智能电网调峰以及柔性电子设备等领域具有广泛的应用前景^[3]。然而, 其能量密度相对较低, 主要受限于电极材料储能性能的不足^[4-5]。因此, 开发兼具高比电容、优异倍率性能和长期循环稳定性的先进电极材料已成为当前研究热点^[6]。

MXene 是一类由 MAX 相选择性刻蚀获得的二维过渡金属碳/氮化物材料。自 2011 年首次报道以来, MXene 凭借优异的金属导电性、丰富的表面官能团、良好的亲水性以及可调控的层状结构, 在超级电容器领域受到广泛关注^[7-8]。这些特性有利于电子快速传输和电解液离子扩散, 使 MXene 成为极具潜力的电极材料。然而, MXene 片层间较强的范德华力和氢键作用易导致其在制备及循环过程中发生重堆叠, 造成层间距减小、比表面积下降, 从而限制离子传输和活性位点利用; 同时, MXene

易氧化的缺陷也会导致导电性降低和结构退化, 严重制约其实际应用^[9-10]。

针对这一问题, 科研人员通过引入石墨烯、碳纳米管、导电聚合物、金属氧化物及生物质材料等功能组分构建复合体系, 以抑制 MXene 重堆叠并改善其结构稳定性^[11]。其中, 生物质材料(如纤维素、木质素、壳聚糖及多种农业副产物)因来源广泛、成本低廉, 具有丰富的天然微观结构, 受到广泛关注^[12]。二者复合, 不仅能够作为层间支撑体扩大 MXene 层间距, 还可构建多级孔结构、增加活性位点并促进离子传输, 从而显著提升电极材料的电化学性能。如 Liu 等人^[13]将稻壳活性炭(RHAC)与 MXene 复合, 利用稻壳天然 SiO₂ 模板形成的层次孔结构作为 MXene 层间支撑, 有效抑制了片层堆叠。优化后的 RHAC/MXene (质量比为 60:40) 电极在 100 mA/g 下比电容达 255 F/g, 在 10000 次循环后容量保持率高达 90%, 表明生物质衍生碳在稳定 MXene 结构方面的显著优势。

近年来, MXene/生物质复合材料在超级电容器领域取得了快速发展, 不同生物质组分与 MXene 之间的协同作用为提升材料导电性、结构

稳定性及储能性能提供了新的研究思路。然而,目前相关文献与综述主要围绕MXene复合材料种类、制备方法及电化学性能进行归纳,而不同复合策略、结构与储能机制之间的构效关系尚缺乏系统梳理。本文更加关注MXene/生物质复合体系中的结构调控机制及其构效关系,从“结构构筑-传输行为-储能性能”的逻辑主线出发,系统分析生物质组分在调控MXene层间结构、构建多级孔道、优化电子/离子传输网络以及增强界面稳定性中的作用机制,进一步揭示不同复合策略下材料结构演变与电荷存储行为之间的内在联系,为高性能MXene/生物质复合电极材料的理性设计提供理论依据。

1 MXene的制备

MXene是构筑MXene/生物质复合材料的重要功能单元,其结构与性能在很大程度上取决于制备方法。不同制备工艺获得的MXene在层间距、表面官能团、缺陷密度、分散稳定性及导电性、亲水性和电化学活性等方面存在显著差异^[14],进而影响其与生物质材料的界面相互作用及复合效果^[15]。因此,在讨论MXene/生物质复合材料的制备策略之前,有必要首先对MXene的制备方法及其特点进行系统总结。

MXene的MAX相前驱体具有 $M_{n+1}AX_n$ 结构,M为过渡金属元素(如Sc、Ti、V、Cr),A为Ⅲ_A或Ⅳ_A族元素(如Al或Si),X为碳或氮原子^[16]。MXene通常由MAX相前驱体通过选择性去除A层元素获得。主要制备方法包括酸蚀刻、电化学蚀刻、熔盐刻蚀以及其他新型刻蚀方法^[17]。

1.1 酸蚀刻法

酸蚀刻法因工艺成熟、制备效率高而应用最为广泛。酸蚀刻法通常采用氢氟酸(HF)或含氟酸性溶液对MAX相进行选择性刻蚀,以去除A层元素并获得二维层状MXene^[18]。其原理是利用HF优先与MAX相中的A层发生反应,使层状结构逐渐剥离并形成MXene片层,如图1所示。反应后裸露的高表面能过渡金属层会吸附溶液中的羟基、氟离子或氧离子,形成稳定的表面端基官能团^[19]。

除直接使用HF外,研究人员还开发了 NH_4HF_2 体系以及LiF/HCl原位生成HF体系等替代方法,以降低高浓度HF的使用风险并改善MXene的结构完

整性^[20]。以 Ti_3AlC_2 为例,在HF水溶液或含氟酸性溶液中进行刻蚀时,Al原子层被选择性去除,从而获得 Ti_3C_2 MXene。为探究刻蚀条件对MXene结构演变的影响,Wang等人^[21]系统研究了不同HF刻蚀时间下 Ti_3AlC_2 的形貌变化规律。如图2所示,经HF溶液浸泡2 h后,大部分 Ti_3AlC_2 块体开始呈现层状结构;随着刻蚀时间延长,铝原子层持续被移除,导致MXene片层减薄、层间距增大。研究发现,刻蚀条件不仅影响MXene的微观形貌,还会改变其化学结构和晶格参数。

然而,HF的强腐蚀性和毒性对环境对人体构成潜在危害,且高浓度HF蚀刻易在MXene片层产生孔洞缺陷,破坏材料的结构完整性^[22]。这些缺陷会降低MXene片层的结构完整性,并增加电子传输阻力;同时,MXene自身易发生片层重堆叠,从而限制电解质离子的扩散与传输,劣化材料的电化学性能和力学稳定性。尽管通过优化HF浓度、反应温度及刻蚀时间等参数能够在一定程度上调控MXene的层间结构和表面化学性质,但含氟刻蚀体系仍存在安全性差、环境污染风险高以及易引入结构缺陷等问题^[23]。因此,开发绿色、安全、高效的无氟制备技术已成为当前MXene研究的重要方向。

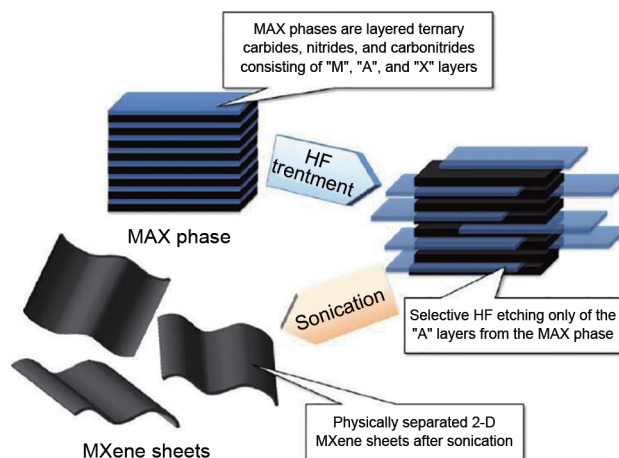


图1 HF酸蚀刻MXene示意图^[24]
Fig. 1 Schematic diagram of HF acid etching of MXene^[24]

1.2 电化学蚀刻法

电化学蚀刻法是以MAX相直接作为工作电极,在外加电场作用下选择性氧化并去除层间A元素(如Al),从而实现MXene的制备^[25]。其本质是利用电压驱动M—A键断裂,而保留稳定的M—X骨架

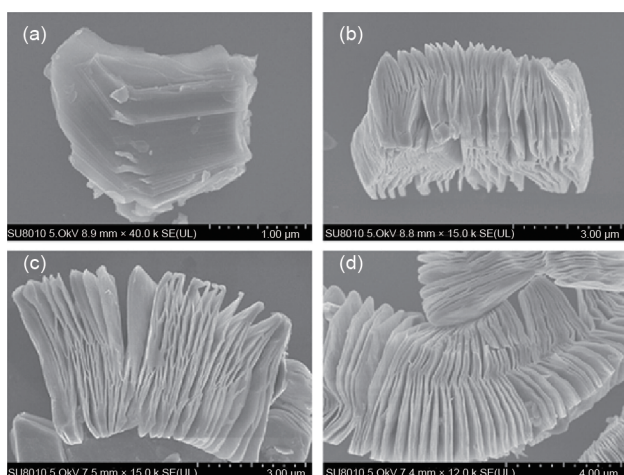


图2 Ti_3AlC_2 在HF蚀刻前后的SEM图像: (a) HF蚀刻前; (b) 2 h; (c) 10 h; (d) 20 h^[21]

Fig. 2 SEM images of Ti_3AlC_2 before and after HF etching: (a) Before HF etching; (b) 2 hours; (c) 10 hours; (d) 20 hours^[21]

结构。通过调控电解液组成、施加电压及反应温度等参数,可实现对刻蚀过程及MXene表面化学性质的精确调控^[26]。然而,当施加电压过高或刻蚀时间过长时,M层可能发生进一步氧化,导致MXene结构破坏甚至转化为金属氧化物等副产物,从而降低材料的导电性和电化学性能。因此,精确匹配M—A键与M—X键的氧化电位,并合理控制刻蚀时间,是实现A层选择性去除和获得高质量MXene的关键^[27]。

与传统化学蚀刻相比,电化学蚀刻的优势在于可通过调控电解液组成、电压和温度等参数,实现对表面官能团的精确调控。例如,Chan等人^[28]以 HBF_4 为电解液,在较低HF浓度下实现了 Ti_3C_2 和 Ti_3CN MXene的电化学蚀刻。该方法抑制了HF分解并加快了蚀刻速率,所得MXene片层具有更大的横向尺寸。Shen等人^[29]在 LiCl-KCl 熔盐体系中开发了熔盐辅助电化学刻蚀方法,以 Ti_3AlC_2 为阳极、Ni片为阴极,实现了无氟 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Cl}_2$ MXene的制备。结果表明,所得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面的一Cl端基可通过后续处理原位转化为一O或—S,简化了改性流程,丰富了表面端基种类(图3)。经—O端基化的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 展现出优异的电化学性能:在1.0 A/g电流密度下比电容达到225 F/g,电容保持率可达91.1%,经10000次充放电循环后容量保持率仍接近100%。

1.3 熔盐蚀刻法

熔盐蚀刻法是一种近年来发展起来的无氟

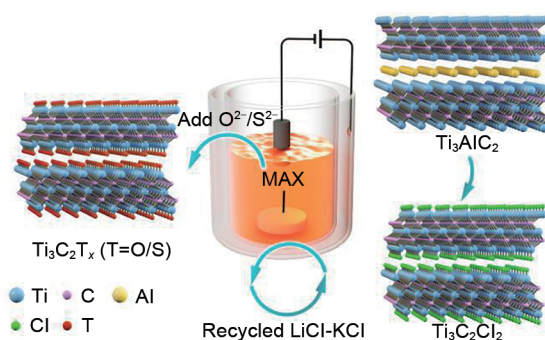


图3 熔盐辅助电化学蚀刻从MAX相合成MXene及其表面终端原位改性示意图^[29]

Fig. 3 Schematic diagram of the synthesis of MXene from MAX phase by molten salt-assisted electrochemical etching and in-situ modification of its surface terminations^[29]

