

高灵敏度 MXene 基纤维传感器的制备及性能

宋理阳, 韩玮屹, 彭 军, 王潮霞*

(江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 以热塑性聚氨酯 (TPU) 为基底、原位氢氟酸刻蚀法制备的过渡金属碳化物/氮化物 (MXene) 纳米片为导电材料, 经湿法纺丝技术制得了 MXene-TPU 导电纤维 (MTF)。采用 SEM、EDS、TGA 对其进行了表征, 测试了其电导率、力学性能、拉伸应变传感性能, 评价了其在人体运动检测中的应用。结果表明, 在 TPU 内部建立的 MXene 导电网络赋予了 MTF 高应变灵敏系数 (在 120% 应变下灵敏系数为 2930)。MXene 的引入提高了 MTF 的热稳定性, 其热分解温度从聚氨酯纤维 (TF) 的 360 °C 提高到 400 °C; MXene 在纤维表面及内部形成的连续导电通路赋予纤维良好的导电性 (电导率为 141.54 S/m); MXene 也增强了 MTF 纤维的模量, MXene 理论负载量为 21.74% 的 MTF 样品 (MTF₂) 应变 50% 时的应力 (σ_{50}) 比 TF 增大了 1.3 倍, 具备一定的拉伸应变恢复性; MTF₂ 通过电阻变化率的不同来表达人体关节运动形式, 可用于人体运动监测。

关键词: MXene; 聚氨酯; 导电纤维; 柔性传感器; 灵敏度; 功能材料

中图分类号: TQ342; TP212; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2024) 10-2158-06

Preparation and performance of highly sensitive MXene-based fiber sensors

SONG Liyang, HAN Weiyi, PENG Jun, WANG Chaoxia*

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: MXene-TPU conductive fiber (MTF) was synthesized *via* wet spinning using thermoplastic polyurethane (TPU) as substrate and transition metal carbides/nitrides (MXene) nanosheets, prepared through an *in-situ* hydrofluoric acid etching process, as conductive material, and characterized by SEM, EDS and TGA. Its electrical conductivity, mechanical properties and tensile strain sensing properties were analyzed, followed by evaluation on its application in human motion detection. The results demonstrated that the MXene conductive network built inside the TPU led to a high strain sensitivity coefficient (2930 at 120% strain) for MTF, improved the thermal stability of MTF, with its thermal decomposition temperature increased from 360 °C of polyurethane fiber (TF) to 400 °C, gave rise to good conductivity *via* the continuous conductive pathway formed by MXene on the surface and inside of the fiber (conductivity of 141.54 S/m), and enhanced the modulus of MTF, with the stress strain (σ_{50}) at a theoretical load of 21.74% MXene (MTF₂) at 50% 1.3 times higher than that of TF. MTF₂ exhibited a certain tensile strain recovery and could be used for human motion monitoring by expressing different resistance change rates to correspond to human joint motion forms.

Key words: MXene; polyurethane; conductive fibers; flexible sensors; gauge factor; functional materials

柔性可穿戴应变传感器在软体机器人^[1-2]、人体运动监测^[3-4]和健康监护^[5-6]等诸多领域应用广泛。传统的应变传感器通常是由金属以及半导体材料构成, 柔性和可拉伸性能较差, 极大地限制了其在智能可穿戴领域的应用^[7]。纤维基应变传感器不仅具

有质轻^[8]、易制备^[9-10]、耐用^[11-12]、可洗涤^[13]和柔软舒适^[14]等特点, 而且具有良好的植入性能, 例如: 可嵌入到其他织物中或编织到智能可穿戴纺织品中^[15-16], 具有广阔的应用前景。

纤维基应变传感器应具有较高的灵敏度和可拉

收稿日期: 2023-11-08; 定用日期: 2023-12-13; DOI: 10.13550/j.jxhg.20230954

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21975107)

作者简介: 宋理阳 (1999—), 男, 硕士生, E-mail: 946539942@qq.com。联系人: 王潮霞 (1969—), 女, 教授, E-mail: wchaoxia@sohu.com。

