

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.06.004

## 基于溶液喷射纺取向包芯纱的柔性传感器性能

石磊, 林小琳, 刘星  
(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 针对现有柔性传感器线性度差、灵敏度低、制备成本高等问题, 利用高效、低成本的湿法纺丝技术和溶液喷射纺纱技术, 以热塑性聚氨酯为原料制备取向包芯纱, 通过涂覆导电颗粒改善纱线的导电性, 制备了可拉伸的取向包芯纱柔性传感器; 对取向包芯纱柔性传感器的微观形貌进行观察, 对其拉伸传感性能进行测试, 并分析其传感原理。结果表明: 所制备的柔性传感器仍保持良好的纱线形貌(捻回角 $53^\circ$ ), 具有大应变范围(0~40%)、高线性度(有效线性度1.913%)、高灵敏度( $GF=25.26$ )、低响应时间(112 ms)、高稳定性和高可重复性(5 200次循环), 能够较为准确地反映出人体大幅度和小幅度的生理活动规律。

**关键词:** 溶液喷射纺纱; 取向包芯纱; 导电聚合物; 柔性传感器

**中图分类号:** TP212.3; TS102.528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2024)06-0022-06

### Property of flexible sensor based on solution jet spinning oriented core-spun yarn

SHI Lei, LIN Xiaolin, LIU Xing

(School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor linearity, low sensitivity and high preparation cost of existing flexible sensors, efficient and low-cost wet spinning technology and solution jet spinning technology were used to prepare oriented core spun yarn using thermoplastic polyurethane as raw material, and the conductivity of the yarn was improved by tting conductive particles, then a stretchable oriented core spun flexible sensor was prepared. The micro-morphology of the oriented core-spun yarn flexible sensor was observed, tensile sensing performance of the flexible sensor was tested and sensing principle of the flexible sensor was analyzed. The results show that the prepared flexible sensor still maintains good yarn morphology (twist angle is  $53^\circ$ ), has a large strain range (0~40%), high linearity (effective linearity is 1.913%), high sensitivity ( $GF = 25.26$ ), low response time (112 ms), high stability and repeatability (5 200 cycles). It can accurately reflect the physiological activity law of large and small range of human body.

**Key words:** solution jet spinning; oriented core-spun yarn; conductive polymer; flexible sensor

随着科学技术的发展, 人类生活水平不断提高, 人们也更关注于自身的身体健康情况, 可监测人体健康及运动状况的智能可穿戴设备也应运而生, 起主要监测作用的柔性传感元件的开发也成为研究的热点。纺织品作为人类生活的必需品, 具有极好的柔韧性与透气舒适性, 是制备柔性传感器的理想载体<sup>[1-2]</sup>。纺织品根据形式可分为纤维、纱线和织物等。近些年以织物为基底的柔性传感器的报道越来越多, 该传感器具有重量轻、柔韧性好、强度高等特点<sup>[3-4]</sup>, 但其尺寸固

定、不够灵活、灵敏度和线性度较低。相较于柔性织物传感器, 柔性纱线传感器具有可编织、弹性高、适应性广等独特优点, 能更好地适应弯曲、扭转等复杂的应变监测<sup>[5-6]</sup>, 可以实现更多维度的传感功能, 从而对人体生理活动进行更全面的监测。因此, 以纱线为基底制备出柔性传感器, 对推动智能可穿戴设备的蓬勃发展具有重要的意义。

与传统的纱线相比, 取向纳米纤维纱线具有比表面积高、孔隙率大、透气性好、结晶度和取向度高、易

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51603148); 天津市自然科学基金资助项目(20JCQNJC00250)

通信作者: 石磊(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能可穿戴。E-mail: shilei@tiangong.edu.cn

