

Ti₃C₂ MXene 柔性应力/应变传感器的制备及应用研究进展

袁文凤, 王军凯, 夏启勋, 周爱国

(河南理工大学材料科学与工程学院, 河南省深地材料科学与技术重点实验室, 河南 焦作 454003)

摘 要: 碳化钛迈科烯(Ti₃C₂ MXene)是一种新型碳化物二维材料, 具有手风琴的片层结构, 受到拉伸或压缩会产生滑动或堆叠, 使其内部导电路径和长度发生改变, 直接影响输出电信号的变化。因此, Ti₃C₂ MXene 可以作为传感材料, 检测应力/应变。与弹性基底复合, 该材料可以制备柔性传感器, 检测人体的运动与健康信号。本综述阐述了 Ti₃C₂ MXene 作为应力/应变传感器的工作原理; 归纳了近期 Ti₃C₂ MXene 柔性传感器的制备方法并分为 6 类: 静电纺丝法、过滤法/涂层法、浸渍法、丝网印刷法、冷冻干燥法、冷冻解冻法; 对比讨论了这 6 种制备方法的关键指标: 弹性基底、测量参数、最低测试极限、循环次数、测量范围、反应时间和应变灵敏度因数; 列举了该传感器的常见应用场景。展望了 Ti₃C₂ MXene 柔性传感器良好的发展前景, 总结了当前亟待解决的问题。

关键词: 二维材料; 迈科烯; 复合材料; 应力/应变; 柔性传感器

中图分类号: TB34 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)05-1447-08

网络出版时间: 2022-04-01



Research Progress on Preparation and Application of Flexible Stress/Strain Sensors Based on Two-Dimensional Ti₃C₂ MXene

YUAN Wenfeng, WANG Junkai, XIA Qixun, ZHOU Aiguo

(Henan Key Laboratory of Materials on Deep-Earth Engineering, School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: Ti₃C₂ MXene is a novel two-dimensional carbide with an accordion-like lamellar structure. The flakes of Ti₃C₂ MXene can slide or stack under tension or compression, which can change the number and length of internal conductive paths and directly affect the output electrical signals. Thus, Ti₃C₂ MXene can be used as sensing materials to measure the change of stress/strain. Combined with the elastic substrates, this material is used to make flexible sensors to monitor the motions and health signals of human-beings. This paper described the working principle of flexible stress/strain sensors made by Ti₃C₂ MXene composites. Recent methods to prepare the sensors were reviewed, *i.e.*, electrospinning, filtration/coating, impregnation, screen printing, freeze drying, and freeze thawing. The key factors of the methods, *i.e.*, flexible substrate, sensing parameters, sensor structure, detection limit, cycle times, sensing range, responsive time and gauge factor, were represented. Some applications of the MXene-based sensors were discussed. Finally, the promising development of Ti₃C₂ MXene flexible sensors was outlooked and the problems to be solved were summarized.

Keywords: two dimensional materials; MXene; composites; stress/strain; flexible sensor

近年来, 柔性应力/应变传感器发展迅猛, 是可穿戴设备实现柔性化的基础^[1-2]。柔性应力/应变传感器不仅具有出色的传感特性, 而且有轻质、可伸缩、可弯曲、柔韧性好等特征^[3-4], 可以用于制备可穿戴的健康监测设备^[5], 监测人体的脉搏、心跳、

呼吸等生理信号^[6-7]; 也可以制成电子皮肤^[8-9], 附着在规则或不规则物体表面, 模拟感知人的触觉。

柔性应力/应变传感器由传感材料和弹性基底组成^[10]。传感材料通过感知外界刺激, 将应力/应变转化为电信号。常见的传感材料有导电纳米颗粒

收稿日期: 2021-05-13。 修订日期: 2021-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金(51772077); 河南省高校科技创新团队(19IRTSTHN027); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(212102210157)。

第一作者: 袁文凤(1983—), 女, 博士研究生。

通信作者: 周爱国(1975—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2021-05-13. Revised date: 2021-07-09.

First author: YUAN Wenfeng (1983—), female, Doctoral candidate.

E-mail: ywf3507@163.com

Correspondent author: ZHOU Aiguo (1975—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhouag@hpu.edu.cn

(炭黑颗粒、银颗粒等)^[11]、纳米纤维(碳纳米管、银纳米线等)^[12–14]、纳米薄片(石墨烯等)^[15–16]。为了获得高性能的柔性传感器,研究者仍在寻找新型传感材料。

2011 年,研究者发现一种新型的类石墨烯二维材料,迈科烯(MXene)。它的统一化学表达式为 $M_{n+1}X_n$ ($n=1, 2, 3, \dots$), 式中 M 为早期过渡金属, X 为碳或碳氮化合物^[17–19]。MXene 是通过刻蚀层状陶瓷 MAX 相(A 代表主族元素), 移除 A 元素而得到^[20–21]。Ti₃C₂ 是第 1 个被制备出来、技术成熟并且性能稳定的 MXene。本综述提到的 MXene 均为 Ti₃C₂ MXene。MXene 表面带有大量的—OH、—O、—F 等官能团, 易与弹性材料发生物理或化学交联, 形成柔性复合材料。MXene 的二维片层具有良好的导电性, 在复合材料中形成导电网络, 受外力作用时, 导电网络变形, 影响复合材料的导电性能。因此, MXene 可以用作传感材料制备高性能的柔性传感器。

近期,很多研究者采用不同方法制备了 MXene 的复合材料,作为柔性传感器,表现了良好的性能。本文描述了 MXene 柔性传感器的工作原理,综述了各种制备方法,归纳了不同 MXene 柔性传感器的性能与应用,总结了当前亟待解决的问题。