伸性才能满足智能可穿戴纺织品的性能需求。为了提高纤维基应变传感器的可拉伸性能, ZHANG 等^[17]采用静电纺丝法制备了银纳米线/MXene (过渡金属碳化物/氮化物) 螺旋导电纱, 通过超捻的方式赋予纱线层次螺旋结构, 纺织的纱线断裂伸长率可达 1850%, 在 600%~1000% 应变范围内灵敏系数 (GF) 稳定在 1.7。ZHAO 等^[18]通过湿法纺丝技术制备了 MXene/碳纳米管复合纤维, 该纤维具有高拉伸强度 (161 MPa) 和优异的导电性能 (1715 S/cm), 可编织为储能纺织品。为了提高微小形变的响应灵敏度, QU 等^[19]通过同轴湿法纺丝技术制备了裂纹型碳纳米管/聚氨酯芯鞘纤维, 并探究了其在手语翻译方向应用的潜力, 发现纤维基应变传感器灵敏系数因为裂纹结构而提高。CHENG 等^[20]提出了一种制备聚乙烯醇/水性聚氨酯 (PVA/WPU) /MXene 复合纤维应变传感器的简便方法, 但该复合纤维的性能相对较差, GF 只有 5.61, 断裂伸长率仅为 358%。可见, “权衡” 纤维基应变传感器的可拉伸性、灵敏度和导电性仍是不小的挑战。

为了兼顾柔性可穿戴应变传感器的拉伸性能与导电性能, 本文拟以热塑性聚氨酯 (TPU) 为基底, 采用原位氢氟酸刻蚀法^[21]制备高导电的 MXene 纳米片为导电材料, 然后经湿法纺丝技术制得 MXene-TPU 导电纤维 (MTF)。通过在聚氨酯弹性体内部建立 MXene 导电网络, 希望获得较高的应变灵敏系数和较宽的传感范围。并探究 MXene 负载量对纤维导电性以及在不同拉伸应变状态下传感性能的影响, 拓展其智能可穿戴应用范围, 旨在为高性能柔性应变传感器的制备提供一种新的方法和思路。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

TPU, 工业级, 巴斯夫聚氨酯 (中国) 有限公司; 二甲基亚砜 (DMSO, 化学纯)、盐酸 (质量分数 36%)、无水乙醇, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 氟化锂, 优级纯, 上海泰坦科技股份有限公司; Ti_3AlC_2 (MAX 相), 分析纯, 吉林一一科技有限公司; 实验用水均为自制去离子水。

8846A 型数显万用表, 美国 Fluke 公司; SU8100 型场发射扫描电子显微镜 (SEM), 日本 Hitachi 公司; EDAX Octane Elect Super 型能量色散分析仪 (EDS), 美国 Ametek 公司; CHI760E 型电化学工作站, 上海辰华 (CHI) 仪器有限公司; ESM303 型电动拉伸/压缩试验台, 美国 MARK-10 公司; CTM2050 型微机控制电子万能材料试验机, 协强仪

器制造 (上海) 有限公司; Q500 型热重分析仪 (TGA), 美国 TA 公司; FD-1A-50 型冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; TG16-WS 型台式高速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.2 制备方法

1.2.1 MXene 粉末的制备

室温下, 将 2 g 氟化锂加入装有 40 mL 浓度为 9 mol/L 的盐酸的聚四氟烧杯中搅拌 (400 r/min) 30 min, 再加入 2 g 的 Ti_3AlC_2 (MAX 相), 升温到 35 °C 持续搅拌 (400 r/min) 24 h 后, 将混合物离心分离 (10000 r/min, 10 min), 收集沉淀, 加入 40 mL 去离子水洗涤, 混合均匀后再次离心分离 (10000 r/min, 10 min); 重复离心分离、收集沉淀、洗涤步骤, 直到离心分离后的上清液 pH 为 6。将沉淀加入 40 mL 无水乙醇中超声 (750 W) 处理 2 h, 离心分离 (10000 r/min) 10 min 后收集沉淀。沉淀中加入 20 mL 去离子水, 摇匀, 3500 r/min 离心分离 3 min, 获得黑棕色 MXene 上清液。将得到的 MXene 分散液于 -60 °C 下冷冻干燥 72 h, 得到黑色 MXene 固体粉末。

1.2.2 TPU 纤维的制备

室温下, 将 0.40 g 的 TPU 加入到 3.60 g 的 DMSO 中, 升温到 45 °C 搅拌 (400 r/min) 5 h 得到质量分数为 10% 的 TPU 纺丝液。用 10 mL 注射器吸入 TPU 纺丝液, 以 50.00 mL/h 的流速从喷丝头 (内径为 0.62 mm) 喷入装有去离子水的凝固浴 (室温) 中形成凝胶态聚氨酯纤维, 12 h 后将其从凝固浴中取出, 置于室温下通风处晾干, 制得 TPU 纤维, 记为 TF。