于编织等优点<sup>[7]</sup>,具有普通纺织纱线不具备的特殊性能,更易于掺杂功能改性。除了制备纯取向纳米纤维纱线外,将纳米纤维缠绕在其他纤维/纱线的表面得到取向纳米纤维包芯纱也是现在主流的研究方向<sup>[8-10]</sup>。取向纳米纤维包芯纱抗拉强度更高,且其高比表面积、高孔隙率等特点大大增加了导电粘附基体材料的表面积,产生的小尺寸效应、量子尺寸效应和量子隧道效应有利于提高纱线的导电性能和传感性能。

将导电材料涂覆在纱线表面得到导电纱线,是制备柔性纱线传感器最简单、有效的方法之一。为解决无机导电材料与聚合物复合时存在界面相互作用力弱、表面分布不均、长期使用不稳定的问题,本文选用能通过物理吸附或化学合成的方式与聚合物结合的导电聚合物作为导电材料。含有杂环共轭型结构的聚吡咯具有优异的导电性能及易于氧化聚合的特点,被广泛用于制备导电纱线<sup>[11-13]</sup>。与硅橡胶相比,热塑性聚氨酯弹性基体具有相对较高的极性,与导电聚合物具有更好的相容性,有利于有机导电组分与聚氨酯材料更均匀和牢固的结合<sup>[14]</sup>。目前获得取向纳米纤维的方法主要是静电纺丝法,取向纳米纤维纱线的制备装置也主要基于静电纺丝装置进行的纳米纤维收集加捻部分的改进<sup>[15-18]</sup>。但纺丝过程中施加的高压电成为操作安全的隐患,也制约了静电纺丝的规模化生产。溶液喷射法的单针头纺丝速率是静电纺丝速率的10倍多,出丝量更大,纺丝效率更高,且不需高压电场及配套保护装置,生产操作更灵活、简单,更适用于工业化生产<sup>[19-21]</sup>。因此,本文采用工艺简单易操作、适于规模化生产的湿法纺丝技术和溶液喷射纺纱技术,以热塑性聚氨酯为原料来制备取向包芯纱,通过涂覆导电颗粒改善纱线的导电性,制备取向包芯纱柔性传感器,并对柔性传感器的拉伸传感性能进行测试和分析。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂与仪器

材料与试剂:热塑性聚氨酯(TPU),1185A、90A型号,德国BASF公司;N-N二甲基甲酰胺(DMF),分析纯,天津渤化化学试剂有限公司;去离子水,自制;吡咯单体(Py)、对甲苯磺酸(PTSA),均为分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ ),分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司。

仪器与设备:CP224C型电子天平,上海奥豪斯仪器有限公司;85-2型数显恒温磁力搅拌器,金坛市白塔新宝仪器厂;DH-101-O型电热鼓风干燥箱,天津市中环实验电炉有限公司;湿法纺丝装置,自制;JDF05

型溶液喷射纺丝装置,长沙纳仪仪器科技有限公司;Regulus 8100型冷场发射扫描电子显微镜、SU1000型扫描电子显微镜,日本Hitachi公司;5969型万能试验机,美国INSTRON公司;U3402A型数字双显示万用表,美国Agilent公司。

### 1.2 取向包芯纱的制备

以DMF为溶剂、1185A型TPU为溶质,配置质量分数为28%的TPU溶液,静置去泡后转移至针管中备用;以去离子水为凝固浴进行湿法纺丝,采用14G型纺丝针头(外径2.00 mm、内径1.8 mm),推进速率为10 mL/h,收集速率为1 mm/s;将所得纤维在室温环境干燥至恒重,即得到TPU纤维,作为取向包芯纱的芯纱。

