

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241105.002

MXene 基可穿戴传感器的制备及其在运动领域的应用



分享本文

王羽飞^{1,2}, 肖明月^{1,2}, 郭贯切^{1,2}, 孙璐璐^{1,2}, 王子卓^{*3}, 冯岸超^{*1,2}

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院 先进弹性体材料研究中心, 北京 100029; 3. 北京化工大学 文法学院, 北京 100029)

摘要: 鉴于运动员与运动爱好者对于精准掌握自身生理状态的需求日益增长, 以期实现训练的优化与运动表现的提升, 同时减少运动损伤的风险, 传统的监测手段, 如表面肌电图 (sEMG) 和三维运动捕捉技术, 因穿戴不适和对环境条件的严格要求而限制了其广泛应用。近年来, 基于 MXene 材料的柔性传感器因其卓越的生物相容性、机械柔韧性和电导性, 展现出在可穿戴设备领域的巨大潜力。这些传感器能够紧密贴合人体皮肤, 实现对运动过程中的肌电信号、生理参数等关键信息的实时监测。本文旨在综合评述 MXene 基柔性传感器在运动科学领域的应用前景, 探讨其在肢体动作捕捉、生理参数监测以及其他潜在功能方面的应用, 并深入分析当前 MXene 基传感器在实际应用中所面临的技术挑战和限制因素。通过对现有文献的系统性回顾, 本文旨在为未来的研究方向提供指导, 并为运动科学领域的技术进步提供理论支持。

关键词: 运动监控; MXene 复合材料; 可穿戴传感器; 实时监测; 制备方法

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2025)06-2943-15

Fabrication of MXene-based wearable sensors and their applications in sports science

WANG Yufei^{1,2}, XIAO Mingyue^{1,2}, GUO Guanqie^{1,2}, SUN Lulu^{1,2}, WANG Zizhuo^{*3}, FENG Anchao^{*1,2}

(1. State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Center for Advanced Elastomer Materials, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. College of Humanities and Law, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Given the increasing demand from athletes and fitness enthusiasts for accurate monitoring of physiological states to optimize training, enhance performance, and reduce the risk of injuries, traditional methods such as surface electromyography (sEMG) and three-dimensional motion capture are limited by discomfort and strict environmental requirements. Recently, flexible sensors made from MXene materials have shown great promise in wearable technology due to their excellent biocompatibility, mechanical flexibility, and conductivity. These sensors can closely adhere to the skin, allowing for real-time monitoring of essential data, including electromyographic signals and physiological parameters during physical activities. This review aims to assess the potential applications of MXene-based flexible sensors in sports science, focusing on their roles in motion capture, physiological monitoring, and other functionalities. It also analyzes the technical challenges and limitations facing these sensors in practical applications. Through a systematic review of the existing literature, this study seeks to guide future research directions and support advancements in the field of sports science.

收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-10-22; 录用日期: 2024-10-26; 网络首发时间: 2024-11-05 14:19:49

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241105.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (ZK20220198); 北京科技新星计划 (20230484260)

National Natural Science Foundation of China (ZK20220198); Beijing Nova Program (20230484260)

通信作者: 王子卓, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为体育教育与运动训练 Email: 2014500012@buct.edu.cn;

冯岸超, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为高分子材料合成及改性 Email: fengac@mail.buct.edu.cn

引用格式: 王羽飞, 肖明月, 郭贯切, 等. MXene 基可穿戴传感器的制备及其在运动领域的应用 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 2943-2957.

WANG Yufei, XIAO Mingyue, GUO Guanqie, et al. Fabrication of MXene-based wearable sensors and their applications in sports science[J].

Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 2943-2957(in Chinese).

Keywords: motion monitoring; MXene composite materials; wearable sensors; real-time monitoring; fabrication methods

多样的体育运动丰富了人们的日常生活,也促进了人们的身心健康。随着人们生活水平的提高,更多的人积极参与到了各项体育锻炼中。为了更好地进行体育锻炼,掌握相关的技术动作必不可少。目前在非专业领域中主要是通过老师的言传身教来学习,而在专业领域中还会使用一些监测设备来精确检测运动员的运动数据,以进一步提高成绩。其中常用的包括表面肌电测试^[1-3]和三维摄像^[4-5],然而,表面肌电测试需要在受试者的肌肉表面贴附电极片^[6],佩戴过程繁琐且会带来不适。三维摄像同样需要在全身佩戴多个反射标记或红外光源^[7],且由于易被其他光线干扰,需要在特定的室内环境中进行测试。另外,及时了解自身的生理状态有助于运动员科学安全地进行运动锻炼。随着柔性电子学的快速发展,研究人员不断探索使用柔性传感器来监测运动姿态和生理状态,以帮助提高运动员的成绩,同时帮助大众更好地掌握技术动作。

柔性电子传感器是以柔性材料为基础,通过监测外部环境的改变引起传感器内部电阻或电容等参数的改变,进而反映外部环境改变的电子器件^[8-10]。由于具有良好的柔性,相比于表面肌电等方式以及刚性传感器,柔性传感器可以很好地附着在人体皮肤的表面,实现对人体肌肉、关节的形变,以及生理信号的监测。这使得柔性传感器在人体运动监测^[11]、人体生理状态监测^[12]、医疗监控^[13]等领域有着潜在的应用前景。根据原理的不同,柔性传感器分为压阻式^[14]、压电式^[15]、电容式^[10]、摩擦电式^[16]、离子电子式^[17]。研究人员将柔性传感器直接佩戴在人体皮肤的表面^[18],或设计在特定的服装内^[19],来监测佩戴者的动作或生理信号。根据其实际使用中的需求,柔性传感器应具有柔性轻便、生物相容、耐用等特点,还要具有高灵敏度、快速响应、宽传感范围的性能。

导电材料是制备柔性传感器的重要材料,负责形成并传导变化的电信号。常用的导电材料包括炭黑^[20]、碳纳米管^[21]等碳材料以及导电金属材料^[22]。MXene作为最新的二维导电材料,集导电性优异、机械强度高、亲水性好、比表面积大^[23-24]等优点于一身,因此受到了广泛的关注。在传感^[25-26]、电化学储能^[27-28]、电磁干扰屏蔽^[29]以及催化剂^[30]

等领域引起了研究热潮,具有广泛的应用前景。MXene是一类二维过渡金属碳/氮化物,自 Ti_3C_2 作为第一种MXene在2011年被首次发现^[31]以来,已有超过30种MXene陆续被发现^[32],主要通过刻蚀陶瓷相前驱体MAX中的A成分得到^[33],其中M代表前过渡金属元素,例如Ti、Sc、V等;A代表ⅢA族及ⅣA族元素,例如Al、Si等;X代表元素C或N^[34]。得到的MXene通常表示为 $M_{n+1}X_nT_x$ ^[35],T代表MXene表面的羟基、氟原子等官能团,理论上存在超过一百种MXene^[36],MAX和MXene包含的元素种类如图1所示^[37]。

MXene具有二维片层状结构且表面具有丰富的亲水官能团^[38],使得其可通过喷涂^[39]、浸渍干燥^[40]、共混^[41]等方式与柔性基体材料进行复合,最终得到柔性压力传感器。在传感器受到外力时,内部的MXene纳米片的堆叠形式发生改变,进而产生不同的电信号。MXene基传感器灵敏度高、力学性能良好、功能可扩展,能够贴附在人体表面检测人体关节的运动状态和生理信号^[42-43],在运动领域具有良好的应用前景。然而MXene由于其本身耐氧化性较差,在与外界接触的情况下会快速氧化失效^[40]。且MXene基传感器在实际应用设计、大规模生产、降低成本以及多功能集成等方面依然没有较大的突破^[44]。因此将MXene传感器实际应用于体育领域中仍是一项巨大的挑战。

本文综述了MXene基柔性传感器在运动领域的应用,首先介绍了MXene基传感器在肢体动作监测、生理信号监测以及其他与体育运动相关功能。随后简要分析了MXene基传感器在实际应用上依然存在的问题并做出展望。

1 运动应用

1.1 动作监测

1.1.1 简单的关节往复运动

在运动领域中,掌握正确的动作有助于体育运动的参与者进行科学锻炼,减少受伤概率,同时也会提升运动员的技术水平和动作观赏性。MXene基柔性传感器可以制成可穿戴设备佩戴在人体上^[45-46],将人体运动时产生的动作信号实时转变为可量化的电信号,将有助于运动员和运动爱好者通过这些电信号不断学习和优化自身的动作,提高运动水平。

1 IA	2 IIA	M A X T										13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 H	2 He											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 Li	4 Be	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

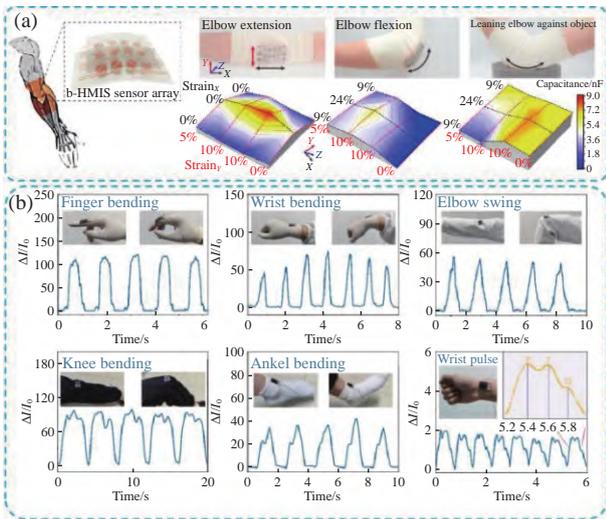
图1 MAX 和 MXene 相关元素^[37]Fig. 1 Elements involved in the formation of MAX and MXenes^[37]