1.2.3 MXene-TPU 导电纤维的制备

室温下, 将 0.05、0.10、0.15、0.20 g 的 MXene 粉末分别加入 3.60 g 的 DMSO 中超声 (750 W) 分散 1 h; 将 0.40 g 的 TPU 加入到上述含有 MXene 的 DMSO 分散液中, 于 45 °C 下搅拌 (400 r/min) 5 h, 得到 MXene-TPU 纺丝液。其纺丝制备纤维过程同 1.2.2 节, 制得 MXene-TPU 导电纤维, 分别记为 MTF₁、MTF₂、MTF₃、MTF₄。根据公式 (1) 计算得到 MXene 理论负载量分别为 12.20%、21.74%、29.41%、35.71%。

$$\text{MXene理论负载量}/\% = \frac{\text{MXene质量浓度}}{\text{MXene质量浓度} + \text{TPU质量浓度}} \quad (1)$$

除特别指定说明外, 文中 MTF 为 MTF₁、MTF₂、MTF₃、MTF₄ 的统一名称。

1.3 结构表征与性能测试

SEM 表征: 加速电压 5 kV, 发射电流 10 μA。采用能量色散分析仪测定纤维表面及内部的元素分布。

TGA 测试: MTF 样品约 5 mg, 温度范围为 30~700 °C, 升温速率 20 °C/min, 以 20 mL/min 流速的氮气为保护气体, 测定 TF 和 MTF 经高温处理后的剩余质量。

力学性能测试: 采用微机控制电子万能材料试验机测试 TF 和 MTF 的应力-应变曲线, 测试拉伸速率为 50 mm/min, 模式选择非金属材料模式, 并输入样品横截面直径等参数。

导电性能测试: 采用数字万用表将接触测量笔放在纤维样品两端读取并记录纤维样品在一段时间内的电阻值, 取其平均值。用公式 (2) 计算 MTF 的电导率 (δ)。

$$\delta = L/(R \cdot S) \quad (2)$$

式中: δ 为电导率, S/m; L 为测试的导电纤维长度, m; R 为测试的电阻, Ω ; S 为纤维的截面面积, m^2 。

拉伸应变传感性能测试: 采用电化学工作站测

试在拉伸应变下样品电阻变化情况, 电流-时间曲线 ($I-t$ 曲线) 模式, 电压 1 V。用电动拉伸/压缩试验台对样品进行拉伸, 拉伸速率为 20 mm/min, 最低拉伸极限为 0 mm, 最高拉伸极限依据所加持的样品原长进行设定。根据公式 (3) 计算 MTF 的 GF。

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: GF 为应变灵敏系数; ΔR 为电阻变化量, Ω ; R_0 为未受应变时的电阻值, Ω ; ε 为应变变化率, %。

人体运动监测: 将 MTF 分别贴附于手指、手腕上, 测试者做手指、手腕下弯动作, 采用电化学工作站记录 MTF 在不同动作时电流的变化。电流 (I) - 时间 (t) 曲线模式, 电压 1 V。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌及结构分析