以DMF为溶剂、90A型TPU为溶质,配置质量分数为12%的TPU溶液,静置去泡后转移至针管中备用。溶液喷射纺纱装置如图1所示。

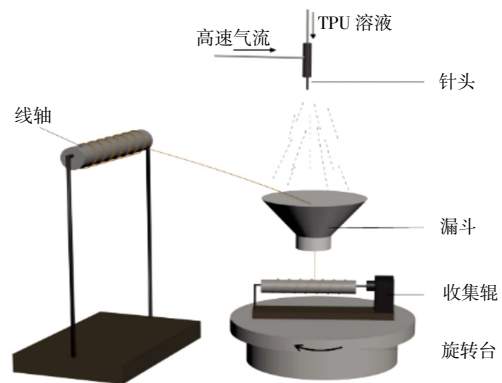


图1 溶液喷射纺纱装置示意

Fig.1 Schematic diagram of solution jet spinning

首先将针管与溶液喷射纺纱装置连接好,纺丝前确认纺丝针头通畅;TPU纤维穿过漏斗与收集辊连接,推进速率设为0.6 mL/h、牵伸风压设为0.16 MPa;通过旋转台使得倒漏斗与芯材纤维发生相对转动,从而对漏斗内收集到的纳米纤维产生加捻作用,同时保证了纳米纤维能均匀包覆在芯材纤维上,使得包芯纱粗细均匀,并且具有取向;将收集好的包芯纱置于50℃烘箱中干燥1 h,使溶剂挥发完全,即得到TPU取向包芯纱。

### 1.3 取向包芯纱柔性传感器的制备

剪取一定长度取向包芯纱,在去离子水中洗去表面杂质;取50 mL去离子水,加入1.384 g的吡咯单体搅拌均匀分散,将取向包芯纱放入其中浸润0.5 h;另取50 mL去离子水,加入10.8 g的 $\text{FeCl}_3$ 和4.375 g的PTSA,搅拌均匀形成混合溶液;将上述步骤得到的2种溶液混合,持续搅拌10 min后,取出包芯纱并将其表面沉积的絮状物冲洗干净,于50℃烘干至恒重。再继续重复上述实验步骤2次,即得到导电取向包芯

纱。使用导电银胶与导电铜胶带将细导线与导电取向包芯纱两端连接固定,组装完成即得到取向包芯纱柔性传感器。

### 1.4 形貌表征与传感性能测试

(1) 形貌表征: 采用 Regulus 8100 型冷场发射扫描电子显微镜及 SU1000 型扫描电子显微镜对喷金后样品的形貌结构进行观察分析。

(2) 拉伸传感性能测试: 采用万能试验机和数字万用表对取向包芯纱柔性传感器的线性度、灵敏度、响应时间以及循环稳定性等拉伸传感性能进行测试。柔性传感器有效线性度计算公式为:

$$\delta = \Delta Y_{\max} / Y \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\Delta Y_{\max}$  为传感器校准曲线与拟合直线间的最大偏差;  $Y$  为满量程输出值;  $\delta$  为有效线性度。  $\delta$  比值越小, 柔性传感器的线性度越高。 柔性传感器的灵敏度计算公式为:

$$GF = \frac{(R - R_0) / R_0}{(L - L_0) / L_0} = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中:  $R_0$  为传感器初始电阻;  $R$  为传感器的实时电阻;  $\Delta R$  为电阻变化量;  $L_0$  为柔性应变传感器的初始长度;  $L$  为柔性应变传感器的实时长度;  $\varepsilon$  为应变。 柔性传感器的响应时间计算公式:

$$\Delta t = t_R - t_S \quad (3)$$

$$t_S = \varepsilon \cdot l / v_1 \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为响应时间;  $t_R$  为传感器发生电阻变化所用时间;  $t_S$  为传感器发生一定应变所用时间;  $\varepsilon$  为应变;  $l$  为传感器有效长度;  $v_1$  为拉伸速率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 外观形貌表征