1 MXene 柔性应力/应变传感器的原理

MXene 柔性传感器由导电纳米片 MXene 与弹性基底组成。MXene 导电网络把感受到的微小变形转化为电信号(电容或电阻)的变化^[22], 弹性基底提供传感器可拉伸、可伸缩等的力学性能。图 1 为一种 MXene/弹性材料受到拉伸时的结构变化。MXene 二维片层在复合体中形成导电网络, 被拉伸时, 复合体网络发生变形, MXene 片层之间的相互距离被伸长或缩短, 进而部分导电通路断开或者加强, 最终表现在输出电信号的改变。

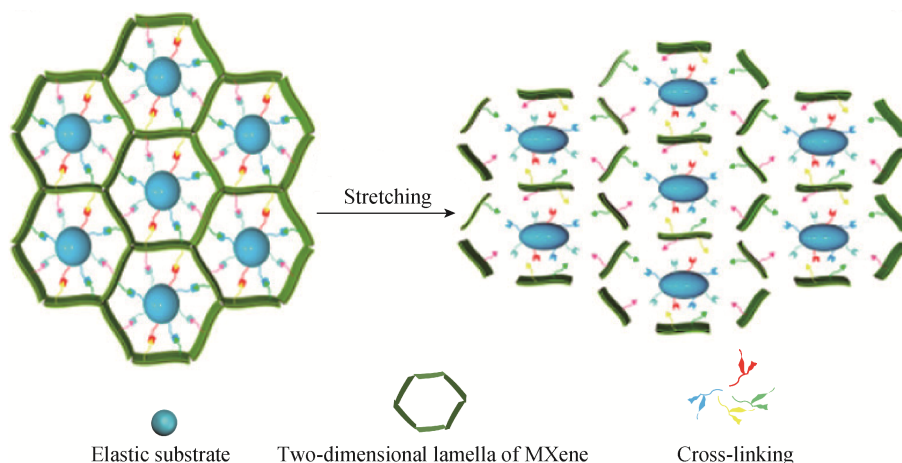


图 1 MXene/弹性材料拉伸情况下的微观结构变化^[23]

Fig. 1 Microstructure change of MXene/elastic material under tension^[23]

表征传感器性能的重要指标是应变灵敏度因数(f_g)。应变灵敏度因数是传感器测量的物理量(应力/应变)与输出电信号(电阻/电压等)的比值。例如,对于测量应变的电阻式传感器,应变灵敏度因数的计算公式为 $f_g = (\Delta R/R_0)/\varepsilon$, 即应变灵敏度因数是电阻变化($\Delta R/R_0$)与应变(ε)的比值。具有不同应变灵敏度因数的传感器适合不同的应用场景。

2 MXene 柔性应力/应变传感器的制备

目前,制备 MXene 柔性传感器的方法有:静电纺丝法^[24–26]、过滤法/涂层法^[27–29]、浸渍法^[30–31]、丝网印刷法^[32–33]、冷冻干燥法^[34–35]、冷冻-解冻法^[36–37]等。

2.1 静电纺丝法

静电纺丝法制备 MXene 柔性传感器通常有 2 种方法。一种是利用静电纺丝把 MXene 和弹性材料的混合溶液直接纺成二维薄膜,制备柔性传感器。另一种是用静电纺丝制出可拉伸的弹性基底,再将 MXene 通过氢键或静电作用装饰在该基底的表面,制成传感器。

Sharma 等^[26]采用第 1 种方法,将 MXene 胶体溶液和改性后的聚四氟乙烯(PVDF-TiFE)直接混合,通过静电纺丝,制备了 MXene/PVDF-TiFE 传感器。该传感器通过电容的变化分辨受力的大小,最低检测压力为 1.5 Pa,可用于检测人体生理信号如脉搏、心率等。该工作拓展了 MXene 传感器的超低压范围,实现了较好的循环稳定性,但该方法中的 PVDF 不溶于水,即使经过改性,也很难将 MXene

均匀分散于 PVDF-TiFE。

Yang 等^[38]采用第 2 种方法,控制环境温度为 30 °C,相对湿度为 45%,将聚氨酯分散体纺成可拉伸聚氨酯(PU)毡。再把 MXene 溶液滴在 PU 上,形成 MXene-PU 互锁导电网络,然后在该网络的两端,用碳双面胶引出导线,从而制备了 MXene/PU (Network-M/P)的应变传感器。受到拉伸应力时,覆盖在 PU 上的相邻 MXene 片层之间彼此滑动,内部

导电路径断开或连接,导致输出电阻发生变化。该传感器的应变检测范围为 1%~100%,可用于检测脉搏、心率、手指弯曲、手臂弯曲等信号。图 2 为静电纺丝法制备 MXene/PU 传感器的示意图。该课题组制备的传感器可以同时实现拉伸、垂直压力、弯曲和细微的震动等多功能检测,扩大了更可控的传感范围,但是这种方法对制备环境的温度和湿度要求严格,制备的材料强度不足。

