

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.03.004

基于高强韧自修复聚氨酯的柔性应变传感器 制备及其性能

杨光^{1,2}, 丁云鹏^{1,2}, 邢任权^{1,2}, 唐薪潮^{1,2}, 闫静^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织未来技术研究中心, 天津 300387)

摘要: 针对柔性应变传感器在使用中因疲劳或机械损伤而导致的传感性能失效问题, 设计了一种基于多重氢键网络的高韧性、自修复聚氨酯, 通过将其与导电的氧化锡锑(ATO)纳米纤维复合, 获得了具有高稳定性和自修复能力的柔性应变传感器, 并系统研究了其力学性能、传感性能和自修复性能。结果表明: 所制备的自修复聚氨酯具有900%的断裂伸长率和8 MPa的拉伸强度; 基于此聚氨酯所制备的柔性应变传感器在40%应变范围内拥有高达240的灵敏度和良好的循环稳定性; 此外, 得益于聚氨酯的动态氢键网络, 传感器在受损后通过加热可以完全恢复到初始力学性能和传感性能。

关键词: 柔性应变传感器; 自修复; 聚氨酯; 韧性

中图分类号: TB34; TP212.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)03-0031-08

Fabrication and properties of flexible strain sensor based on highly tough and self-healing polyurethane

YANG Guang^{1,2}, DING Yunpeng^{1,2}, XING Renquan^{1,2}, TANG Xinchao^{1,2}, YAN Jing^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Future Textile Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To address the performance failure issues due to fatigue or mechanical damage in flexible strain sensors during use, this study prepared a high-toughness, self-healing polyurethane based on a multi-hydrogen bond network. By compositing it with conductive antimony tin oxide (ATO) nanofibers, a highly stable, self-healing flexible strain sensor was developed and extensively characterized for its mechanical and sensing properties. Results indicate that the fabricated self-healing polyurethane exhibits a 900% elongation at break and a tensile strength of 8 MPa. The flexible strain sensor constructed from this polyurethane demonstrates a sensitivity as high as 240 within a strain range of 40% and maintains excellent cyclic stability. Additionally, thanks to the dynamic hydrogen bonding network of polyurethane, the sensor can fully recover its initial mechanical and sensing performance after being damaged by heating.

Key words: flexible strain sensor; self-healing; polyurethane; toughness

柔性应变传感器能够在拉伸、弯曲和扭转状态下工作, 可有效满足智能可穿戴电子设备的需求, 这使其在人造皮肤、运动检测、健康监测和人机交互等领域受到了极大关注^[1-5]。开发柔性应变传感器的常见策略是通过结构和工艺设计, 将无机填料(如炭黑、银纳米线、石墨烯和碳纳米管)作为传感层引入到由弹性聚合物组成的基体中, 从而使柔性应变传感器具有聚合物基体和填充物的力学和电学性能^[6-11]。柔性聚合物

基体在柔性应变传感器的开发中具有重要意义, 其一般要具备可以容纳大幅形变和复杂机械应力的独特属性。到目前为止, 常用的柔性聚合物基体材料包括聚二甲硅氧烷(PDMS)和聚氨酯(PU)等, 这2种聚合物都有其特定的优点, 适用于不同的传感应用场景。例如, PDMS以其卓越的柔韧性、光学透明度、生物相容性及易于加工的特性而广受青睐。其固有的弹性和柔软性使得传感器能够承受显著的机械形变, 非常

收稿日期: 2024-04-15 基金项目: 天津市自然科学基金项目(23JCYBJC00650)

通信作者: 杨光(1985—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能聚合物材料与柔性器件。E-mail: gyang@tiangong.edu.cn

适用于直接与皮肤接触的可穿戴设备^[12-17]。然而,PDMS 基体在使用过程中很容易被划伤或破裂,导致传感器无法正常工作,而且长期使用会造成老化,严重影响柔性应变传感器的使用寿命和工作稳定性。

PU 以高弹性和良好的耐磨性而著称,同时通过调控其化学结构,可以制备出硬度和弹性各异的PU,这一点对于开发需要承受反复机械应力的柔性应变传感器至关重要。值得注意的是,通过引入可逆共价键或非共价键可设计聚氨酯的自修复性能,从而使其能够修复物理损伤,恢复其原始结构和传感功能^[18-22]。在各类可逆动态键中,氢键广泛存在于各类聚氨酯中,且具备快速解离/键合的优势,因此近年来被大量应用于聚氨酯的自修复功能设计。比如,Xu 等^[23]使用短链的五甘醇和不对称结构的异氰酸酯合成了具有高密度弱氢键作用的聚氨酯,在室温条件下即具有良好的自修复效率。然而,由于氢键本身键能偏低,导致材料机械性能较差,这使得柔性应变传感器的应用性能受到较大影响^[24-27]。因此,通过调控氢键网络开发出具有高强韧、可自修复的聚氨酯基材并用于柔性应变传感器具有重要意义。