外层纳米纤维 SEM 图如图 2 所示。

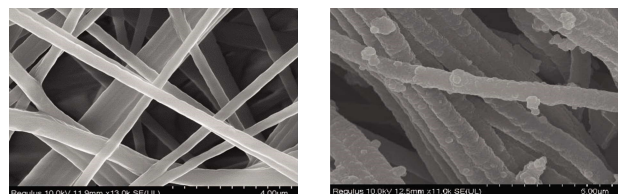


图 2 外层纳米纤维 SEM 图

Fig.2 SEM images of cortex nanofibers

由图 2 可知, 纳米纤维形态良好, 表面有褶皱有利于导电聚合物 PPy 的沉积; 取向包芯纱经过 3 次原位聚合处理后, PPy 均匀包覆在纳米纤维表面。

图 3 为取向包芯纱柔性传感器表面。

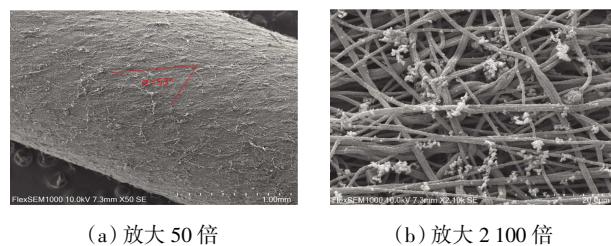


图 3 取向包芯纱柔性传感器表面 SEM 图

Fig.3 SEM images of surface of flexible oriented core-spun yarn sensors

由图 3 可见, 包芯纱外层的纳米纤维均匀包覆着一层聚吡咯, 但没有形成致密的导电膜, 仍保持纱线的表面形貌。包芯纱具有一定的取向且捻回角为  $53^\circ$ 。

图 4 为取向包芯纱柔性传感器截面的 SEM 图。

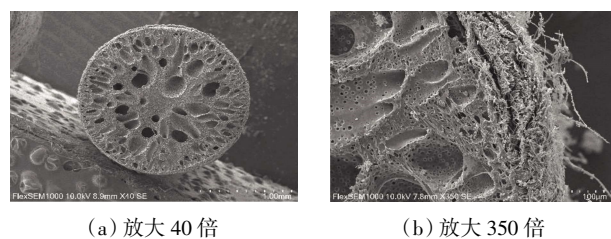


图 4 取向包芯纱柔性传感器截面 SEM 图

Fig.4 SEM images of cross section of flexible oriented core-spun yarn sensors

由图 4 可见, 取向包芯纱的芯层与外层结合良好, 外层纳米纤维能均匀地包裹在芯层纤维的表面, 无明显分离现象。

### 2.2 拉伸传感性能分析

在  $37^\circ\text{C}$  的温度条件下, 测量柔性传感器的电阻值, 反复操作 10 次后取平均值, 得到该柔性传感器的电阻值为  $5.14\text{ k}\Omega$ 。

#### 2.2.1 线性度和灵敏度分析

图 5 为所制备的取向包芯纱柔性传感器应变-电阻变化率曲线。

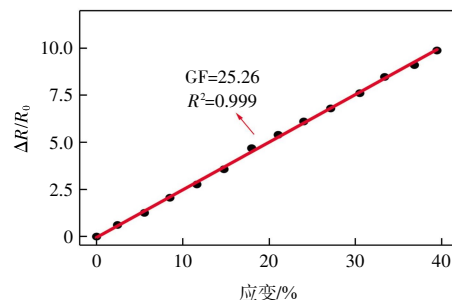


图 5 取向包芯纱柔性传感器的应变-电阻变化率曲线  
Fig.5 Change rate of strain-resistance of flexible oriented core-spun yarn sensors

由图 5 可知, 应变-电阻变化率曲线与拟合曲线

的线性相关度  $R^2=0.999$ , 具有高度的线性相关性。根据式(1)计算得到取向包芯纱柔性传感器的有效线性度为 1.913%, 表明该柔性传感器在 0~40% 应变范围内具有极好线性度。图 5 中曲线的斜率即为该传感器的灵敏度。根据式(2)计算可得该传感器在 0~40% 应变范围内的灵敏度为 25.26, 其灵敏度线性方程如式(5):

$$\Delta R/R_0 = (25.26 \pm 0.11)\varepsilon, 0 \leq \varepsilon \leq 40\% \quad (5)$$