MXene制备方法,为传统含氟刻蚀体系提供了重要替代途径。该方法通常采用 CuCl_2 、 FeCl_2 、 ZnCl_2 等路易斯酸熔盐作为刻蚀介质,在高温条件下通过选择性去除MAX相中的A层元素实现MXene的制备^[30]。与HF或 LiF/HCl 等湿法刻蚀相比,熔盐刻蚀具有反应过程可控、环境友好以及能够获得新型表面终端基团等优点,尤其适用于传统湿法难以制备的MXene体系。

其刻蚀机理主要依赖于熔盐中路易斯酸性金属离子的氧化作用。反应过程中,A层元素优先被氧化并与Cl⁻结合生成挥发性金属氯化物,从而实现A层的持续去除,而稳定的M—X骨架得以保留,最终形成具有Cl终端的MXene材料^[31]。Li等人^[32]开发了一种通用的路易斯酸性熔盐刻蚀法,利用熔盐阳离子氧化MAX相中的A元素(如Si、Ga、Zn),成功制备了多种传统HF法难以获得的MXene。所得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 在非水电解质中表现出伪电容储锂行为,容量达205 mAh/g,倍率性能和循环稳定性优异。该方法为MXene的绿色合成和表面化学调控提供了新途径。

此外,熔盐刻蚀过程中形成的一Cl终端基团还可通过后续热处理或化学转化进一步调控为一O、—S等其他表面基团,从而实现MXene表面化学性质的精准调控。凭借无氟制备、终端基团可设计以及适用于多种MAX前驱体等优势,熔盐刻蚀已成为当前MXene绿色制备与表面工程研究的重要发展方向。表1表明不同制备方法在结构调控、性能优化及适用体系方面各具优势,为MXene材料的可控合成与应用提供了多样化路径。

表 1 不同MXene制备方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different MXene preparation methods

方法	蚀刻剂	机理	优点	缺点	参考文献
酸蚀刻	HF 溶液	HF 选择性去除 MAX 相中的 A 层元素，形成表面带—F、—OH、—O 等端基的 MXene	工艺成熟，蚀刻效率高，适用于多种 MAX 相	HF 腐蚀性强，对环境与人体有害	[33]
氟盐/酸蚀刻	LiF + HCl	原位生成低浓度 HF 进行缓和刻蚀，同时 Li ⁺ 插层促进片层剥离	刻蚀过程温和，层间距增大，片层易剥离	反应时间较长	[34]
无氟碱蚀刻	KOH/NaOH	利用强碱选择性破坏 A 层并引入—O、—OH 端基，实现无氟制备	环境友好，减少 F 终端，提高导电性	刻蚀效率低，适用范围窄	[35]
电化学蚀刻	电化学电解液体系	外加电场驱动 M—A 键断裂，实现 A 层选择性去除，可调控表面化学性质	条件温和，可调控刻蚀速率与缺陷密度	设备要求高，规模化受限	[36]
熔盐蚀刻	CuCl ₂ 、ZnCl ₂ 、FeCl ₂ 等	高温熔盐中 A 层被氧化并与 Cl ⁻ 等结合去除，可获得可调表面终端	表面终端可调，结构稳定性高，抗氧化性改善	反应温度高，能耗大	[37]

2 MXene/生物质复合材料的复合方法

为充分发挥 MXene 高导电性和生物质材料丰富结构特征的协同优势，科研人员开发了多种复合构筑策略。不同复合方法在组装过程、结构形成机制及界面结合方式等方面存在差异，进而影响复合材料的形貌结构和性能表现。目前常用的 MXene/生物质复合方法主要包括水热组装法、静电自组装法、真空辅助过滤法以及 3D 打印技术等。下文对这些方法的基本原理、结构特点及应用研究进展进行介绍。

2.1 水热组装法

水热组装法是利用密闭反应体系在高温高压条件下促进 MXene 与生物质组分发生原位组装和界面耦合，从而构筑稳定复合结构的方法^[38]。与真空辅助过滤等物理组装方法相比，水热法更注重界面化学作用及结构演化过程，有利于形成结合更加紧密的复合体系。

在水热反应过程中，生物质分子可能发生部分碳化、重排或交联，从而在 MXene 表面形成包覆层或桥连结构。同时，MXene 表面丰富的—O、—OH 及少量—F 等终端基团可通过氢键作用、静电作用、配位作用甚至共价键连接与生物质组分发生相互作用，从而提高界面结合强度和电子传输效率^[39]。从微观角度来看，该方法有利于构建核-壳结构、三维多孔网络结构及互穿网络结构等多种层级架构。其中，MXene 通常作为导电核心，而生物质衍生碳形成外层或连接网络。这种结构不仅提高了材料的机械稳定性，还可有效防止 MXene 在循环过程中的结构塌陷。此外，反应温度与时间对结构演化

具有显著影响。较高温度有助于促进碳化程度及界面结合，但过高温可能导致 MXene 结构破坏。因此，优化反应条件是实现性能提升的关键。

Sun 等人^[39]以杏鲍菇衍生活性炭为生物质碳骨架，并引入 MXene/rGO 导电网络，通过一步水热法构筑三维互穿导电网络，如图 4(a)所示。水热过程中乙二胺促进 MXene 与 rGO 协同自组装，并增强其与生物质碳之间的界面结合。所得复合材料形成了丰富的介孔结构和连续电子传输通道，有效抑制 MXene 片层重堆叠。当 MXene/GO 与活性炭质量比为 3 : 10 时，电极在 2 mV/s 下比电容达到 442 F/g，约为纯活性炭的 1.5 倍，循环 10000 次后电容保持率仍达 88.1%，表明水热法能够有效实现结构调控与性能协同提升。Cui 等人^[40]则通过水热碳化法，将 MXene 纳米片与经阳离子处理后的萝卜片复合，制备了自支撑 MXene/生物质/壳聚糖碳气凝胶（MBC）电极。该电极在 2 mV/s 扫描速率下体积比电容高达 1801.4 mF/cm³，在 50000 次循环后仍保持 82% 的电容保持率，展现出卓越的循环稳定性和结构柔性。

2.2 静电自组装法

MXene 表面的—O、—OH 等终端基团在水溶液中易发生解离，使其具有较高的负电荷密度，能够与壳聚糖、阳离子改性纤维素等带正电的生物质材料发生静电相互作用，该过程称为静电自组装^[41]。在实际体系中，静电作用往往与氢键作用、范德华力及配位作用协同存在，共同促进复合结构的稳定形成。

与传统物理混合法相比，静电自组装法能够在分子或纳米尺度实现组分的精准排列与有序组装。在适宜条件下，MXene 纳米片与生物质组分可通过层层组装形成规则的层状结构，从而构建连续的

电子传输通路和高效的离子扩散通道。这种有序结构不仅有利于形成均匀的层间孔道,降低离子传输路径的曲折度,还能够提高电解液对活性位点的利用效率。同时,生物质组分可作为层间支撑体插入MXene片层之间,增大层间距并减弱片层间的范德华吸引力,从而有效抑制MXene的重堆叠现象,促进电解质离子的快速扩散^[42]。此外,该方法通常在温和条件下进行,能够较好地保留MXene表面活性官能团及二维层状结构,对于构筑柔性储能材料具有明显优势。

Zhu等人^[43]以柔性木材(FW)为生物质基底,构筑了抗坏血酸(VC)改性的MXene复合电极(MVFW),如图4(b)所示。MXene纳米片通过界面相互作用均匀组装于木材天然多孔骨架内部,形成连续导电网络。VC的引入进一步将MXene层间距由1.44 nm扩大至1.52 nm,有效抑制了片层重堆叠并提高了材料的抗氧化稳定性。所得MVFW电极在5 mA/cm²电流密度下的面积比电容达到1301 mF/cm²,储存2个月后仍保持约70%的电容保持率,表现出优异的储能性能和结构稳定性。

2.3 真空辅助过滤法

真空辅助过滤法具有工艺简单、结构可控及适用于柔性电极制备等优点,是目前构筑MXene/生物质复合膜最常用的方法之一。该方法通常将剥离后的MXene分散液与生物质溶液(如纳米纤维素、壳聚糖、生物质炭等)进行均匀混合,在负压作用下通过滤膜沉积形成层状复合结构^[44]。从结构形成机理来看,在抽滤过程中,MXene纳米片在流体驱动下沿过滤方向定向排列,形成类“砖-泥”结构;而生物质组分则作为“间隔剂”插入片层之间,通过氢键或静电作用实现界面结合。其中,生物质组分含量对复合膜层间结构具有重要调控作用。当含量较低时,间隔效果有限,仍易发生局部堆叠;而含量过高则可能导致导电网络被破坏,降低电子传输效率。因此,合理调控两者的配比是获得优异电化学性能的关键。

Sun等人^[45]采用真空辅助过滤法制备MXene薄膜,并将其作为基准电极研究MXene片层堆叠对储能性能的影响。研究发现MXene的SSA为8.3 m²/g,在0.5 A/g下的比电容为76 F/g,表现出明显的纳米片堆叠问题。为克服抽滤膜结构致密的问题,研究通过将棉纤维布浸渍MXene溶液后经热解构建了MXene/

CF异质结构,比表面积提升至386 m²/g,在0.5 A/g下比电容达357 F/g,体积比电容为7.14 F/cm³,100 A/g下电容保持率为63.9%,循环5000次后保持率达99.8%。Weng等人^[46]通过真空辅助过滤法制备了MXene-细菌纤维素(BC)复合膜,如图4(c),利用BC与MXene间的氢键交联获得自支撑柔性电极。研究发现,BC质量含量为10%时效果最佳:层间距由1.36 nm扩至1.44 nm,电导率达182 S/cm,抗拉强度88.94 MPa、杨氏模量6.8 GPa,面积比电容为346 mF/cm²,优于纯MXene的307 mF/cm²。

研究表明,MXene纳米片在过滤过程中易形成高度有序的层状堆积结构,所得复合膜通常较为致密,在高载量或厚电极条件下容易产生离子扩散受限的问题。因此,近年来研究者通过引入牺牲模板或后续活化处理,在层状结构中构建微孔或介孔,以进一步改善其电化学性能。

2.4 3D打印技术

随着先进制造技术的发展,3D打印技术为MXene/生物质复合材料的精准结构构筑提供了新的技术路径。通过将MXene与生物质材料制备成具有适宜流变性能的“墨水”,可实现复杂几何结构电极的可控制备^[47]。该方法不仅能够在宏观尺度上调控电极形貌,还可通过设计内部结构(如多孔通道或蜂窝结构)优化离子传输路径,从而提高电极的离子扩散效率、电荷传输能力及整体储能性能^[48]。此外,3D打印技术在构建微型化与柔性储能器件方面具有独特优势,可满足新一代可穿戴电子设备的需求。

Zhou等人^[49]利用3D打印技术,以纤维素纳米纤维为流变改性剂,在总固含量仅为8%(质量分数)的条件下制备出可打印的MXene基墨水,如图4(d)所示,显著降低了二维材料用量并抑制其自堆叠。打印后结合冷冻干燥,构建出具有多级孔结构的三维网络,SSA达78.13 m²/g。电化学测试表明,该电极在1 mA/cm²下的面比电容达到2.43 F/cm²,组装的固态对称超级电容器体积比电容达到25.4 F/cm³,并表现出101 μWh/cm²的能量密度。经过5000次充放电循环后,其电容保持率仍达85%。该研究证明,3D打印与冷冻干燥联用可在低固含量下实现电子-离子协同传输网络的有效构筑。然而,3D打印对材料体系的流变性能与稳定性要求较高,同时设备成本较高,极大程度地限制了其大规模应用。因