基于此,本文将具有四重氢键的脲基嘧啶酮(UPy)、二重氢键以及多重弱氢键引入聚氨酯分子网络,形成多重氢键协同作用,从而制备出具有高强韧和自修复能力的聚氨酯。利用该聚氨酯对高导电性的氧化锡锑(ATO)纳米纤维进行封装,制备具有优异传感性能、高稳定性和可自修复的柔性应变传感器,并对该传感器的灵敏性、应变范围、循环稳定性以及自修复性能进行测试分析。

1 实验部分

1.1 实验试剂与设备

材料与试剂:聚四氢呋喃(PTMEG, 1 000 g/mol)、季戊四醇四-3-巯基丙酸酯(90%)、2-氨基-4-羟基-6-甲基嘧啶、4,4-双(羟甲基)-2,2-二吡啶(BNB)、2-氨基-2-甲基-1,3-丙二醇、六亚甲基二异氰酸酯(HDI)、异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、二月桂酸二丁基锡(DBTDL)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、五水合四氯化锡($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、三氯化锑(SbCl_3),均为分析纯,上海阿拉丁生物科技有限公司;聚乙烯吡咯烷酮(1 300 kg/mol)、无水乙醇、正己烷,均为分析纯,麦克林生物科技有限公司。

仪器与设备:静电纺丝装置,自制;KSL-1200X 型马弗炉,中国合肥科晶材料技术有限公司;Nicolet iS50

型红外光谱仪,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;Model 3369 型万能强力试验机,美国 Instron 公司;BX51 型光学显微镜,日本 Olympus 公司;DAQ6510 型精密电阻万用表,美国 Keithley 公司。

1.2 ATO 纳米纤维膜的制备

ATO 纳米纤维膜的制备需要使用静电纺丝技术,并结合后续的高温煅烧工艺^[12]。首先将聚乙烯吡咯烷酮溶解于乙醇/DMF(体积比为 2:1)混合溶剂中,所制备的聚乙烯吡咯烷酮溶液的质量分数为 12%。随后,向溶液中加入总质量分数为 10%的 ATO 前驱体,即金属盐 SbCl_3 和 $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,保持溶液中 Sb:Sn 的摩尔比为 1:9。纺丝液在 22 kV 电压和低于 35%的相对湿度下纺丝 30 min。纺丝液的挤出速率为 0.1 mL/h,纺丝距离为 18 cm,收集辊的转速为 150 r/min。然后将纳米纤维膜放入马弗炉,在空气气氛下以 1 °C/min 的速率加热至 700 °C并保温 4 h,再经缓慢冷却后获得了高导电 ATO 纳米纤维膜。

1.3 UPy 扩链剂的合成

将 2.00 g 干燥的 2-氨基-4-羟基-6-甲基嘧啶置于三口烧瓶中,加入足量的 HDI,在氮气环境中于 100 °C 反应 10 h。反应溶液冷却后,加入正己烷洗涤并过滤得到白色产物,即异氰酸酯改性的 UPy(UPy-NCO)。然后将 6.00 g UPy-NCO 固体和 3.34 g 2-氨基-2-甲基-1,3-丙二醇加入反应烧瓶中,在 60 °C 氮气氛围下反应 5 h,反应完成后使用 DMF 洗涤,最后在 50 °C 鼓风烘箱中干燥 3 h,得到白色固态 UPy 扩链剂。

1.4 自修复柔性应变传感器的制备

自修复柔性应变传感器的制备流程如图 1 所示,其包含自修复聚氨酯合成及其与导电 ATO 纳米纤维膜的复合。

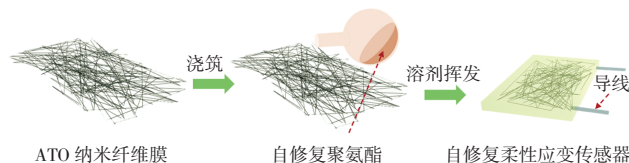


图 1 柔性应变传感器的制备流程

Fig.1 Preparation process of flexible strain sensor

(1) 自修复聚氨酯的合成:将 3.00 g PTMEG 聚合物加入三口烧瓶中,抽真空,于 100 °C 下烘干 1 h。然后加入 14.00 mL 干燥后的 DMF、1.32 mL IPDI 和少量 DBTDL 作为催化剂。在氮气保护下,将反应液放置在 70 °C 环境中进行 2 h 反应得到预聚物,随后在反应溶液中加入 BNB 扩链剂和 UPy 扩链剂,再反应 1 h。随后加入 0.29 g 的交联剂季戊四醇四-3-巯基丙酸酯,并交联反应 1 h 得到聚氨酯的预交联溶液,进一步在