图 1 为 TF 和 MTF₂ 表面及截面 SEM 图。

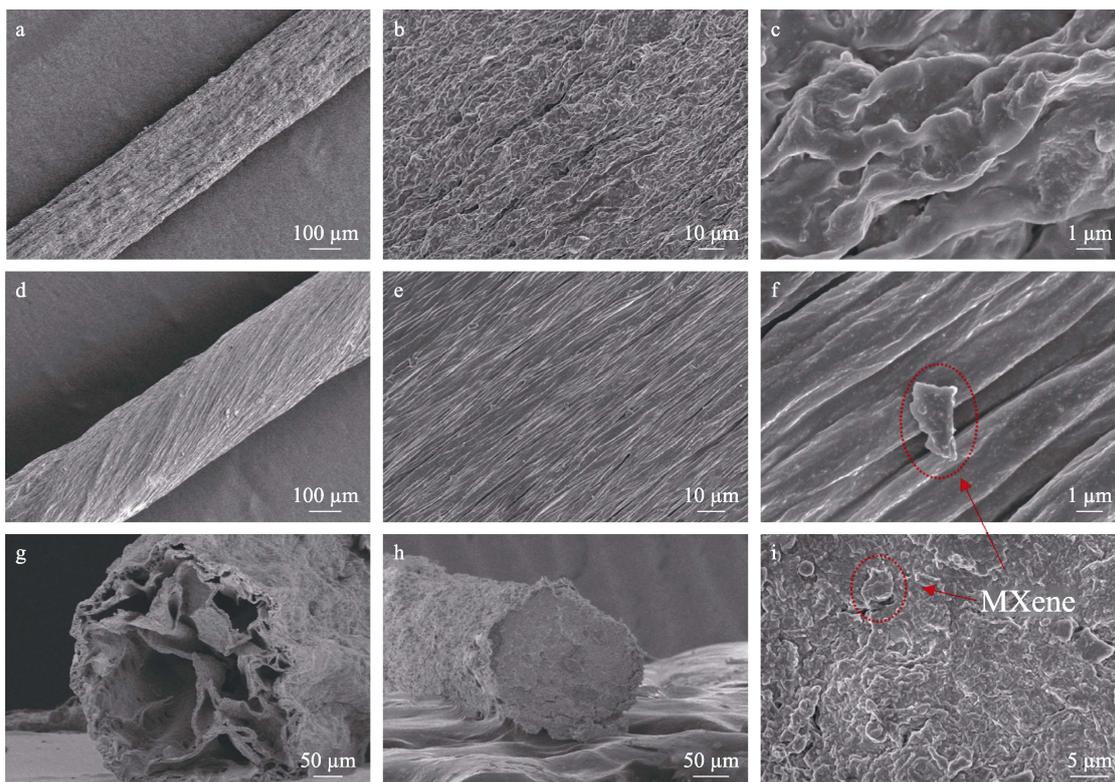


图 1 不同放大倍数下, TF (a、b、c) 和 MTF₂ (d、e、f) 的表面 SEM 图及 TF (g) 和 MTF₂ (h、i) 的截面 SEM 图
Fig. 1 Surface SEM images of TF (a, b, c) and MTF₂ (d, e, f) as well as cross-sectional SEM images of TF (g) and MTF₂ (h, i) at different magnifications

从图 1 可以看出, TF (图 1a~c) 和 MTF₂ (图 1d~f) 的表面形貌呈现出沿纤维轴向紧密排列的褶皱条纹, 这是 TPU 分子链在相分离过程中受到重力作用拉伸的结果^[22]。TF 的横截面 (图 1g) 呈不规则形状且存在孔隙, 而 MTF₂ 则具有相对圆形的横截面 (图 1h)。这是因为, 纤维截面的形状主要是

由纺丝液的凝固速率决定的, 纺丝液注入去离子水后, 溶剂 DMSO 在去离子水中快速扩散, 导致纤维快速凝固, TF 形成不规则的纤维表面形态。引入 MXene 后, 纺丝液中的 MXene 在极性溶剂 DMSO 中具有高分散性^[23], 会促进去离子水向纤维中扩散, 于是 MTF₂ 产生更多的圆形纤维^[24]。图 1e、f、i 表

明, 在 MTF₂ 的表面和截面上铺满了片层间接触密集的 MXene, 这会形成良好的导电通路并赋予纤维较好的导电能力。

MXene 在 MTF 的分布会影响纤维导电性。图 2 为 MTF₂ 的表面、截面 EDS 谱图。从图 2 可以观察到, 在纤维的表面与内部均存在致密分布的 Ti 元素, 表明 MXene 较为均匀地附着在纤维的表面和内部。

