

功能材料

聚苯胺尼龙导电织物的制备及其传感性能

韩玮屹, 彭 军, 宋理阳, 殷允杰, 王潮霞*

(江南大学 纺织科学与工程学院 生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 采用低温原位聚合法在尼龙织物表面形成一层聚苯胺导电材料, 并用场发射扫描电子显微镜和显微拉曼成像光谱仪对其形貌及化学组成进行了表征, 用数显万用表和电化学工作站测试了其导电性能。结果表明, 聚苯胺聚合在尼龙织物的表面, 赋予尼龙织物较好的导电性, 聚苯胺尼龙导电织物电导率为 31.62 S/m。聚苯胺尼龙导电织物的电阻随应变的增大而增大, 当应变恢复到初始状态时, 电阻逐渐恢复并接近初始值, 在 3500 次拉伸-回复循环后仍有 96.2% 的高循环稳定性。聚苯胺尼龙导电织物具有良好的传感性能, 在 0~15% 应变范围内可以准确监测人体的关节运动。同时, 聚苯胺尼龙导电织物也具有热电性能, 其塞贝克系数为 8.406 $\mu\text{V}/\text{K}$, 有望作为温差传感器。

关键词: 织物传感器; 热电织物; 应变传感; 聚苯胺; 运动监测; 功能材料

中图分类号: TS106; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1003-5214 (2023) 09-1919-06

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Preparation and sensing properties of polyaniline nylon conductive fabric

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

(Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: A layer of polyaniline conductive material was developed on the surface of nylon fabric by low temperature *in situ* polymerization, and characterized by field emission scanning electron microscopy and microscopic Raman imaging spectrometer for morphology and chemical composition analyses. The conductivity of polyaniline nylon fabric was then measured by digital multimeter and electrochemical workstation. The results showed that polyaniline polymerized on the surface led to the improvement of electrical conductivity, 31.62 S/m, of polyaniline nylon conductive fabric. The resistance of polyaniline nylon conductive fabric increased with the increase of strain, but gradually recovered back to the initial value when the strain returned to the initial state. The polyaniline nylon conductive fabric still maintained a high recycle stability of 96.2% after 3500 stretching-releasing cycles. Furthermore, the polyaniline nylon conductive fabric exhibited good sensing performance and could accurately monitor the joint movement of human body within strain ranging from 0 to 15%. Meanwhile, the polyaniline nylon conductive fabric displayed thermoelectric properties. With a Seebeck coefficient of 8.406 $\mu\text{V}/\text{K}$, the fabric showed good potential in temperature sensing.

Key words: fabric sensors; thermoelectric fabrics; strain sensing; polyaniline; motion monitoring; functional materials

织物基柔性传感器因其轻薄、灵敏度高, 且具有可穿戴功能, 在军事、医疗、健康检测、娱乐等方面极具发展潜力^[1-3]。开发织物基柔性传感器通常

是将导电材料与柔性基底相结合, 根据导电材料的不同, 柔性织物传感器主要分为金属基柔性织物传感器^[4-5]、聚合物基柔性织物传感器^[6-7]以及碳基柔

收稿日期: 2022-11-24; 定用日期: 2023-02-25; DOI: 10.13550/j.jxhg.20221073

基金项目: 国家自然科学基金 (21975107)

作者简介: 韩玮屹 (1998—), 男, 硕士生, E-mail: jnuhanweiyi@163.com。联系人: 王潮霞 (1969—), 女, 教授, E-mail: wchaoxia@sohu.com。

性织物传感器^[8-10]。导电聚合物聚苯胺具有成本低廉、制备简单、电导率高、稳定性好的特点,将其用于柔性传感器可实现对运动、呼吸、脉搏、声音等人体信号的采集,具有广阔的应用前景^[6,11-12]。

聚苯胺因其优异的导电性、稳定的理化性质已引起能源、防腐、传感等领域研究者的广泛关注。柯贵珍等^[13]采用原位聚合法制得了导电性较好的聚苯胺复合棉织物,并探究了合成工艺对织物电阻的影响;韩潇等^[14]以涤纶织物为基材,采用原位聚合法制备了导电涤纶/聚苯胺复合针织物,并研究了导电针织物的应变-电阻传感性能。尼龙织物具有良好的机械性能,耐磨性能强,氨纶织物具有良好的弹性,而尼龙氨纶混纺织物兼具二者良好的性能,是拉伸传感织物良好的基材。原位聚合法是制备聚苯胺导电织物的常用方法^[15],先将织物浸入含有盐酸的苯胺溶液中,再用过硫酸铵引发苯胺聚合,从而得到聚苯胺改性织物,该方法可以提高聚苯胺的附着量及结合力,从而增强织物导电能力。