80 °C下烘干获得聚氨酯膜。

(2) 为了获得电阻式柔性应变传感器,将预交联反应后的溶液刮涂在连接有电极导线的ATO纳米纤维膜上,放置在70 °C的烘箱中充分反应并烘干2 h,再转移到80 °C的真空烘箱中烘干12 h,进而获得柔性应变传感器。

1.5 结构表征与传感性能测试

(1) 红外光谱分析:为了验证聚氨酯网络的成功合成,利用红外光谱仪对比表征聚合物原料和聚氨酯的特征官能团,扫描波数范围设定为4 000~400 cm^{-1} 。

(2) 力学性能测试:室温条件下,在万能强力试验机上对尺寸为5 mm × 40 mm的自修复聚氨酯长条试样进行力学性能测试。测试长度为20 mm,拉伸速率为10 mm/min。每种材料至少测试5次,取平均值。

(3) 自修复测试:将样品切成两半,然后使两断面紧密接触,通过控制温度和时间来完成自修复,并通过力学性能和传感性能测试来表征样品的自修复效果,通过光学显微镜观察损伤界面自修复前后的状态变化。聚氨酯自修复效率(η_1)采用修复前后的断裂伸长率比值,计算公式为:

$$\eta_1 = (\varepsilon_r / \varepsilon_0) \times 100\%$$

式中: ε_r 为修复后样品的断裂伸长率; ε_0 为初始断裂伸长率。传感器自修复效率(η_2)采用修复前后的电阻比值,计算公式如下为:

$$\eta_2 = 1 - [(R_r - R_0) / R_0 \times 100\%]$$

式中: R_r 为修复后的电阻值; R_0 为初始电阻值。

(4) 传感性能测试:柔性应变传感器的灵敏度、迟滞性、应变范围以及工作稳定性是评价柔性应变传感器的重要指标。采用万能强力试验机和精密电阻万用表搭建传感性能测试平台,如图2所示,在拉伸过程中对传感器的电阻进行实时监测。试样尺寸和测试参数与力学性能测试相同。传感器灵敏度(GF)的计算公式为:

$$GF = (\Delta R / R_0) / \varepsilon$$

式中: ΔR 为电阻值变化量; R_0 为初始电阻; ε 为应变变量。

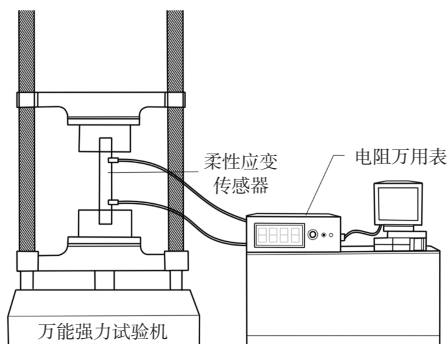


图2 传感性能测试平台示意

Fig.2 Schematic of sensor performance testing platform

2 结果与讨论

2.1 自修复聚氨酯的性能分析

2.1.1 红外光谱分析

本文所制备PU和原材料PTMEG的红外光谱如图3所示。

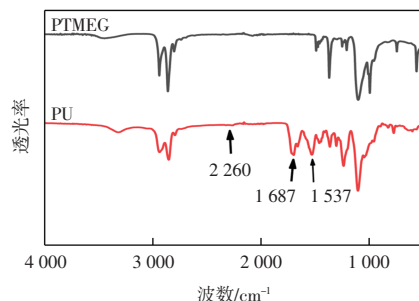


图3 PU和PTMEG的红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of PU and PTMEG

由图3可知,与原材料PTMEG相比,合成PU的红外光谱在1 687和1 537 cm^{-1} 处展现出2个清晰的吸收峰,分别对应着C=O和—NH的特征峰,这表明了—NCO和—OH反应的发生。此外,值得注意的是,在2 260 cm^{-1} 处未观察到—NCO特征峰,这表明聚合物原料、扩链剂以及交联剂与异氰酸酯已彻底反应,—NCO基团被完全消耗。这些结果充分证实了PU的成功合成。

