

高弹性 MXene/TPU 纳米纤维纱线的制备及其应变传感性能

郑贤宏^{1,2}, 胡侨乐¹, 聂文琪¹, 王宗乾¹, 李长龙^{1*}, 夏文¹

(1. 安徽工程大学 纺织服装学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 东华大学 化学化工与生物工程学院, 上海 201620)

摘要: 采用静电纺丝技术制备了热塑性聚氨酯弹性体 (TPU) 纳米纤维膜, 并通过“Biscrolling”的方法制备高弹性过渡金属碳化物/氮化物 ($Ti_3C_2T_x$ MXene) 改性 TPU 纳米纤维纱线。通过 SEM、电阻测试、传感性能测试等对复合纳米纤维纱线进行结构和性能表征。结果显示, 随着 MXene 负载量的增加, 复合纱线的强度先增加后降低, 断裂伸长率可达 459% 以上, 展现出优异的弹性和弹性回复性; MXene 片可在纳米纤维纱线表面及内部形成连续导电薄膜, 赋予复合纱线较好的导电性 [电阻 (76 ± 16) Ω/cm]。纱线的应变传感性能测试表明, MXene/TPU 纳米纤维纱线的传感系数可高达 477.86, 线性度高达 0.995, 高于绝大多数文献报道的纱线传感器, 并且在监测人体的各种运动状态上展现出较好的应变传感性能。

关键词: MXene; TPU; 静电纺丝; 纳米纤维纱线; 应变传感器; 灵敏度; 功能材料

中图分类号: TQ342 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2022) 01-0080-06

Preparation and strain sensing performance of highly stretchable MXene/TPU nanofiber yarn

ZHENG Xianhong^{1,2}, HU Qiaole¹, NIE Wenqi¹, WANG Zongqian¹, LI Changlong^{1*}, XIA Wen¹

(1. School of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China; 2. College of Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: TPU nanofiber membranes were firstly prepared by the electrospinning technique, and $Ti_3C_2T_x$ MXene/TPU nanofiber yarns were fabricated by the “Biscrolling” method. The obtained composite nanofiber yarns were characterized by SEM, electrical resistance test, sensing performance test and other techniques. The results showed that the tensile strength of the composite yarn was firstly increased and then decreased with the loading of MXene, and the breaking strain was more than 459%, demonstrating good elasticity. In addition, continuous and conductive MXene film can be constructed on the inner and outside the yarn, rendering the composite yarn with low electrical resistance [(76±16) Ω/cm]. The strain sensing performance of the composite yarns were also investigated, and the results revealed that MXene/TPU nanofiber yarns had the gauge factor and linearity of 477.86 and 0.995, respectively, which were higher than that of most of yarn strain sensors. In addition, the MXene/TPU nanofiber yarns can be used to monitor various motion states of human body.

Key words: MXene; TPU; electrospinning; nanofiber yarn; strain sensor; sensitivity; functional materials

近年来, 弹性可穿戴的微电子传感器件因其在软体机器人、人体运动监测和健康监护等领域的潜在应用而备受关注^[1-2]。传统的应变传感器通常是由刚硬的金属以及半导体材料组成, 并且具有较小的

应变范围和较低的灵敏度, 极大地限制了其智能可穿戴应用^[3]。相对于其他传感机制, 电阻型应变传感器具有应用范围广、测试便捷等优势。因此, 高性能电阻式应变传感器的开发是可穿戴式运动监测

收稿日期: 2021-07-29; 定用日期: 2021-09-30; DOI: 10.13550/j.jxhg.20210767

基金项目: 安徽省自然科学基金 (2008085QE213)

作者简介: 郑贤宏 (1990—), 男, 讲师, 博士, E-mail: 1907059@ahpu.edu.cn. 联系人: 李长龙 (1968—), 男, 教授, E-mail: licl@ahpu.edu.cn.