为了检测人体的关节运动, MXene 传感器需要紧密贴合在人体表面, 跟随且不能明显阻碍人体关节发生应变。于是具有良好柔性和回弹性的弹性体聚合物材料成为了一种理想的基体材料。北京化工大学的于中振团队^[47]使用一种自上而下的制备方法制备 MXene 基导电复合材料, 将 MXene 溶液喷涂在双轴取向的聚苯乙烯薄膜上, 再通过退火使得聚苯乙烯/MXene 薄膜收缩, 得到带有褶皱的聚苯乙烯/MXene 薄膜, 最后将聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 涂敷在聚苯乙烯/MXene 薄膜上, 将聚苯乙烯溶解后, 得到褶皱 PDMS/MXene 薄膜。这种不均匀褶皱产生的自我控制微裂纹使得 PDMS/MXene 薄膜具有较高的拉伸性 (100%)。以 PDMS/MXene 复合膜作电极, 浸渍了离子液体的聚氨酯纺织垫作电解质层, 再与两个条纹阵列图案 PDMS/MXene 薄膜组装得到具有高拉伸性和高灵敏度的传感器阵列 (图 2(a))。该传感器阵列利用电极层和电解质层之间的压力来感应接触电容变化, 可佩戴在人体的关节处可检测关节运动情况。武汉光电国家研究中心的李露颖团队^[48]将聚对苯二甲酰胺纤维 (ANF) 溶液和 MXene 混合, 经过真空过滤将混合溶液转化为 MXene/ANF 复合薄膜, 将复合膜与插指电极组装并使用聚氨酯 (PU) 封装得到 MXene/ANF 复合压阻传感器。通过一维芳纶纳米纤维和二维 MXene 纳米片之间的氢键相互作用, MXene/ANF 复合薄膜的抗拉强度和韧性比纯 MXene 片分别提高到 7 倍和 33 倍, 同时聚氨酯外壳具有一定的自修复能力, 提高了传感器抵抗外界损伤的能力, 很好保证了在较为极端的使用环境下传感器件的功能完整性。该 MXene/

ANF 传感器具有良好的灵敏度 (208.7 kPa^{-1}) 和响应速度 (10 ms), 在外部压力下, MXene 片层间的层间距减小, 使得传感器内部的总电阻减小, 表现为增加的电流信号, 可以监测人体多种关节部位的运动 (图 2(b))。

尽管采用弹性体材料作为传感器的基底或封装材料使传感器具有良好的传感性能, 然而由于透气性普遍较差使得其在佩戴舒适性上表现一般, 且会引起皮肤过敏、瘙痒以及炎症等不良反应^[49]。因此研究人员开始探索使用透气性材料与 MXene 结合构建柔性传感器。天津科技大学的刘洪斌团队^[50]采用木浆纸作为基底, 将木浆纸浸泡在 MXene 溶液中再浸泡在成分为松香和木质素的疏水性施胶剂。施胶剂保证了传感器的疏水性, 避免接触水后传感器快速失效。该传感器具有良好的透气性 (154 mm/s), 接近透气性服装的 180 mm/s 的要求 (图 3(a))。且相比于 PU 膜和创口贴出现明显的炎症反应, 该传感器在皮肤表面附着 7 d 后没有明显的炎症或过敏反应, 可以长期佩戴在人体上进行人体运动监测, 是一种实用舒适的运动监测传感器。郑州大学刘虎团队^[51]通过浸渍干燥的方法将 MXene 和碳纳米管涂附在由静电纺丝得到的聚氨酯 (TPU) 纤维膜上, 组装得到 MXene/碳纳米管 (CNT)@对苯二胺 (PDA)-TPU 传感器。MXene 和碳纳米管构成协同导电网络, 具有三维结构的 TPU 纤维膜提供良好的透气性和可拉伸性。该传感器具有良好的透气性和传感性能, 能够监测肘关节、膝关节和指关节等人体的关节运动 (图 3(b))。

对于纸基和纺织品基体的柔性传感器来说, 导电材料分布在疏松多孔的纺织纤维表面, 通过

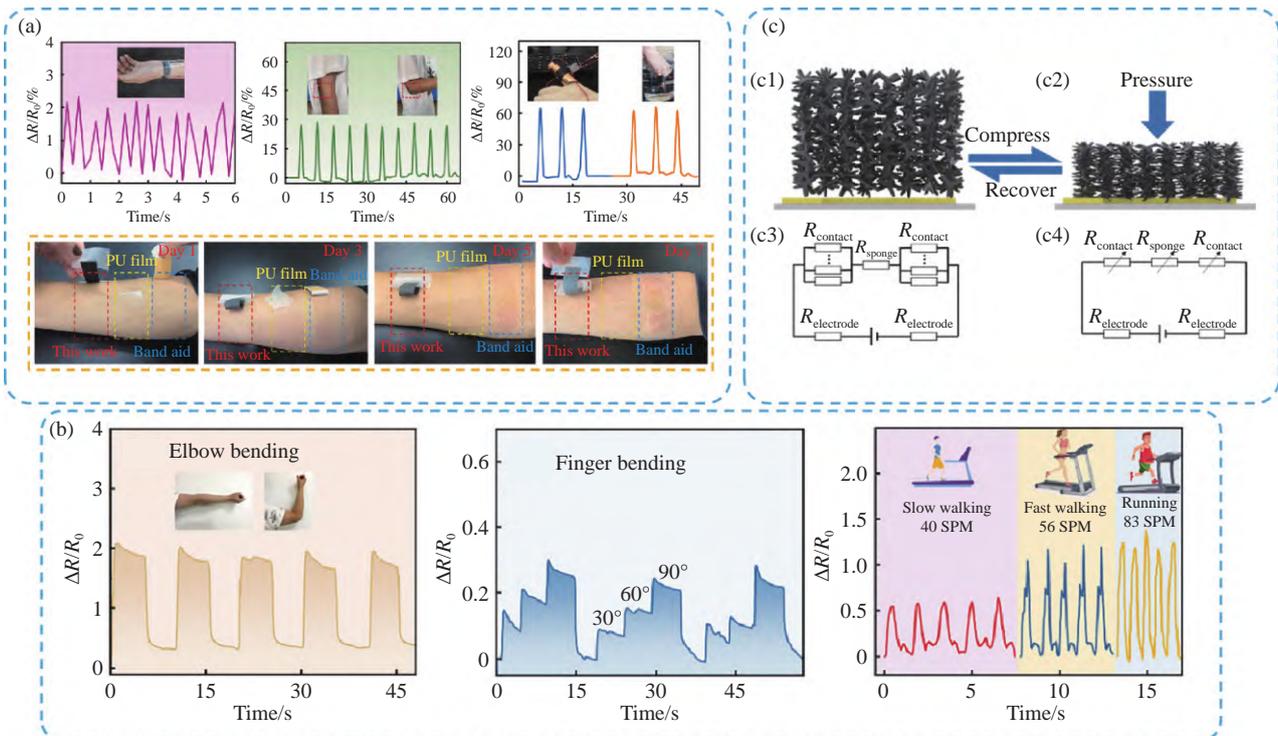


b-HMIS—Bilayer hierarchical MXene iontronic sensor; $\Delta I/I_0$ —Current response value

图2 以弹性体材料为基体的MXene传感器用于动作监测：
(a) 传感器阵列监测肘部动作示意图；(b) 监测手指、手腕、肘部、膝盖、脚踝、脉搏^[47-48]

Fig. 2 MXene sensors based on elastomer materials used for motion monitoring: (a) Schematic diagram of sensor array monitoring elbow movements; (b) Monitoring of fingers, wrists, elbows, knees, ankles and pulse^[47-48]

受到外力压缩后改善导电通路进而反映外力大小^[52] (图3(c))。相对于弹性体基体的传感器，通常大部分纺织品基体的传感器的传感性能较差，主要体现在灵敏度和响应时间低、传感范围小等^[42]。参考在弹性体基体上构建微结构以提高传感性能的方法，在纺织品基体上构建微结构或许是一种提高纺织品基传感器的有效方法。Zheng等^[53]受到人体皮肤棘层微观结构的启发，利用屈曲效应，通过施加、释放双轴应力，使沉积了MXene纳米片的TPU纳米纤维毡表面形成棘状微结构。首先利用静电纺丝制备TPU纳米纤维毛毡，再将MXene纳米片沉积在双轴预拉伸的TPU毛毡表面，待双轴应力释放后，形成棘状微观结构。相比于均匀微结构在压力下接触面积快速饱和和使得其只有较小的高灵敏度的线性范围，这种仿生间歇结构由于其微结构的高度不均一，不仅初始接触面积减少，且在较高的微结构的接触面积饱和后，由较低的微结构发生形变继续增大接触面积，最终构建的传感器在全范围内具有优秀的灵敏度 ($1\ 368.9\ \text{kPa}^{-1}$)，线性响应达到0.997，同时具有良



$\Delta R/R_0$ —Resistance response value; PU—Polyurethane; SPM—Steps per minute; R_{contact} —Contact resistance between the conductive layer and the interdigital electrode; R_{sponge} —The resistance of the conductive layer itself; $R_{\text{electrode}}$ —Electrode resistance of the printed interdigital electrode