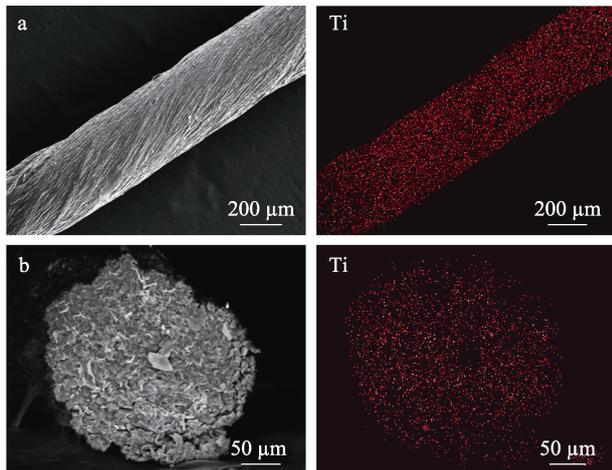


图 2 MTF₂ 的表面 (a) 和截面 (b) EDS 谱图

Fig. 2 Surface (a) and cross-sectional (b) EDS spectra of MTF₂

2.2 导电性能分析

图 3 为 MTF 电导率的测定结果。

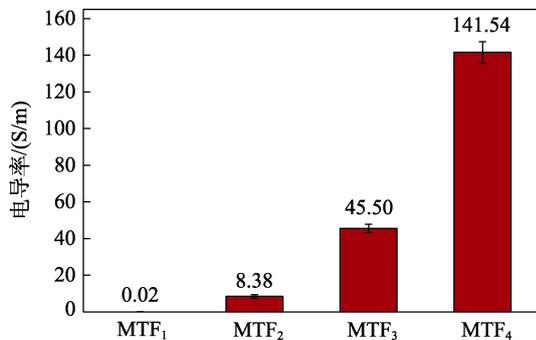


图 3 MTF 的电导率

Fig. 3 Conductivity of MTF

从图 3 可以看出, MTF 的电导率随 MXene 负载量的增加而迅速增加, MTF₁~MTF₄ 的电导率分别为 0.02、8.38、45.50 和 141.54 S/m。这可归因于纤维内部 MXene 含量的提高, 导致 MXene 片层之间的接触更加紧密, 促进更多、更完整的导电网络的形成, 从而迅速提高了 MTF 的电导率。

图 4 为 TF 和 MTF 的热重分析曲线。

从图 4 可以看出, 所有样品均呈现两个阶段的热分解过程, 分别由多异氰酸酯和多元醇的降解造成的。第 1 阶段 (TF, 250~300 °C; MTF, 250~320 °C) 的质量损失与 TPU 中氨酯键的降解有关,

并伴随着二异氰酸酯和二醇的形成以及 CO₂ 的释放; 第 2 阶段 (TF, 300~550 °C; MTF, 320~550 °C) 的质量损失归因于 TPU 软段的热解, 多元醇链段热解产生复杂的小分子混合物。TF 的最大热分解温度为 360 °C; 将 MXene 引入 TPU 后, MTF 的最大热分解温度升高至 400 °C, 这表明 MXene 的引入提高了 MTF 的热稳定性。MTF 中 MXene 实际负载量为 700 °C 时 MTF 质量保留率与 TF 质量保留率的差值, 经测定, MTF₁、MTF₂、MTF₃ 和 MTF₄ 的 MXene 实际负载量分别为 11.31%、18.69%、26.32%、33.90%。结果表明, 样品的实际 MXene 负载量与理论负载量 (12.20%、21.74%、29.41%、35.71%) 相差无几。

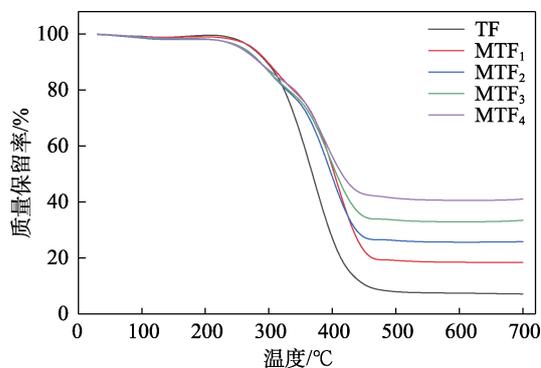


图 4 TF 和 MTF 的热重分析曲线

Fig. 4 Thermogravimetric analysis curves of TF and MTF

2.3 力学性能分析

图 5 为 TF 和 MTF 力学性能测试结果。

从图 5 可以看出, 随着 MXene 负载量的逐步增大, MTF 的拉伸强度和断裂伸长率都逐渐降低, 分别从 MXene 负载量为 0 (TF) 的 30.03 MPa、1387% 降低至 MXene 理论负载量为 35.71% (MTF₄) 的 11.83 MPa、21%。这是因为, 引入刚度明显高于 TPU 的 MXene 填料后, 明显降低了纤维整体的韧性, 导致纤维在受力时更容易断裂而不是发生塑性变形, 从而降低了纤维的断裂伸长率。同时, 高刚度的 MXene 会与 TPU 分子交联网络形成桥接作用, 导致更加有效的应力传递, 将显著提升 MTF 的模量。为了量化模量增强的幅度, 计算了 TF 和 MTF 在 50% 应变时的应力 (σ_{50})。当 MXene 的理论负载量从 0 (TF) 增大到 21.74% (MTF₂) 时, MTF 的 σ_{50} 增大了 1.3 倍。在纤维受到有限拉伸 (<100%) 的大多数实际应用中, 这种模量的强化都是有利的。MTF₂ 的电导率为 8.38 S/m, 拉伸强度为 19.68 MPa, 断裂伸长率为 664%, 综合考虑弹性、强力和导电性的性能数据, 以下文中除特殊说明外, 均采用 MXene 理论负载量为 21.74% 的 MTF₂ 进行表征与测试。