系统的关键。

理想的应变传感器应具有较高的灵敏度和较宽的应变区间。因此, 基于弹性基底的应变传感器成为当前的研究热点。目前, 多种导电材料已被应用于弹性应变传感器, 例如, 银纳米材料^[4]、碳纳米管^[5]、导电高分子^[6]等。YOU 等^[7]通过干法纺丝的方法制备了石墨烯/聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 复合纤维, 该纤维的灵敏度可达 65 (应变区间 0~6%), 并具有较好的循环稳定性。ZHU 等^[8]通过毛细管法将银纳米线嵌在聚氨酯纤维表面, 制备了毫米级银纳米线/聚氨酯弹性纤维, 该纤维的灵敏度为 87.6 (应变区间 0~22%), 并且具有较快的响应速度。LI 等^[9]通过涂层的方法制备了皮芯型银纳米颗粒/石墨烯改性聚氨酯纱线, 该纱线作为柔性应变传感器具有较宽的工作区间 (拉伸应变 50%), 较高的灵敏度 (500) 和线性度 (相关系数 0.98)。此外, 该纱线还可以用于监测手指的运动以及走路过程, 在智能可穿戴传感器领域具有一定的应用前景。过渡金属碳化物/氮化物 (MXene) 作为一类新兴的二维纳米材料, 具有优异的分散性、高电导率、高赝电容活性和高比表面积, 在能源、环境、催化等领域引起广泛关注^[10]。然而, 将 MXene 用于纱线应变传感器的研究相对较少, 并且制备的纱线应变传感器的性能相对较差, 灵敏度仅为 17, 应变检测区间也仅有 50%^[11]。因此, 制备高灵敏度和宽检测区间的 MXene 基应变传感器始终存在挑战。TPU 作为一种典型的热塑性聚氨酯弹性体橡胶, 具有较好的弹性, 其拉伸应变可高达 700%。然而, 纯的 TPU 纤维表面光滑, 与其他活性材料具有较低的结合牢度。为了解决上述问题, 研究人员提出了多种策略用于提升 TPU 纤维表面活性材料负载量及结合牢度, 例如: 聚合物包裹法^[9]、薄膜卷绕法^[12]、静电组装法^[13]、层层自组合法^[14]等。上述方法虽然在一定程度上可以提升 TPU 纤维表面活性材料负载量及其传感性能, 但是工艺过程复杂, 且其传感性能也有待进一步提升。静电纺丝技术作为一种典型的纳米纤维的制备方法, 已被广泛应用于各种纳米纤维纱线的制备。利用静电纺丝法制备 TPU 纳米纤维, 纳米纤维较高的比表面积及其集合体的芯吸效应可以实现活性材料的高效吸附。受碳纳米管纺丝的启发, 采用“Biscrolling”的方法将 MXene 均匀负载到 TPU 纳米纤维中, 可以在纱线内部及表面建立导电网络, 可实现纱线的高导电性和高效应变-电阻响应。然而, 结合静电纺丝和“Biscrolling”制备高应变传感性能的 MXene/TPU 纳米纤维纱线鲜见报道。

本研究拟采用静电纺丝技术并结合喷涂方法, 在 TPU 纳米纤维纱线表面及内部建立 MXene 导电

网络, 来制备 MXene 改性的纳米纤维纱线, 测试其应变传感性能, 并探究其智能可穿戴应用。本研究旨在为高性能柔性应变传感器的制备提供一种新方法和思路。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

氟化锂 (质量分数 99.99%), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 无水乙醇、浓盐酸 (质量分数 36%~38%)、*N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF)、四氢呋喃 (THF), 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; TPU, 工业级, 巴斯夫化工 (上海) 有限公司; Ti_3AlC_2 (MAX), 化学纯, 吉林一一科技有限公司。

S-4800 型场发射扫描电子显微镜, 日本日立公司; D8 型 X 射线衍射仪, 德国布鲁克公司; JEM-2100F 透射电子显微镜, 日本 JEOL 公司; VC890C+ 数字万用表, 深圳市驿生胜利科技有限公司; DW-N152D68 高压直流电源, 东文高压电源 (天津) 股份有限公司; DF-1 集热式磁力搅拌器, 上海力辰仪器科技有限公司; XQ-2 单纤维强力机, 上海新纤仪器有限公司; 静电纺丝设备及纳米纤维纱线加捻器, 实验室自制。

1.2 方法

1.2.1 MXene 的合成

MXene 采用原位氢氟酸选择性刻蚀法进行制备^[15], 具体制备步骤如下: 将 2 g 氟化锂加入到 40 mL 9 mol/L 盐酸溶液中, 磁力搅拌 30 min 后, 将 2 g MAX 加入到上述溶液中。混合液于 35 °C 下搅拌 24 h, 然后将反应液倒入 4 根离心管中, 3.5 × 10³ r/min 离心 10 min, 离心后倒掉上清液, 向离心管中加入 40 mL 去离子水, 充分摇匀后, 在 3.5 × 10³ r/min 下反复离心, 直至 pH 达 5~6。向上述离心获得的沉淀中加入 40 mL 无水乙醇, 在 750 W 下超声 1 h, 并在 1.0 × 10⁴ r/min 下离心 10 min, 收集下层沉淀; 向沉淀中加入去离子水, 在 750 W 下超声 20 min 后, 3.5 × 10³ r/min 离心 3 min, 收集上层溶液。重复上述过程, 收集 400 mL MXene 分散液 (3~4 g/L)。收集的分散液通过高速离心进一步浓缩, 在 1.0 × 10⁴ r/min 下离心 10 min, 取下层溶液 (称重法测定质量浓度为 10 g/L) 留作喷涂使用。