式中:  $R_0$  为传感器初始电阻;  $\Delta R$  为电阻变化量;  $\varepsilon$  为应变。由此可见, 本文所制备的取向包芯纱柔性传感器具有良好的线性度和灵敏度, 有利于对人体生理活动进行的精准检测。

### 2.2.2 适应性和响应程度分析

柔性传感器需要高灵敏度和高线性度, 同时也需要良好的适应性和响应程度, 以应对复杂的应变环境。图 6 所示为对取向包芯纱柔性传感器在三角波、梯形波、阶梯波拉伸应变下的动态响应情况下的测试结果。

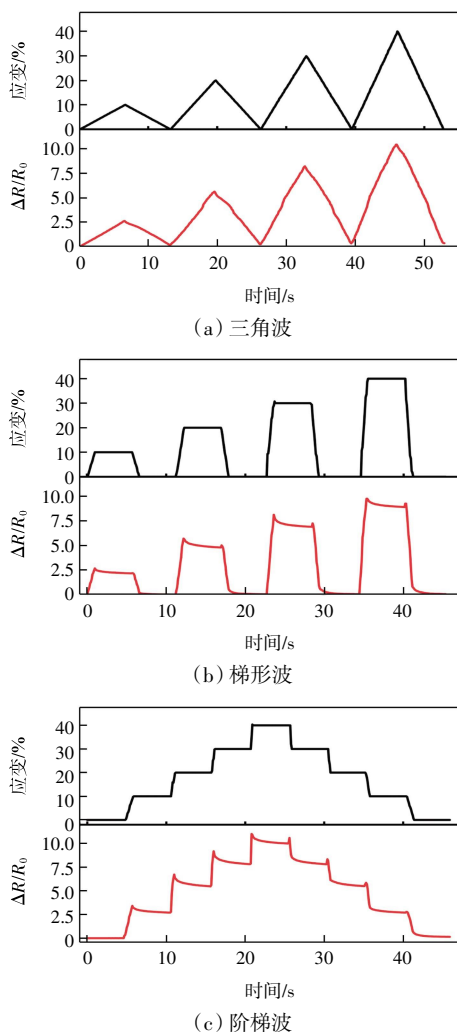


图 6 取向包芯纱柔性传感器在不同波形下的电阻变化率  
Fig.6 Change rate of resistance of flexible oriented core-spun yarn sensor at different waveforms

由图 6 可知, 本文所制备的取向包芯纱柔性传感器在三角波、梯形波、阶梯波拉伸应变下均能产生与应变波形相符的电学信号波形, 响应程度基本符合线性方程(5)。这说明该柔性传感器能在各类应变条件下保持稳定的结构变化, 适应性良好, 在多变的应变条件下仍保持良好的响应程度。该柔性传感器在不同拉伸速率下的电阻变化率如图 7 所示。

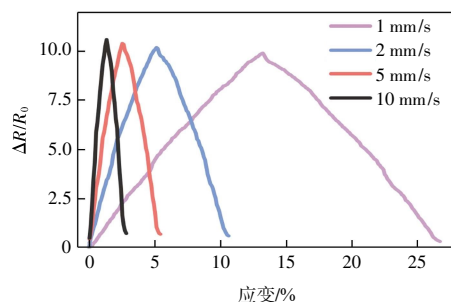


图 7 取向包芯纱柔性传感器在不同拉伸速率下的电阻变化率  
Fig.7 Change rate of resistance of flexible oriented core-spun yarn sensor at different strain speeds

由图 7 可见, 取向包芯纱柔性传感器在不同的拉伸速率下具有同样的响应趋势, 进一步说明该柔性传感器的内结构相对稳定, 其响应程度与应变大小有关, 而受拉伸速率影响很小。