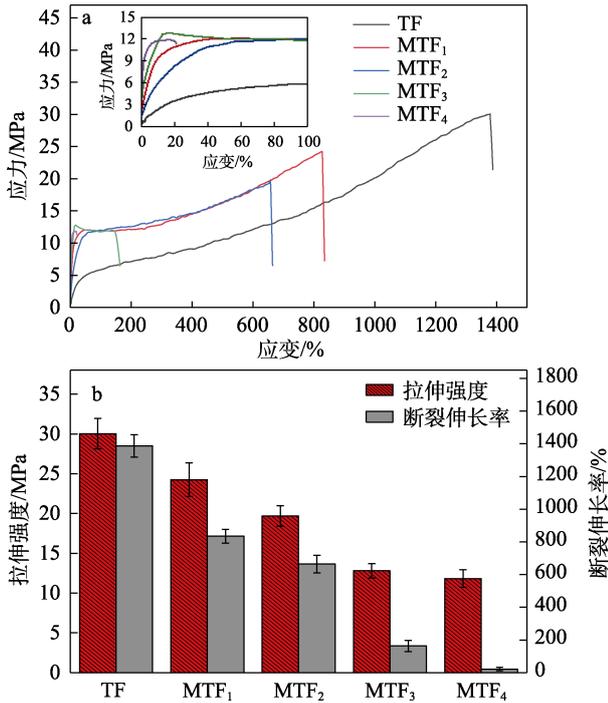


图 5 MTF 的应力-应变曲线 (a); MXene 负载量对 MTF 的拉伸强度和断裂伸长率的影响 (b)

Fig. 5 Stress-strain curves of MTF (a); Effect of MXene loading on tensile strength and elongation at break of MTF (b)

2.4 拉伸应变传感性能分析

图 6 为 MTF 的拉伸电阻变化率 ($\Delta R/R_0$) 以及 MTF₂ 在不同拉伸应变下的电阻变化率测试结果。

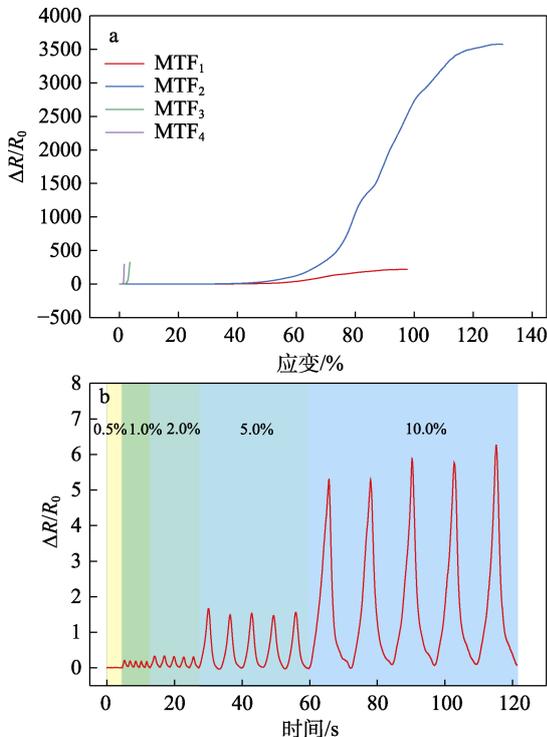


图 6 MTF 的拉伸电阻变化率 (a) 和 MTF₂ 在不同拉伸应变下的电阻变化率 (b)

Fig. 6 Change rate of tensile resistance of MTF (a) and resistance change rate of MTF₂ at different tensile strains (b)

从图 6 可以看出, MTF 的 $\Delta R/R_0$ 随着应变的增加而增加 (图 6a), 表明 MTF 具有应变传感行为。对 MTF 的灵敏系数进行测试, MTF₁ 在 100%应变下的灵敏系数为 220。MTF₂ 在 120%应变下的灵敏系数为 2930 (50%应变下的灵敏系数为 84), 此时其达到最大检测值, 电阻不再随应变的增大而增大, 因此, MTF₂ 作为应变传感器的传感范围为 120%。而 MTF₃ 和 MTF₄ 由于 MXene 的大量引入导致纤维失去了几乎全部的弹性和大部分强力, 已无法满足应变传感测试的性能需求。MTF₂ 具有较高的灵敏系数可归因于其具备高弹性(图 5)和高导电性(图 3), 这两者的组合为其应变传感性能提供了有力保障。MTF₂ 的 ($\Delta R/R_0$) 与施加的拉伸应变呈正相关性(图 6b), 随着拉伸应变由 0.5% 增加至 10.0%, 电阻变化率相应由 0.01 增加至 6.26。在不同拉伸应变时, 电阻变化率基本稳定在某一特定值, 可以将拉伸应变信号稳定转换为电阻变化的电信号。同时, 在拉伸应变恢复后, MTF₂ 可以恢复到拉伸前初始的电阻状态, 具备一定可恢复性。