图3 以纤维制品为基体的MXene传感器用于动作监测：(a) 纸基MXene传感器运动监测及透气性比较测试；(b) 纺织品基MXene传感器监测动作；(c) 传感器工作原理示意图^[50-52]

Fig. 3 MXene sensor based on fiber products for motion monitoring: (a) Paper based MXene sensor motion monitoring and comparative permeability testing; (b) Textile-based MXene sensors monitor movement; (c) Schematic diagram of sensor working principle^[50-52]

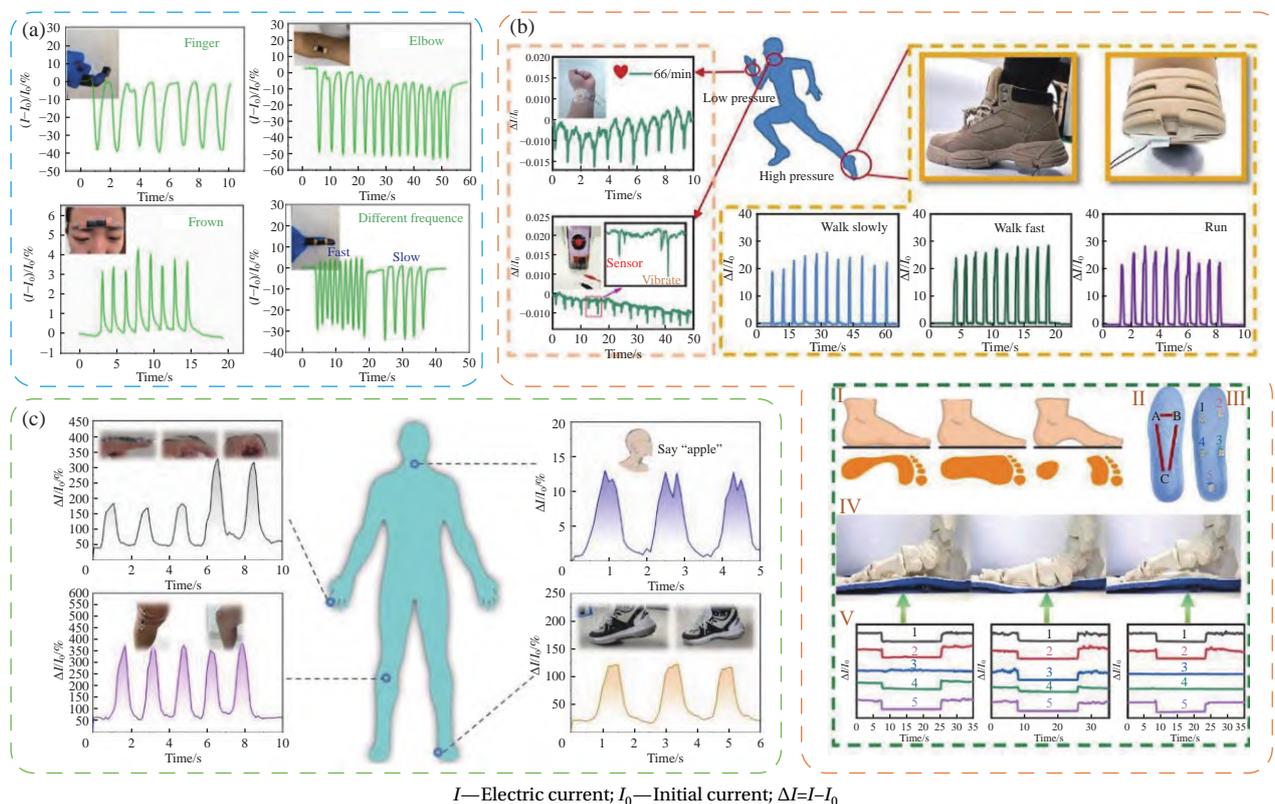
好的低检测限 (1 Pa)、响应速度 (20 ms)、透气性 ($165.6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) 等传感性能。安徽工业大学的李长龙教授和新加坡国立大学的 Tan Swee Ching 教授等^[54]报道了一种以透气织物作为基底的 MXene 基压力传感器。其以无纺布做传感器的基体,通过丝网印刷,在无纺布上印制 MXene 叉指电极。另外在无纺布上喷涂 MXene 和银纳米线 (AgNWs) 作为传感层。该传感器具有多层多孔结构,具有良好的透气性 (607 mm/s),且具有良好的传感性能:灵敏度高 ($770.86\sim 1\,434.89 \text{ kPa}^{-1}$)、传感范围宽 (0~100 kPa)、响应/恢复时间快 (70/81 ms)、检测限低 ($\approx 1 \text{ Pa}$),传感层数的增加会使传感器在受到压缩时产生更大的相对电阻变化,超过初始电流变化的影响,进而提高传感器的灵敏度,该传感器可以检测全尺寸的人体运动,包括脉搏和步行/跑步等。该方法为开发高性能的纺织品传感器提供了重要思路。

柔性运动传感器需要贴敷在皮肤表面进行工作,为了减轻与皮肤长时间接触或暴露在不干净的室内环境引起皮肤刺激和细菌感染,需要传感器具有一定的生物相容性和抗菌性能^[55]。水凝胶具有良好的生物相容性、柔韧性和刺激响应性,且可具备自黏附、自修复、抗紫外、抗菌止血等功能^[56]。MXene 具有显著的抗菌作用,可以被认为是金属基杀菌剂^[57]。例如 Yu 等^[58]开发的一款聚乙烯吡咯烷酮/聚酰胺/MXene (PVP/PA/MXene) 导电水凝胶,经体外细胞测试证明具有良好的生物相容性,可促进脊髓再生用于脊髓损伤修复。因此,使用 MXene 和水凝胶开发具有良好生物相容性和抗菌性能的柔性运动传感器具有巨大的应用前景。燕山大学的焦体峰团队^[59]将明胶加入 MXene 溶液中得到复合预水凝胶,再浸泡入单宁酸的水/甘油溶液中,得到 MXene 复合明胶 (MCG) 有机水凝胶。明胶的加入使得 MXene 纳米片被明胶分子链包裹起来,避免了因 MXene 纳米片的聚集和氧化导致水凝胶性能快速下降。单宁酸的加入使水凝胶内部形成了更多的氢键,进一步稳定了其网络结构,且其所含的儿茶酚基团赋予了 MCG 良好的自黏附性。而甘油可以抑制水的结冰和挥发,提高了 MCG 在低温环境 (-30°C) 和开放环境下的稳定性和耐用性 ($> 7 \text{ d}$)。MCG 复合水凝胶具有高机械强度 (最大应力 1.8 MPa 、最大应变 330%)、良好的环境稳定性、自黏附、生

物可降解和较高的灵敏度 ($\text{GF}=5.66$) 等性能,能够实现监测人体动作和体温 (图 4(a))。这为开发多功能且具备多种实用性能的柔性传感器提供了新的思路。中国科学院福建物质结构研究所的官轮辉团队^[60]通过定向冷冻法制备出 SA/MXene/PDMS 气凝胶。将海藻酸钠 (SA) 粉末和 MXene 溶液混合,经液氮冷冻和冻干后得到 MXene/SA 气凝胶,随后浸入硅树脂溶液中,取出固化得到 SA/MXene/PDMS 气凝胶。SA 与 MXene 之间形成的氢键构成了三维网络结构,聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 包覆在三维网络外层显著提高了结构的力学性能。使用 SA/MXene/PDMS 气凝胶构建的压阻式应变传感器最高灵敏度达到了 37.43 kPa^{-1} ,还具有质轻 ($0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、抗机械疲劳 (6 万次循环)、耐极端环境 ($-40\sim 80^\circ\text{C}$) 等性能特点。在小应变下,气凝胶传感器内片层之间的支撑结构的弯曲导致电导率的增加,而在大应变下,层状结构的互相接触导致电导率的增加,可应用于人体的脉搏监测等人体微小脉动的监测和搭载在鞋垫内实现动作监测和足部姿态监测等大应变监测 (图 4(b))。生物质基水凝胶由于具有良好的生物相容性和刺激响应性,以及丰富的原料来源,因此得到了广泛的研究和应用。Wang 等^[61]在 MXene/Wood 水凝胶中引入 ZnCl_2 作为第三组分。 ZnCl_2 可以诱导纤维素重排,使更多的纤维素纤维及其表面的羟基暴露出来,同时 Zn^{2+} 离子可作为 MXene 的插层剂分散在 MXene 片层之间,通过静电排斥效应增大 MXene 片层间距^[62],抑制其自堆叠。MXene、纤维素和水和 ZnCl_2 之间可形成丰富的氢键网络,使得到的导电复合水凝胶具有良好的机械强度 (抗拉强度 1.44 MPa) 和电导率 ($0.26 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$),另外,水凝胶中的无机盐组分降低了水的饱和蒸汽压和冰点,使得复合水凝胶在 3 d 内及 -20°C 下依然可以正常使用。MXene/Wood 水凝胶具有良好的刺激响应性,组装成的传感器具有良好的灵敏度 (最高 49.7 MPa^{-1}),可用于监测人体运动 (图 4(c))。

1.1.2 具体的运动项目应用

目前的运动监测应用传感器的测试大部分停留在简单的关节往复运动,关于具体的运动项目以及建设全身监测网络的相关研究依然较少。Pu 等^[63]开发了一种 MXene 辅助双功能水凝胶纤维用于人体运动监测。将聚丙烯酸接枝 MXene (MXene-