1.2.2 静电纺 TPU 纳米纤维

TPU 首先在 80 °C 下真空干燥 24 h, 以去除其中水分。将 4.4 g TPU 通过磁力搅拌溶于 15.6 g DMF/THF 混合溶剂 [V(DMF) : V(THF)=1 : 3] 中, 配制成质量分数为 22% TPU 溶液。上述制备的 TPU 溶液经过超声脱泡, 作为静电纺丝溶液。静电纺丝

参数如下：针头规格为 22 号，电压为 20 kV，针头与接收辊工作距离为 20 cm，纺丝速度为 4 mL/h，接收辊收集速度 1.0×10^3 r/min，纺丝时间为 8 h。

1.2.3 MXene/TPU 纳米纤维纱线的制备

采用“Biscrolling”的方法将 MXene 负载到 TPU 纳米纤维上。首先，将上述静电纺丝制备的 TPU 纳米纤维毡裁剪为 $40 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$ 纳米纤维带，将质量浓度为 10 g/L 的 MXene 分散液通过喷涂法负载到裁剪好的纳米纤维带上，并施加 357 捻/m 的捻度，然后经过 50 °C 真空热定型 12 h。MXene 分散液重复喷涂 1~5 次，按喷涂次数将制备的 MXene/TPU 纳米纤维纱线分别标记为 MTY-1、MTY-2、MTY-3、MTY-4、MTY-5。MXene/TPU 复合纱线中 MXene 的质量分数 (w) 按式 (1) 计算：

$$w / \% = (m - m_0) / m_0 \times 100 \quad (1)$$

式中： m_0 为纱线初始质量，g； m 为纱线负载 MXene 后的质量，g。

1.3 结构表征与性能测试

SEM 测试：在 5 kV 加速电压下用 SEM 对纳米纤维纱线进行形貌观察，并用 Image J 软件统计纤维直径。HRTEM 测试：工作电压 200 kV。XRD 测试条件：Cu K_{α} ，管电压 40 V，管电流 40 mA。机械性能测试：拉伸隔距 10 mm，拉伸速度 10 mm/min，纤维电阻信号由数字万用表实时记录。纱线传感性能采用灵敏度或传感系数 (GF) 进行衡量，按式 (2) 计算：

$$GF = (R - R_0) / (\varepsilon R_0) = \Delta R / (\varepsilon R_0) \quad (2)$$

式中： R_0 、 R 分别为试样初始电阻、测试电阻， Ω ； ΔR 为纱线电阻变化量， Ω ； ε 为试样的应变，%。

2 结果与讨论

2.1 MXene 微观结构分析

通过 XRD 和 HRTEM 对 MXene 的微观结构进行了表征，结果如图 1 所示。

由图 1a 可见，MAX 在经过原位氢氟酸刻蚀后，铝的衍射峰消失 ($2\theta=38.8^\circ$)，表明铝已经被成功刻蚀。此外，(002) 晶面衍射峰从刻蚀前 9.5° 移至刻蚀后 5.9° ，进一步证明制备的 MXene 片层已经被成功剥离^[15]。

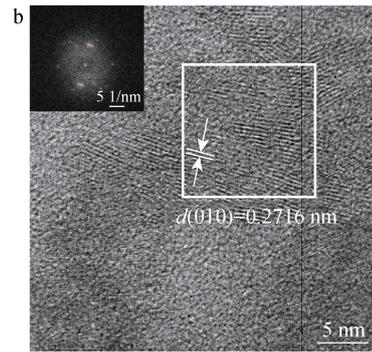
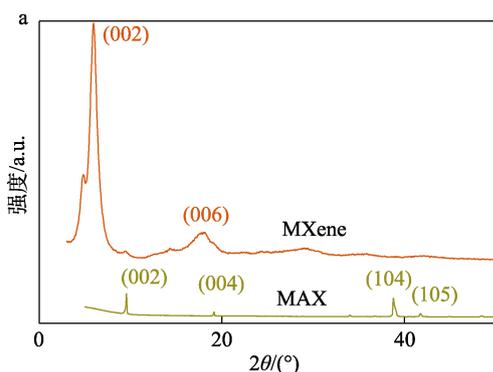