本研究拟采用原位聚合法在尼龙织物表面形成一层聚苯胺导电层,制得聚苯胺尼龙导电织物,探究反应温度、应变、拉伸次数、拉伸速率对织物导电性能的影响,并分析其应变和温差传感性能。旨在探索应变、温差双功能人体信号采集的新途径。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

苯胺、过硫酸铵、浓盐酸(质量分数 36%),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;尼龙织物(250 g/m²,尼龙质量分数 90%、氨纶质量分数 10%),义乌市博毅织带有限公司。

LSHZ-300 冷冻水浴恒温振荡器,常州申光仪器有限公司;8846A 数显万用表,美国 Fluke 公司;SZT-2A 四探针表面电阻测试仪,苏州同创电子有限公司;SU8100 场发射扫描电子显微镜,日本日立株式会社;DXR 3xi 显微拉曼成像光谱仪,美国赛默飞世尔科技公司;CHI760E 电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;CTM2050 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;YB571-II 型织物摩擦牢度仪,温州市大荣纺织仪器有限公司。

1.2 聚苯胺尼龙导电织物的制备

按 $n(\text{苯胺}):n(\text{浓盐酸})=1:2$ 、 $n(\text{苯胺}):n(\text{过硫酸铵})=4:5$ 配制反应溶液。取 3.72 g (0.04 mol) 苯胺溶于 40 mL 2 mol/L 盐酸中,将 5 cm×1 cm 尼龙织物浸渍在苯胺盐酸溶液中。将 11.4 g (0.05 mol) 过

硫酸铵溶于 40 mL 去离子水中,然后将制备的过硫酸铵溶液缓慢滴加至上述体系中,先后分别在室温(25 °C)和冰水浴(0 °C)下反应 24 h,取出织物,水洗,80 °C 烘干^[16],得到聚苯胺尼龙导电织物。

1.3 测试与表征方法

1.3.1 结构表征

采用场发射扫描电子显微镜观察未处理尼龙织物和聚苯胺尼龙导电织物的表面形貌,测试电压为 4 kV,放大倍数 2000 倍。并采用显微拉曼成像光谱仪分析二者结构特征,拉曼激发光源测试波长为 532 nm。

1.3.2 导电性能测试

采用数显万用表测量聚苯胺尼龙导电织物电阻,保持两夹头间距为 4 cm,测量 3 次,取平均值。

1.3.3 应变-电阻传感性能测试

将聚苯胺尼龙导电织物张紧(伸直但不伸长)后夹持在微机控制电子万能材料试验机两侧的夹头上,保持两夹头间距为 4 cm,将电化学工作站与织物两侧相连。启动微机控制电子万能材料试验机,夹头以 30 mm/min 的速率往复运动,对聚苯胺尼龙导电织物分别进行 5%、10%、15%、20%、30%、40%、50% 的拉伸测试,每个测试重复进行 5 次,电化学工作站实时记录织物电阻的变化情况,探究不同应变对织物电阻的影响。分别以 30、60、120、240、480、720 mm/min 的速率对聚苯胺尼龙导电织物进行 15% 应变拉伸测试,每个测试重复进行 5 次,化学工作站实时记录织物电阻的变化情况,探究不同拉伸速率对织物电阻的影响。再以 420 mm/min 的速率将聚苯胺尼龙导电织物拉伸 15% 应变并重复 3500 次,测试织物拉伸-回复循环稳定性。

1.3.4 人体运动监测

将聚苯胺尼龙导电织物分别贴附于食指和手腕上,测试者分别做手腕和手指下弯两个动作,采用电化学工作站记录聚苯胺尼龙导电织物在不同动作时电流的变化,每个动作重复 5 次。

1.3.5 温差传感测试

将聚苯胺尼龙导电织物夹在自制的塞贝克系数测试装置上,测试环境温度为 20 °C,织物两端温差为 0~40 K 依次变化,每隔 2 K 记录 1 次聚苯胺尼龙导电织物两端开路电压,计算聚苯胺尼龙导电织物的塞贝克系数。采用四探针表面电阻测试仪测试织物电导率,计算织物功率因子。