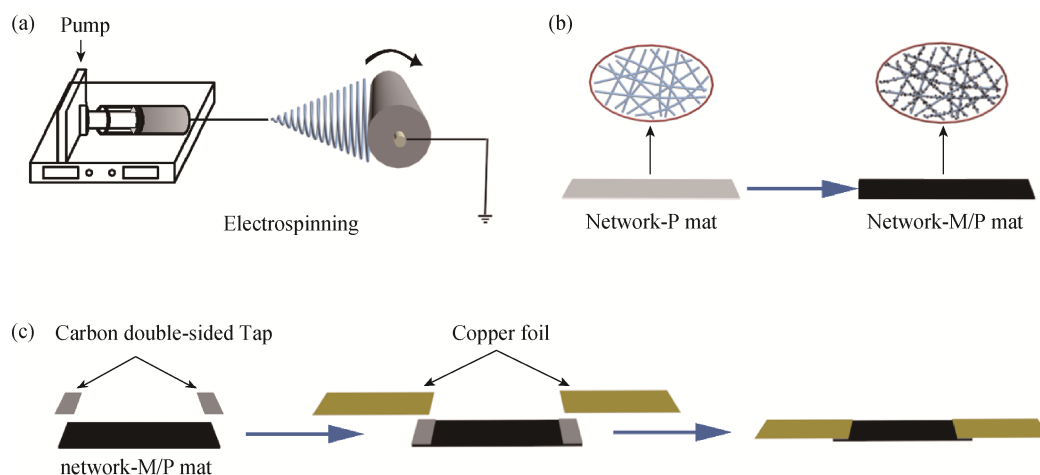


图 2 静电纺丝法制备 MXene/PU 传感器的示意图^[38]

Fig. 2 Schematic of preparation MXene/PU sensors by electrospinning^[38]

2.2 过滤法/涂层法

过滤法/涂层法是通过抽滤、过滤、逐层喷涂或自然蒸发等方式,将 MXene 胶体溶液或 MXene 复合体系的混合溶液沉淀于弹性基底上,制成传感器。

Ma 等^[39]将 MXene 粉末分散于 1 mL 的乙醇中,滴在印有叉指电极的 PI 薄膜上,制备了三明治结构的 MXene/PI 应力传感器。该传感器响应速率小于 30 ms,可以检测关节弯曲和呼吸等信号变化。该方法制备过程简单,降低了成本,但由于 MXene 纳米片的低纵横比,很难将 MXene 纳米片组装成具有理想力学和传感性能连续宏观结构。

Yang 等^[29]分别用氢氟酸(HF)和四甲基氢氧化铵(TMAOH)处理 MAX 相(Ti_3AlC_2),得到含有四甲基氢氧化铵(TMA)的 MXene 纳米粒子-纳米片胶体溶液。将该胶体溶液抽滤在微孔滤膜上,形成 MXene 导电薄膜。MXene 导电薄膜在真空干燥箱 25 °C 干燥 12 h,待薄膜干燥后,切成 0.6 cm×2.0 cm 的长方形,用二甲基硅氧烷(PDMS)封装剔除滤膜后的 MXene 长方形片,并在 MXene 两端涂上银电极,得到二维平面结构的 MXene 应变传感器。该传感器在其形变范围内可以检测关节运动,拳头的握紧和松开、行走与呼吸,区分单词发音等信号变化。图 3 为抽滤法制备 MXene 传感器的示意图。此方法兼

顾了在小应变下发生显著的结构变化和大变形区域内保持导电通路的连通性,但是抽滤成薄膜的 MXene 脆性大,在外力作用下,易断裂,使传感器的内部通路断开或短路。

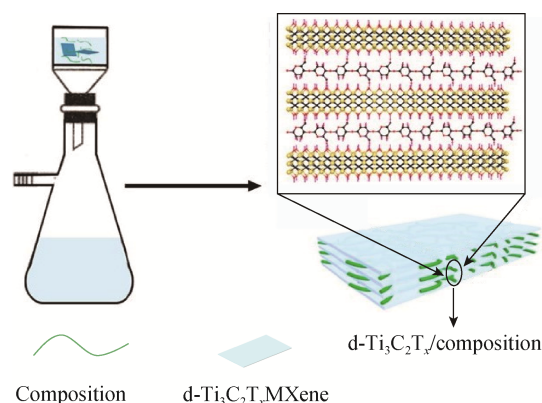


图 3 抽滤法制备 MXene 传感器的示意图^[40]

Fig. 3 Schematic of preparation MXene sensors by filtration^[40]

2.3 浸渍法

浸渍法是将弹性体(如多孔材料^[41]、泡沫^[42]、海绵^[43]等)浸入导电体溶液中,使弹性基底和传感材料充分结合,制备传感器。

海绵具有丰富的多孔结构,在外力下,可以压缩至原体积的 95%,随着外力的逐渐消失,可恢复

到初始状态。MXene 纳米片具有较大的接触面积和强的 van der Waals 力, 能很好地附着在海绵上, 因此 Yue 等^[31]将孔隙率超过 97% 的三聚氰胺海绵, 浸渍到不同浓度的 MXene 胶体溶液中, 直至海绵完全变黑, 从而构建了三维 MXene-sponge(海绵)网状结构。随后, 固定在沉积有聚乙烯醇(PVA)的叉指电极上, 与聚酰亚胺基板、聚乙烯醇膜一起, 按顺序依次组装, 形成 MXene-sponge-PVA 压力传感器。该传感器的响应时间为 138 ms, 最低检测限为 9 Pa, 可用于检测手指弯曲、呼吸、脉搏等生理信号。该方法制备过程简单且成本较低, 适合大规模生产, 但是在外力反复作用下, MXene 海绵之间的热和化

学不稳定性限制了其应用领域。

Li 等^[44]将 PU 海绵浸入带正电荷的壳聚糖(CS)溶液中, 得到 CS@PU 海绵, 然后将其浸入带负电荷的 MXene 胶体溶液中, 充分浸泡后, 将海绵取出并转移至 80 °C 真空干燥箱中, 重复上述步骤, 由此制备出 MXene@CS@PU 压力传感器。在一定压力范围, 该传感器具有很好的耐疲劳性能, 可进行压缩至原体积 95% 以内的应力(呼吸、脉搏等)检测。图 4 为浸渍法制备 MXene 传感器的示意图。这种方法实现了多种检测模式的组合, 但是海绵作为弹性基底体积较大, 反复加载-卸载过程中, 存在线性失真, 不利于集成应用开发。