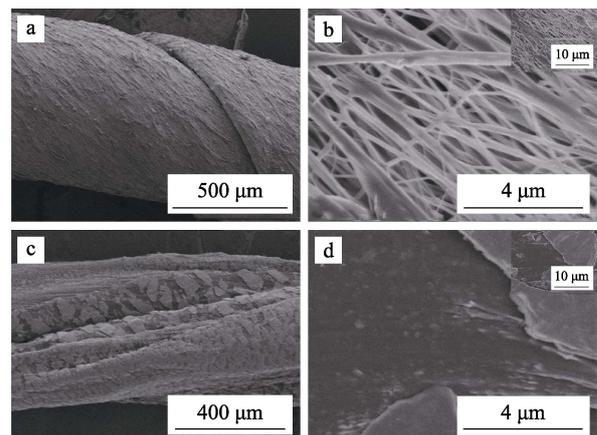
图 1 MXene 的 XRD 谱图 (a) 及 HRTEM 图 (b)
Fig. 1 XRD patterns (a) and HRTEM image (b) of MXene

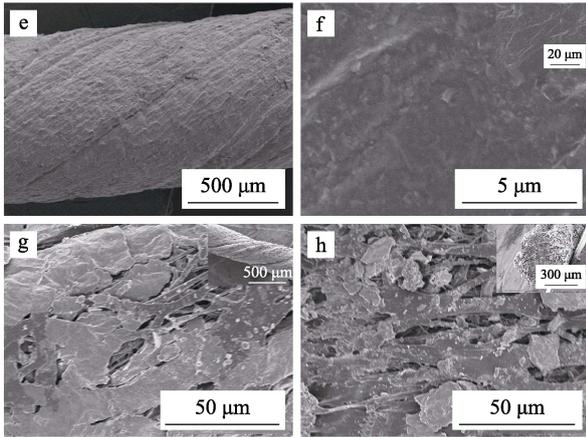
由图 1b 可知，MXene 的 (010) 晶面间距为 0.2716 nm，这也和文献[16]报道的 Ti_3C_2 的 (010) 晶面间距相当。选区电子衍射图(插图)表明，MXene 呈现六元环状晶格结构。

2.2 纳米纤维纱线形貌分析

对制备的纳米纤维纱线的形貌进行了 SEM 测试，结果如图 2 所示。由图 2a 可知，纯 TPU 纳米纤维纱线表面粗糙，纱线直径为 $724 \mu\text{m}$ ，捻回角为 45° ；高倍 SEM 图进一步表明，TPU 在高压静电场的作用下得到高倍牵伸，纱线中 TPU 纤维直径为 $(167.2 \pm 51.5) \text{ nm}$ (图 2b)，这远低于文献^[17-18]报道的 TPU 纳米纤维。TPU 较细的纤维直径主要归因于较高的收集速度及其导致的更高倍牵伸。TPU 喷涂 2 次制备的 MTY-2 纱线表面变得更加粗糙，并且呈现类似“鱼鳞”状形貌结构(图 2c)。进一步观察 MXene 在纱线中的负载状况，如图 2d 所示，TPU 纳米纤维已经完全被 MXene 片层包裹，并在纱线表面形成非连续的“鱼鳞”状薄膜。在经过 4 次 MXene 喷涂之后，MTY-4 纱线结构均匀，TPU 纳米纤维已经完全被 MXene 片层包裹，并且在纱线表面形成连续致密的 MXene 薄膜，如图 2e、f 所示。

由图 2g 可知，MTY-4 纱线在 100% 伸长时纱线直径显著减小，纱线表面 MXene 片层发生滑移，在纱线表面形成裂纹。此外，由图 2h 可知，MXene 片层也均匀分布在纱线内部，具有较好的结构一致性。



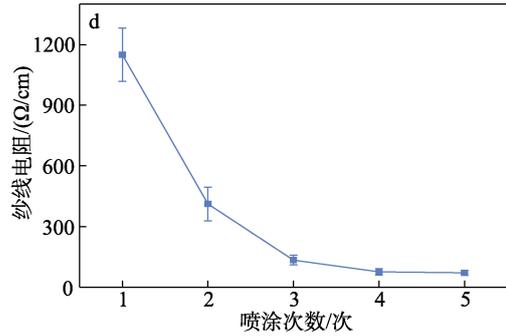
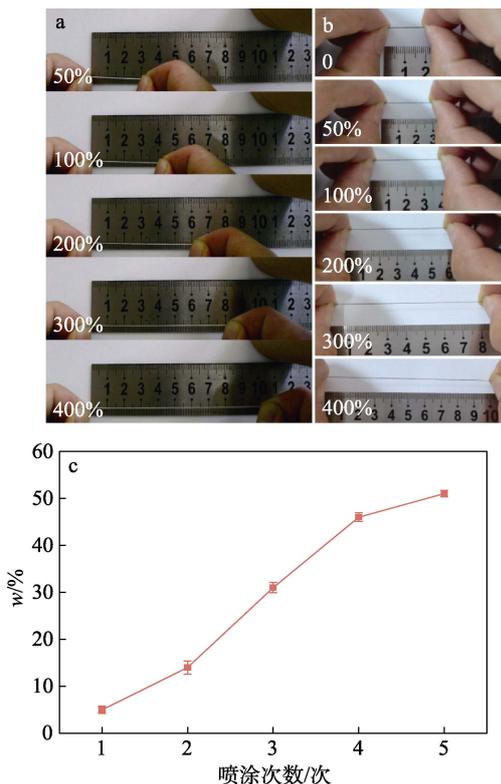