2 结果与讨论

2.1 表观形貌与化学结构分析

图 1 为尼龙织物与聚苯胺尼龙导电织物的

SEM 图。

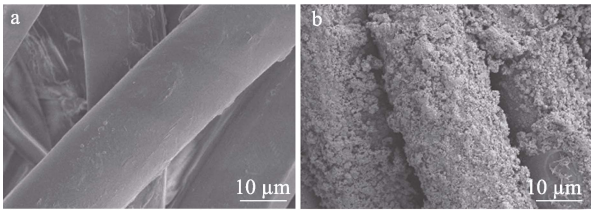


图 1 尼龙织物 (a)、聚苯胺尼龙导电织物 (b) 的 SEM 图
Fig. 1 SEM images of nylon fabric (a) and polyaniline nylon conductive fabric (b)

由图 1a 可见, 尼龙织物纤维表面较为光滑平整。由图 1b 可见, 聚苯胺尼龙导电织物表面被粒状物质完全包裹, 说明聚苯胺成功地原位聚合在尼龙织物上。但纤维表面有少量的突出部分, 这可能是由聚苯胺团聚造成的^[17]。

图 2 为尼龙织物与聚苯胺尼龙导电织物拉曼光谱。

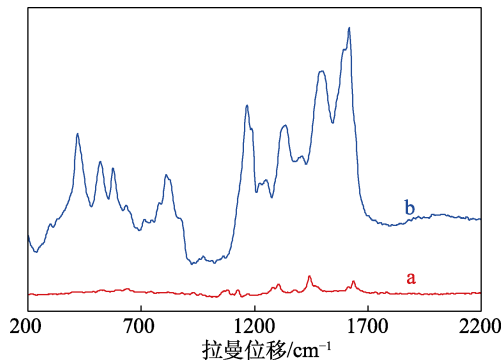


图 2 尼龙织物 (a) 与聚苯胺尼龙导电织物 (b) 的拉曼光谱
Fig. 2 Raman spectra of nylon fabric (a) and polyaniline nylon conductive fabric (b)

由图 2 可见, 聚苯胺尼龙导电织物相较于尼龙织物产生了新的特征峰, 其中, 812 cm^{-1} 处的吸收峰对应 C—N 键的变形振动, 1165 cm^{-1} 处的吸收峰对应氧化形式的 C—H 键的振动, 而 1180 cm^{-1} 处的吸收峰对应还原形式的 C—H 键的振动, 1335 cm^{-1} 处的吸收峰为介于 C—N 与 C=N 键之间的极化子带, 1480 cm^{-1} 附近的吸收峰对应 C=N 键的振动, 1616 cm^{-1} 附近的吸收峰对应苯环 C—C 键的伸缩振动。这些特征峰表明, 聚苯胺尼龙导电织物表面存在具有导电性能的掺杂态聚苯胺^[18-20]。

2.2 聚苯胺尼龙导电织物导电性能的影响因素

2.2.1 反应温度的影响

采用数显万用表测试不同温度 (0 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下制备的聚苯胺尼龙导电织物电阻, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下制备的聚苯胺尼龙导电织物电阻为 $253\text{ }\Omega$, 其导电性优于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下制备的 $11321\text{ }\Omega$, 这是由于在低温条件下, 苯胺的聚合速率

较慢, 有利于在尼龙织物表面形成分子链规整、相对分子质量高的聚苯胺导电层; 如果反应温度较高, 聚苯胺分子链的大 π 键易被破坏, 生成的聚苯胺分子链短, 与纤维结合牢度低, 从而导致聚苯胺导电织物导电性能下降^[21]。对比不同温度下制备的聚苯胺尼龙导电织物, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下制备的织物导电性能更佳, 因此, 采用该样品进行后续测试。