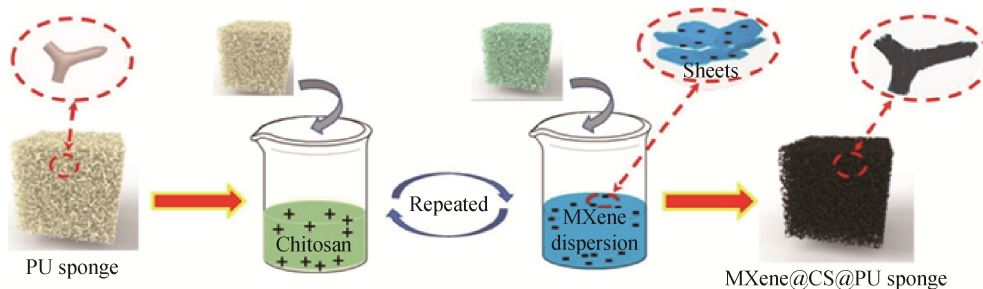


图 4 浸渍法制备 MXene 传感器的示意图^[44]

Fig. 4 Schematic of preparing MXene sensors by impregnation^[44]

2.4 丝网印刷法

丝网印刷法先将 MXene 复合体系调制成墨水, 在压力作用下, MXene 墨水通过基板上的孔眼转移到弹性基底上, 制备成传感器。

Shi 等^[33]先将 MXene/银纳米线(AgNWs)/多巴胺(PDA)混合, 制备成凝胶状油墨。再用丝网印刷技术, 将其印在聚氨酯上, 得到 MXene/AgNWs/PDA 应变传感器。MXene 和 AgNWs 的复合传感材料让传感器具有较高的应变灵敏度因数($f_g=8\ 700$), PDA 使传感器有较好的韧性。该传感器在不同的应变下, 呈现不同的应变灵敏度因数。0~55% 的应变时, 应变灵敏度因数大于 100; 55%~83% 的应变时, 应变灵敏度因数大于 200。这类传感器可用于跟踪不同运动状态下的人体活动。这种设计成功实现了在大变形下高的应变灵敏度因数, 但是多层结构有层与层之间容易脱落的不足。

2.5 冷冻干燥法

冷冻干燥法将 MXene 的复合体, 通过冷冻干燥形成气凝胶, 再组装成传感器。

Hu 等^[35]将 MXene 和 CS 共混, 在冷冻干燥机的冷冻干燥过程中制备了有一定的力学性能和线性应变灵敏度因数的气凝胶。由于 MXene 带负电, CS 带正电, 在冷冻过程中, MXene 和 CS 正负电荷

相互吸引定向生长为有序的层状结构。冻干后, CS 被转为 CS 及其衍生碳, 这些碳化了的 CS 将 MXene 片层接为连续的导电路径。压缩时, 微观形貌中孔洞距离减少, 导电接触面积增加, 单位面积内的导电路径增多, 输出电流变大。MXene/CS 气凝胶可以组装成压阻传感器, 用来检测表情、呼吸、脉搏、吞咽等行为的信号变化。该方法制备的传感器在宽压力范围内实现了高线性应变灵敏度因数, 但在合成过程中 CS 容易团聚导致性能降低。

Wang 等^[45]将 MXene/芳纶纳米纤维(ANFs)混合, 在冷冻干燥机中冷冻干燥, 形成 MXene/ANFs 气凝胶。MXene/ANFs 是砂浆砖结构, 具有 2%~80% 的形变范围, 最低检测限为 100 Pa, 可以在 200 °C 下检测人体微小运动和大运动。这种方法实现了高度可压缩、热稳定的传感器, 可用于极高或极低的温度下, 但在室温下导电性和应变灵敏度因数较差。

Liu 等^[46]将 MXene 和聚酰胺酸(PAA)混合溶液冷冻 24 h, 再移到冷冻干燥机中冷冻干燥 72 h, 然后在氩气中 300 °C 退火 2 h, 此时 PAA 转化为 PI(聚酰亚胺), 从而得到 MXene/PI 气凝胶应变传感器, 可用于柔性应变传感。该方法将二维 MXene 集成到三维宏观框架中, 形成独立的高导电的三维 MXene 整体, 然而传感器对微小压力检测能力不足。

Liu 等^[47]将 MXene 胶体溶液、聚酰亚胺纳米纤维(PINF)和黏合剂聚酰胺酸-三乙胺盐溶液(PAA-TEA)加到去离子水中,得到 MXene/PINF 悬浮液。将悬浮液置入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中 12 h,再移到冷冻干燥机中 72 h,最后进行热亚胺化处理,得到 MXene/PINF 气凝胶压阻传感器。MXene/PINF 是层-柱多

孔蜘蛛网结构,具有 0.5%~90.0%的压缩应变,在液氮及高温环境有稳定的传感特性,可以检测脉搏、吸气和呼气、发音、摇头、膝盖弯曲及手指弯曲等人体运动。图 5 为冷冻干燥法制备气凝胶传感器的示意图。这种传感器耐高、低温,适用于各种恶劣的环境,但是存在线性应变灵敏度因数较低的缺陷。