a~b—TPU; c~d—MTY-2; e~f—MTY-4; g—100%伸长的 MTY-4; h—MTY-4 纱线截面

图 2 MXene/TPU 纳米纤维纱线的 SEM 图
Fig. 2 SEM images of MXene/TPU nanofiber yarns

2.3 纳米纤维纱线物理性能分析

对 MXene/TPU 纳米纤维纱线的弹性和导电性能进行了测试, 结果如图 3 所示。由图 3a 和 b 可知, TPU 纳米纤维纱线在 MXene 改性前后纱线均可牵伸至 400%, 且不发生断裂, 展现出较好的弹性和较高的拉伸强度。为了测试 MXene 在纱线中的负载量, 采用微量天平称量纱线负载前后质量差异, MXene 的质量分数如图 3c 所示。由图 3c 可知, MTY-1 中 MXene 的质量分数最低, 仅有 5%±0.8%; MTY-5 中 MXene 的质量分数最高可达 51%。MTY-4 和 MTY-5 纱线较高的 MXene 负载量主要归因于 TPU 纳米纤维纱线较高的比表面积和芯吸效应。



a—TPU 纳米纤维纱线伸长实物图; b—MTY-4 纳米纤维纱线伸长实物图; c—MTY 纱线中 MXene 的负载量; d—MTY 纳米纤维纱线电阻

图 3 MXene/TPU 纳米纤维纱线弹性及导电性能
Fig. 3 Elasticity and electrical conductivity of MXene/TPU nanofiber yarn

制备的 MXene 改性纱线的电阻结果如图 3d 所示, MTY-1 具有最高的电阻, 可高达(1150±132) Ω/cm, 其较高的电阻主要归因于较低的 MXene 负载量难以在纱线内部建立完整的导电通路。复合纱线的电阻随 MXene 负载量的增加而减小, MTY-4 和 MTY-5 电阻最低并且接近, 分别为(76±16)、(71±13) Ω/cm。上述结果表明, 当 MXene 质量分数达到 46% 时, MXene 已经在纱线表面和内部建立完整的导电通路 (图 2e、f), 进一步增加 MXene 负载量并不能显著提高纱线电导率。

TPU 纳米纤维纱线及 MXene/TPU 复合纱线机械性能如图 4 所示。

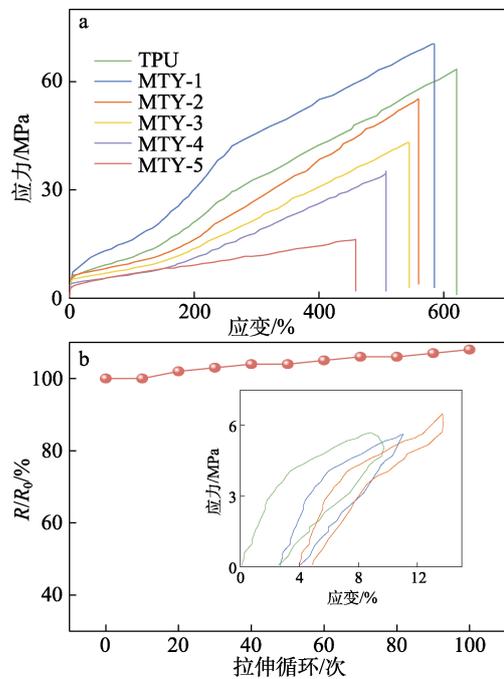


图 4 TPU 及 MXene/TPU 纱线典型应力-应变曲线 (a); MTY-4 循环拉伸电阻变化 (应变率为 50%) (b) 及其循环拉伸应力-应变曲线 (插图)

Fig. 4 Typical stress-strain curves of TPU and MXene/TPU yarns (a); Electrical resistance variation of MTY-4 (strain=50%) (b) and inset is its cyclic tensile stress-strain curves