图 8 为取向包芯纱柔性传感器在 10% 应变、14 mm/s 拉伸速率下的响应情况, 用于计算柔性传感器的响应时间, 柔性传感器的有效长度为 70 mm。

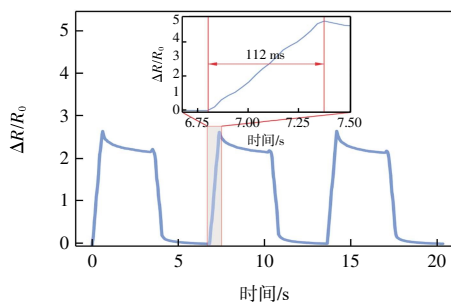


图 8 取向包芯纱柔性传感器的响应时间  
Fig.8 Response time of flexible oriented core-spun yarn sensor

由图 8 中插图可计算电阻变化所用时间, 响应时间公式如式(3)和(4)所示。计算可得取向包芯纱柔性传感器的拉伸响应时间为 112 ms, 说明该传感器具有很高的快速响应能力。

### 2.2.3 循环稳定性分析

在应变为 10% 的条件下, 对取向包芯纱柔性传感器进行循环稳定性的测试, 结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 分别在循环的前、中、后段截取部分

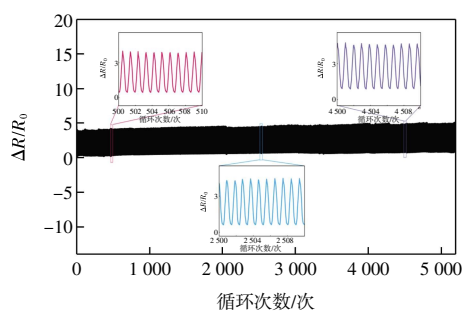


图 9 取向包芯纱柔性传感器 5 200 次循环中的电学响应  
Fig.9 Electrical response of flexible oriented core-spun yarn sensor in 5 200 cycles

循环进行对比,在 5 200 次循环中,该柔性传感器表现出良好的稳定性和重复性,具有很高的实际应用价值。

### 2.3 传感机理分析

为探究取向包芯纱柔性传感器的传感机理,对拉伸前后的取向包芯纱的微观形貌进行了测试,如图 10 所示。

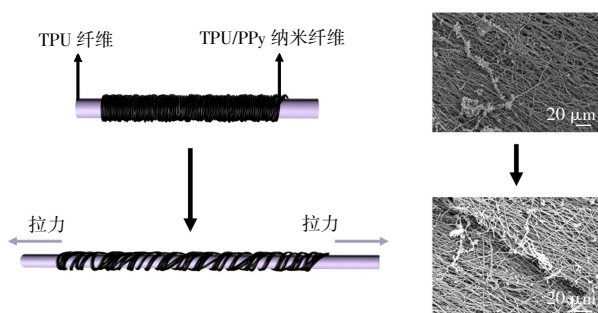


图 10 取向包芯纱柔性传感器的传感机理示意  
Fig.10 Schematic diagram of sensing mechanism of flexible oriented core-spun yarn sensor

由图 10 可知,初始时,取向包芯纱表面的纳米纤维紧密接触,形成超多的导电通路,使得该传感器的初始阻值较小;当在 0~40% 的应变范围内拉伸该柔性传感器时,纳米纤维层发生分层,纳米纤维相互之间逐渐发生分离,纳米纤维表面的 PPy 接触面积不断减小、导电通路逐渐减少,使得柔性传感器的电阻值增大;当柔性传感器拉伸回复后,随着包芯纱伸长的恢复,纳米纤维也重新恢复紧密接触,此时柔性传感器电阻值也恢复至初始值。