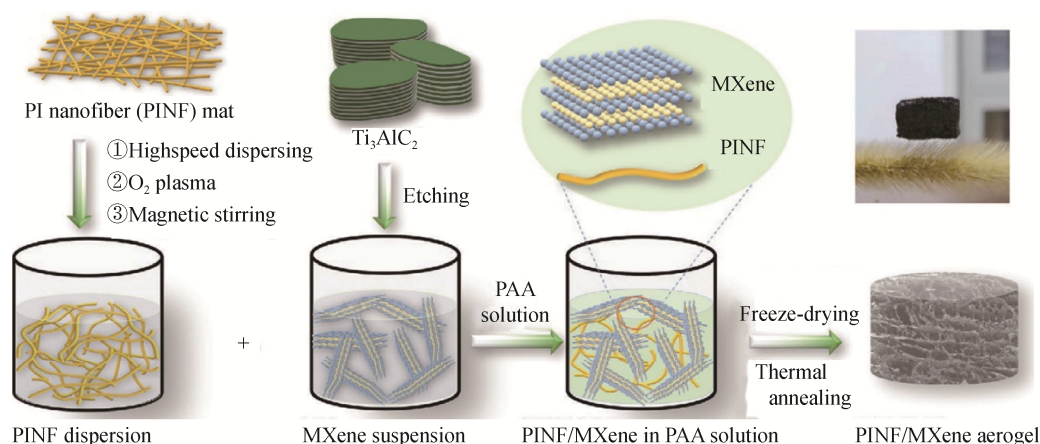


图 5 冷冻干燥法制备气凝胶传感器的示意图^[47]

Fig. 5 Schematic of aerogel sensors prepared by freeze-drying^[47]

2.6 冷冻解冻法

冷冻解冻法也称为物理交联法,将 MXene 的复合材料在低温和室温下反复冷冻-解冻,使材料内部形成微晶区作为物理交联点,由此得到三维网络结构的导电水凝胶。

Lu 等^[37]将 MXene 加入 PVA 和聚乙烯吡咯烷酮(PVP)溶液中,然后移到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中冷冻 12 h,

室温解冻 3 h,如此反复 3 次,得到 MXene/PVA/PVP 复合双网络水凝胶传感器。在该水凝胶中,PVP“硬链段”具有较大分子的侧链基团被并入 PVA 的“软链段”中。“软”和“硬”链段的网络结构使水凝胶表现出良好的力学性能。该传感器具有 33.5 ms 的响应时间和 0.87 Pa 的最低检测限,可以检测人体的多种生理信号。图 6 为冷冻解冻法制备水凝胶传感器的示意图。

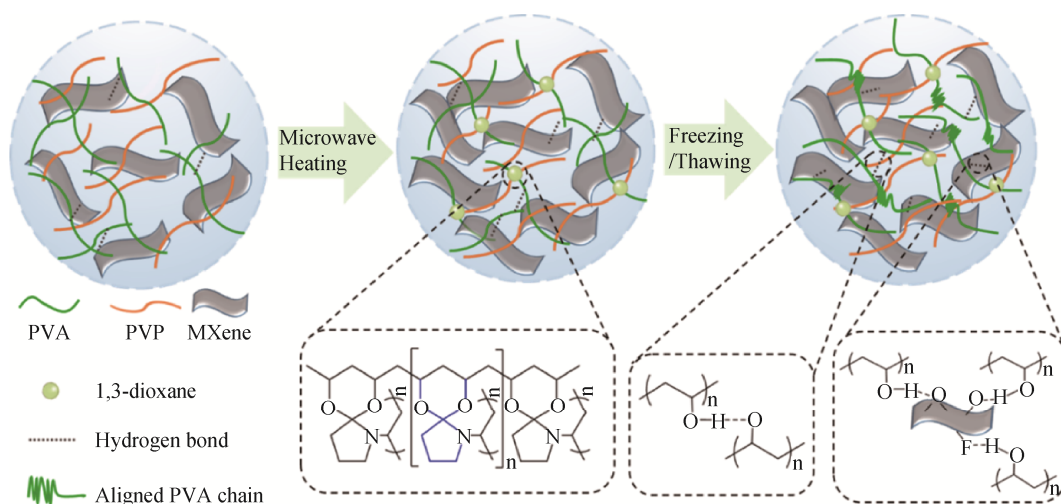


图 6 冻融法制备 MXene 水凝胶传感器的示意图^[37]

Fig. 6 Schematic of MXene hydrogel sensors by freeze-thawing^[37]

综上,静电纺丝、过滤/涂层、丝网印刷 3 种方法是把 MXene 及 MXene 复合体系涂覆在弹性基底材料表面,制备的传感器可以检测微小的形变,用于监测心跳、脉搏等信号变化。

浸渍法将 MXene 直接浸入成型的弹性体(如海绵)里,构成盘结的导电网络。此传感器可以检测较大的形变,受到外力作用,MXene 在弹性体内部的接触面积随之变化,从而引起输出电信号的变化,

实现对人体较大运动的重复检测(10 000 次以上)。

冷冻干燥法充分发挥 MXene 和弹性基底材料之间的相互协同作用, 赋予传感器耐疲劳性(10 000 次以上), 可以监测压力的分布情况, 在恶劣环境中较好的传感性能。

冷冻-解冻法制备的 MXene 传感器, 除其内部弹性体子间的物理或者化学交联外, MXene 和弹性基底之间又发生了二次交联, 使此类传感器具有优异的力学性能(断裂强度 400 kPa 以上, 拉伸率

2 400%以上), 能够检测笔迹、面部表情和声音等信号, 还可以扩展到三维运动的传感应用, 包括触摸传感和生物信号监测等。表 1 列出来 MXene 柔性传感器的制备方法、弹性基底、测量参数、最低测试极限、循环次数、测量范围、反应时间和应变灵敏度因数等。

因此, 不同方法制备的 MXene 传感器表现出差异的性能特征。可根据各自传感器的优势, 应用于不同的人体活动。

表 1 常见传感器的制备方法、弹性基底、测量参数、最低测试极限、循环次数、测量范围、反应时间和应变灵敏度因数
Table 1 Preparing method, elasticity substrate, measured parameter, detection limit, cycle time, sensing range, responsive time, and gauge factor of common sensor