由图 4a 可知,TPU 纳米纤维纱线的断裂强度和伸长率分别为 63.4 MPa 和 620.7%。MTY-1 具有最高的断裂强度为 70.4 MPa,这主要归因于 MXene 片层在纳米纤维中的桥接作用导致更有效的应力传递。进一步增加 MXene 负载量会导致复合纱线的断裂强度和伸长率进一步降低,这主要归因于 MXene 片层在纱线内部形成更大的聚集体阻碍纳米纤维间应力传递。此外,所有 Mxene/TPU 复合纱线的断裂伸长率均在 459%以上,展现出优异的弹性。如图 4b 所示,MTY-4 纱线在 50%拉伸应变下循环拉伸 100 次后实时电阻的相对变化仍然小于 10%,展现出较好的循环稳定性。此外,从纱线的循环拉伸曲线可知,纱线具有较好的弹性及弹性回复性。因此,MTY-4 纱线较好的电阻稳定性主要归因于其较好的弹性和弹性回复性。

2.4 纳米纤维纱线应变传感性能

由于 MTY 纱线较好的弹性和导电性,其可以作为柔性应变传感器,其应变传感性能如图 5 所示。由图 5a 可知,MTY 纱线在拉伸过程中电阻呈现接近线性增加,这也和文献^[19-20]报道的其他弹性导电纤维的趋势相同。此外,MTY-4 具有高的灵敏度,并且其传感曲线的相关系数(线性度)高达 $R^2=0.995$,表明其具有优异的传感性。为了衡量 MTY 纱线的传感性能,采用传感系数(GF)衡量纱线的灵敏度。MTY-1、MTY-2、MTY-3、MTY-4、MTY-5 的传感系数(即图 5a 斜率)分别为 6.99、101.87、300.0、477.86、341.18,表明 MTY-4 具有最优异的应变传感性能。

如图 5b 所示,对比了 MTY-4 和文献报道的纱线应变传感器的传感性能。本文制备的 MTY-4 的传感系数高于大部分文献报道的其他纱线^[5-8,11,13,17,21],例如:MXene/PU 纱线(GF=17)^[11],AgNW/PU 纤维(GF=87.6)^[8],RGO/PANI/弹性纱线(GF=60.3)^[6],MWCNT/TPU 纤维(GF=97.1)^[5]。此外,本文的 MTY-4 的最大应变区间也比上述纱线应变传感器高,表明其具有优异的应变传感性能。尽管 MTY-4 的传感系数(GF=477.86)略低于 AgNPs/AgNWs/MXene/弹性包芯纱(GF=872.79)^[4]和 Ag/RGO/PU 纱线(GF=500)^[9],但是 MTY-4 具有更宽的应变范围。

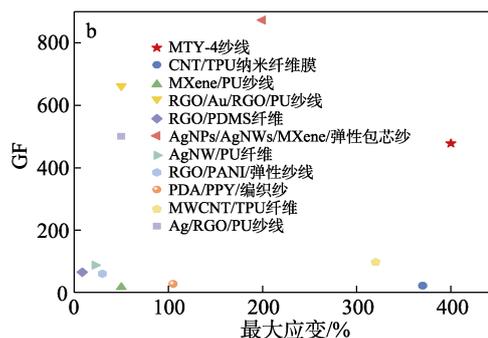
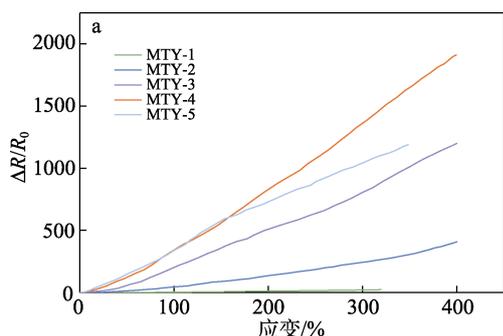


图 5 MXene/TPU 纳米纤维纱线应变传感性能(a);MTY-4 与文献报道的其他纱线传感器的性能对比(b)

Fig.5 Strain sensing performance of MXene/TPU nanofiber yarns (a); Strain sensing performance comparison of MTY-4 with previous reported yarn strain sensors (b)

MTY-4 较为优异的应变传感性能主要归因于以下几个方面:(1)TPU 纳米纤维被 MXene 纳米片完全包覆,赋予纤维基体较好的导电性;(2)MXene 纳米片在纱线内部及表面建立完整的导电网络,赋予纱线较好的结构一致性;(3)TPU 纳米纤维较好的弹性使得纱线在拉伸过程中 MXene 片层发生可逆的“接触-滑移分离”,如图 6 所示, MXene 基导电网络发生可逆的“破坏-重建”过程。