图 7 为 MTF₂ 在 10% 拉伸应变下循环 800 次的稳定性测试结果。拉伸应变可靠性与耐久性评估拉伸应变传感应用的重要因素。从图 7 可以看出, 在 800 次拉伸循环中, MTF₂ 在循环拉伸-恢复的前期电阻变化率差异不大, 而随着拉伸次数增加至 200 次后, 电阻变化率呈现逐步增大的趋势。这是由于 MTF₂ 在多次拉伸应变的情况下, 存在拉伸疲劳现象, 自身恢复性变差导致原始导电通路不连续, 纤维电阻增加。

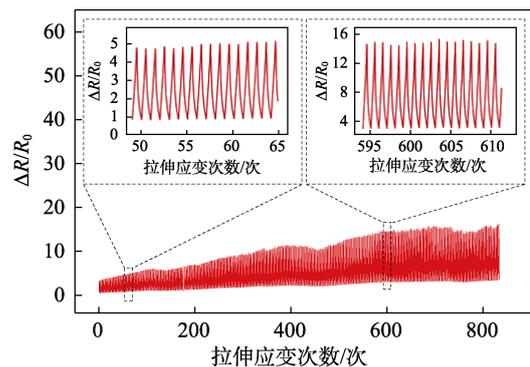


图 7 MTF₂ 在 800 次 10% 应变下循环拉伸的稳定性
Fig. 7 Stability of MTF₂ under 800 cycles of 10% cyclic stretching

2.5 人体运动监测应用分析

图 8 为 MTF₂ 对人体关节运动的响应检测结果。从图 8 可以看出, 在人体关节进行同幅度弯曲与恢复时, 可以观察到电阻的变化率呈现出周期波形趋势, 且每次弯曲与恢复所对应的电阻变化率曲线基本相同, 说明 MTF₂ 可通过电阻变化率的不同

来表达人体关节运动形式,两者之间建立了一定相关性。表明 MTF₂ 在人体运动监测领域具有应用潜力。

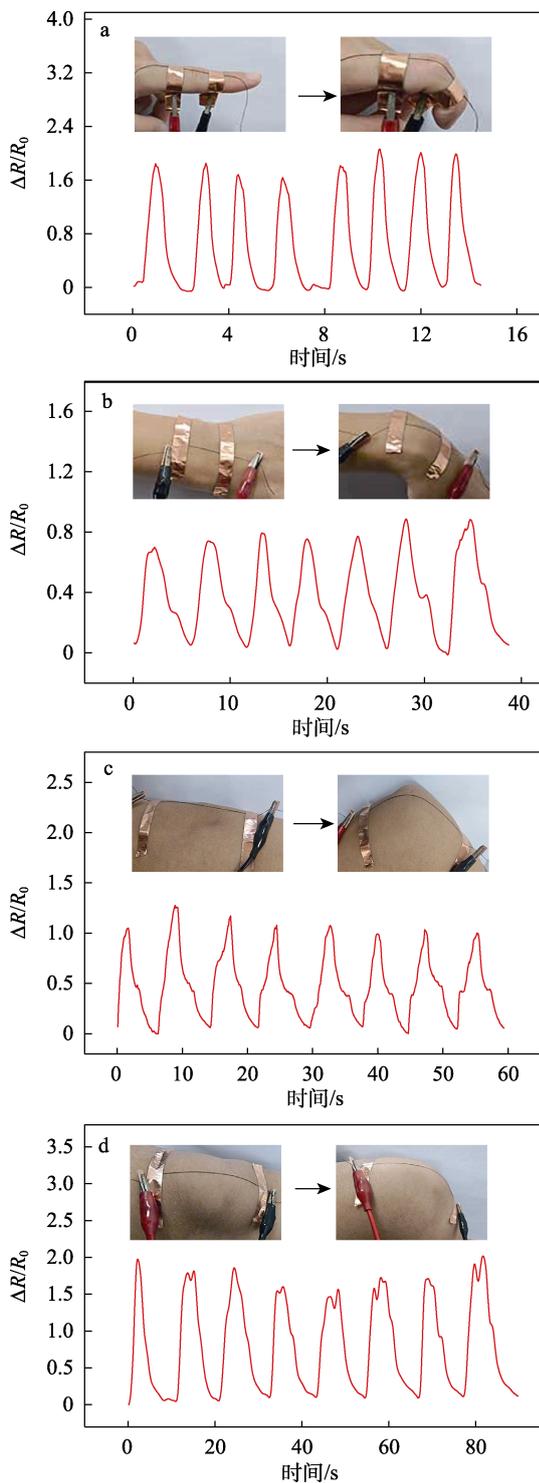


图 8 MTF₂ 对手指 (a)、手腕 (b)、肘关节 (c) 和膝关节 (d) 运动的传感信号检测

Fig. 8 Sensing signal detection of MTF₂ for finger (a), wrist (b), elbow (c) and knee (d) motion