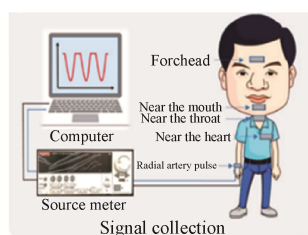
Preparation methods	Elasticity substrate	Measured parameter	Detection limit	Cycle time	Sensing range	Responsive time/ms	GF	Ref.
Electrospinning	PVDF-TrFE	Pressure	1.5 Pa	10 000	1.5~300.0 kPa	38		26
	PU mat	Strain	0.1%	3 200	0.1~150.0%		228	38
Filtration	PI film	Piezoresistive	351 Pa	4 000	0.19~2.13%	125	180.1	39
	PDMS	Strain	0.025%	5 000	0.025~53.000%	30	178.4	29
Impregnation	Sponge/CS/PU	Piezoresistive	9 Pa	10 000	10~85%	19	3.0	31
	Sponge/PVA	Piezoresistive	9 Pa	10 000	5.37~18.56 kPa	138		44
Screen printing	PDA	Strain	5%	5 000	5~83%		8 700	39
Freeze-drying	CS	Pressure	1.0 Pa	150 000	0.5~70.0%	109.6		35
	ANFs	Pressure	100 Pa	1 000	2.0~80.0%	32	6.75	45
	PINF	Piezoresistive	0.5%	1 000	0.5~90.0%		1.67	46
	PI	Strain	10%	1 000	10~80%		200	47
Freeze-thawing	PVA/PVP	Strain/Pressure	0.87 Pa	2 000	0~2 400%	233	19.18	37

3 柔性应力/应变传感器的应用

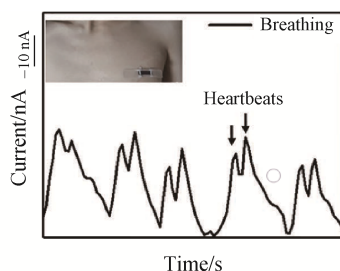
MXene 柔性应力/应变传感器可以用于监测人体大变形运动, 如关节运动(手指弯曲、手腕弯曲和

腿部弯曲等)、肌肉收缩和小变形的生命信号(吞咽、呼吸、脉搏、人脸表情和发声等)^[48]。图 7 为 MXene 柔性传感器监测人体生理信号的应用。

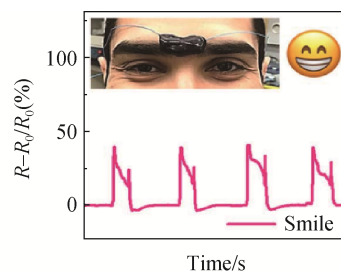
除此之外, MXene 柔性应力/应变传感器还可以



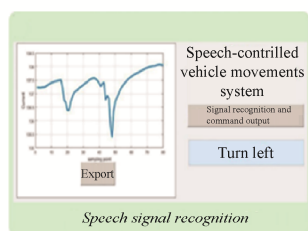
(a) Human physiological motion signal collection process^[23]



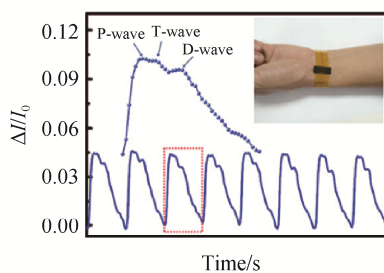
(c) Heartbeats^[29]



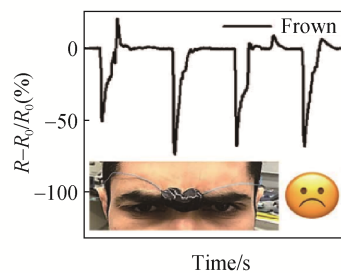
(e) Laugh expressions^[49]



(b) Signal recognition system that can identify different speech signals^[23]



(d) Pulse^[31]



(f) Frustrated expressions^[49]

图 7 MXene 柔性传感器的典型应用

Fig. 7 Typical application of MXene flexible sensor

连接无线发射器进行远程监测, 为实现远距离人机对话提供一种可能。但 MXene 用作传感材料与不同的弹性基底复合, 在拉伸或压缩过程中, MXene 浓度过低, 片层与片层之间无法正常连接。MXene 浓度过高, 大量的相邻片层紧密堆叠, 片层与片层之间无法实现有效滑移, 从而破坏已有的导电网络。因此, 优化 MXene 浓度, 对制备 MXene 柔性应力/应变传感器至关重要, 选择最优浓度得到的柔性应力/应变传感器可用于全身运动、压力分布、个性化医疗监测, 人机交互和人工智能等方面的工作。

4 结论与展望

MXene 具有优良的导电性、丰富的表面基团, 可以分散在弹性基底中形成导电网络, 作为柔性传感器的传感材料, 具有良好的性能与应用前景。

MXene 柔性应力/应变传感器结构多样(一维线型、二维平面和三维结构), 制备工艺繁多(静电纺丝法、浸渍法、涂层法、抽滤法、丝网印刷技术、冷冻干燥法、冷冻-解冻法等)。可以用来实时监测人体呼吸、关节运动、脉搏等体能特征。值得注意的是, MXene 复合水凝胶在无限延展性、自愈性、柔韧性以及高强度等方面, 表现出明显的优势。MXene 水凝胶的三维多孔结构解决了 MXene 二维平面的脆性问题, 同时提高了传感器的综合性能。但若将 MXene 传感器投入健康监测、医疗等的实际应用中, 还需解决以下问题:

1) 很多种制备方法已经被选择用来制备 MXene 传感器, 但为了方便后期的研究者根据应用选择制备方法, 需要确定不同的制备方法分别适用于什么应用场合。完成这个工作, 需要进一步完善表 1, 并从中找寻规律。