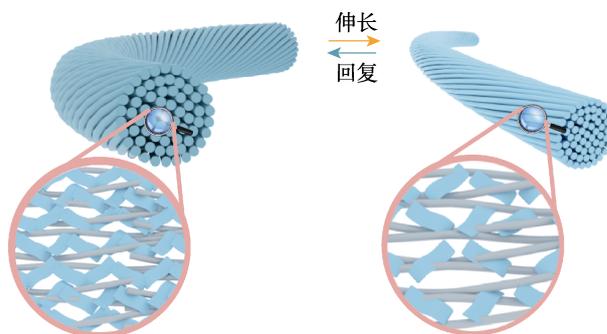
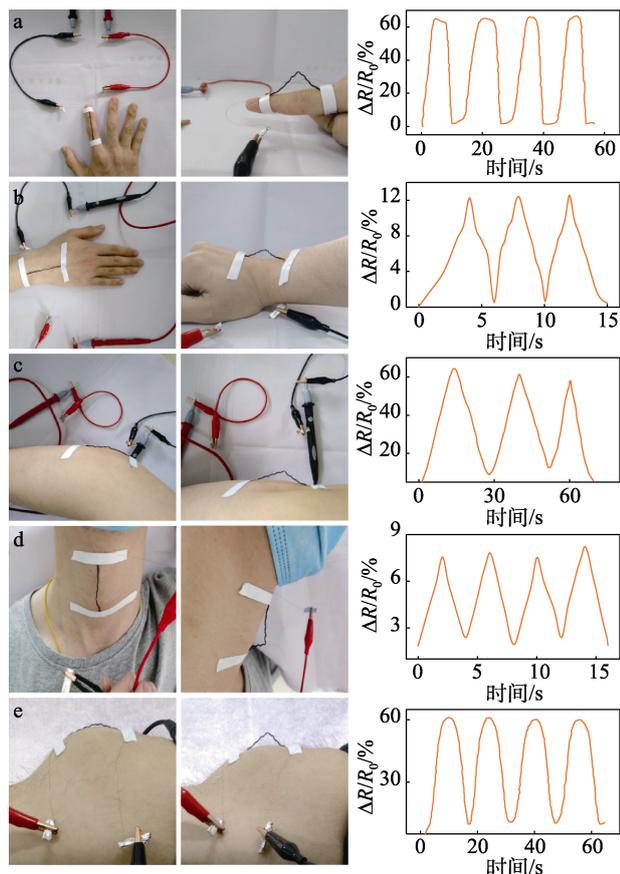


图 6 MXene/TPU 纳米纤维纱线传感机制

Fig.6 Schematic illustration of the sensing mechanism of MTY yarns

2.5 纳米纤维纱线应变传感器的应用

为了证明 MTY 纱线作为可穿戴应变传感器来监测人体运动状态的可行性,MTY-4 纱线被粘贴到人体的不同部位,例如:手指、手腕、胳膊肘、喉咙和膝盖,并且监测其在运动过程中的电阻变化,应变传感性能如图 7 所示。由图 7a 可知,在手指弯曲和恢复过程中,可以检测到持续稳定的电阻信号,并且电阻的变化率可高达 65%。此外,MTY 还可以监测手腕的运动以及手臂摆动过程,均可以得到稳定的电阻信号,如图 7b、c 所示。由图 7d、e 可知,MTY 纱线可以监测人体在喝水和走路时的物理信号,证明了 MTY 纱线应变传感器可以用于人体的康复训练以及软体机器人等领域,在上述的应用领域具有较大的应用前景。



a—手指弯曲运动; b—手腕弯曲运动; c—手臂摆动; d—吞咽时喉部肌肉运动; e—膝盖弯曲运动

图 7 MTY 作为柔性应变传感器监测人体各种运动状态
Fig. 7 Strain sensing performance of MTY as the strain sensors to detect the human motion

3 结论

通过静电纺丝技术和喷涂法制备出 MXene 改性 TPU 纳米纤维纱线 (MTY)。通过系列表征证实, MXene 片层可均匀包覆在 TPU 纳米纤维表面并形成致密导电薄膜, 并赋予纱线较好的导电性 [电阻为 $(76 \pm 16) \Omega/\text{cm}$]。此外, MTY 纱线具有较好的弹性和应变传感性能, 其传感系数可高达 477.86, 最大工作应变可高达 400%。MTY 纱线较好的应变传感性能主要归因于 MXene 片层在 TPU 纳米纤维纱线中建立的导电网络, 赋予纱线较好的应变-电阻响应。MTY 纱线还可作为可穿戴柔性应变传感器应用于监测人体的运动状态, 展现出较好的稳定性。本文为制备高性能柔性应变传感器提供了一种新思路和方法。