2.1.2 力学性能分析

拉伸前后的PU外观状态如图4所示。多重氢键的引入赋予了聚氨酯优异的力学性能,所以本文合成的PU薄膜展现出良好的断裂伸长率,可被拉伸至约原长度的9倍。对初始样品进行拉伸断裂测试可知,PU膜的断裂强度达到8 MPa以上,断裂韧性达到35.4 MJ/m^3 ,这代表着其具有优异的抗破坏性能。

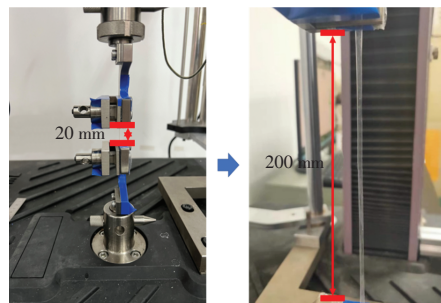


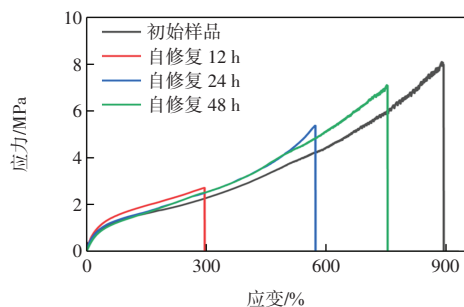
图4 PU拉伸前后的照片

Fig.4 Photos of PU before and after stretching

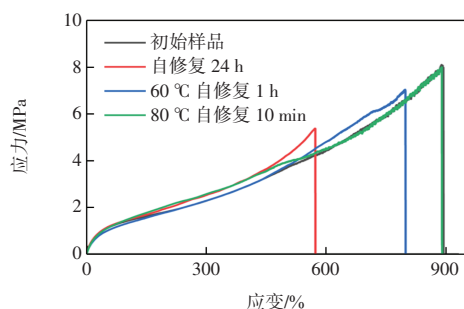
2.1.3 自修复性能分析

为了测试PU膜的自修复效率,将PU膜剪断,然后使两断面接触,在不同温度下分别修复不同时间,

自修复后聚合物的拉伸断裂结果如图 5 所示。



(a) 室温下修复 PU 的应力-应变曲线



(b) 不同温度下修复 PU 的应力-应变曲线

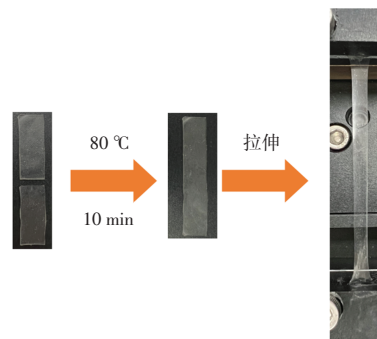
图 5 不同温度下自修复 PU 的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of self-healing PU at different temperatures

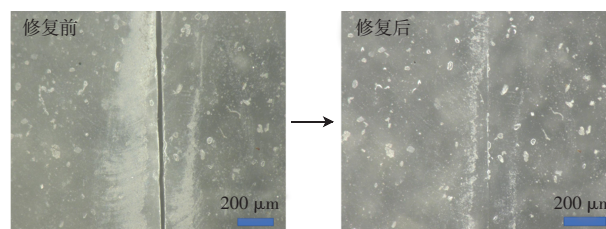
由图 5(a)可知,在室温条件下,随着自修复时间的延长,样品的断裂伸长率和应力显著增强,修复效率逐步提高。修复 12、24 和 48 h 后样品的断裂伸长率分别达到了 300%、580%和 750%,计算得到的自修复效率分别为 34%、65%和 84%,这一结果有效证实了本文所制备的聚氨酯无需外部热刺激也具有出色的修复能力。由图 5(b)可知,随着修复温度的升高,即使在大幅缩短的修复时间内,样品的修复效率依然表现出上升趋势。温度升至 60 °C 时,仅 1 h 修复时间便可实现 90%的性能恢复,高于室温下 24 h 的自修复效果。当修复温度增至 80 °C 时,样品力学性能可在 10 min 内完全恢复,达到 100%的修复效果。这些实验结果为后续柔性电子器件的自修复条件设计提供了重要参考。

为了可视化展示 PU 样品的自修复效果,将置于 80 °C 烘箱中自修复 10 min 的 PU 样品进行拉伸,并采用光学显微镜对聚氨酯损伤界面在自修复前后的形态结构进行详细观察,结果如图 6 所示。