2) Ti_3C_2 MXene 是最常见的 MXene, 但是还有 Ti_2C 、 V_2C 、 Nb_2C 、 Mo_2C 等不同的 MXene。 Ti_3C_2 是否是最适合应用为传感器的 MXene。其它 MXene 是否比 Ti_3C_2 MXene 更适合。完成该工作, 需要进一步测试不同的 MXene。

3) MXene 传感器在电子信息领域的应用问题的解决。目前的研究主要从材料与化学的角度制备这种传感器。传感器在使用过程中, 需要考虑 MXene 传感材料对信号、传输、处理方面的特殊要求。因此需要从电子信息的角度研究 MXene 传感器的应用过程。

参考文献:

- [1] HAN S T, PENG H Y, SUN Q J, et al. An overview of the development of flexible sensors[J]. *Adv Mater*, 2017, 29(33): 1700375.
- [2] XU F L, LI X Y, SHI Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: a review[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11): 580.
- [3] AMJADI M, KYUNG K U, PARK I K, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review[J]. *Adv Funct Mater*, 2016, 26(11): 1678–1698.
- [4] YAN J F, MA Y N, LI X X, et al. Flexible and high-sensitivity piezoresistive sensor based on MXene composite with wrinkle structure[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(15): 23592–23598.
- [5] 单光存, 范文静, 尹明, 等. 基于 MXene 和多孔 PVB 的高灵敏压阻柔性传感器可用于健康监测[J]. *科学通报*, 2020, 65(32): 3499–3501. SHAN Guangcun, FAN Wenjing, YIN Ming, et al. *Sci Bull(in Chinese)*, 2020, 65(32): 3499–3501.
- [6] YANG Y, GAO W. Wearable and flexible electronics for continuous molecular monitoring[J]. *Chem Soc Rev*, 2019, 48(6): 1465–1491.
- [7] DARABI A M, KHOSROZADEH A, MBELECK R, et al. Skin-Inspired multifunctional autonomic-intrinsic conductive self-healing hydrogels with pressure sensitivity, stretchability, and 3D printability[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(4): 1705922.
- [8] LEE Y, PARK J, CHOE A, et al. Mimicking human and biological skins for multifunctional skin electronics[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(20): 1904523.
- [9] YUAN Y, LEI T M, QIN Y, et al. Flexible electronic skins based on piezoelectric nanogenerators and piezotronics[J]. *Nano Energy*, 2019, 59: 84–90.
- [10] 李法利, 李晟斌, 曹晋玮, 等. 弹性敏感材料与传感器件[J]. *材料导报*, 2020, 34(1): 1059–1068. LI Fali, LI Shengbin, CAO Jinwei, et al. *Mater Rep (in Chinese)*, 2020, 34(1): 1059–1068.
- [11] JIAN M Q, WANG C, WANG Q, et al. Advanced carbon materials for flexible and wearable sensors[J]. *Sci China Mater*, 2017, 60(11): 1026–1062.
- [12] AMJADI M, PICHITPAJONGKIT A, LEE S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(5): 5154–5163.
- [13] NUR R, MATSUHISA N, JIANG Z, et al. A highly sensitive capacitive-type strain sensor using wrinkled ultrathin gold films[J]. *Nano Lett*, 2018, 18(9): 5610–5617.
- [14] LEE J, PYO S, KWON D S, et al. Ultrasensitive strain sensor based on separation of overlapped carbon nanotubes[J]. *Small*, 2019, 15(12): 1805120.
- [15] WANG Y M, WANG Y, YANG Y, et al. Graphene-polymer nanocomposite-based redox-induced electricity for flexible self-powered strain sensors[J]. *Adv Energy Mater*, 2018, 8(22): 1800961.
- [16] SOBOLECIK P, ALI A, K.HASSAN M, et al. 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (MXene)-reinforced polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers with enhanced mechanical and electrical properties[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): 0183705.
- [17] 王冰心, 刘凡凡, 胡前库, 等. 二维碳化物 Ti_2C 在超级电容器中的电化学性能研究[J]. *现代技术陶瓷*, 2017, 38(1): 64–70. WANG Bingxin, LIU Fanfan, HU Qianku, et al. *Adv Ceram(in Chinese)*, 2017, 38(1): 64–70.
- [18] 刘凡凡, 周爱国, 陈进峰, 等. 二维结构 MXene 温和制备及吸附催化领域的应用[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(1): 120–124.