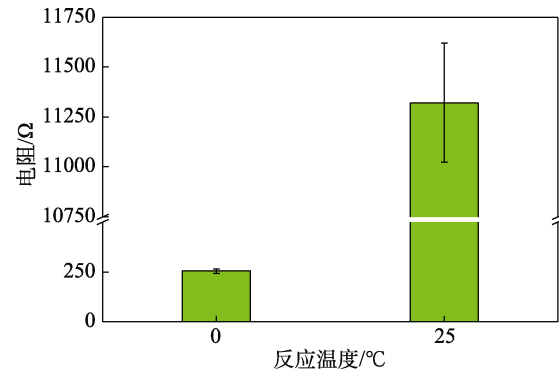


图 3 聚苯胺尼龙导电织物导电性与反应温度的关系
Fig. 3 Relation between conductivity and reaction temperature of polyaniline nylon conductive fabric

2.2.2 应变的影响

由于本研究选择织物纤维为尼龙与氨纶的混纺纤维, 本身具有良好的拉伸弹性。对聚苯胺尼龙导电织物分别进行应变从 0 到 50% 拉伸, 记录电阻变化率与应变的关系, 考察适合传感性能测试的应变范围, 结果如图 4 所示。

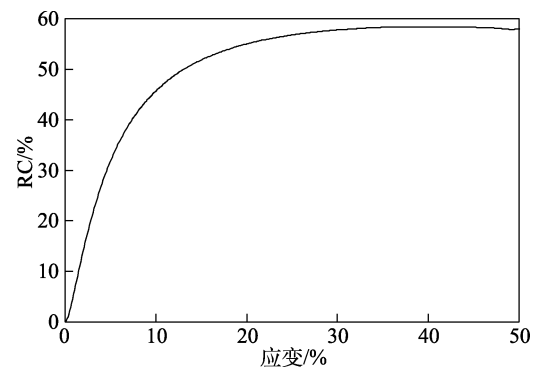


图 4 聚苯胺尼龙导电织物导电性随应变的变化
Fig. 4 Change of conductivity of polyaniline nylon conductive fabric with strain

根据式 (1) 计算聚苯胺尼龙导电织物电阻变化率:

$$RC/\% = (R_0 - R) / R_0 \times 100 \quad (1)$$

式中: RC 为电阻变化率, %; R 为聚苯胺尼龙导电织物受到拉伸时电阻, Ω ; R_0 为聚苯胺尼龙导电织物原长时电阻, Ω 。

由图 4 可知, 当聚苯胺尼龙导电织物应变为 0~15% 时, 电阻变化率与应变变化呈线性关系, 在此阶段, 尼龙织物上聚苯胺导电层截面面积缩小量极其有限, 较其应变变化可忽略不计。根据 $R = \rho L / S$

(其中: R 为织物电阻, Ω ; ρ 为织物电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; L 为织物长度, cm ; S 为织物截面积, cm^2) 可知, 织物电阻与应变几乎呈线性关系。当应变增至 40% 时, 聚苯胺导电网络发生部分断裂, 部分聚苯胺之间失去有效连接, 导电性能进一步下降。当应变 $>40\%$ 时, 聚苯胺导电网络断裂过程已基本结束, 应变增加时, 已断裂的聚苯胺导电网络间距进一步增大, 因而电阻变化率增大速率极慢。

为进一步考察聚苯胺尼龙导电织物应变传感的线性及灵敏度, 在不同应变范围内(5%、10%、15%、20%、30%、40%、50%) 对聚苯胺尼龙导电织物的电阻变化率与应变进行线性拟合, 斜率即为传感器灵敏度, 结果如表 1 所示。

表 1 聚苯胺尼龙导电织物的电阻变化率与应变的拟合方程

Table 1 Fitting equation between resistance change rate and strain of polyaniline nylon conductive fabric

应变/%	拟合方程	R^2
5	$y=6.8658x-0.0045$	0.9968
10	$y=4.7591x+0.0431$	0.9764
15	$y=3.3811x+0.0962$	0.9492
20	$y=2.5129x+0.1439$	0.9212
30	$y=1.5386x+0.2204$	0.8678
40	$y=1.0284x+0.2776$	0.8163
50	$y=0.7213x+0.3223$	0.7625

由表 1 可知, 聚苯胺尼龙导电织物在 0~5% 应变范围内, 灵敏度为 6.87, 拟合曲线相关系数 (R^2) = 0.9968, 说明此范围内织物电阻变化率与应变具有高度线性相关性; 当应变增至 15% 时, 聚苯胺尼龙导电织物灵敏度降至 3.38, 拟合曲线相关系数降至 0.9492, 随着应变进一步增加, 聚苯胺颗粒间逐步失去有效连接, 电阻变化率增加速率减缓, 聚苯胺尼龙导电织物灵敏度及拟合曲线线性相关程度降低。