此, 开发兼具优异流变性能、结构稳定性及电化学活性的复合墨水体系, 并实现打印工艺与电极结构的协同优化, 是推动 MXene/生物质复合材料 3D 打印技术走向实际应用的重要研究方向。

综上所述, 不同复合方法在结构构筑机制及性能优化方向上各具特点。水热组装法侧重于增强 MXene 与生物质之间的界面结合, 并促进三维网络结构形成, 适用于提高结构稳定性; 静电自组装法依赖界面电荷作用, 可实现层间距的精准调控和纳米尺度有序组装; 真空辅助过滤法更适于构筑规

则层状导电网络, 但所得膜层较致密, 厚电极中易出现离子扩散受限; 3D 打印技术则兼具宏观结构设计和微观孔结构调控能力, 更适用于柔性器件和复杂电极构筑。因此, 不同复合策略并不存在绝对优劣, 其选择应结合目标结构、传输需求及应用场景综合考虑。因此, 深入理解各类复合方法的结构形成机制及其构效关系, 对于实现 MXene/生物质复合材料的性能优化具有重要意义。图 4 总结了目前 MXene/生物质复合材料的典型构筑策略及其结构形成过程。

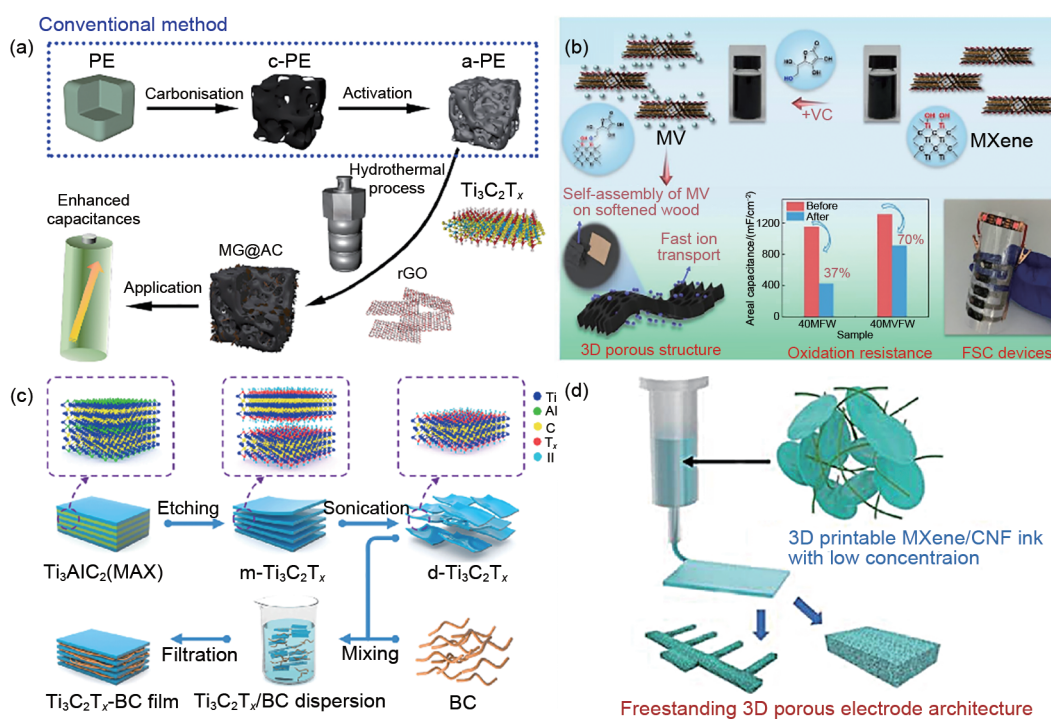


图 4 不同复合方法制备示意图: (a) 水热组装法^[39]; (b) 静电自组装法^[43]; (c) 真空抽滤^[46]; (d) 3D 打印技术^[49]
Fig. 4 Schematic diagrams of composites fabricated via different preparation methods: (a) Hydrothermal assembly method^[39]; (b) electrostatic self-assembly method^[43]; (c) vacuum filtration^[46]; (d) 3D printing technology^[49]

3 MXene/生物质复合材料的结构与构效关系

MXene/生物质复合材料的电化学性能不仅取决于其组成成分, 还与其微观结构特征密切相关。合理的结构设计能够有效缓解 MXene 片层重堆叠问题, 优化离子与电子传输路径, 并提高活性位点利用率, 从而实现储能性能的提升。近年来, 科研人员通过调控层间结构、多级孔结构以及界面相互作用等方式, 构筑了多种具有优异电化学性能的

MXene/生物质复合材料^[50]。深入理解材料结构特征与电化学行为之间的构效关系, 对于指导高性能超级电容器电极材料的设计与开发具有重要意义。

3.1 层间结构调控与离子传输机制

MXene 材料在干燥或充放电循环过程中易发生片层重堆叠, 导致层间距减小、有效比表面积降低以及部分电化学活性位点被遮蔽, 从而阻碍电解质离子的进入与扩散, 削弱电荷存储和传输能力。生物质组分作为间隔剂插入 MXene 片层时, 通过降低片层间范德华作用力扩大层间距离, 降低水合

离子进入 MXene 层间所需克服的去溶剂化能垒, 从而降低离子迁移活化能, 提高界面离子传输动力学。然而, 层间距的调控并非越大越有利。层间距过小时, 水合离子进入受阻, 导致扩散阻抗增加; 层间距过大则削弱 MXene 片层之间电子传输连续性。因此, 合理调控层间距需要在离子扩散效率与电子传输能力之间建立平衡。

从界面热力学角度来看, MXene 层间离子传输不仅受几何空间限制, 还受到离子去溶剂化过程的影响。在水系电解液中, 离子通常以水合状态存在, 其有效尺寸远大于裸离子。当 MXene 层间距接近或小于水合离子尺寸时, 离子进入层间需要部分或完全脱除水合壳层, 从而克服较高的去溶剂化能垒, 导致离子扩散活化能增加, 限制快速充放电过程。引入生物质组分后, 一方面可作为插层剂扩大 MXene 层间距, 为水合离子提供更宽松的扩散通道; 另一方面, 可调节层间界面的极性环境及表面官能团分布, 降低离子去溶剂化能垒, 促进界面电荷转移。由此可见, 生物质诱导的层间结构优化不仅改善了离子扩散通道, 还降低了界面离子迁移能垒, 实现了电子传输与离子扩散的协同优化^[51]。构筑稳定且开放的层间结构, 实现层间距、电子传输与离子扩散之间的协同优化, 是提升 MXene 基复合材料电化学性能的重要策略。

Zhou 等人^[52]通过将纤维素纳米纤维 (CNF) 嵌入 MXene 层间, 制备了 MXene/CNF 复合薄膜。研究发现, CNF 的引入使层间距由纯 MXene 的 1.1 nm 增大至 1.3 nm, 降低了离子扩散阻力, 层间结构如图 5 所示。薄膜体积电容为 94.21 F/cm³, 且在 60° 弯曲角度下循环 10000 次后电容保持率高达 97.87%, 表明适当层间结构可在促进离子快速传输与维持电子导电网络之间取得协同平衡。

Dutta 等人^[53]将蒜皮衍生 CNF 插层至 Ti₃C₂T_x MXene 层间得到 MXCF 复合电极, 其与还原氧化石墨烯 (rGO)、碳纳米管 (CNT) 和聚苯胺 (PANI) 组成的复合电极 rCPANI 组装为不对称超级电容器, 电化学性能如图 6 所示。添加 10% 的 CNF 后, MXCF 电极在 2 mV/s 扫速下比电容从 306 F/g 提高到了 358 F/g, 且在 1000 mV/s 高扫速下电容保持率仍可达到 63%。CNF 的间隔作用与毛细力诱导的 MXene 片层褶皱结构, 可有效抑制片层重堆叠,

实现跨尺度连通的离子传输通道的构建和层间结构的精准调控。

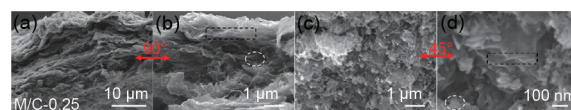


图 5 MXene/CNF 复合薄膜超级电容器层间结构示意图^[52]
Fig. 5 Schematic diagram of the interlayer structure of MXene/CNF composite film supercapacitor^[52]

3.2 多级孔结构构筑机制与离子传输调控

构建三维多孔导电网络是提升复合材料整体性能的重要策略。生物质衍生碳材料具有天然多孔结构, 但不同碳化及活化工艺会显著改变其孔隙形成过程, 使所得材料的比表面积和孔径分布产生较大差异。因此, 生物质碳材料性能差异并非简单来源于原料种类, 而主要取决于碳骨架形成过程、挥发组分释放行为以及后处理过程中的孔结构调控机制。通过合理设计碳化、活化及气凝胶构筑过程, 可实现微孔、介孔和大孔结构的协同调控, 从而优化电解液离子迁移路径和电荷存储行为。表 2 为不同生物质碳材料制备工艺及其对孔结构及储能行为的影响。其中, 微孔主要提供电荷吸附与储存位点, 是电双层电容形成的重要基础; 介孔能够促进电解质离子的扩散与传输, 提高活性位点利用率; 大孔则作为电解质储库和传输通道, 有利于降低离子扩散阻力, 实现快速充放电过程^[54]。在 MXene/生物质复合体系中, 多级孔结构与层状结构相结合, 可构建“二维+三维”协同传输网络。其中, 层状结构提供连续电子通道; 而多孔结构提供高效离子通道, 实现电荷存储与传输的协同优化。

Sinha 等人^[55]以橙皮为碳源、KOH 为活化剂得到了分级多孔碳, 引入 Ti₃C₂T_x MXene 层间, 制备了复合材料 (MxACK) 如图 7 所示。采用 NLDFT 模型对其孔结构进行分析, 其比表面积达 2080.55 m²/g, 形成以 2~3.5 nm 介孔为主、微孔协同存在的分级孔结构, 使 MXene 层间距由 0.97 nm 增大至约 1.1 nm。CV 测试结果显示 MxACK 电极在 5 mV/s 时, 比电容为 407 F/g, 高于纯 MXene 的 203 F/g, 循环 5000 次后保持率为 93.13%。

Lyu 等人^[60]以纤维素纳米纤维为骨架、单壁碳纳米管为导电相、Ti₃C₂T_x MXene 为活性材料, 构建了三维多孔气凝胶薄膜 TSC, 其形貌如图 8 所示。该气凝胶比表面积高达 301.03 m²/g, 采用