I —Electric current; I_0 —Initial current; $\Delta I=I-I_0$

图 4 以凝胶为基体的 MXene 传感器用于动作监测: (a) MXene 复合明胶 (MCG) 传感器监测手指、肘部运动; (b) 海藻酸钠/MXene/聚二甲基硅氧烷 (SA/MXene/PDMS) 气凝胶监测足部运动和步态; (c) MXene/Wood 水凝胶监测手指、膝盖运动^[59-61]

Fig. 4 Gel-based MXene sensor for motion monitoring: (a) MXene-composited gelatin (MCG) sensors to monitor finger and elbow movements; (b) Sodium alginate/MXene/pol-ydimethylsiloxane (SA/MXene/PDMS) aerogel monitoring of foot movement and gait; (c) MXene/Wood hydrogel to monitor finger and knee movements^[59-61]

g-PAA) 引入聚丙烯酰胺/壳聚糖 (PAM/CS) 水凝胶网络中得到 MPPC(MXene-g-PAA-PAM/CS) 双功能水凝胶, 可同时作为应变传感器和自供电系统的电解质。MXene-g-PAA 均匀分布在水凝胶网络中提高离子传输速率, 提高了 MPPC 的电导率, 且与水凝胶分子形成氢键, 提高了 MPPC 的力学强度。MPPC 水凝胶通过湿纺制成纤维状并浸泡在 $ZnSO_4$ 溶液中得到自供电水凝胶纤维 (ZIB)。将 ZIB 缠绕在 MPPC 上可组装成自供电传感系统, 具有良好的机械强度 (1.8 MPa)、灵敏度 ($GF=2.4$) 和检测范围 (0%~800%) 等性能, 可实现实时监测人体运动, 并能够搭载在乒乓球拍上检测乒乓球的轨迹和速度。且这种纤维状的水凝胶传感器可以和普通纤维一起编织成衣物^[64], 用于监测人体运动。Bai 等^[65] 针对均匀结构的传感器无法实现对应变方向及不同种类应变的区分这一问题, 提出了一种 Janus 结构的可选方向识别的多功能柔性传感器, 可以实现对定向弯曲、压缩、拉伸的识别。其采用单宁酸 (TA) 修饰的 MXene 作为导

电材料, 以改善 MXene 在基体聚氨酯 (PU) 中的分散性, 同时 MXene 的添加还能显著提高基体的机械强度。利用重力进行自组装, 使 MXene 在聚氨酯中呈层状浓度梯度分布, 这种结构使得传感器可以对定向弯曲、压缩和拉伸做出选择性多功能响应, 以更好地实现对人体动作的监测, 将其佩戴在人体手腕处可以对篮球投篮和乒乓球挥拍的动作进行分析和评估 (图 5(a)), 该工作对体育项目的动作评估以及颈椎等部位的健康监测具有重要应用潜力, 使柔性传感器具有更高的实用价值。在一项由新加坡国立大学和南方科技大学等学校参与的工作中^[66]。研究人员 MXene 复合导电薄膜上构建不同分布和面积的褶皱来改变应变传感器的工作窗口, 以满足对应变范围不同的各个部位的检测需求。将 7 个传感器分布在身体的各个部位, 通过蓝牙直接将信号发出并输入到人工神经网络 (ANN) 模型中进行训练, 使其能够完全准确分类识别出人体全身动作。为了提高数据传输的稳定性, 降低功耗, 将传感器和机器学习 (ML) 芯

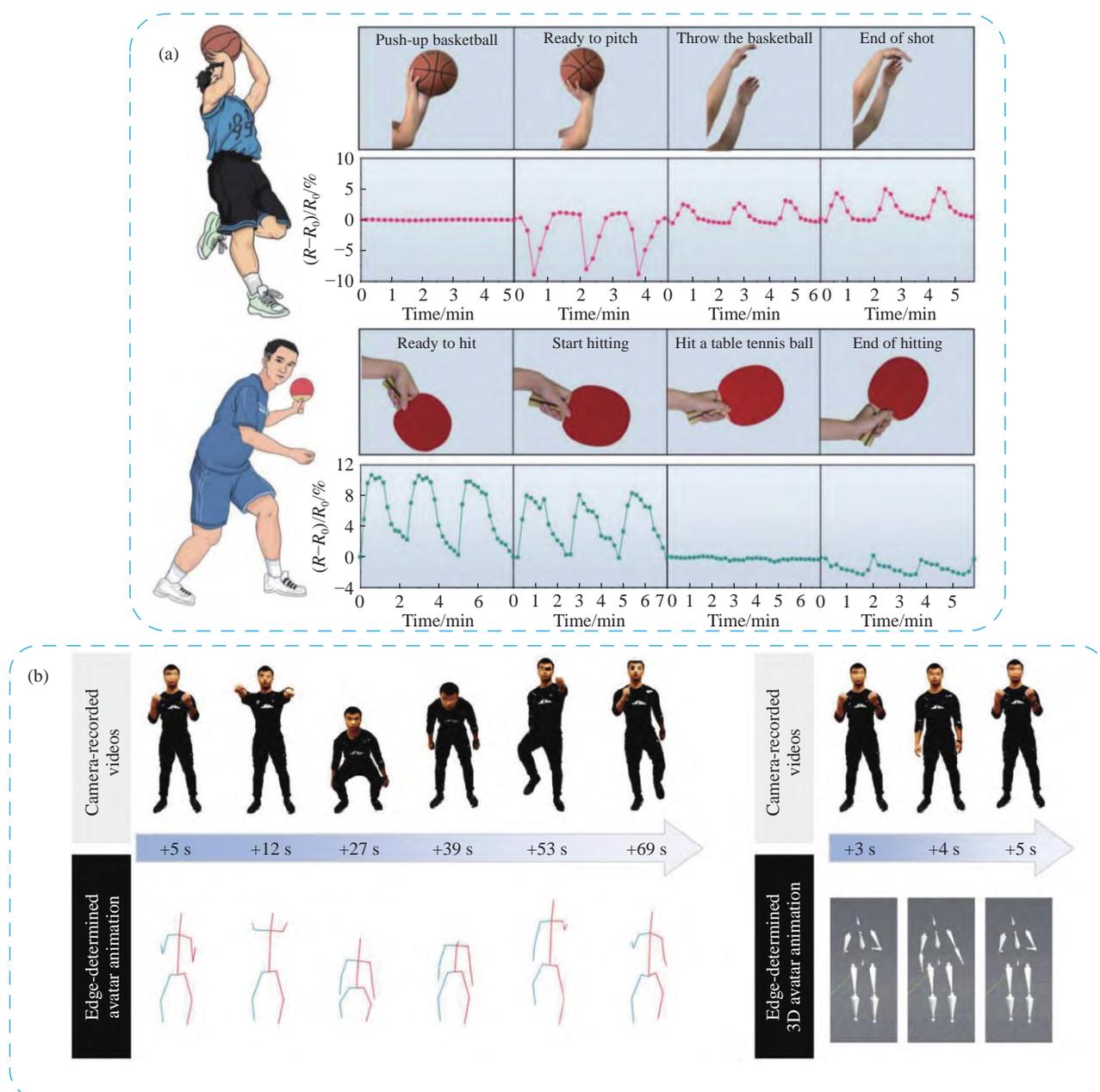


图 5 (a) 传感器监测分析篮球投篮和乒乓球挥拍动作; (b) 利用传感器全身监测数据进行全身化身重建^[65-66]

Fig. 5 (a) Sensor monitoring and analysis of basketball shooting and table tennis swing; (b) Full-body avatar reconstruction using sensor whole-body monitoring data^[65-66]

片集成, 得到边缘传感器模块, 可以在传感器内通过传感器内卷积神经网络 (CNN) 实现重建全身化身模型 (图 5(b)), 实时高精度确定人体 15 个关节的位置, 最终得到棍人虚拟形象动画。这对在体育领域中实现人体运动监测具有重要启发。