由图 6(a)可以清楚看到,PU 拉伸至原先长度的 3 倍,其结构依旧完好,未观察到断裂痕迹,表明 PU 已经被完全修复。由图 6(b)可以看出,受损样品表面呈现了一道明显的划痕。但样品经 80 °C 处理 10 min 后,先前明显的损伤痕迹已完全消失,这一变化直观地展示了聚氨酯的自修复效果,进一步证实了其优异的自



(a) PU 修复后的拉伸照片



(b) PU 损伤界面自修复前后的光学显微镜照片

图 6 修复后 PU 的拉伸展示和光学显微镜照片

Fig.6 Stretching and optical microscopic photos after PU self-healing

修复性能。

总的来说,PU 在不同温度下均具有优异的自修复功能,特别是在高温修复环境下,样品自修复后的拉伸断裂曲线都与初始样品几乎重合,证明其具备完全修复自身损伤的能力。因此,该高强韧、自修复 PU 可作为基材应用于柔性应变传感器,从而大幅度提升传感器的稳定性和使用寿命。

2.1.4 自修复机理分析

聚氨酯的自修复功能来源于分子交联网络中的可逆多重氢键设计,其自修复机理如图 7 所示。

通过设计具有不同氢键强度的扩链剂,把弱、中、强 3 种强度的氢键引入分子链交联网络。具体来说,弱氢键为聚氨酯材料固有的氢键,中等强度的氢键来源于二元 BNB 通过相互作用形成的协同二重氢键,而强氢键则源自二元 UPy 在分子网络中形成的四重氢键。当 PU 材料在外部应力作用下遭受损伤时,在一定自修复温度下,内部分子链的流动性增强。当损伤区域的 2 个断裂面接触时,其内部分子链开始相互扩散,其中弱氢键因较低的键能可快速重组,确保了断面的密切接触。在随后的自修复过程中,聚合物网络中的中等和强氢键也逐步重组。当撤去温度后,分子链及其氢键交互作用则被固定,完成自修复过程。高温下分子链流动性增加,促使氢键网络以更大的概率重组,因此,较高的修复温度能显著提升自修复的效率。