图 5 为聚苯胺尼龙导电织物在应变依次为 5%、10%、15%、20%、30%、40%、50% 时电阻变化率曲线。

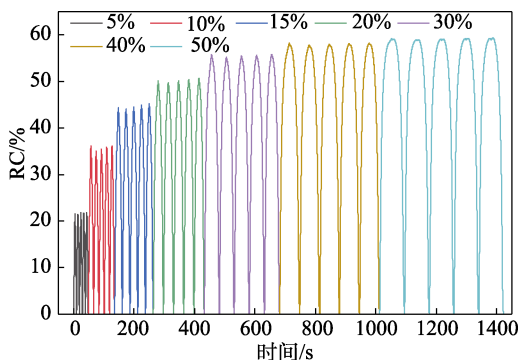


图 5 聚苯胺尼龙导电织物的 RC 与应变的关系
Fig. 5 Relationship between RC and strain of polyaniline nylon conductive fabric

由图 5 可知, 当对聚苯胺尼龙导电织物施加一系列阶梯增加应变时, 聚苯胺尼龙导电织物能稳定地对应变做出响应。

总体来看, 在 0~15% 应变范围内, 聚苯胺尼龙导电织物电阻变化率与应变有较好的线性关系, 通过电阻的变化能够反映拉伸的程度, 可用于监测人体的关节运动。因此, 当人体的运动在此范围内时, 聚苯胺尼龙导电织物能够反馈人体的运动信息。

2.2.3 拉伸次数

耐久性是测试人体信号传感器性能的一个重要指标, 为了测试聚苯胺尼龙导电织物的耐久性, 对织物以 480 mm/min 的速率在 0~15% 应变范围进行拉伸-回复循环测试 3500 次, 用电化学工作站记录织物电阻变化, 聚苯胺尼龙导电织物的导电性与拉伸次数的关系见图 6。

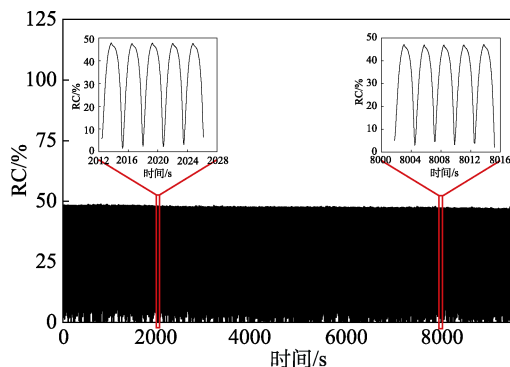


图 6 聚苯胺尼龙导电织物的导电性与拉伸次数的关系
Fig. 6 Relationship between conductivity and stretching cycles of polyaniline nylon conductive fabric

根据式(2)计算聚苯胺尼龙导电织物的稳定性:

$$S/\%=(R_0-R_1)/R_0 \times 100 \quad (2)$$

式中: S 为聚苯胺尼龙导电织物的稳定性, %; R_1 为聚苯胺尼龙导电织物受到拉伸-回复循环后的电阻, Ω ; R_0 为聚苯胺尼龙导电织物初始电阻, Ω 。

由图 6 可以看出, 当聚苯胺尼龙导电织物受到 3500 次拉伸-回复循环后, 其电阻变化较小, 稳定性为 96.2%。随着拉伸次数的增加, 聚苯胺尼龙导电织物电阻变化率逐渐降低, 这是因为, 织物发生不可逆的黏性流动, 无法恢复原长, 聚苯胺导电网络间有效连接受到破坏, 织物电阻有所下降。对比前后两组插图可以看出, 聚苯胺尼龙导电织物经过多次拉伸后电阻变化率波形和变化范围几乎无变化。

2.2.4 拉伸速率

分别以 30~720 mm/min 设置梯度拉伸速率对聚苯胺尼龙导电织物在 15% 应变下进行拉伸-回复循环测试, 结果如图 7 所示。由图 7 可见, 拉伸速率对聚苯胺尼龙导电织物应变传感性能影响较小, 且不同拉伸速率时聚苯胺尼龙导电织物均具有较好的稳定性。