由取向包芯纱的电镜图可知,表面的纳米纤维是具有一定取向的,这一特殊结构使得该柔性传感器的电阻变化率能随伸长率的变化而呈线性变化,且纳米纤维提供了大比表面积,使得在拉伸过程中电阻值变化迅速,提高了柔性传感器的灵敏度。

### 2.4 取向包芯纱柔性传感器的应用

取向包芯纱传感器具有优异的线性度和较高的

灵敏度,将该传感器与人体贴合后,对其进行可穿戴的实际应用测试。将柔性传感器贴合在被监测人员食指处,安装固定好后,对食指不同角度的运动进行监测。图 11 展示的是该传感器对指关节多角度的弯曲-伸直运动的响应情况。

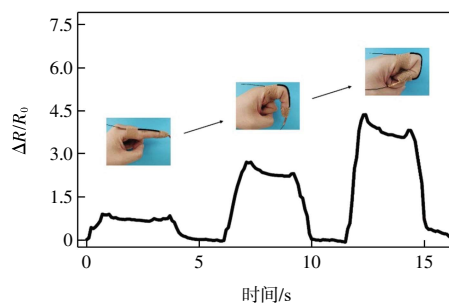


图 11 手指弯曲动作的电学响应

Fig.11 Electrical response of finger bending

由图 11 可知,对应手指不同的运动状态,该传感器的电阻变化率分别为 0.8、2.8、4.4。由此可见,该传感器能够有效监测指关节不同角度的运动,具有良好的指关节运动监测能力。将柔性传感器贴合于被监测人员的颈部咽喉处,对其的 3 次抬头、3 次吞咽动作进行监测,其电学响应如图 12 所示。

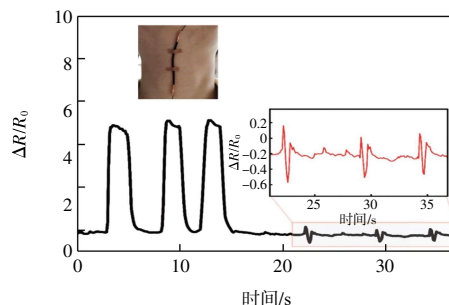


图 12 抬头、吞咽动作的电学响应

Fig.12 Electrical response of raising and swallowing

由图 12 可知,该柔性传感器可以对抬头动作做出稳定连续的响应,对于咽喉部的吞咽动作也能进行识别,有望进一步应用到语音识别领域。

## 3 结论

采用湿法纺丝技术和溶液喷射纺纱技术制备了取向包芯纱,捻回角为  $53^\circ$ 。在包芯纱上原位聚合 PPy 得到导电包芯纱,组装后得到取向包芯纱柔性传感器,利用其拉伸前后的电阻变化进行传感测试。结果表明:

(1) 取向包芯纱柔性传感器的应变范围可达 40%,有效线性度为 1.913%,灵敏度可达 25.26,响应时间为 112 ms,在不同的应变条件下均能作出对应的

响应,具有5 200次循环的高稳定性和重复性。

(2) 当取向包芯纱柔性传感器在0~40%应变范围内发生拉伸时,外层的导电纳米纤维在拉力作用下发生分离,致使柔性传感器的电阻值增大,从而产生传感作用,且由于其具有取向纳米纤维结构,使得该柔性传感器具有高线性度和高灵敏度。