1.2 生理状态监测

人体在运动时会出现各种生理信号的变化, 包括电生理信号以及电化学信号, 这些生理信号反映了人体的生理状态, 及时了解自身的身体状

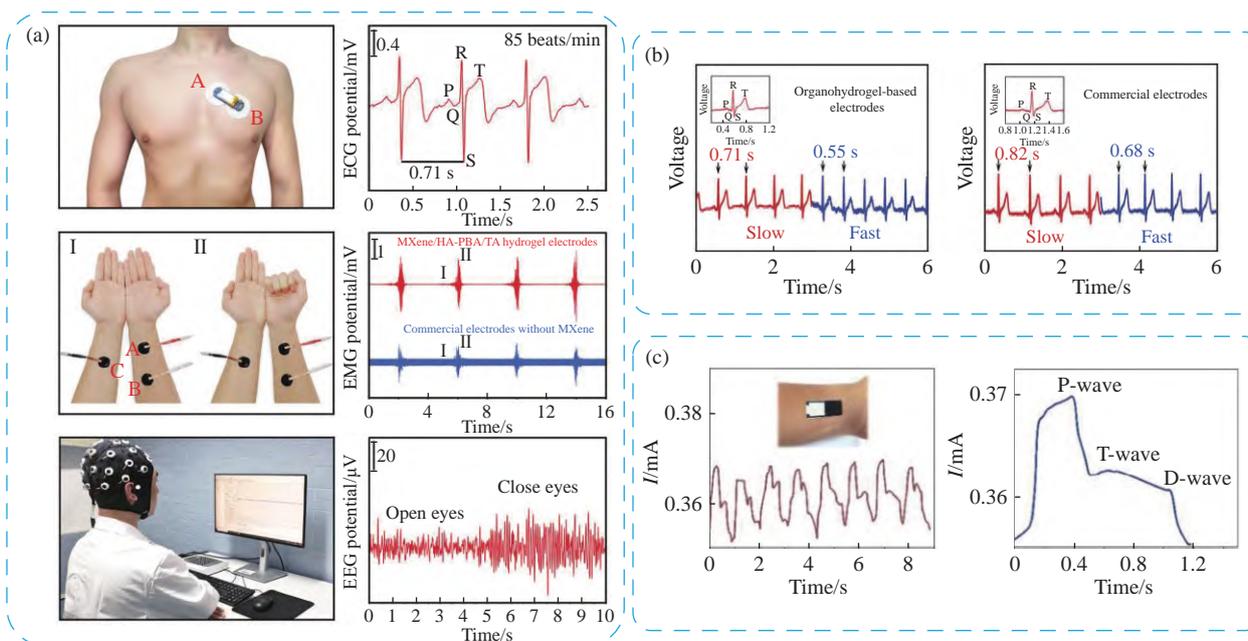
态对运动参与者的身体健康和安全有着重大的意义。

1.2.1 电生理信号

Wang 等^[67] 使用苯硼酸改性的透明质酸 (HA-PBA) 和 TA 作为聚合物水凝胶网络, 以 MXene 作为导电材料制备 MXene/HA-PBA/TA 导电复合水凝胶。将 MXene 加入 HA-PBA 溶液中, 通过界面超分子组装得到 MXene/HA-PBA 超分子组装, 再加入 NaOH 溶液和 TA, 通过 TA 儿茶酚基团与 HA-PBA 中苯硼酸之间的动态硼酸酯键, 以及 HA-

PBA、TA、MXene 之间的界面超分子相互作用, 实现 MXene/HA-PBA/TA 导电复合水凝胶的组装。透明质酸是人体组织细胞外基质的重要组成成分, 具备良好的生物相容性和锁水保湿性能, 使得制得的传感器具有良好的生物相容性和细胞黏附性。且由于水凝胶分子中存在大量可吸收紫外线的苯酚和酮基结构, 使得其具有良好的抗紫外线性能, 具备在室外阳光照射下使用的能力。MXene/HA-PBA/TA 水凝胶传感器, 具有良好的导电性, 可用于监测肌电、心电、脑电等人体表皮的微小电生理信号, 用于运动康复训练(图 6(a))。Liu 等^[68]最近提出了一种新的 MXene 复合凝胶的制备策略, 通过引入具有丰富氢键的 TA 包覆 MXene 纳米片形成 TA@MXene 纳米序列, 在保护 MXene 不被氧化的同时, 还可以与凝胶网络分子间形成大量氢键, 使复合凝胶的力学性能得到明显提升。制得的 TA@MXene/2-丙烯酸-2-乙基己酯 (PHEA) 水凝胶传感器可以作为电极, 将 3 个水凝胶分别作为工作电极、参比电极和接地电极可以监测高重复稳定的心电图信号。另外, 由于 MXene 具有窄

带隙半导体特性、随着温度升高, MXene 的导电性增强, 使得该导电水凝胶可以实现体温监测(图 6(b))。这种制备策略依赖 TA@MXene 和聚合物网络之间的氢键的形成, 因此将 TA@MXene 引入聚丙烯酸 (PAA) 和聚丙烯酰胺 (PAM) 有机水凝胶网络等具有丰富氢键供体或受体的凝胶网络中, 可以获得多种力学性能良好的导电复合凝胶用于柔性电子器件。Li 等^[69]通过无纺布上依次喷涂 MXene 和聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸 (PEDOT:PSS) 得到 MXene/PEDOT:PSS/Nonwoven fabrics (MPF) 传感层, 与 MXene 丝网印刷得到的插指电极组装得到柔性透气的生物相容的三层传感层 (MPF3) 压力传感器。具有高导电性的导电聚合物 PEDOT:PSS 涂层提高了传感层的电导率, 进而提高了传感器的传感性能, 同时能一定程度保护 MXene 不被氧化, 大大提高了传感器的耐用性。该传感器具有较高的灵敏度 (754.5 kPa^{-1}), 能很好地满足监测人体运动的需求。除了能监测人体的肢体运动, MPF3 压力传感器还能精准监测人体的脉搏(图 6(c)), 通过对脉搏波形的分析可得到



P, Q, R, S and T represent peaks in the electrocardiogram signal, with each letter referring to a peak in one cycle of the electrocardiogram

图 6 MXene 基传感器用于电生理信号监测: (a) MXene/苯硼酸接枝透明质酸/天然多酚单宁酸 (HA-PBA/TA) 导电复合水凝胶用于监测心电图、脉搏、脑电; (b) TA@MXene/聚丙烯酸羟乙酯 (PHEA) 水凝胶传感器用于监测心电图信号; (c) MXene/PEDOT:PSS/Nonwoven fabrics (MPF) 压力传感器监测脉搏^[67-69]

Fig. 6 MXene-based sensor for electrophysiological signal monitoring: (a) MXene/Hyaluronic acid-Phenylboronic acid/Tannic acid (MXene/HA-PBA/TA) conductive composite hydrogel for monitoring electrocardiogram (ECG), pulse and electroencephalogram (EEG); (b) TA@MXene/Poly(2-ethylhexyl acrylate) (PHEA) hydrogel sensor for monitoring ECG signals; (c) The MXene/PEDOT:PSS/Nonwoven fabrics (MPF) pressure sensor monitors the pulse^[67-69]

测试者的心率, 径向增强指数 (AIr) 等生理信息, 可用于诊断血管老化和动脉僵硬问题。另外 MPF 可制成测量电极用于心电图 (ECG) 测量, 得到的信号质量甚至可与商用 Ag/AgCl 电极媲美。这种使用 PEDOT:PSS 作为 MXene 涂层制备传感器的制备策略在可穿戴运动监测传感器领域具有广泛应用前景。

1.2.2 电化学信号

人体内产生的液体成分同样反映着人体的生理状态, 目前可通过非侵入式的方式检测人体汗液^[70]、尿液^[71]、唾液^[72]、泪液^[73]等液体的成分, 进而判断人体的生理状态。然而在运动过程中, 将传感器长时间佩戴在眼睛等部位会给佩戴者带来不适, 甚至可能会在剧烈运动时造成伤害。因此通过佩戴在皮肤上的 MXene 基传感器对汗液成分进行实时监测和分析来监测人体状态是更为可行的方案。北京师范大学的刘楠团队^[74]利用浸渍干燥法在无纺布上沉积 MXene, 再滴铸 c-MOF 得到 MXene/c-MOF 电极, 多孔结构的 c-MOF 的加入增加了电极的电化学活跃区域, 降低了阻抗, 提高了信噪比。MXene/c-MOF 电极可以检测汗液中的尿酸 (UA), UA 浓度和响应电流呈现良好的线性关系, 且几乎不受汗液中其他成分的干扰。在电极表面修饰葡萄糖氧化酶 (GOx) 后, 葡萄糖的最终水解产物过氧化氢在电极表面失去电子, 进而检测汗液内葡萄糖的浓度, 葡萄糖浓度和响应电流同样具有良好的线性关系, 且电流信号几乎只受葡萄糖浓度的影响。西安工程大学的刘呈坤团队^[75]通过静电纺丝制备聚乙烯醇纤维 (PVF), 浸泡在 MXene 溶液中后, 再原位聚合 PEDOT:PSS, 得到 PVF/MXene/PEDOT:PSS 纳米纤维束, 在其表面添加乳酸氧化酶 (LOx) 和 Nafion 隔膜, 再将其编织到普通织物中, 可佩戴在人体上进行汗液乳酸检测。乳酸在电极表面氧化生成丙酮酸盐并释放电子, 产生相应电流。乳酸浓度和相应电流呈现良好的线性关系, 且这种检测对乳酸具有特异性, 几乎不受其他成分的影响。通过对汗液中乳酸、葡萄糖等成分的实时监测, 对运动员的科学训练和饮食, 以及广大运动爱好者的健康运动具有重要意义。