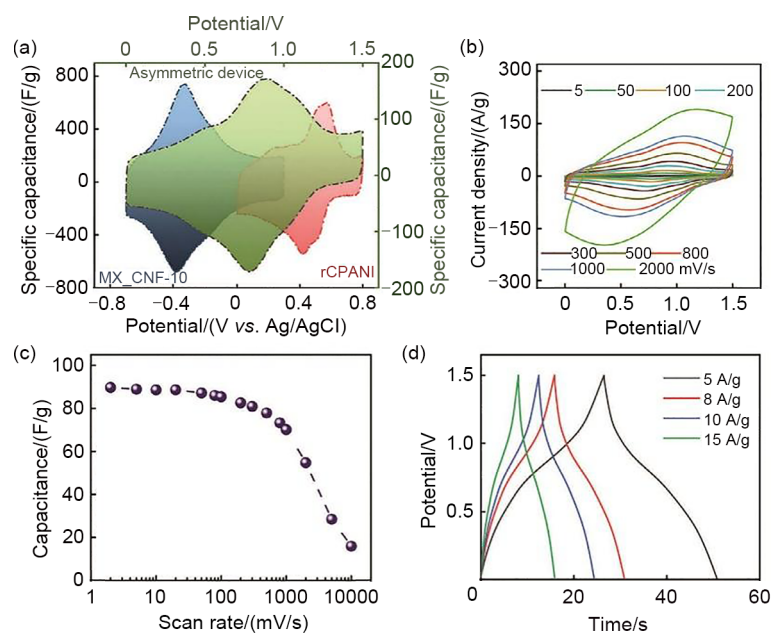


图6 rCPANI//MXCF 不对称器件的电化学性能: (a) 在 50 mV/s 下 rCPANI 和 MXCF 电极的 CV 曲线; (b) 不同扫描速率下的 CV 曲线; (c) 倍率性能; (d) rCPANI//MXCF 器件的 GCD 曲线^[53]

Fig. 6 Electrochemical performance of the rCPANI//MXCF asymmetric device: (a) CV curves of rCPANI and MXCF electrodes at 50 mV/s; (b) CV curves at different scan rates; (c) rate capability; (d) GCD curves of the rCPANI//MXCF device^[53]

表 2 不同生物质碳材料制备工艺及其对孔结构及储能行为的影响

Table 2 Preparation processes of various biomass-derived carbon materials and their effects on pore structure and energy storage behavior

生物质碳材料	制备工艺	结构形成机制	主要孔结构	电化学作用	参考文献
生物质碳	直接碳化	挥发组分逸出, 保留天然结构	微孔较少, 孔隙有限	提供基础电荷吸附位点	[55]
	酸/碱活化	化学刻蚀和碳骨架重构	丰富微孔/介孔	提高比表面积和电荷存储能力	[56]
	模板法	模板诱导孔道复制	规则介孔结构	促进离子快速扩散	[57]
	气凝胶碳化	保持三维网络结构	连续宏-介孔网络	降低扩散阻抗, 提高倍率性能	[58]
与 MXene 复合	水热组装法	MXene 与生物质在高温高压下原位组装, 形成以 MXene 为核、生物质碳为壳的三维互穿导电网络	丰富介孔和三维连通骨架	提高比电容 (283~442 F/g); 循环 10000 次保持率 88.1%, 结构稳定性增强	[39]
	静电自组装法	静电引力驱动 MXene 与带正电生物质有序堆积, 生物质插入层间增大层间距, 形成规则层状结构	规则层状通道, 层间距可控	促进离子扩散, 面积比电容达 1301 mF/cm ² , 抗氧化性改善	[41]
	真空辅助过滤法	负压定向排列 MXene 成致密层状膜, 生物质嵌入层间作为间隔剂和增强相, 形成“砖-泥”结构	层间空隙为主, 适度扩大层间距	提供连续电子路径, 面积比电容 346 mF/cm ² , 拉伸强度提升至 88.9 MPa	[44]
	3D 打印技术	逐层打印墨水结合冷冻干燥, 构建蜂窝状多级孔三维宏观骨架, 生物质充当流变助剂和支撑体	大/介/微孔共存的多级网络, 比表面积 78.13 m ² /g	面比电容 2.43 F/cm ² , 能量密度 101 μWh/cm ² , 循环 5000 次保持率 85%	[47]

BJH 模型对其孔结构进行分析, 其孔径分布于 9.84~13.67 nm, 形成了发达的多级孔道结构。电化学测试表明, 其面电容达 746.68 mF/cm², 循环 10000 次后电容保持率达 91.23%。

除引入生物质衍生碳或天然高分子构筑多级孔结构外, 研究人员还借鉴天然生物组织的结构特征, 通过仿生设计直接构建具有分级孔道的 MXene 基材料, 进一步优化离子传输行为。如

Zhang 等人^[61]受竹子中空结构启发,采用冷冻干燥技术,制备了具有中空腔体与多孔壁层的MXene气凝胶纤维。该纤维壁层富含介孔与大孔,形成蜂窝状多级孔网络,比表面积达 $9.24 \text{ m}^2/\text{g}$,远高于致密纤维。这种“中空+多孔”的协同结构使电解质离子可从内外双壁同时进入,显著缩短离子传输路径,降低扩散阻抗。电化学测试表明,该纤维电

极在 1 A/g 电流密度下比电容高达 355 F/g ,循环15000次后保持率达87%,充分验证了多级孔结构在提升电荷存储动力学方面的关键作用。此外,孔结构参数(如孔径分布、孔容及比表面积)对电化学性能具有重要影响。因此,通过调控活化条件及模板结构,实现对多级孔结构的精准构筑,是当前研究的重要方向。

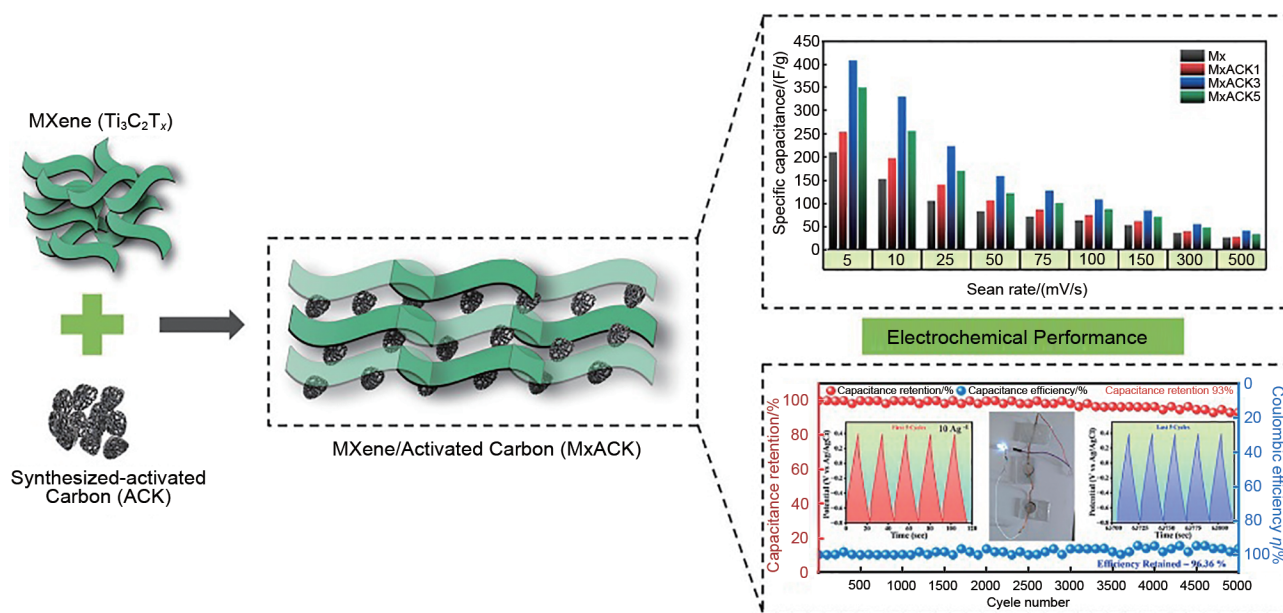


图7 MxACK复合材料的合成及其电化学性能^[59]

Fig. 7 Synthesis and electrochemical performance of MxACK^[59]

3.3 导电网络构建与电子传输机制

在电化学储能过程中,电子传输速率直接影响材料的倍率性能与能量利用效率。MXene因其金属级导电性,在复合体系中通常作为主要导电骨架。生物质碳材料并非简单作为导电填料,而是在MXene片层之间构筑电子桥梁,通过减少片层接触电阻和延长电子传输路径,形成连续三维电子网络。其中纤维素纳米纤维、细菌纤维素等一维生物质材料能够连接相邻MXene片层,形成连续电子传输路径,同时抑制片层重堆叠;生物质炭凭借较高的导电性和多孔骨架,可与MXene共同构建三维导电网络,提高整体电子传输效率;壳聚糖、木质素等天然高分子则主要通过增强界面结合改善导电网络的稳定性。不同生物质组分在导电网络构建中的功能存在差异,因此应根据材料特性和应用需求进行合理选择^[62]。

Yu 等人^[63]首次将活性炭(AC)颗粒封装于

MXene片层之间制备AC/MXene复合材料,如图9所示。MXene同时充当导电骨架、柔性基体与活性材料,AC颗粒增大MXene层间距,二者协同构建三维导电网络。该复合电极比表面积高达 $2786 \text{ m}^2/\text{g}$,在有机电解液中电导率为 $29\sim 166 \text{ S/cm}$,在 0.1 A/g 电流密度下比电容为 126 F/g , 100 A/g 超高电流密度下保持率仍达57.9%,循环10万次后电容保持率92.4%。

Wang 等人^[64]以细菌纤维素(BC)为骨架,与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene复合构建了三维多孔自支撑导电网络。在 3 mA/cm^2 电流密度下质量比电容为 416 F/g ,面积比电容为 2084 mF/cm^2 ,经10000次充放电循环后电容保持率仍达96.5%。MXene凭借优异的本征导电性形成主要电子传输通路,而BC纳米纤维则作为柔性支撑和导电桥梁,有效抑制MXene片层重堆叠并促进电子在片层间快速传输。同时形成的蜂窝状多孔结构有利于电解液渗透和离子扩