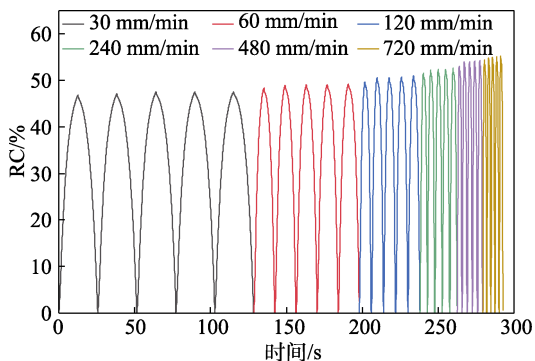


图 7 聚苯胺尼龙导电织物 RC 与拉伸速率的关系

Fig. 7 Relationship between RC and stretching rate of polyaniline nylon conductive fabric

2.2.5 摩擦次数

采用织物摩擦牢度仪对聚苯胺尼龙导电织物的耐摩擦性能进行分析, 结果见图 8。

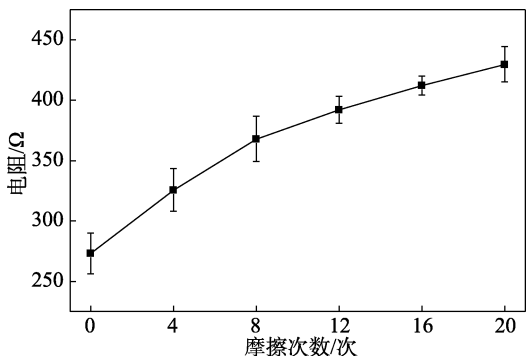


图 8 聚苯胺尼龙导电织物导电性与摩擦次数的关系

Fig. 8 Relationship between electrical conductivity and friction times of polyaniline nylon conductive fabric

由图 8 可知, 随着摩擦次数的增加, 聚苯胺尼龙导电织物的电阻逐渐增大, 导电性能呈下降趋势, 在摩擦过程中, 织物表面的聚苯胺颗粒发生脱落。在经过 20 次摩擦测试后, 聚苯胺尼龙导电织物的导电性维持在 430 Ω 左右, 说明其具有良好的耐摩擦性能。

2.3 聚苯胺尼龙导电织物的传感性能

2.3.1 应变传感

聚苯胺尼龙导电织物导电性能随着应变的增大而减小, 将导电织物贴附于人体关节上, 可通过电化学工作站实时监测人体关节部位的运动信号。考虑到手部活动较多, 且便于检测, 选择手指和手腕作为检测聚苯胺尼龙导电织物传感性能的部位。设置测试电压为 1 V, 采用电化学工作站记录贴附于食指和手腕处的导电织物电阻信号变化, 结果如图 9 所示。

图 9a、b 为测试者做出食指和手腕下弯-回复动作时聚苯胺尼龙导电织物电流信号变化情况, 曲线中的 1 个波峰代表 1 次下弯-回复动作。由图 9a、b 可知, 当手指及手腕平放时, 聚苯胺尼龙织物处于自然伸长状态, 电阻较为稳定, 当食指和手腕分别向下弯曲时, 聚苯胺尼龙织物受到应力并产生形变,

导电性能下降, 电流信号波形产生明显变化, 手指下弯时响应时间约为 0.40 s (图 9c); 当手指和手腕回复至原位, 聚苯胺尼龙导电织物也恢复原长, 导电性能提升, 电流信号恢复初始状态, 波形再次出现明显变化, 手指回复响应时间约为 0.55 s (图 9d)。