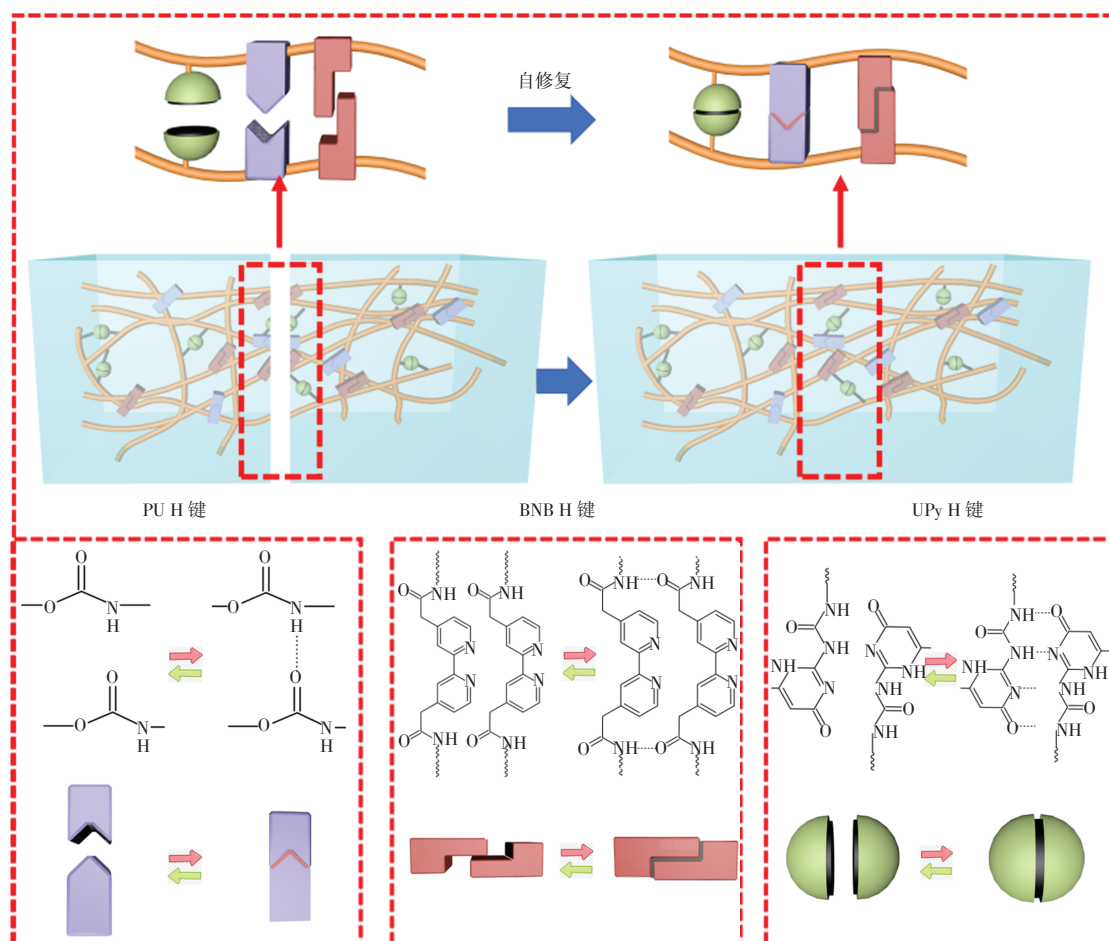


图 7 PU 的自修复机理

Fig.7 Self-healing mechanism diagram of PU

2.2 柔性应变传感器的传感性能分析

ATO 纳米纤维基传感器的核心传感原理为:当施加应变时,ATO 纳米纤维因不具备拉伸性会立即发生断裂,且纳米纤维中的裂纹随着应变的增加而逐渐增多,导电纳米纤维的逐渐断裂导致传感器电阻显著增大,引起传感器总电阻变化^[2]。基于此,本文对基于高强韧自修复 PU 的 ATO/PU 柔性应变传感器的传感性能进行了分析。

2.2.1 灵敏度分析

图 8 为本文所制备柔性传感器的灵敏度测试结果。

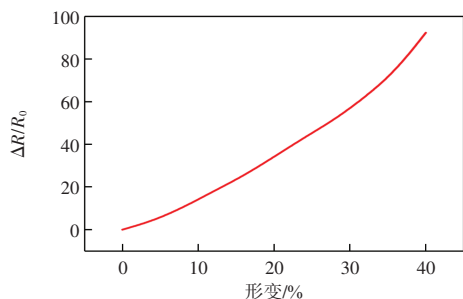


图 8 40%应变范围内传感器相对电阻的变化曲线

Fig.8 Change curve of relative resistance of sensor within 40% strain range

由图 8 可以看出,随着应变的变化,传感器的相对电阻变化($\Delta R/R_0$)呈现出较好的线性度。传感器的初始电阻 R_0 为 1 k Ω (对应电导率为 4 S/m),当应变达到 40%时,电阻大幅度增加到 97 k Ω ,对应着传感器的灵敏度高达 240,这一性能远超其他类型的柔性应变传感器,如表1 所示。

表 1 已报道的自修复柔性应变传感器性能对比

Tab.1 Performance comparison of reported self-healing flexible strain sensors

材料	断裂伸长率/%	灵敏度	自修复效率/%	参考文献
GO/BNR	750	127.00	93.98	[28]
MXenes/PDMS	100	107.00	100.00	[29]
AgNWs/PU	500	11.20	99.30	[30]
CNTs/GO/PU	900	0.45	94.00	[31]
Fe(BF ₄) ₂ /PDMS	800	0.33	95.00	[32]
GO/TPU	230	2.50	83.00	[33]
ATO/PU	900	240.00	98.00	本工作

注:GO 为石墨烯;PDMS 为聚二甲硅氧烷;BNR 为改性橡胶;AgNWs 为银纳米线;PU 为聚氨酯;CNTs 为碳纳米管;Fe(BF₄)₂ 为四氟硼酸铁六水合物;TPU 为热塑性聚氨酯。

2.2.2 循环稳定性分析

为了评估传感器的循环稳定性和耐用性,在 10%、20%、30%和 40%的应变条件下对其进行了反复拉伸测试,并在 20%的应变水平下对传感器进行 1 000 次拉伸-释放循环,结果如图 9 所示。