- LIU Fanfan, ZHOU Aiguo, CHEN Jinfeng, et al. *Ordn Mater Sci Eng* (in Chinese), 2016, 39(1): 120–124.
- [19] 耿欣, 温广武, 杨思宇, 等. MXene(Ti_3C_2)的制备及其吸波性能[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(3): 315–321.
- GENG Xin, WEN Guangwu, YANG Siyu, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2018, 46(3): 315–321.
- [20] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 [J]. *Adv Mater*, 2011, 23(37): 4248–4253.
- [21] 毛威, 高冀芸, 侯明, 等. 二维 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 官能团微波等离子体调控及其气敏性能[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(3): 519–527.
- MAO Wei, GAO Jiyun, HOU Ming, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(3): 519–527.
- [22] CHAO M Y, WANG Y G, MA D, et al. Wearable MXene nanocomposites-based strain sensor with tile-like stacked hierarchical microstructure for broad-range ultrasensitive sensing[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105187.
- [23] GUO Q Q, ZHANG X X, ZHAO F Y, et al. Protein inspired self-healable Ti_3C_2 MXenes/rubber-based supramolecular elastomer for intelligent sensing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2557–2560.
- [24] FANG F Y, WANG H, WANG H Q, et al. Stretchable MXene/thermoplastic polyurethanes based strain sensor fabricated using a combined electrospinning and electrostatic spray deposition technique[J]. *Micromachines*, 2021, 12(3): 252–263.
- [25] LI Y, MENG F B, MEI Y, et al. 391[J]. Electrospun generation of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene@graphene oxide hybrid aerogel microspheres for tunable high-performance microwave absorption[J]. *Chem Eng J*, 2019, 391: 123512.
- [26] SHARMA D, CHHETRY A, KO S, et al. Highly sensitive and stable pressure sensor based on polymer-Mxene composite nanofiber mat for wearable health monitoring[C]. 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Vancouver, Canada, 2020: 810–813.
- [27] ZHOU H, WANG Y W, WANG F Q, et al. Water permeability in MXene membranes: process matters[J]. *Chin Chem Lett*, 2020, 31(6): 1665–1669.
- [28] LI Y, TIAN X, GAO S P, et al. Reversible crumpling of 2D titanium carbide (MXene) nanocoatings for stretchable electromagnetic shielding and wearable wireless communication[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(5): 1907451.
- [29] YANG Y N, SHI L J, CAO Z R, et al. Strain sensors with a high sensitivity and a wide sensing range based on a $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (MXene) nanoparticle–nanosheet hybrid network[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, 29(14): 1807882.
- [30] LI F, LIU Y L, WANG G G, et al. Few-layered $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes coupled with Fe_2O_3 nanorod arrays grown on carbon cloth as anodes for flexible asymmetric supercapacitors[J]. *J Mater Chem A*, 2019, 7(39): 22631–22641.
- [31] YUE Y, LIU N S, LIU W J, et al. 3D hybrid porous MXene-sponge network and its application in piezoresistive sensor[J]. *Nano Energy*, 2018, 50: 79–87.
- [32] ABDOLHOSSEINZADEH S, SCHNEIDER R, VERMA V, et al. Turning trash into treasure: additive free MXene sediment inks for screen-printed micro-supercapacitors[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(17): 2000716.
- [33] SHI X L, WANG H K, XIE X T, et al. Bioinspired ultrasensitive and stretchable MXene-based strain sensor via nacre-mimetic microscale "brick-and-mortar" architecture[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(1): 649–659.
- [34] WANG N N, WANG H, WANG Y L, et al. Robust, lightweight, hydrophobic and fire retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation[J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2019, 11(43): 40512–40523.
- [35] HU Y J, ZHOU H, LUO Q S, et al. Biomass polymer-assisted fabrication of aerogels from MXenes with ultrahigh compression elasticity and pressure sensitivity[J]. *J Mater Chem A*, 2019, 7(14): 8092–8100.
- [36] PI M H, JIANG L C, WANG Z S, et al. Robust and ultrasensitive hydrogel sensors enhanced by MXene/cellulose nanocrystals[J]. *J Mater Sci*, 2021, 56(14): 8871–8886.
- [37] LU Y, QU X Y, ZHAO W, et al. Highly stretchable, elastic, and sensitive MXene-based hydrogel for flexible strain and pressure sensors[J]. *Research*, 2020, DOI:10.34133/2020/2038560.
- [38] YANG K, YIN F X, XIA D, et al. A highly flexible and multifunctional strain sensor based on a network-structured MXene/polyurethane mat with ultra-high sensitivity and a broad sensing range[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(20): 9949–9957.
- [39] MA Y N, LIU N S, LI L Y, et al. A highly flexible and sensitive piezoresistive sensor based on MXene with greatly changed interlayer distances[J]. *Nat Commun*, 2017, 8(1): 1207–1215.
- [40] CAO W T, CHEN F F, ZHU Y J, et al. Binary strengthening and toughening of MXene/cellulose nanofiber composite paper with nacre-inspired structure and superior electromagnetic interference shielding properties[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(5): 4583–4593.
- [41] JUNG S, KIM J H, KIM J, et al. Reverse-micelle-induced porous pressure-sensitive rubber for wearable human–machine interfaces[J]. *Adv Mater*, 2014, 26(28): 4825–4830.
- [42] JEONG Y R, PARK H, JIN S W, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensors using fragmentized graphene foam[J]. *Adv Funct Mater*, 2015, 25(27): 4228–4236.
- [43] HAN J W, KIM B, LI J, et al. Flexible, compressible, hydrophobic, floatable, and conductive carbon nanotube-polymer sponge[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(5): 1307–1315.
- [44] LI X P, LI Y, LI X P, et al. Highly sensitive, reliable and flexible piezoresistive pressure sensors featuring polyurethane sponge coated with MXene sheets[J]. *J Colloid Interf Sci*, 2019, 542(15): 54–62.
- [45] WANG L, ZHANG M Y, YANG B, et al. Highly compressible, thermally stable, light-weight, and robust aramid nanofibers/ Ti_3AlC_2 MXene composite aerogel for sensitive pressure sensor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10633–10647.
- [46] LIU J, ZHANG H B, XIE X, et al. Multifunctional, superelastic, and lightweight MXene/polyimide aerogels[J]. *Small*, 2018, 14(45): 1802479.
- [47] LIU H, CHEN X Y, ZHENG Y J, et al. Lightweight, superelastic, and hydrophobic polyimide nanofiber/MXene composite aerogel for wearable piezoresistive sensor and oil/water separation applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(13): 2008006.
- [48] ZHANG J Q, WAN L J, GAO Y, et al. Highly stretchable and self-healable MXene/polyvinyl alcohol hydrogel electrode for wearable capacitive electronic skin[J]. *Adv Electron Mater*, 2019, 5(7): 1900285.
- [49] ZHANG Y Z, LEE K H, HANJUM D, et al. MXenes stretch hydrogel sensor performance to new limits[J]. *Sci Adv*, 2018, 4(6): eaat0098.