(3) 取向包芯纱柔性传感器既能准确识别人体手指、头部等的大幅度运动,又能够识别出吞咽一类的小幅度动作,传感性能良好,能够较为准确地反映出人体的生理活动规律。将该柔性传感器加工编织或与其他纺织品结合,可对人体进行多部位多线程的监测,在康复医疗、智能监测等领域具有很大的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] YANG Z, PANG Y, HAN X L, et al. Graphene textile strain sensor with negative resistance variation for human motion detection[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 9134-9141.
- [2] HEO J S, EOM J, KIM Y H, et al. Recent progress of textile-based wearable electronics: A comprehensive review of materials, devices, and applications[J]. *Small*, 2018, 14(3): 201703034.
- [3] STEWART I E, KIM M J, WILEY B J. Effect of morphology on the electrical resistivity of silver nanostructure films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(2): 1870-1876.
- [4] ZHOU X R, HU C Y, LIN X C, et al. Polyaniline-coated cotton knitted fabric for body motion monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 321: 112591.
- [5] SHI J D, LIU S, ZHANG L S, et al. Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(5): 1901958.
- [6] YANG T T, XIE D, LI Z H, et al. Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance[J]. *Materials Science & Engineering R Reports A Review Journal*, 2017, 115: 1-37.
- [7] GÖKTEPE F, MÜLAYIM B B. Long path towards to success in electrospun nanofiber yarn production since 1930's: A critical review[J]. *Autex Research Journal*, 2018, 18(2): 87-109.
- [8] QI K, WANG H B, YOU X L, et al. Core-sheath nanofiber yarn for textile pressure sensor with high pressure sensitivity and spatial tactile acuity[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 561: 93-103.
- [9] MALEKI H, YILMAZ D, SEMNANI RAHBAR R, et al. Electrospun poly (lactic acid)-cotton core-shell yarns: Processing, morphology, and mechanical properties[J]. *Journal of Composite Materials*, 2022, 56(23): 3541-3552.
- [10] KE Y M, JIA K Y, ZHONG W B, et al. Wide-range sensitive all-textile piezoresistive sensors assembled with biomimetic core-shell yarn via facile embroidery integration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435: 135003.
- [11] NAMSHEER K, ROUT C S. Conducting polymers: A comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(10): 5659-5697.
- [12] GUNASEKARA D S W, HE Y, FANG S, et al. High-repeatability macro-porous sponge piezoresistive pressure sensor with polydopamine/polypyrrole composite coating based on in situ polymerization method[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(10): 789.
- [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] 万玉勤. 功能型聚吡咯/聚氨酯多孔材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.  
WAN Y Q. Preparation and properties of functional polypyrrole/polyurethane porous materials[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021 (in Chinese).
- [15] PAN H, LI L M, HU L, et al. Continuous aligned polymer fibers produced by a modified electrospinning method[J]. *Polymer*, 2006, 47(14): 4901-4904.
- [16] HE J X, ZHOU Y M, WANG L D, et al. Fabrication of continuous nanofiber core-spun yarn by a novel electrospinning method[J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(10): 2061-2065.
- [17] ZHOU Y M, WANG H B, HE J X, et al. Highly stretchable nanofiber-coated hybrid yarn with wavy structure fabricated by novel airflow-electrospinning method[J]. *Materials Letters*, 2019, 239: 1-4.
- [18] 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.
- [19] ZHUANG X P, JIA K F, CHENG B W, et al. Solution blowing of continuous carbon nanofiber yarn and its electrochemical performance for supercapacitors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 237: 308-311.
- [20] LIU Y, ZHANG G K, ZHUANG X P, et al. Solution blown nylon 6 nanofibrous membrane as scaffold for nanofiltration[J]. *Polymers*, 2019, 11(2): 364.
- [21] 王航, 庄旭品, 董锋, 等. 溶液喷射纺纳米纤维制备技术及其应用进展[J]. *纺织学报*, 2018, 39(7): 165-173.  
WANG H, ZHUANG X P, DONG F, et al. Preparation technology and application progress of solution blown nanofibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2018, 39(7): 165-173 (in Chinese).

#### 本文引文格式:

石磊, 林小琳, 刘星. 基于溶液喷射纺取向包芯纱的柔性传感器性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(6): 22-27.  
SHI L, LIN X L, LIU X. Property of flexible sensor based on solution jet spinning oriented core-spun yarn[J]. *Journal of Tianjin University*, 2024, 43(6): 22-27 (in Chinese).