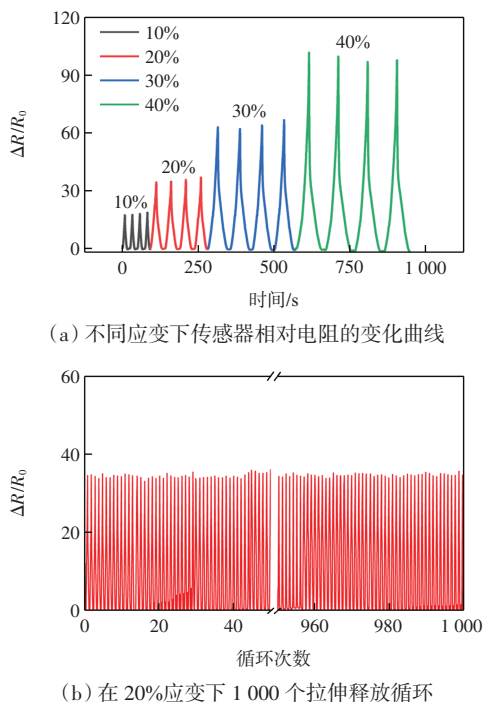


图 9 传感器在不同形变下的循环稳定性

Fig.9 Cyclic stability of sensor under different strains

由图 9(a)可知,随着应变水平的提高,信号曲线逐渐增强,同时每一种应变水平下的循环测试均显示出一致且规律的信号曲线,这证明了传感器在不同应变条件下的优良循环稳定性,这归因于自修复聚氨酯具有出色的弹性及其与 ATO 纳米纤维之间的强界面结合力。由图 9(b)可以看出,在 20%的应变水平下对传感器进行 1 000 次拉伸-释放循环,所得电信号的差异性较小,没有明显的信号削弱和异常,这代表着器件具有良好的稳定性和耐久性。

不同温度下传感器的灵敏度如图 10 所示。

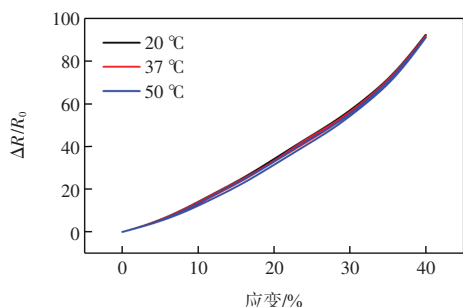


图 10 不同温度下的传感器灵敏度

Fig.10 Sensitivity of sensor at different temperatures

由图 10 可见,在 25~50 °C 不同温度的可穿戴环境中,传感器的传感性能基本不受工作温度的影响。

2.2.3 迟滞性分析

迟滞性是传感器反映应变变量准确性的重要指标。图 11 所示为传感器在拉伸与释放过程中的迟滞曲线,反映了在同一应变水平下拉伸与释放阶段电信号的差异。由图 11 可见,拉伸与释放过程中的电信号曲线基本上是重叠的,这表明传感器具有极低的迟滞性,能够准确地反映出形变的大小。

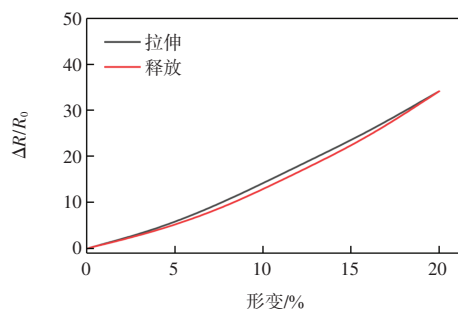


图 11 柔性应变传感器的迟滞曲线

Fig.11 Hysteresis curves of flexible strain sensor

综上所述,本文所制备的电阻式柔性应变传感器展现出良好的传感性能。

2.3 柔性应变传感器的自修复性能

柔性应变传感器的高柔性使其在实际使用中易出现微裂纹或受到外力损伤,这将导致其传感性能的失效,从而影响可穿戴设备的服役性能。柔性应变传感器理想的自修复性能是同时恢复器件的力学和电学性能,进而使其传感功能恢复到初始状态。为了直观展示传感器的导电性修复效果,将传感器与电源和小灯泡连接,以监测电路的导电状态,如图 12 所示。

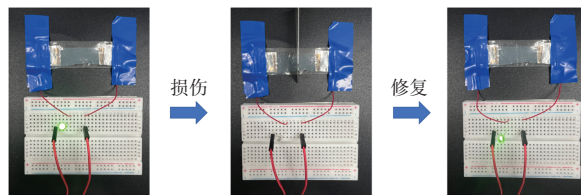


图 12 柔性应变传感器的导电性修复

Fig.12 Conductivity recovery of flexible strain sensor

由图 12 可以看出,初始时,由于传感器的高导电性,小灯泡亮度较高。当传感器被切断后,电路开路,小灯泡随之熄灭。在常温下进行 12 h 的自修复之后,传感器的导电性得到恢复,小灯泡也重新被点亮。这一导电性的恢复主要归功于聚氨酯的卓越自修复特性及其在自修复过程中驱动 ATO 纳米纤维膜重新形成导电通路,从而恢复整个传感器的导电功能。该结果充分展示了传感器在物理损伤后能有效恢复其功