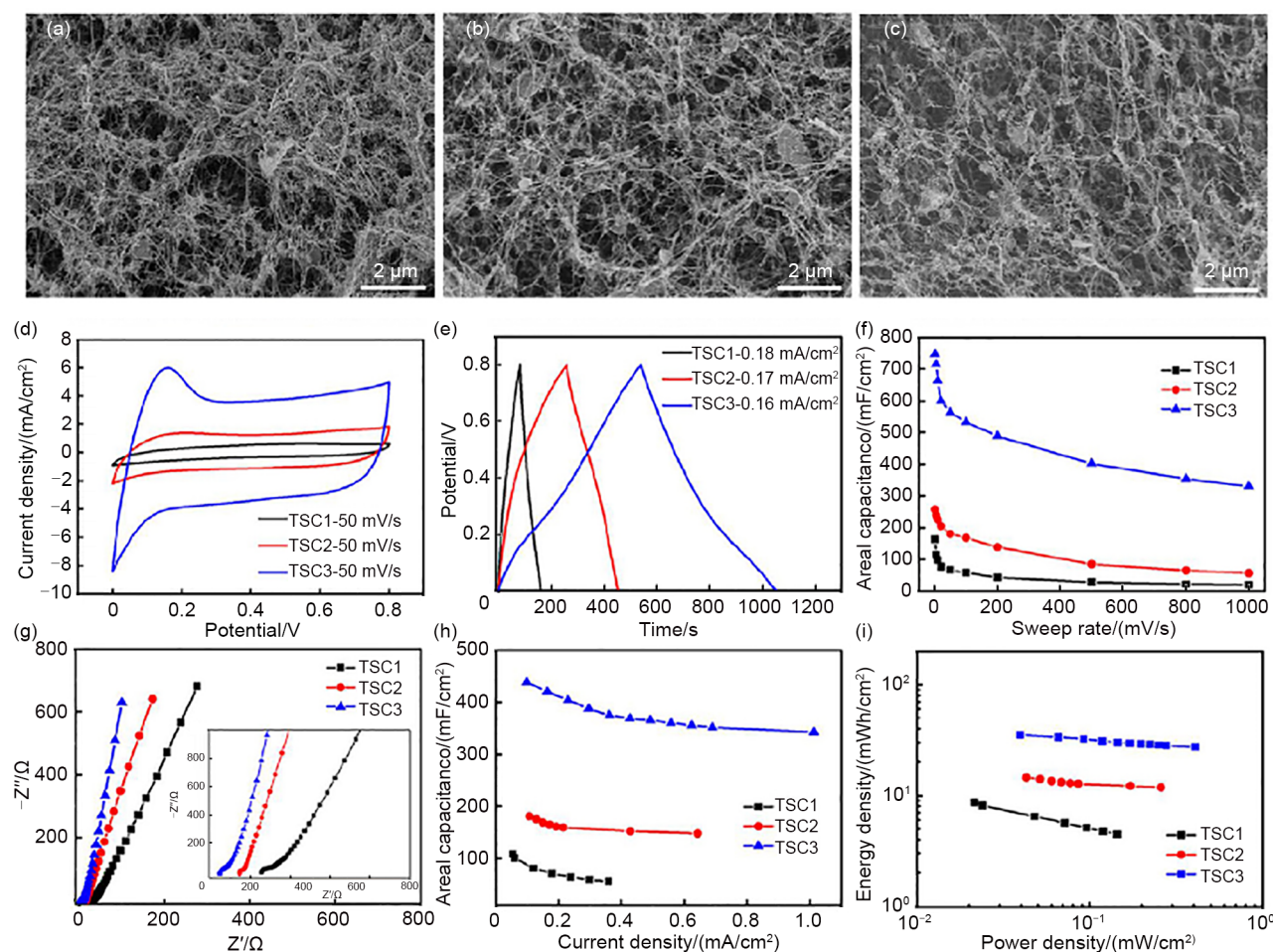


图8 不同杂化气凝胶的SEM图像: (a) TSC1; (b) TSC2; (c) TSC3及电化学性能对比: 三种气凝胶薄膜电极的CV (d) 和 (e) GCD; (f) 不同扫描速率下面积比容量; (g) EIS的比较; (h) 不同电流密度下的面积比容量; (i) 三种气凝胶电极的面积能量密度和面积功率密度^[60]

Fig. 8 SEM images of different hybrid aerogels: (a) TSC1; (b) TSC2; (c) TSC3, and comparison of electrochemical performance: (d) CV; (e) GCD; (f) areal specific capacity at various scan rates; (g) EIS of the three aerogel film electrodes; (h) areal specific capacitance at different current densities; (i) areal energy density and areal power density of the three aerogel electrodes^[60]

散,从而协同降低电极内阻和电荷转移阻抗,如图10所示(R_{ct} 仅为0.8~0.9 Ω)。表明MXene与生物质碳构建的多维导电网络在提升电子传输效率、优化电极倍率性能与循环稳定性方面具有显著的优势。

3.4 力学性能与结构稳定性调控机制

除离子传输、电子传导及电荷存储过程外,电极材料的力学性能与结构稳定性也是影响超级电容器实际应用的重要因素。特别是在柔性储能器件的长期循环过程中,电极不仅需要保持较高的电化学活性,还需具备良好的机械强度和形变适应能力,以维持稳定的结构完整性。生物质材料,尤其是纳米纤维素,具有高强度与良好柔韧性,可在复合体

系中构建支撑网络。该网络结构可在外力作用或电化学循环过程中分散应力,防止MXene片层发生局部塌陷或断裂。此外,在充放电过程中,电极材料通常会经历体积膨胀与收缩,而柔性网络可作为缓冲层,降低结构损伤。引入适量生物质组分后,复合材料的抗拉强度与断裂伸长率均显著提升,同时循环稳定性可得到提高^[65]。

Song等人^[66]将 $Ti_3C_2T_x$ MXene、纤维素纳米纤维(CNF)与天然纤维基活性碳纤维(CF)复合得到柔性对称超级电容器(FSC),如图11所示。FSC可承受180°反复弯曲,展现出优异的柔韧性和结构稳定性,比电容高达420.99 F/g,循环10000次后保持率达87.2%。合理构筑柔性支撑网

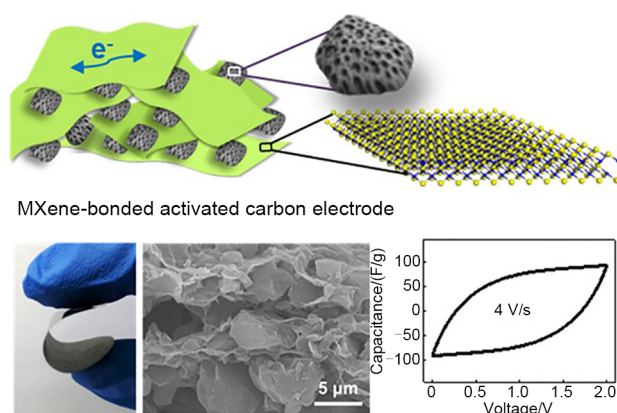


图9 MXene黏合AC薄膜的构造示意图及电化学性能^[63]
Fig. 9 Schematic diagram of the construction and electrochemical performance of MXene-bonded AC film^[63]

络能够在维持优异电化学性能的同时显著增强结构

稳定性,为MXene/生物质复合电极的协同优化提供了重要设计思路。

除了提升柔性器件的形变适应能力外,生物质组分还能够显著增强复合电极的本征力学性能。Bi等人^[67]采用真空抽滤法,将纤维素纳米纤维(CNF)与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene复合,制备了柔性自支撑MCNF复合薄膜。CNF通过氢键与MXene片层紧密结合,构建了仿珍珠层的“砖-泥”结构,显著提升了薄膜的力学性能:当CNF含量为16%时,复合薄膜的拉伸强度由纯MXene的5.5 MPa提升至30.6 MPa,提高了5.6倍,同时断裂伸长率也显著改善。在电化学性能方面,该复合薄膜在5 mV/s扫速下比电容达246 F/g,与纯MXene (251 F/g)相比几乎未发生明显衰减,实现了力学性能与电化学性能的协同优化。

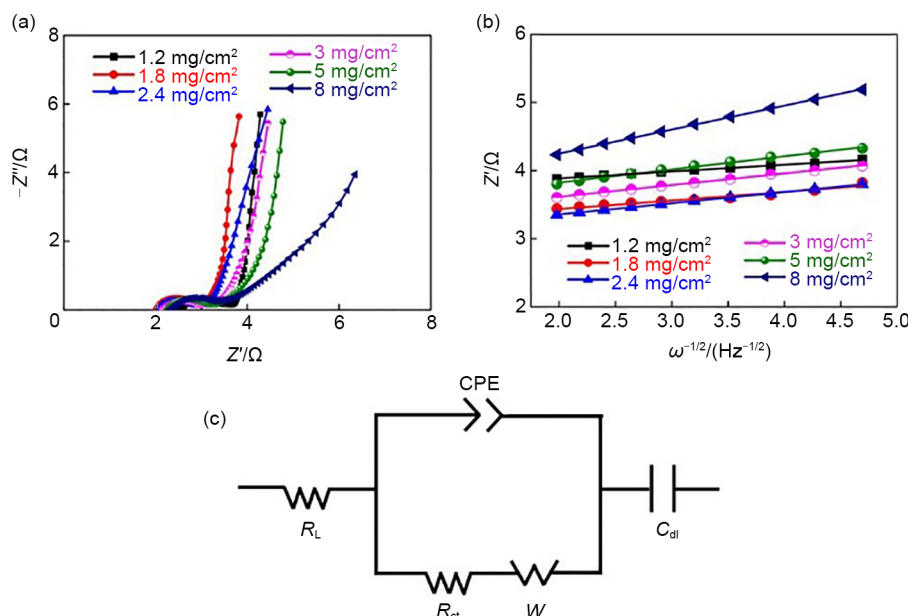


图10 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{BC}$ 复合材料的奈奎斯特阻抗图^[64]
Fig. 10 The Nyquist impedance diagram of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{BC}$ composite material^[64]

3.5 界面耦合机制与协同效应本质

MXene/生物质复合体系中的界面相互作用是实现性能提升的核心因素之一。MXene表面富含—OH、—O等极性基团,可与生物质材料中的羟基或氨基形成氢键或静电相互作用,从而实现稳定结合。从电子结构角度看,这种界面耦合作用会引起界面区域电子云重新分布,导致局部电子结构和表面电荷密度发生变化,从而影响材料的电荷转移行为和电化学反应活性^[68]。此外,界面处的紧密接

触还可降低电荷转移阻抗,提高反应动力学。更重要的是,复合体系中不同结构单元之间存在明显的协同效应。如多孔结构提升离子扩散效率、MXene提高电子传输速率、界面耦合优化电荷转移路径,三者协同作用使整体性能远优于单一组分材料。这种协同效应是MXene/生物质复合材料性能提升的本质原因。