1.3 其他功能

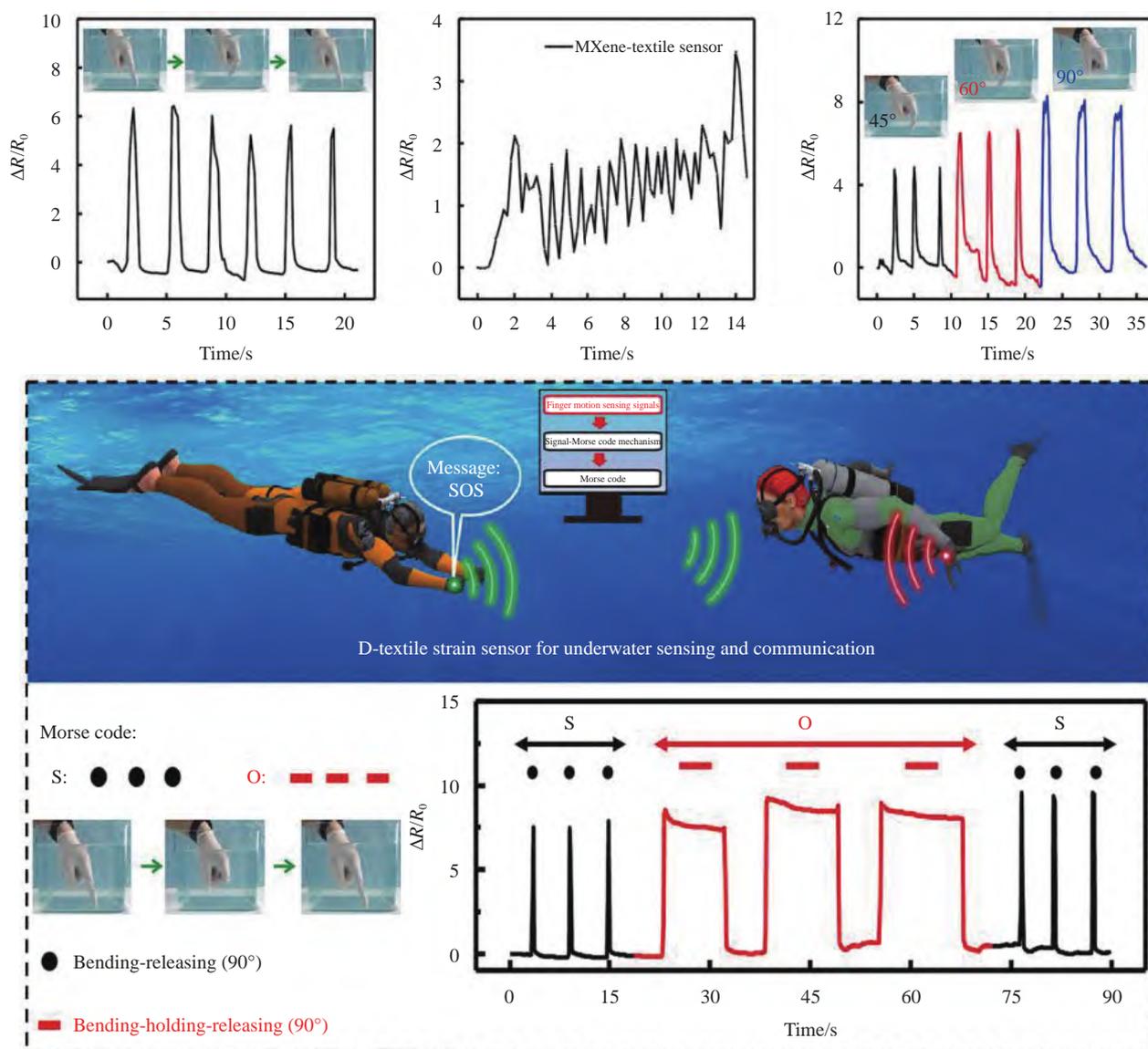
1.3.1 热/电治疗

MXene 是一种出色的光热转换材料, 其内部

光热转换效率近乎达到了 100%, 可以将近红外光辐射转化为热量^[76]。因此可以通过对佩戴部位进行近红外光照射使得传感器升温, 对佩戴者的相关部位进行加热。北京化工大学先进弹性体中心的万鹏博课题组^[77]设计制备了一种柔性透气光热治疗表皮传感器, 在具有优异传感性能的同时, 还利用 MXene 具有良好光热效应的特性, 使得传感器具有良好的光热加热性能, 在功率密度为 0.50 W/cm^{-2} 的近红外光照射下, 传感器可在 60 s 内从室温升至 51°C 。当传感器监测到佩戴者由于腱鞘炎等相关疾病出现关节活动异常时, 可通过加热来缓解相关症状。同时, 通过调节近红外光的功率密度, 可以调节传感器的加热温度。该功能预计可以帮助佩戴者在运动后缓解肌肉的酸痛, 发现并缓解运动者相关部位的病症并辅助治疗, 在运动健康检测和治疗领域具有潜在应用。北京师范大学的刘楠团队^[78]利用草本植物的纤维素框架以及 MXene 在汗液中的离子交联制备 MXene 基表皮电极 (MBE), 具有高透气、轻便和良好的监测信号稳定性, 可用来长期监测人体肌电信号。同时, MBE 在电压作用下可以进行电加热和电脉冲来刺激血液循环, 加速肌肉内乳酸的排除, 缓解肌肉疲劳。这为运动后的肌肉恢复非常有益, 在运动健康领域具有潜在应用。

1.3.2 水下运动防水

由于 MXene 表面带有丰富的亲水基团, 若使用 MXene 作为导电材料的传感器直接暴露在水下环境中^[79], MXene 会快速脱落^[80]导致传感器失效。于是针对游泳、潜水等水下运动, 许多研究人员关于开发具有防水功能的传感器展开了研究。东北大学的青勇权课题组^[81]设计并制作了一种具有协同耦合双导电涂层的超疏水电子纺织品, 其以 MXene 为内部导电涂层, 以硬脂酸 (STA)-TiO₂/十八烷基三氯硅烷 (OTS) 多壁碳纳米管 (MWCNTs)/ γ -氨基丙基三乙氧基硅烷 (KH550)@米糠蜡 (Wax) (STOMKW) 导电层作为外部导电层。该外层涂层可以保护内层 MXene 不被氧化, 同时提供的超疏水表面在各种拉伸状态下均保持较好的疏水性 (接触角 $> 150^\circ$), 可实现在水下进行运动信号监测 (图 7)。扬州大学的高杰峰团队^[82]通过浸渍干燥法在聚多巴胺 (PDA) 改性的聚丙烯弹性体织物上沉积 MXene, 再浸入聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 及其固化剂溶液中, 取出加热固化后得到疏水透

图7 具有超疏水涂层的MXene纺织品用于水下运动监测^[81]Fig. 7 MXene textiles with super hydrophobic coating for underwater motion monitoring^[81]

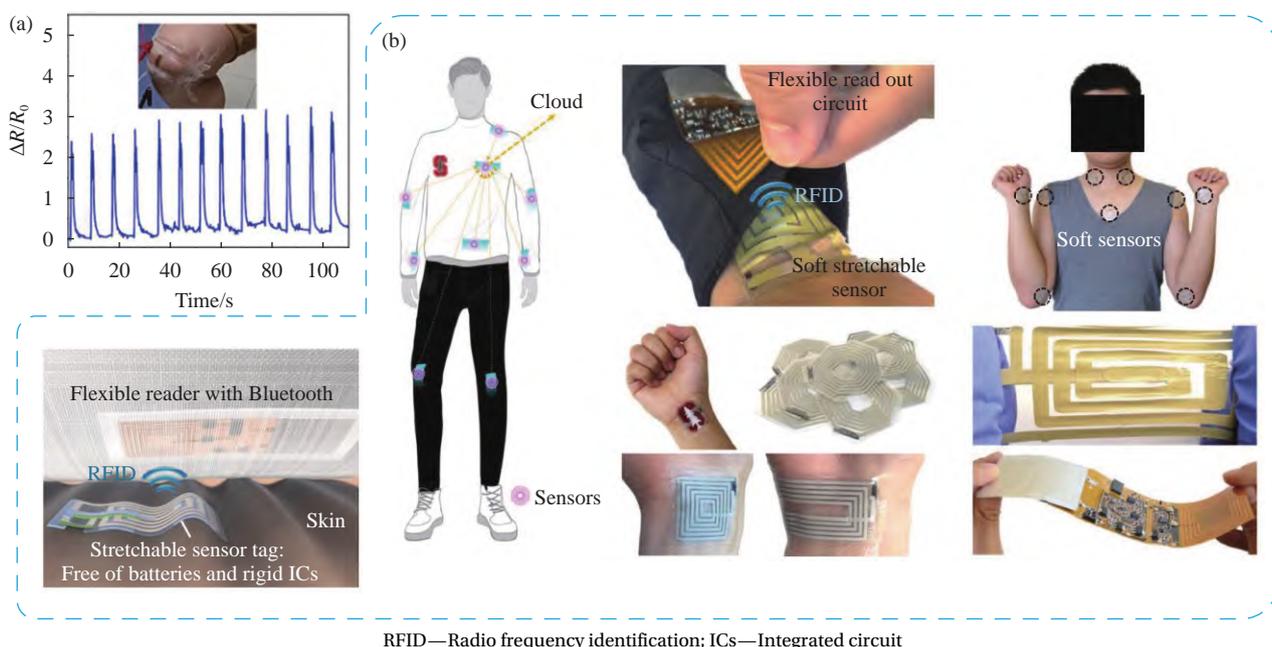
气的MXene基纺织品传感器, PDMS 包覆在MXene表面, 可以保护MXene不被氧化, 同时为传感器提供超疏水性(接触角 $> 140^\circ$)。为水下运动传感器的制备提供了更简便的方案。

2 存在的问题及展望

经过众多研究者的努力, MXene基柔性传感器的各项性能不断提升, 功能不断增多, 在运动健康领域具有广泛的应用前景。然而, 要将MXene基传感器实际应用于运动领域依然有众多困难亟待解决。

MXene暴露在外界环境中会被快速氧化为TiO₂, 使得器件快速失效(图8(a))^[83]。目前在MXene

基传感器中多通过防水涂层来阻止MXene和外界的水和氧气接触, 进而达到抗氧化的目的^[84]。另外通过对MXene进行表面修饰也是一种可行的方法, 华南理工大学沈文浩团队^[85]使用聚多巴胺(PDA)对MXene进行修饰, 使多巴胺(DA)与MXene表面的Ti原子进行配位, PDA与MXene表面的—OH、=O等末端基通过氢键连接。经PDA修饰的MXene能够有效抵御环境氧化, 经60 d室温环境放置, 其电阻没有明显变化。同时经PDA修饰的MXene薄膜内部的MXene纳米片的排列规整度和致密程度得到改善, 使得其电导率和力学性能相比MXene薄膜有了明显提升。MXene的稳定性对器件的长期使用性能具有重要影响, 该问题