3 结论

通过原位氢氟酸刻蚀法和湿法纺丝技术制得 MTF, MXene 在纤维表面和内部均匀分布并形成导

电通路, 赋予纤维较好的导电能力。

(1) MTF₂ (MXene 理论负载量为 21.74%) 的电导率为 8.38 S/m, 拉伸强度为 19.68 MPa, 断裂伸长率为 664%。

(2) MTF₂ 具有高应变灵敏度, 在 120% 应变下的灵敏系数为 2930。随着拉伸应变由 0.5% 增加至 10.0%, MTF₂ 电阻变化率相应由 0.01 增加至 6.26, 并且具有一定的可恢复性。

本文 MTF 的制备方法操作简单、反应条件较为温和, 可执行性强, 且成功地将 TPU 的可拉伸性与 MXene 的导电性相结合, 基本兼顾了两者的优点, 制备的 MTF 有望用于应变传感领域。

参考文献:

- [1] DONG L Z, REN M, WANG Y L, *et al.* Self-sensing coaxial muscle fibers with bi-lengthwise actuation[J]. *Mater Horiz*, 2021, 8(9): 2541-2552.
- [2] CUI B, REN M, DONG L Z, *et al.* Pretension-free and self-recoverable coiled artificial muscle fibers with powerful cyclic work capability[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(13): 12809-12819.
- [3] CHENG B C, WU P Y. Scalable fabrication of Kevlar/Ti₃C₂T_x MXene intelligent wearable fabrics with multiple sensory capabilities[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5): 8676-8685.
- [4] DONG H, SUN J C, LIU X M, *et al.* Highly sensitive and stretchable MXene/CNTs/TPU composite strain sensor with bilayer conductive structure for human motion detection[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(13): 15504-15516.
- [5] XU X W, CHEN Y C, HE P, *et al.* Wearable CNT/Ti₃C₂T_x MXene/PDMS composite strain sensor with enhanced stability for real-time human healthcare monitoring[J]. *Nano Research*, 2021, 14(8): 2875-2883.
- [6] CHEN X, HOU Z R, LI G X, *et al.* A laser-scribed wearable strain sensing system powered by an integrated rechargeable thin-film zinc-air battery for a long-time continuous healthcare monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022, 101: 107606.
- [7] LIU X H (刘旭华), MIAO J L (苗锦雷), QU L J (曲丽君), *et al.* Research progress of composite conductive fiber in wearable intelligent textiles[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2021, 38(1): 67-83.
- [8] WANG L, ZHANG M Y, YANG B, *et al.* Highly compressible, thermally stable, light-weight, and robust aramid nanofibers/Ti₃AlC₂ MXene composite aerogel for sensitive pressure sensor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10633-10647.
- [9] ZOU S Z, LI D Q, HE C G, *et al.* Scalable fabrication of an MXene/cotton/spandex yarn for intelligent wearable applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(8): 10994-11003.
- [10] EOM W, SHIN H, AMBADE R B, *et al.* Large-scale wet-spinning of highly electroconductive MXene fibers[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 2825.
- [11] ZHANG N Y (张宁仪), WANG C X (王潮霞). Preparation of AgNPs-polyurethane conductive fiber and its application in tension sensing[J]. *Fine Chemicals* (精细化工), 2022, 39(6): 1170-1177, 1189.
- [12] ZENG Z, HAO B W, LI D Q, *et al.* Large-scale production of weavable, dyeable and durable spandex/CNT/cotton core-sheath yarn for wearable strain sensors[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106520.
- [13] UZUN S, SEYEDIN S, STOLTZFUS A L, *et al.* Knittable and washable multifunctional MXene-coated cellulose yarns[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(45): 1905015.
- [14] GAO Y, GUO F Y, CAO P, *et al.* Winding-locked carbon nanotubes/polymer nanofibers helical yarn for ultrastretchable conductor and strain sensor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3442-3450.

(下转第 2179 页)