参考文献:

[1] CAO Y Q, LAI T C, TENG F R, *et al.* Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowires/ carbon nanotubes on hair band for human motion detection[J]. *Progress in Natural Science-Materials International*, 2021, 31(3): 379-386.
[2] GUO R Y (郭茹月), BAO Y (鲍艳). Research progress on wearable

piezoresistive strain sensors based on two-dimensional conductive materials/flexible polymer composites[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021, 38(4): 649-661.
[3] GONG S, LAI D T H, SU B, *et al.* Highly stretchy black gold E-skin nanopatches as highly sensitive wearable biomedical sensors[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2015, 1(4): 1400063.
[4] WANG Z G (王志刚), XU Q Q (徐琴琴), YIN J Z (银建中), *et al.* Preparation of AgNPs@graphene by a one-pot method and its application in flexible sensors[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021,38(11):2247-2251.
[5] WANG X Z, SUN H L, YUE X Y, *et al.* A highly stretchable carbon nanotubes/thermoplastic polyurethane fiber-shaped strain sensor with porous structure for human motion monitoring[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 168: 126-132.
[6] ZHAO Y N, HUANG Y, HU W, *et al.* Highly sensitive flexible strain sensor based on threadlike spandex substrate coating with conductive nanocomposites for wearable electronic skin[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 035004.
[7] YOU X, YANG J S, WANG M M, *et al.* Graphene-based fiber sensors with high stretchability and sensitivity by direct ink extrusion[J]. *2D Materials*, 2020, 7(1): 015025.
[8] ZHU G J, REN P G, GUO H, *et al.* Highly sensitive and stretchable polyurethane fiber strain sensors with embedded silver nanowires[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(26): 23649-23658.
[9] LI X T, HU H B, HUA T, *et al.* Wearable strain sensing textile based on one-dimensional stretchable and weavable yarn sensors[J]. *Nano Research*, 2018, 11(11): 5799-5811.
[10] ZHANG C F, ANASORI B, SERAL-ASCASO A, *et al.* Transparent, flexible, and conductive 2D titanium carbide (MXene) films with high volumetric capacitance[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(36): 1702678.
[11] LEVITT A, SEYEDIN S, ZHANG J Z, *et al.* Bath electrospinning of continuous and scalable multifunctional MXene-infiltrated nanoyarns[J]. *Small*, 2020, 16(26): 2002158.
[12] XIE X X, HUANG H, ZHU J, *et al.* A spirally layered carbon nanotube-graphene/polyurethane composite yarn for highly sensitive and stretchable strain sensor[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 135: 105932.
[13] PAN J J, YANG M Y, LUO L, *et al.* Stretchable and highly sensitive braided composite yarn@polydopamine@polypyrrole for wearable applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7): 7338-7348.
[14] CHEN Q, XIANG D, WANG L, *et al.* Facile fabrication and performance of robust polymer/carbon nanotube coated spandex fibers for strain sensing[J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112: 186-196.
[15] ZHENG X H, HU Q L, WANG Z Q, *et al.* Roll-to-roll layer-by-layer assembly bark-shaped carbon nanotube/Ti₃C₂T_x MXene textiles for wearable electronics[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 602: 680-688.
[16] DAI B Z, ZHAO B, XIE X, *et al.* Novel two-dimensional Ti₃C₂T_x MXenes/nano-carbon sphere hybrids for high-performance microwave absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(21): 5690-5697.
[17] WANG Y H, LI W Y, ZHOU Y F, *et al.* Fabrication of high-performance wearable strain sensors by using CNTs-coated electrospun polyurethane nanofibers[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(26): 12592-12606.
[18] GUO Y H, GUO Y C, HE W D, *et al.* PET/TPU nanofiber composite filters with high interfacial adhesion strength based on one-step co-electrospinning[J]. *Powder Technology*, 2021, 387: 136-145.
[19] PARK J, PARK S, AHN S, *et al.* Wearable strain sensor using conductive yarn sewed on clothing for human respiratory monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12628-12636.
[20] YAN T, ZHOU H, NIU H T, *et al.* Highly sensitive detection of subtle movement using a flexible strain sensor from helically wrapped carbon yarns[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(32): 10049-10058.
[21] LI X T, KOH K H, FARHAN M, *et al.* An ultraflexible polyurethane yarn-based wearable strain sensor with a polydimethylsiloxane infiltrated multilayer sheath for smart textiles[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(6): 4110-4118.