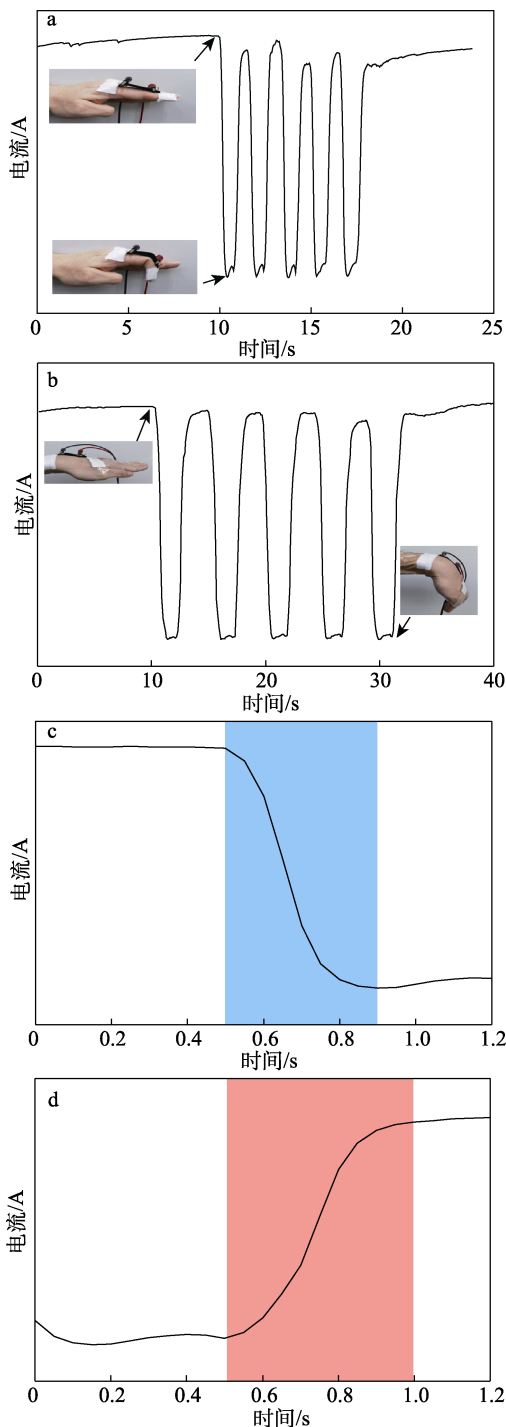


图 9 聚苯胺尼龙导电织物在手指 (a) 和手腕关节处 (b) 进行下弯-回复动作时的电流信号变化及手指下弯 (c)-回复 (d) 响应时间

Fig. 9 Change of current signal of polyaniline nylon conductive fabric at finger (a) and wrist joint (b) during the flexion-recovery action and the response time of finger flexion (c)-recovery (d)

聚苯胺尼龙导电织物在拉伸-回复过程中, 纤维大分子在受到外力作用后会发生普弹形变、高弹形变和黏性流动, 当外力撤去后, 普弹形变迅速完全恢复, 高弹形变逐渐恢复, 存在滞后效应。聚苯胺间有效接触未恢复至初始值, 织物电流强度略低于初始状态。随着纤维间距逐渐回复, 聚苯胺导电网络逐渐完善, 织物电阻随之减小, 导电性能提升。在食指及手腕做出相似程度的下弯时, 5 次测试信号波形及强度变化相似, 说明聚苯胺尼龙导电织物可监测手指、手腕等人体关节部位的运动信号。

2.3.2 温差传感

室温 (20 °C) 下采用自制塞贝克系数测试装置测量冷端为 20 °C、两端温差为 0~40 K 依次变化时聚苯胺尼龙导电织物两端输出电压, 结果如图 10 所示。其斜率即为塞贝克系数, 并根据 $PF=\sigma S^2$ 计算出聚苯胺尼龙导电织物功率因子, 其中: PF 为织物功率因子, $W/(m \cdot K^2)$; σ 为织物电导率, S/m ; S 为织物塞贝克系数, $\mu V/K$ 。

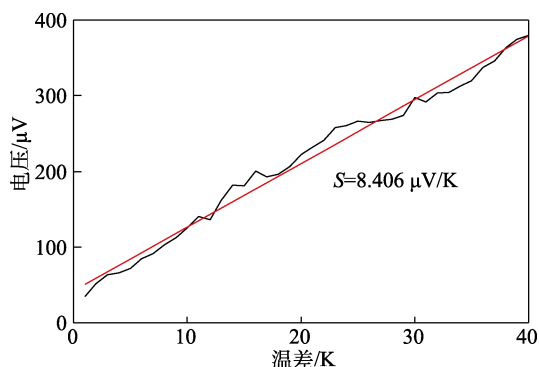


图 10 聚苯胺尼龙导电织物输出电压与两端温差的关系
Fig. 10 Relationship between output voltage and temperature difference at both ends of polyaniline nylon conductive fabric