Yang等人^[69]采用水热辅助真空抽滤法,以木质素磺酸钠为诱导剂,构建了木质素/MXene/氧化石

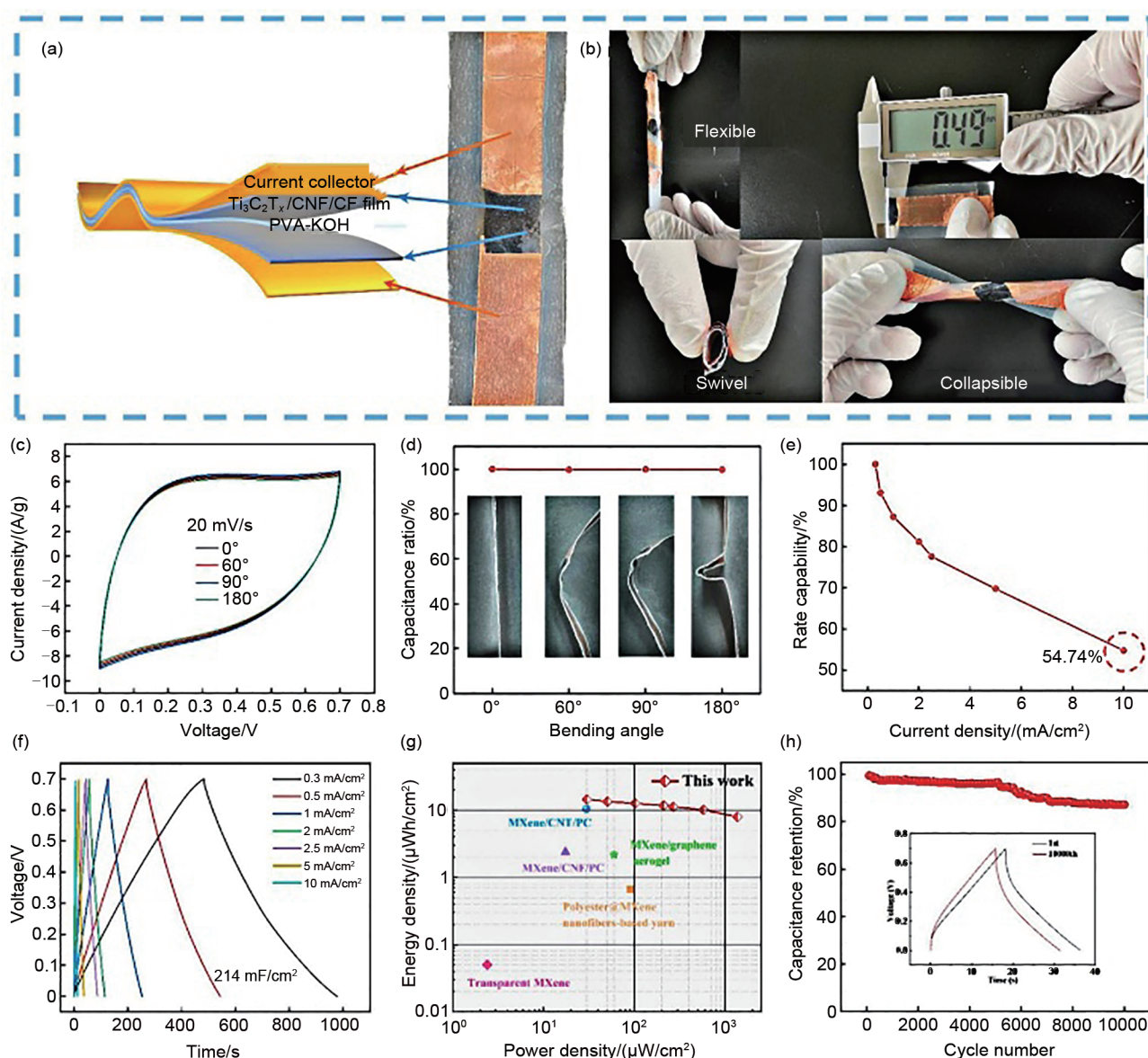


图 11 柔性对称超级电容器 FSC 的制备及电化学性能: (a) 制备机理图; (b) 柔性、可旋转性、可折叠性和 0.49 毫米的超薄厚度; (c)~(d) 不同弯曲角度下的 CV 曲线; (e) 电容保持曲线; (f) 不同电流密度下的 GCD 曲线; (g) Ragone 图; (h) 循环稳定性曲线^[66]

Fig. 11 Preparation and electrochemical performance of a flexible symmetric supercapacitor (FSC): (a) Preparation mechanism diagram; (b) Flexibility, rotatability, foldability, and an ultra-thin thickness of 0.49 mm; (c)~(d) CV curves at different bending angles; (e) Capacitance retention curve; (f) GCD curves at different current densities; (g) Ragone plot; (h) Cyclic stability curve^[66]

墨烯三维多孔复合电极 (LGM₂-2-80)。在 0.5 A/g 电流密度下比电容达 281 F/g, 5000 次循环后电容保持率高达 149%, 展现出优异的界面稳定性和协同增效作用。XPS 结果表明, 木质素与 MXene 之间形成氢键和静电作用, 诱导 Ti 价态及表面官能团重构, 构筑了稳定的界面耦合结构。该研究表明界面耦合是实现结构-性能协同增强的本质所在。

除了通过化学键合作用增强界面稳定性外, 改

善界面润湿性也是促进界面耦合的重要途径。Fan 等人^[70]以枣核壳为碳源制备多孔碳 (AJSPC), 通过湿法复合将 Ti₃C₂T_x MXene 生长于碳骨架表面。复合材料在 0.5 A/g 电流密度下比电容达 156.1 F/g, 对称电容器能量密度为 8.4 Wh/kg。XPS 分析表明, 界面处形成了氢键等强相互作用, 实现了 MXene 在多孔碳表面的均匀锚定与稳定分布。

此外, 从传输通道协同设计的角度构建“电子/

离子双传输通道”，也是实现界面耦合与协同增效的重要策略。Wu 等人^[71]针对 MXene 电极中“层间距增大导致层间导电性下降”的问题，将一维导电核壳结构细菌纤维素@聚吡咯 (BC@PPy) 纤维均匀插入 MXene 片层之间，如图 12 所示。BC 纤维作为间隔层将层间距由 2.53 nm 扩大至 3.38 nm，为离子扩散提供充足通道；PPy 导电壳层则构建连续电子传输网络，补偿层间导电性损失；同时，BC@PPy

纤维作为界面锚定点增强了层间结合强度。由于电子与离子传输的协同优化以及稳定界面结构的构建，复合薄膜比电容达到 221.21 mF/cm²，为纯 MXene 薄膜的 255%，拉伸强度提高至 78.9 MPa，为纯 MXene 薄膜的 359%。该研究表明，界面耦合不仅来源于化学相互作用，还可通过结构设计实现电子传导、离子扩散与力学支撑的协同增强，从而显著提升电极的综合性能。

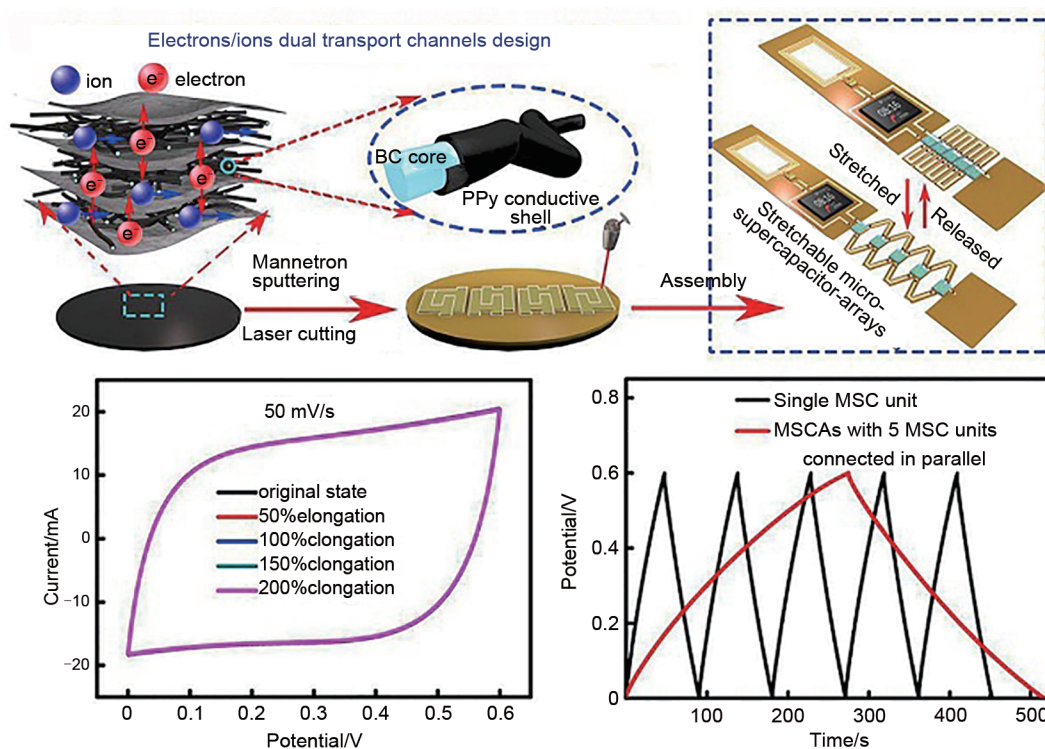


图 12 MXene/BC@PPy 制备流程及电化学性能^[71]

Fig. 12 Preparation process and electrochemical performance of MXene/BC@PPy^[71]

综上所述，近年来 MXene/生物质复合材料通过不同生物质组分和结构设计策略，实现了电化学性能的显著提升，不同 MXene 生物质复合材料的结构及电化学性能的对比如表 3 所示。不同生物质材料在复合体系中发挥着不同作用：纤维素、细菌纤维素等天然高分子主要作为柔性支撑和层间间隔剂，有效抑制 MXene 片层重堆叠，改善离子传输并增强力学性能；生物质衍生多孔碳则凭借高比表面积和丰富孔结构，提高活性位点利用率并构建高效电子/离子传输网络。多数复合材料均表现出较高的比电容、良好的倍率性能和优异的循环稳定性，其中部分体系在高倍率条件下仍能保持 60%~85% 的电容保持率，循环寿命可达

5000~10000 次，显示出良好的实际应用潜力。此外，由于 MXene 片层覆盖和复合组分填充效应，多数复合材料的比表面积呈现下降趋势，但合理的结构设计能够弥补比表面积降低带来的不利影响，实现电子传输、离子扩散与结构稳定性的协同优化，因此整体电化学性能仍得到显著提升。然而，不同复合策略仍存在各自局限，如层间结构无法精准调控、界面耦合强度及电子/离子传输协同性仍需进一步优化。因此，未来应结合多尺度结构设计、界面工程及绿色制备技术，实现 MXene/生物质复合材料结构与性能的协同优化，为高性能超级电容器电极材料的开发提供新的研究思路；应进一步加强电化学动力学分析，

结合 *b* 值分析、Dunn 模型以及原位表征技术，深入揭示 MXene/生物质复合材料中的电子传输、离子扩散及界面储能机制，为高性能复合电极的精准设计提供理论指导。

表 3 不同 MXene/生物质复合材料的结构及电化学性能的对比
Table 3 Comparison of structures and electrochemical properties of different MXene/biomass composites

生物质原料	复合材料	比表面积/(m ² /g)	层间距/nm	电解液	电压区间/V	比电容	倍率性能	循环稳定性	参考文献
杏鲍菇衍生 AC	Ti ₃ C ₂ T _x /rGO 水凝胶-活性炭	复合材料: 1174.4; 纯 AC: 2535.6	1.26	3 mol/L H ₂ SO ₄	-0.2~0.6	442 F/g (2 mV/s)	48.13% (2~200 mV/s)	88.1% (10000 次)	[39]
天然木材	Ti ₃ C ₂ T _x /抗坏血酸-柔性木材	34.5	1.48	2 mol/L H ₂ SO ₄	-0.2~0.4	1301 mF/cm ² (5 mA/cm ²)	75% (5~50 mA/cm ²)	93% (10000 次)	[43]
棉纤维	Ti ₃ C ₂ T _x /CF	386	1.34	6 mol/L KOH	-1~0	357 F/g	63.9% (0.5~100 A/g) (0.5 A/g)	99.8% (5000 次)	[45]
油棕纤维	Ti ₃ C ₂ T _x /纤维素纳米纤维(CNF)	78.13	1.50	1 mol/L H ₂ SO ₄	-0.2~0.4	84.6 F/g (1 mA/cm ²)	70% (1~20 mA/cm ²)	85% (5000 次)	[49]
纤维素纳米纤维	Ti ₃ C ₂ T _x /CNF	15.78	2.6	6 mol/L KOH	-1~0	44.54 F/cm ³ (5 mV/s)	—	97.87% (10000 次)	[52]
大蒜壳衍生 CNF	Ti ₃ C ₂ T _x /CNF	—	—	3 mol/L H ₂ SO ₄	-0.6~0.2	358 F/g (2 mV/s)	63% (2~1000 mV/s)	96% (2000 次)	[53]
橙皮生物质炭	Ti ₃ C ₂ T _x /橙皮生物质炭	2080.55	1.1	1 mol/L H ₂ SO ₄	-0.8~0.4	407 F/g (5 mV/s)	—	93.13% (5000 次)	[59]
BC	Ti ₃ C ₂ T _x /BC	—	—	3 mol/L H ₂ SO ₄	-0.65~0.3	416 F/g (3 mA/cm ²)	62% (3~50 mA/cm ²)	96.5% (10000 次)	[64]
天然纤维	Ti ₃ C ₂ T _x /CNF/CF	933.2	6.57 μm	1 mol/L H ₂ SO ₄	-0.6~0.2	420.99 F/g	84.56% (0.5~10 A/g)	91.2% (10000 次)	[66]
木质磺酸钠	TiVCT _x /氧化石墨烯(GO)/木质素磺酸钠	—	—	1 mol/L H ₂ SO ₄	0~1	281 F/g	48.7% (0.5~30 A/g)	149% (5000 次)	[69]
酸枣壳生物质炭	Ti ₃ C ₂ T _x /酸枣壳多孔碳	870.7	—	1 mol/L Na ₂ SO ₄	-1.0~0.8	156.1 F/g	—	75% (5000 次)	[70]