RFID—Radio frequency identification; ICs—Integrated circuit

图 8 (a) 使用胶带固定传感器; (b) 一种柔性传感器和刚性硅读出电路完全分离的人体区域传感器网络^[83, 85]

Fig. 8 (a) Use tape to secure the sensor; (b) A human body area sensor network in which flexible sensors and rigid silicon readout circuits are completely separated^[83, 85]

的解决将是 MXene 基传感器迈向实际应用的重要一步。

尽管目前的 MXene 基传感器有着优异的传感性能,且在透气、生物相容性等方面有着明显的进展。然而由于器件本身不能与人体进行紧密贴合,往往在实际测试中需要双面胶等外部辅助工具进行固定^[86],且传感器需要供电、信号发出等设备,使得其在实际使用中依然具有佩戴不便及不舒适的问题。安徽工业大学的李长龙团队^[49]在无织物上通过丝网印刷构建 MXene 基传感器和超级电容器得到自供电传感系统。美国斯坦福大学的鲍哲南团队^[87]设计制备了一种人体区域传感器网络 (bodyNET),实现了柔性传感器和刚性硅读出电路的完全分离。其中,柔性传感器标签完全不包含芯片和电池等刚性组件,其被贴附在人体的不同部位,负责收集人体生理信号。启动器由电线,信号读取器和电池组成并附着在纺织品中。柔性传感器标签和启动器之间没有任何物理连接,二者通过无线射频识别 (RFID) 进行信号传递,同时通过非常规协调 RFID 设计解决应变引起的传感器天线电感和电阻的变化导致的信号改变 (图 8(b))。由于在运动过程中有着较为复杂和剧烈的动作,难以避免会使贴附在皮肤表面的传感器脱落,因此将不同种类的 MXene 基传感器和配

套电子设备集成在运动服装或护具中,构建传感网络,实现全方位监测人体各种运动信号,或许是未来实现传感器应用的一个努力方向。

除此之外,对于信号的采集和分析处理,软件的开发以及产品的标准化等内容,需要广大研究者的共同努力。未来运动员和运动爱好者通过穿戴 MXene 传感器参加运动,通过传感器采集的信号实时了解自身的运动状态,同时大数据和人工智能可对采集的数据进行处理分析,给出合理的运动建议,还可以传输到教练员的终端,便于教练及时掌握运动员或学员的信息。这对提升运动员的成绩,科学训练,以及运动爱好者进行科学运动具有重要意义。

参考文献:

- [1] 崔玉鹏,洪峰. 表面肌电图在人体运动研究中的应用 [J]. 首都体育学院学报, 2005, 17(1): 102-104, 114.
CUI Yupeng, HONG Feng. Application of surface electromyography in the study of human motion [J]. Journal of Capital Physical Education Institute, 2005, 17(1): 102-104, 114(in Chinese).
- [2] 刘晶晶,李峰. 羽毛球运动员表面肌电信号采集与提取仿真 [J]. 信息技术, 2024(1): 128-133, 140.
LIU Jingjing, LI Feng. Simulation of surface EMG acquisition and extraction for badminton players [J]. Information Technology, 2024(1): 128-133, 140(in Chinese).

- [3] WANG Y, DONG D. Effects of muscle strength in different parts of adolescent standing long jump on distance based on surface electromyography[J]. *Frontiers in Physiology*, 2023, 2(14): 1246776.
- [4] CAMOMILLA V, BERGAMINI E, FANTOZZI S, et al. Trends supporting the in-field use of wearable inertial sensors for sport performance evaluation: A systematic review[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 873.
- [5] 崔小雪. 不同等级男子篮球运动员三分投篮技术运动学研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2020.
CUI Xiaoxue. Kinematics study on three-point shooting technique of men's basketball players of different levels [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2020(in Chinese).
- [6] 权俊超. 不同水平体操运动员完成双杠支撑后摆手倒立的技术诊断[D]. 北京: 北京体育大学, 2019.
QUAN Junchao. Technical diagnosis of handstand after parallel bars support for gymnasts at different levels[D]. Beijing: Beijing Sport University, 2019(in Chinese).
- [7] 杨云. 滑雪运动状态智慧监测方法及应用技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
YANG Yun. Research on intelligent monitoring method and application technology of skiing condition[D]. Taiyuan: North University of China, 2022(in Chinese).
- [8] WAN Y, WANG Y, GUO C. Recent progresses on flexible tactile sensors[J]. *Materials Today Physics*, 2017, 1: 61-73.
- [9] 彭军, 李津, 李伟, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(1): 57-62.
PENG Jun, LI Jin, LI Wei, et al. Research status and application of flexible wearable electronic strain sensor[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 48(1): 57-62(in Chinese).
- [10] QIN J, YIN L, HAO Y, et al. Flexible and stretchable capacitive sensors with different microstructures[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(34): 2008267.
- [11] ZENG L, WANG X, WEN Y, et al. Anti-freezing dual-network hydrogels with high-strength, self-adhesive and strain-sensitive for flexible sensors[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 300: 120229.
- [12] LI P, LING Z, LIU X, et al. Nanocomposite hydrogels flexible sensors with functional cellulose nanocrystals for monitoring human motion and lactate in sweat[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466: 143306.
- [13] CHEN S, QI J, FAN S, et al. Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2021, 10(17): 2100116.
- [14] CHEN R, LUO T, WANG J, et al. Nonlinearity synergy: An elegant strategy for realizing high-sensitivity and wide-linear-range pressure sensing[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6641.
- [15] LU C, YU X, CHEN Y, CHEN X, et al. Giant piezoionic effect of ultrathin MXene nanosheets toward highly-sensitive sleep apnea diagnosis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 463: 142523.
- [16] FAN J, YANG R, DU Y, et al. A triboelectric nanogenerator based on MXene/TPU composite films with excellent stretchability for self-powered flexible sensing[J]. *Nano Energy*, 2024, 129: 109999.
- [17] ZHAO C, WANG Y, TANG G, et al. Ionic flexible sensors: Mechanisms, materials, structures, and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(17): 2110417.
- [18] JIN Q, PAN L, WANG Y, et al. Self-adhesive, antifreezing, and high resilience biobased ionogel as a flexible strain-temperature bimodal sensor[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(8): 4798-4807.
- [19] ZHANG H, LI G, WEI H, et al. Advancing rehabilitation: Knittable fiber-shaped sensors for monitoring rotator cuff injury recovery[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 487: 150470.
- [20] LI M, CHEN S, FAN B, et al. Printed flexible strain sensor array for bendable interactive surface[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(34): 2003214.
- [21] ZARZOSO M, MIKHALCHAN A, MOCERINO D, et al. Strain sensing of structural composites by integrated piezoresistive CNT yarn sensors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 286: 111752.
- [22] DING J, QIAO Z, ZHANG Y, et al. NIR-responsive multi-healing HMPAM/dextran/AgNWs hydrogel sensor with recoverable mechanics and conductivity for human-machine interaction[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116686.
- [23] CHAO M, WANG Y, 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.
- [24] WANG Y T, WANG Y H, KUAI Y B, et al. "Visualization" gas—Gas sensors based on high performance novel MXenes Materials[J]. *Small*, 2023, 20(2): 2305250.
- [25] CHEN Y, FU X, JIANG Y, et al. Highly sensitive and durable MXene/SBS nanofiber-based multifunctional sensors via thiol-ene click chemistry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 467: 143408.
- [26] WANG Y, QIN W, YANG M, et al. High linearity, low hysteresis $Ti_3C_2T_x$ MXene/AgNW/liquid metal self-healing strain sensor modulated by dynamic disulfide and hydrogen bonds[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 34(34): 2301587.
- [27] HUSSAIN I, BIBI F, PANDIYARAJAN S, et al. Partially oxidized MXenes for energy storage applications[J]. *Progress in*