根据图 10 拟合曲线斜率可得出, 聚苯胺尼龙导电织物塞贝克系数为 $8.406 \mu V/K$ 。采用四探针测试仪测得聚苯胺尼龙导电织电导率为 $31.62 S/m$ 。根据 $PF=\sigma S^2$ 计算出聚苯胺尼龙导电织物功率因子为 $2.23 \times 10^{-9} W/(m \cdot K^2)$ 。根据以上数据可以得出, 聚苯胺尼龙导电织物具有温度传感性能。

3 结论

本文通过原位聚合法制备了聚苯胺尼龙导电织物, 探究了反应温度、应变、拉伸次数、拉伸速率对织物导电性能的影响, 并测试了将其作为应力和温度传感器的可能性, 得出以下主要结论:

(1) 采用原位聚合法可在尼龙织物表面形成一层聚苯胺导电层, 赋予织物导电能力, 相比于室温, 在冰水浴环境下, 聚苯胺在尼龙织物上原位聚合量

更多, 织物导电性更好;

(2) 聚苯胺尼龙导电织物具有良好的拉伸弹性, 当织物受到应力产生形变时, 导电性能降低, 回缩时恢复; 在 15% 应变范围内电阻变化率与应变线性相关性高; 当织物受到不同程度和速率的拉伸时都具有较好的稳定性, 且经过 3500 次拉伸-回复循环后织物仍具有较好的稳定性;

(3) 将聚苯胺尼龙导电织物作为传感器贴附于手指和手腕上, 可实时监测人体关节运动信号; 聚苯胺尼龙导电织物塞贝克系数为 $8.406 \mu V/K$, 可检测织物两端温差。聚苯胺尼龙导电织物作为一种智能可穿戴传感材料, 在与电子信息技术相融合后, 可用于日常对人体运动及体温的实时监测。

参考文献:

- [1] KHAN Y, OSTFELD A E, LOCHNER C M, *et al.* Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices[J]. *Advanced materials*, 2016, 28(22): 4373-4395.
- [2] AFROJ S, KARIM N, WANG Z H, *et al.* Engineering graphene flakes for wearable textile sensors via highly scalable and ultrafast yarn dyeing technique[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 3847-3857.
- [3] LIU M M, PU X, JIANG C Y, *et al.* Large-area all-textile pressure sensors for monitoring human motion and physiological signals[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(41): 1703700.
- [4] YANG Q, WANG X, DING X, *et al.* Fabrication and characterization of wrapped metal yarns-based fabric temperature sensors[J]. *Polymers*, 2019, 11(10): 1549.
- [5] LU X, SHANG W H, CHEN G K, *et al.* Environmentally stable, highly conductive, and mechanically robust metallized textiles[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(3): 1477-1488.
- [6] WANG C L (王晨露), MA J X (马金星), YANG Y Q (杨雅晴), *et al.* Strain sensing property and respiration monitoring of polyaniline-coated warp-knitted fabrics[J]. *Journal of Textile Research (纺织学报)*, 2022, 43(8): 113-118.
- [7] LV J C, LIU Z, ZHANG L, *et al.* Multifunctional polypyrrole and rose-like silver flower-decorated E-textile with outstanding pressure/strain sensing and energy storage performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 130823.
- [8] LI Z Z (李泽钊), YUAN Y (原韵), HAN W Y (韩玮屹), *et al.* Conductive nylon fabric modified with graphene and its strain sensing performances[J]. *Textile Auxiliaries (印染助剂)*, 2020, 37(5): 27-30.
- [9] HE Y X, ZHOU M Y, MAHMOUD M H H, *et al.* Multifunctional wearable strain/pressure sensor based on conductive carbon nanotubes/silk nonwoven fabric with high durability and low detection limit[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(3): 1939-1950.
- [10] SUN C Y (孙才英), LYU W F (吕文丰), CIREDAJIE (次仁达杰), *et al.* Carbon nanotubes grafted to linen fabric with pressure sensing properties[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(2): 295-301.
- [11] CAI H H, LIU Z L, XU M T, *et al.* High performance flexible silk fabric electrodes with antibacterial, flame retardant and UV resistance for supercapacitors and sensors[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 390(10): 138895.
- [12] 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.
- [13] KE G Z (柯贵珍), CHOWDHURY M H (乔杜里·莫法塞·哈克), ZHANG M Z (张明卓), *et al.* Preparation and conductive property of polyaniline composited cotton fabric[J]. *Cotton Textile Technology (棉纺织技术)*, 2019, 47(4): 14-17.

(下转第 1958 页)