4 结论与展望

MXene/生物质复合材料通过将 MXene 优异的导电性能、丰富的表面活性位点与生物质材料可再生、多孔结构及良好力学性能等优势相结合，为高性能超级电容器电极材料的设计提供了新的思路。本文系统综述了 MXene 的制备工艺与改性方法，MXene/生物质复合材料的主要构筑策略及其对电化学性能的影响，重点分析了层间结构调控、多级孔结构设计、导电网络构建、力学性能增强及界面耦合等关键构效关系，阐明了其对电子传输、离子扩散和电荷存储行为的影响机制。研究表明，MXene/生物质复合材料性能提升的本质并非简单来源于组分叠加，而是源于生物质诱导的多尺度结构重构及界面耦合作用。通过调节层间结构实现离子快速迁移，通过构建多级孔网络提高活性位点利用率，通过形成连续导电电路降低电子传输阻抗，

并借助界面相互作用增强结构稳定性，最终实现电子传输、离子扩散和结构稳定性的协同优化，从而显著提升电极材料的储能性能。

尽管 MXene/生物质复合材料在超级电容器领域已取得显著进展，但面向实际应用仍面临诸多挑战。未来研究应重点关注以下几个方向：

(1) 加强界面热力学研究与多尺度结构设计的理论指导。当前 MXene/生物质复合材料的界面耦合机制研究多集中于静态化学键合与结构表征层面，而关于界面形成过程中的热力学驱动力、界面能演变规律、离子去溶剂化能垒及界面电荷转移活化能等关键热力学参数的定量研究仍十分匮乏，制约了对复合材料构效关系的深入理解与精准调控。未来应积极引入密度泛函理论 (DFT)、分子动力学 (MD) 模拟及蒙特卡洛 (MC) 模拟等理论计算手段，从原子尺度系统研究 MXene 表面终端基团与生物质组分之间的界面相互作用能、电子结构演

化及离子传输能垒,建立界面热力学参数与电化学性能之间的内在关联。通过理论预测指导实验设计,结合原位/非原位表征技术验证计算结果,揭示界面结构-电荷转移行为-储能性能之间的构效关系,为高性能MXene/生物质复合电极材料的理性设计与可控构筑提供理论依据。

(2) 加强界面调控与多尺度结构设计。生物质材料种类丰富,不同前驱体具有差异显著的组成、微观形貌及孔隙结构,其与MXene的界面相容性及复合行为存在较大差异。同时,不同复合方法(如水热组装、静电自组装和真空辅助过滤等)对生物质原始结构的保留程度及MXene片层的分散状态影响不同,甚至可能破坏生物质原有的优势结构。因此,在复合过程中,应系统研究生物质组分与MXene之间的界面化学匹配、层间堆叠行为以及多尺度结构的构筑与演化规律。未来应重点围绕界面化学调控、多级孔道构筑、异质原子协同掺杂及三维导电网络设计等方面开展研究,深入揭示界面化学键合、电子结构调控、离子扩散行为及应力传递机制之间的内在联系,建立结构-界面-性能构效关系,实现电子/离子双传输通道的协同优化,为高性能MXene/生物质复合电极材料的理性设计提供理论指导,并进一步提升其比电容、倍率性能及循环稳定性。

(3) 推动复合材料的器件化集成与应用拓展。当前MXene/生物质复合材料的研究主要集中于材料制备及三电极体系下的电化学性能表征,而面向实际储能器件的研究仍相对不足。针对柔性全固态超级电容器、微型超级电容器及可穿戴储能器件等应用场景,复合材料在宽温域适应性及高负载条件下的电化学行为等方面仍缺乏系统研究,制约了其由实验室基础研究向实际应用的转化。未来应加强复合材料在实际器件中的集成验证,采用两电极体系开展性能评价,结合面积/体积比电容、能量密度、功率密度、循环寿命及环境稳定性等关键指标,系统评估其在复杂工况下的综合性能,并建立面向不同应用场景的标准化性能评价体系,推动MXene/生物质复合材料在柔性电子、智能穿戴及微型储能系统等领域的实际应用。

(4) 推进绿色制备工艺开发与规模化应用。当前MXene的制备仍主要依赖含氟体系刻蚀,存在环境污染、安全风险高及产率较低等问题,不仅限

制了MXene材料的绿色规模化制备,也制约了MXene/生物质复合材料的低成本产业化发展。同时,复合材料在制备工艺稳定性、批次一致性及标准化性能评价体系等方面仍存在明显不足,阻碍了其由实验室研究向产业化应用的转化。未来应进一步发展无氟刻蚀、电化学刻蚀及熔盐刻蚀等绿色制备技术,实现MXene表面官能团、层间距及缺陷结构的精准调控;同时兼顾原料来源、制备成本及能耗等经济因素,建立完善的结构-性能标准化评价体系,实现高性能MXene/生物质复合电极材料的绿色、低成本和规模化制备。随着界面调控机制、多尺度结构设计、绿色制备技术及器件集成策略的不断完善,MXene/生物质复合材料有望突破现有性能与应用瓶颈,在高性能、绿色化及智能化电化学储能领域展现广阔的应用前景。

综上,MXene/生物质复合材料在绿色、高效、可持续储能领域展现出巨大的发展潜力。随着对构效关系认识的不断深入、制备技术的持续创新以及器件集成水平的提升,该类材料有望在下一代高性能、柔性、环境友好型储能系统中发挥关键作用。

参考文献

- [1] NOVAS N, ALCAYDE A, ROBALO I, et al. Energies and its worldwide research[J]. Energies, 2020, 13(24): 6700. DOI: 10.3390/en13246700.
- [2] OLABI A G. Renewable energy and energy storage systems[J]. Energy, 2017, 136: 1-6. DOI:10.1016/j.energy.2017.07.054.
- [3] JALAL N I, IBRAHIM R I, OUDAH M K. A review on Supercapacitors: Types and components[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973(1): 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012015.
- [4] KUMAR N, LEE S Y, PARK S J. Bridging EDLC and pseudocapacitive mechanisms through materials design: Recent advances in supercapacitor electrodes[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2026, 41: 101251. DOI: 10.1016/j.cossms.2025.101251.
- [5] SAHANI S, MAHAJAN H, HAN S S. Unveiling the hybrid era: Advancement in electrode materials for the high-performance supercapacitor: A comprehensive review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 90: 111808. DOI:10.1016/j.est.2024.111808.
- [6] JYOTHIBASU J P, WANG R H, TIEN Y C, et al. Lignin-derived quinone redox moieties for bio-based supercapacitors[J]. Polymers, 2022, 14(15): 3106. DOI:10.3390/polym14153106.
- [7] 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. DOI: 10.1002/adma.201102306.

- [8] ZHANG X, ZHANG Z H, ZHOU Z. MXene-based materials for electrochemical energy storage[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2018, 27(1): 73-85. DOI:10.1016/j.jechem.2017.08.004.
- [9] XU B, GOGOTSI Y. MXenes: From discovery to applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(47): 2007011. DOI: 10.1002/adfm.202007011.
- [10] CHAUDHURI H, YUN Y S. A critical review on the properties and energy storage applications of graphene oxide/layered double hydroxides and graphene oxide/MXenes[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 564: 232870. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2023. 232870.
- [11] BEHZADI POUR G, FEKRI AVAL L. Recent advances in supercapacitors based on MXene surface modification: A review of symmetric and asymmetric electrodes material[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24: 103045. DOI: 10.1016/j.rineng. 2024. 103045.
- [12] SHAKER M, GHAZVINI A A S, CAO W Q, et al. Biomass-derived porous carbons as supercapacitor electrodes-A review[J]. *New Carbon Materials*, 2021, 36(3): 546-572. DOI: 10.1016/S1872-5805(21)60038-0.
- [13] LIU J J, KULI Z, TOSHTAY K, et al. Biomass-derived activated carbon/MXene composites as supercapacitor electrodes[J]. *Electrochemistry Communications*, 2026, 188: 108166. DOI: 10.1016/j.elecom.2026.108166.
- [14] VERGER L, NATU V, CAREY M, et al. MXenes: An introduction of their synthesis, select properties, and applications[J]. *Trends in Chemistry*, 2019, 1(7): 656-669. DOI: 10.1016/j.trechm. 2019. 04.006.
- [15] KURRA N, AHMED B, GOGOTSI Y, et al. MXene-on-paper coplanar microsupercapacitors[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(24): 1601372. DOI:10.1002/aenm.201601372.
- [16] ANASORI B, LUKATSKAYA M R, GOGOTSI Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2: 16098. DOI: 10.1038/natrevmats. 2016.98.
- [17] GARG R, AGARWAL A, AGARWAL M. A review on MXene for energy storage application: Effect of interlayer distance[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(2): 022001. DOI: 10.1088/2053-1591/ab750d.
- [18] LI Z Y, WANG L B, SUN D D, et al. Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti_3C_2 [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2015, 191: 33-40. DOI: 10.1016/j.mseb.2014.10.009.
- [19] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, et al. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene) [M]/MXenes. New York: Jenny Stanford Publishing, 2023: 415-449. DOI:10.1201/9781003306511-21.
- [20] GUO Y T, JIN S, WANG L B, et al. Rapid preparation of Mo_2CT_x MXene by hydrothermal etching in ammonium hydrogen fluoride solution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 998: 175009. DOI:10.1016/j.jallcom.2024.175009.
- [21] WANG K, ZHOU Y F, XU W T, et al. Fabrication and thermal stability of two-dimensional carbide Ti_3C_2 nanosheets[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(7): 8419-8424. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.02.059.
- [22] SUN M M, YE W, ZHANG J Y, et al. Structure, properties, and preparation of MXene and the application of its composites in supercapacitors[J]. *Inorganics*, 2024, 12(4): 112. DOI: 10.3390/inorganics12040112.
- [23] PENG M J, CUI Z J, PENG W C, et al. Advances in fluorine-free MXene for electrochemical energy storage[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2026, 271: 287-306. DOI: 10.1016/j.jmst.2026.02.019.
- [24] NAGUIB M, MASHTALIR O, CARLE J, et al. Two-dimensional transition metal carbides[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1322-1331. DOI:10.1021/nn204153h.
- [25] LIU L Y, ZSCHIESCHE H, ANTONIETTI M, et al. *In situ* synthesis of MXene with tunable morphology by electrochemical etching of MAX phase prepared in molten salt[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(7): 2203805. DOI:10.1002/aenm.202203805.
- [26] LUKATSKAYA M R, HALIM J, DYATKIN B, et al. Room-temperature carbide-derived carbon synthesis by electrochemical etching of MAX phases[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(19): 4877-4880. DOI:10.1002/anie.201402513.
- [27] ZUO X X, CHANG K, ZHAO J, et al. Bubble-template-assisted synthesis of hollow fullerene-like MoS_2 nanocages as a lithium ion battery anode material[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(1): 51-58. DOI:10.1039/c5ta06869j.
- [28] CHAN K C, GUAN X, ZHANG T, et al. The fabrication of Ti_3C_2 and Ti_3CN MXenes by electrochemical etching[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(37): 25165-25175. DOI:10.1039/d4ta03457k.
- [29] SHEN M, JIANG W Y, LIANG K, et al. One-pot green process to synthesize MXene with controllable surface terminations using molten salts[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(52): 27013-27018. DOI:10.1002/anie.202110640.
- [30] LIU L Y, 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[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(1): 111-118. DOI:10.1021/acsnano.1c08498.
- [31] 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[J]. *iScience*, 2021, 24 (12): 103403. DOI:10.1016/j.isci.2021.103403.
- [32] LI Y B, SHAO H, LIN Z F, et al. A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(8): 894-899. DOI:10.1038/s41563-020-0657-0.
- [33] ZHANG T, PAN L M, TANG H, et al. Synthesis of two-dimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene using $\text{HCl}+\text{LiF}$ etchant: Enhanced exfoliation and delamination[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 818-826. DOI:10.1016/j.jallcom.2016.10.127.
- [34] CUI C, HU M M, ZHANG C, et al. High-capacitance $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene obtained by etching submicron Ti_3AlC_2 grains grown in molten salt[J]. *Chemical Communications*, 2018, 54(58): 8132-8135. DOI:10.1039/c8cc04350g.