- Materials Science, 2025, 147: 101351.
- [28] LI X L, HUANG Z D, SHUCK C E, et al. MXene chemistry, electrochemistry and energy storage applications[J]. Nature Reviews Chemistry, 2022, 6: 389-404.
- [29] CAO W, MA C, TAN S, et al. Ultrathin and flexible CNTs/MXene/cellulose nanofibrils composite paper for electromagnetic interference shielding[J]. Nano-Micro Letters, 2019, 11: 72.
- [30] ANNE B R, KUNDU J, KABIRAZ M K, et al. A review on MXene as promising support materials for oxygen evolution reaction catalysts[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(51): 2306100.
- [31] 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.
- [32] JANICA I, MONTES-GARCÍA V, URBAN F, et al. Covalently functionalized MXenes for highly sensitive humidity sensors[J]. Small, 2023, 7(8): 2201651.
- [33] WEI Y, ZHANG P, SOOMRO R A, et al. Advances in the synthesis of 2D MXenes[J]. Advanced Materials, 2021, 33(39): 2103148.
- [34] JOHNSON D, QIAO Z, UWADIUNOR E, et al. Holdups in nitride MXene's development and limitations in advancing the field of MXene[J]. Small, 2022, 18(17): 2106129.
- [35] 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.
- [36] SHEKHIREV M, SHUCK C E, SARYCHEVA A, et al. Characterization of MXenes at every step, from their precursors to single flakes and assembled films[J]. Progress in Materials Science, 2021, 120: 100757.
- [37] LI X L. Customizing MXenes[J]. Matter, 2023, 6(8): 2519-2522.
- [38] KIM S, KO T Y, JENA A K, et al. Instant self-assembly of functionalized MXenes in organic solvents: General fabrication to high-performance chemical gas sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(11): 2310641.
- [39] YANG Z J, LYU S Y, ZHANG Y Y, et al. Self-assembly 3D porous crumpled MXene spheres as efficient gas and pressure sensing material for transient all-MXene sensors[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14: 56.
- [40] MA Y, CHENG Y, WANG J, et al. Flexible and highly-sensitive pressure sensor based on controllably oxidized MXene[J]. InfoMat, 2022, 4(9): e12328.
- [41] LIAO H, GUO X, WAN P, et al. Conductive MXene nanocomposite organohydrogel for flexible, healable, low-temperature tolerant strain sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(39): 1904507.
- [42] CHANG K, MENG J, GUO M, et al. Flexible and breathable MXene fabrics for highly sensitive human motion monitoring[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145532.
- [43] LAOCHAI T, YUKIRD J, PROMPHET N, et al. Non-invasive electrochemical immunosensor for sweat cortisol based on L-cys/AuNPs/MXene modified thread electrode[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 203: 114039.
- [44] WANG Y, YUE Y, CHENG F, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene-based flexible piezoresistive physical sensors[J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 1734-1758.
- [45] CHEN R, JIA X, ZHOU H, et al. Applications of MXenes in wearable sensing: Advances, challenges, and prospects[J]. Materials Today, 2024, 75: 359-385.
- [46] ZHANG Y, GONG M, WAN P. MXene hydrogel for wearable electronics[J]. Matter, 2021, 4: 513-521.
- [47] CHEN W, LIU L, ZHANG H, et al. Kirigami-inspired highly stretchable, conductive, and hierarchical $Ti_3C_2T_x$ MXene films for efficient electromagnetic interference shielding and pressure sensing[J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 7668-7681.
- [48] CHENG Y, XIE Y, CAO H, et al. High-strength MXene sheets through interlayer hydrogen bonding for self-healing flexible pressure sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 453: 139823.
- [49] ZHENG X, CAO W, HONG X, et al. Versatile electronic textile enabled by a mixed-dimensional assembly strategy[J]. Small, 2023, 19(17): 2208134.
- [50] GUAN M, LIU Y, DU H, et al. Durable, breathable, sweat-resistant, and degradable flexible sensors for human motion detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462(15): 142151.
- [51] WANG J, LIU S, CHEN Z, et al. Ultrasensitive electrospinning fibrous strain sensor with synergistic conductive network for human motion monitoring and human-computer interaction[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 213: 213-222.
- [52] YANG C, WANG W, ZHANG D, et al. High-sensitivity wearable flexible pressure sensor based on MXene and polyaniline for human motion detection[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(12): 10386-10394.
- [53] ZHENG X, ZHOU D, LIU Z, et al. Skin-inspired textile electronics enable ultrasensitive pressure sensing[J]. Small, 2024, 4: 2310032.
- [54] ZHENG X, ZHANG S, ZHOU M, et al. MXene functionalized, highly breathable and sensitive pressure sensors with multi-layered porous structure[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(19): 2214880.
- [55] CHENG H, DEVI R K, HUANG K Y, et al. Highly biocompatible antibacterial hydrogel for wearable sensing of macro and microscale human body motions[J]. Small, 2024,

- 20(37): 2401201.
- [56] HE Q, ZHAO C, CHEN H, et al. Toward next generation wearable sensors based on MXene hydrogels[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(38): 25622-25642.
- [57] RIZI K S. MXene nanosheets as a novel nanomaterial with antimicrobial applications: A literature review[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1262: 132958.
- [58] YU Q N, JIN S C, WANG S C, et al. Injectable, adhesive, self-healing and conductive hydrogels based on MXene nanosheets for spinal cord injury repair[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139252.
- [59] WANG X M, WANG X L, YIN J J, et al. Mechanically robust, degradable and conductive MXene-composited gelatin organohydrogel with environmental stability and self-adhesiveness for multifunctional sensor[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 241(15): 110052.
- [60] HAN S, WU Q, ZHU J, et al. Multifunctional, superelastic, and environmentally stable sodium alginate/MXene/polydimethylsiloxane aerogels for piezoresistive sensor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144551.
- [61] WANG Z, ZHANG X, SHU L, et al. Construction of MXene functionalized wood-based hydrogels using $ZnCl_2$ aqueous solution for flexible electronics[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(19): 10337-10345.
- [62] LIN Z, LIU J, PENG W, et al. Highly stable 3D $Ti_3C_2T_x$ MXene-based foam architectures toward high-performance terahertz radiation shielding[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(2): 2109-2117.
- [63] PU J, GAO Y, GENG Z, et al. Grafted MXene assisted bifunctional hydrogel for stable and highly sensitive self-powered fibrous system[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(24): 2304453.
- [64] SONG J, CHEN S, SUN L, et al. Mechanically and electronically robust transparent organohydrogel fibers[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(8): 1906994.
- [65] BAI J, GU W, BAI Y, et al. Multifunctional flexible sensor based on PU-TA@MXene Janus architecture for selective direction recognition[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(35): 2302847.
- [66] YANG H, LI J, XIAO X, et al. Topographic design in wearable MXene sensors with in-sensor machine learning for full-body avatar reconstruction[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5311.
- [67] WANG W, ZHOU H, XU Z, et al. Flexible conformally bioadhesive MXene hydrogel electronics for machine learning-facilitated human-interactive sensing[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(31): 2401035.
- [68] LIU Y, TIAN G, DU Y, et al. Highly stretchable, low-hysteresis, and adhesive TA@MXene-composited organohydrogels for durable wearable sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(30): 2315813.
- [69] LI Y, CAO W, LIU Z, et al. A personalized electronic textile for ultrasensitive pressure sensing enabled by biocompatible MXene/PEDOT:PSS composite[J]. *Carbon Energy*, 2024, 6(3): e530.
- [70] LI M, WANG L, LIU R, et al. A highly integrated sensing paper for wearable electrochemical sweat analysis[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2021, 174: 112828.
- [71] ZHANG J, MA Y, HAN Y, et al. 3D porous structure assembled from MXene via breath figure method for electrochemical detection of dopamine[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139454.
- [72] LI Z, WANG P, LIANG Z, et al. Cu NCs@MXene-luminescent Faraday cage and Cu nanocone/Bi NPs array-based saliva exosome assay for asthma evaluation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152650.
- [73] GUO S, WU K, LI C, et al. Integrated contact lens sensor system based on multifunctional ultrathin MoS_2 transistors[J]. *Matter*, 2021, 4(3): 969-985.
- [74] LIN X, SONG D, SHAO T, et al. A multifunctional biosensor via MXene assisted by conductive metal-organic framework for healthcare monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(11): 2311637.
- [75] SHEN Y, CHAI S, ZHANG Q, et al. PVF composite conductive nanofibers-based organic electrochemical transistors for lactate detection in human sweat[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146008.
- [76] LI R, ZHANG L, SHI L, et al. MXene Ti_3C_2 : An effective 2D light-to-heat conversion material[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(4): 3752-3759.
- [77] CHAO M, DI P, YUAN Y, et al. Flexible breathable photo-thermal-therapy epidermic sensor with MXene for ultrasensitive wearable human-machine interaction[J]. *Nano Energy*, 2023, 108(4): 108201.
- [78] SONG D, YE G, ZHAO Y, et al. An all-in-one, bioderived, air-permeable, and sweat-stable MXene epidermal electrode for muscle theranostics[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(10): 17168-17178.
- [79] WANG Q, HUANG X, HAN F, et al. Superhydrophobic, biocompatible and durable nanofiber composite with an asymmetric structure for anisotropic strain sensing and body motion detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 137899.
- [80] DAI Z, DING S, LEI M, et al. A superhydrophobic and anti-corrosion strain sensor for robust underwater applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(27): 15282-15293.
- [81] MA J, QING Y, SONG H, et al. Synergistically coupled

- double conductive coating-based electronic textiles with superhydrophobic and high-performance strain sensing properties for underwater human motion sensing applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144284.
- [82] LUO J, GAO S, LUO H, et al. Superhydrophobic and breathable smart MXene-based textile for multifunctional wearable sensing electronics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 126898.
- [83] CAO W, NIE J, CAO Y, et al. A review of how to improve $Ti_3C_2T_x$ MXene stability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154097.
- [84] BU Y, SHEN T, YANG W, et al. Ultrasensitive strain sensor based on superhydrophobic microcracked conductive $Ti_3C_2T_x$ MXene/paper for human-motion monitoring and E-skin[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(8): 1849-1857.
- [85] HAN M M, SHEN W H, CORRIOU J P. Polydopamine-modified MXene/cellulose nanofibers composite film for self-powered humidity sensing and humidity actuating[J]. *Nano Energy*, 2024, 123: 109445.
- [86] ZHANG L, ZHANG X, ZHANG H, et al. Semi-embedded robust MXene/AgNW sensor with self-healing, high sensitivity and a wide range for motion detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 434: 134751.
- [87] NIU S M, MATSUHISA N, BEKER L, et al. A wireless body area sensor network based on stretchable passive tags[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2: 361-368.