- [35] LI T F, YAO L L, LIU Q L, et al. Fluorine-free synthesis of high-purity $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ($\text{T}=\text{OH}, \text{O}$) via alkali treatment[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(21): 6115-6119. DOI: 10.1002/anie.201800887.
- [36] XU S K, WEI G D, LI J Z, et al. Binder-free $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene electrode film for supercapacitor produced by electrophoretic deposition method[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 1026-1036. DOI:10.1016/j.cej.2017.02.144.
- [37] XIU L Y, WANG Z Y, QIU J S. General synthesis of MXene by green etching chemistry of fluoride-free Lewis acidic melts[J]. *Rare Metals*, 2020, 39(11): 1237-1238. DOI:10.1007/s12598-020-01488-0.
- [38] KARMUR R S, GOGOI D, DAS M R, et al. High-performance flexible supercapacitor device composed of a hierarchical 2-D MXene- $\text{Ni}(\text{OH})_2$ nanocomposite and biomass-derived porous carbon electrodes[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(15): 8488-8499. DOI:10.1021/acs.energyfuels.2c01699.
- [39] SUN Y, YUAN Y D, GENG X W, et al. Biochar-derived material decorated by MXene/reduced graphene oxide using one-step hydrothermal treatment as high-performance supercapacitor electrodes[J]. *Carbon*, 2022, 199: 224-232. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.07.058.
- [40] CUI Y H, SHI Q S, LIU Z, et al. MXene/biomass/chitosan carbon aerogel (MBC) with shared cathode and anode for the construction of high-efficiency asymmetric supercapacitor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 472: 144701. DOI:10.1016/j.cej.2023.144701.
- [41] LUO Y J, QUE W X, TANG Y, et al. Regulating functional groups enhances the performance of flexible microporous MXene/bacterial cellulose electrodes in supercapacitors[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(18): 11675-11687. DOI:10.1021/acsnano.3c11547.
- [42] YUAN T, ZHANG Z, LIU Q, et al. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/cellulose nanofiber/polyaniline film as a highly conductive and flexible electrode material for supercapacitors[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 304: 120519. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.120519.
- [43] ZHU S L, CHEN M Z, WANG S W, et al. 3D oxidation-resistant MXene electrode supported by softened wood toward high-performance flexible supercapacitors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 153739. DOI:10.1016/j.cej.2024.153739.
- [44] LIANG Q D, WANG Y X, YANG Y F, et al. Nanocellulose/two dimensional nanomaterials composites for advanced supercapacitor electrodes[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 1024453. DOI:10.3389/fbioe.2022.1024453.
- [45] SUN L, FU Q, PAN C X. Hierarchical porous "skin/skeleton"-like MXene/biomass derived carbon fibers heterostructure for self-supporting, flexible all solid-state supercapacitors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 410: 124565. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.124565.
- [46] WENG M C, ZHOU J H, YE Y J, et al. Self-chargeable supercapacitor made with MXene-bacterial cellulose nanofiber composite for wearable devices[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 647: 277-286. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.05.162.
- [47] ZHU G Y, HOU Y N, LU J Q, et al. MXene decorated 3D-printed carbon black-based electrodes for solid-state micro-supercapacitors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(46): 25422-25428. DOI:10.1039/d3ta04573k.
- [48] MAPPOLI S, GHOSH K, PUMERA M. MXene and polyaniline coated 3D-printed carbon electrode for asymmetric supercapacitor[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2361139. DOI:10.1080/17452759.2024.2361139.
- [49] ZHOU G Q, LI M C, LIU C Z, et al. 3D printed $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/cellulose nanofiber architectures for solid-state supercapacitors: Ink rheology, 3D printability, and electrochemical performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(14): 2109593. DOI: 10.1002/adfm.202109593.
- [50] CAI Y Q, CHEN X G, XU Y, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/carbon composites for advanced supercapacitors: Synthesis, progress, and perspectives[J]. *Carbon Energy*, 2024, 6(2): e501. DOI: 10.1002/cey2.501.
- [51] HADLER-JACOBSEN J, FAGERLI F H, KALAND H, et al. Stacking sequence, interlayer bonding, termination group stability and Li/Na/Mg diffusion in MXenes[J]. *ACS Materials Letters*, 2021, 3(9): 1369-1376. DOI:10.1021/acsmaterialslett.1c00316.
- [52] ZHOU Y Z, TENG Y C, LIU H C, et al. Flexible MXene-cellulose nanofiber based all-solid-state supercapacitors with high volumetric capacitance[J]. *Nanoscale Horizons*, 2025, 10(12): 3357-3368. DOI:10.1039/d5nh00285k.
- [53] DUTTA P, DEB S K, PATRA A, et al. Activating ion channels in collapsed hydrogel derived densified MXene films with cellulose nanofibers to overcome the areal versus volumetric capacitance trade-off[J]. *Small*, 2024, 20(35): 2400119. DOI: 10.1002/sml.202400119.
- [54] DU J, et al. Prefilled and concerted ion transport mechanism in hierarchical porous carbons for ultra-fast energy storage[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(24): 22217-22227. DOI: 10.1021/acsnano.5c03712.
- [55] YANG H, YE S W, ZHOU J M, et al. Biomass-derived porous carbon materials for supercapacitor[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2019, 7: 274. DOI:10.3389/fchem.2019.00274.
- [56] LIANG K, CHEN Y L, WANG D, et al. Post-modified biomass derived carbon materials for energy storage supercapacitors: A review[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2023, 7(15): 3541-3559. DOI:10.1039/d3se00697b.
- [57] HOU J Z, MAO X Y, WANG J Y, et al. Preparation of rice husk-derived porous hard carbon: A self-template method for biomass anode material used for high-performance lithium-ion battery[J]. *Chemical Physics*, 2021, 551: 111352. DOI:10.1016/j.chemphys.2021.111352.
- [58] QIU L M, GUO R R, MA X J, et al. Fabrication of hierarchical porous biomass-based carbon aerogels from liquefied wood for supercapacitor applications[J]. *Wood Science and Technology*, 2024, 58(1): 233-251. DOI:10.1007/s00226-023-01515-0.

- [59] SINHA R, KIRAN P S, KUMAR K V, et al. MXene/biomass-derived activated carbon composite for supercapacitor applications[J]. Carbon, 2025, 236: 120101. DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120101.
- [60] LYU S Y, CHANG H J, ZHANG L F, et al. High specific surface area MXene/SWCNT/cellulose nanofiber aerogel film as an electrode for flexible supercapacitors[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 264: 110888. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110888.
- [61] ZHANG W H, REN S Y, ZHANG Y Z, et al. Bamboo-inspired hierarchically hollow aerogel MXene fibers with ultrafast ionic channels and multiple electromagnetic wave attenuation routes toward high-performance supercapacitors and microwave absorption[J]. Small, 2025, 21(10): 2412272. DOI: 10.1002/smll.202412272.
- [62] INGOLE R S, KADAM S L, KIM K, et al. MXene-supported vanadium sulfide composites reinforced by tailored carbon nanotube networks for high-performance supercapattery[J]. Small, 2025, 21(45): e07971. DOI:10.1002/smll.202507971.
- [63] YU L Y, HU L F, ANASORI B, et al. MXene-bonded activated carbon as a flexible electrode for high-performance supercapacitors[J]. ACS Energy Letters, 2018, 3(7): 1597-1603. DOI:10.1021/acsenergylett.8b00718.
- [64] WANG Y M, WANG X, LI X L, et al. Engineering 3D ion transport channels for flexible MXene films with superior capacitive performance[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(14): 1900326. DOI:10.1002/adfm.201900326.
- [65] TIAN W Q, VAHIDMOHAMMADI A, REID M S, et al. Multifunctional nanocomposites with high strength and capacitance using 2D MXene and 1D nanocellulose[J]. Advanced Materials, 2019, 31(41): 1902977. DOI: 10.1002/adma.201902977.
- [66] SONG C F, LONG Y Y, WAN M H, et al. Flexible composite films constructed of MXene/cellulose nanofibers/natural fiber-based activated carbon fibers for high-performance flexible supercapacitors[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 309: 142838. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142838.
- [67] BI X Y, LI M C, ZHOU G Q, et al. High-performance flexible all-solid-state asymmetric supercapacitors based on binder-free MXene/cellulose nanofiber anode and carbon cloth/polyaniline cathode[J]. Nano Research, 2023, 16(5): 7696-7709. DOI: 10.1007/s12274-023-5586-1.
- [68] ZHANG H N, HAO C, FU T T, et al. Gradient-layered MXene/hollow lignin nanospheres architecture design for flexible and stretchable supercapacitors[J]. Nano-Micro Letters, 2024, 17(1): 43. DOI:10.1007/s40820-024-01512-3.
- [69] YANG L Z, HENG Y Q, SUN J P, et al. A cleaner lignin-induced 3D porous MXenes hybrid electrode with enlarged voltage and high capacitance retention[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141964. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.141964.
- [70] FAN Q W, SONG C Y, ZHANG Y C, et al. Biomass-based porous carbon with surface grown MXenes for high-performance electromagnetic absorption and supercapacitor validated from structural and charge changes[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(44): 17045-17065. DOI:10.1007/s10853-023-09057-3.
- [71] WU Y D, HU H B, YUAN C Z, et al. Electrons/ions dual transport channels design: Concurrently tuning interlayer conductivity and space within re-stacked few-layered MXenes film electrodes for high-areal-capacitance stretchable micro-supercapacitor-arrays [J]. Nano Energy, 2020, 74: 104812. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104812.