能性的能力。

为了进一步表征本文所制备传感器传感功能的自修复,对比研究了自修复前后传感器的传感信号差异,结果如图13所示。

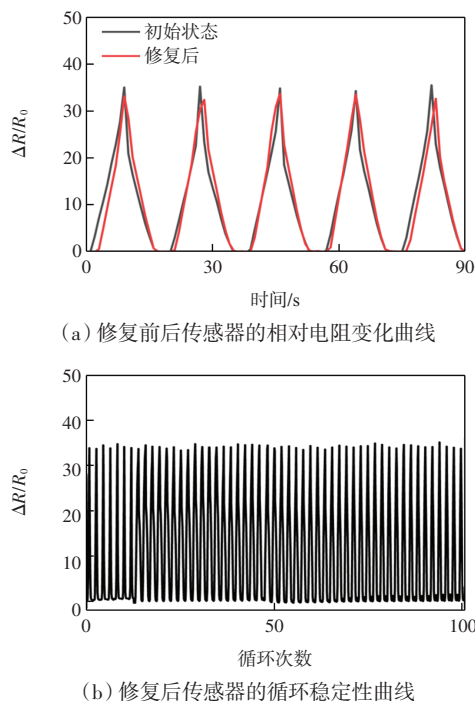


图13 应变传感器自修复前后的传感信号和工作稳定性
Fig.13 Sensing signal and working stability before and after self-healing of strain sensor

由图13(a)可以看出,传感器自修复后基本恢复传感特性,其随形变产生的电信号与初始传感器差异极小,传感灵敏度自修复效率达到了98%。对修复后的传感器进行100次循环拉伸测试,如图13(b)所示,所得信号的差异性依旧较小,证实了修复后传感器的使用耐久性也得到了一并修复。基于力学和传感性能的同时恢复,修复后的传感器展现出了稳定的传感功能。

3 结论

通过多重氢键的协同设计,成功合成了一种兼具高强度、高韧性和高自修复效率的聚氨酯,将这一聚氨酯与高导电ATO纳米纤维复合,制备出了具有高传感性能和自修复能力的柔性应变传感器。研究表明:

(1) 基于多重氢键网络的自修复聚氨酯具有900%的断裂伸长率和8 MPa的拉伸强度,在不同温度条件下可实现损伤自修复,特别是在80℃高温下修复10 min即可实现100%的力学性能恢复。

(2) 所制备的柔性应变传感器在40%宽应变范围

内展现出高达240的灵敏度,并且拉伸循环1000次仍然保持稳定的传感信号,表明其具有优异的传感性能。

(3) 得益于聚氨酯的动态氢键网络,柔性应变传感器也具有优异的自修复能力,其传感功能在自修复后可得到有效恢复。

参考文献:

- [1] LIU L P, NIU S C, ZHANG J Q, et al. Bioinspired, omnidirectional, and hypersensitive flexible strain sensors[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(17): e2200823.
- [2] YANG G, XING R Q, LI Y F, et al. Toward high-performance multifunctional electronics: Knitted fabric-based composite with electrically conductive anisotropy and self-healing capacity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131931.
- [3] GUO X H, ZHAO Y N, XU X, et al. Biomimetic flexible strain sensor with high linearity using double conducting layers[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 213: 108908.
- [4] SI S B, SUN C C, QIU J, et al. Knitting integral conformal all-textile strain sensor with commercial apparel characteristics for smart textiles[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 27: 101508.
- [5] SHAFIQUE H, DE VRIES J, STRAUSS J, et al. Advances in the translation of electrochemical hydrogel-based sensors[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2023, 12(1): 2201501.
- [6] SHAFIQUE H, DE VRIES J, STRAUSS J, et al. Advances in the translation of electrochemical hydrogel-based sensors[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2023, 12(1): e2201501.
- [7] ZHANG Z M, ZHANG Y X, JIANG X, et al. Simple and efficient pressure sensor based on PDMS wrapped CNT arrays[J]. *Carbon*, 2019, 155: 71-76.
- [8] RAMAN S, ARUNAGIRINATHAN R S. Silver nanowires in stretchable resistive strain sensors[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(11): 1932.
- [9] ZHANG X Y, LI Z L, LIU C L, et al. Silver nanowire/silver/poly(dimethylsiloxane) as strain sensors for motion monitoring[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(10): 15797-15807.
- [10] SINGH A, LEE S, WATANABE H, et al. Graphene-based ultrasensitive strain sensors[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(2): 523-528.
- [11] CHUN S, CHOI Y, PARK W. All-graphene strain sensor on soft substrate[J]. *Carbon*, 2017, 116: 753-759.
- [12] YANG G, TANG X C, ZHAO G D, et al. Highly sensitive, direction-aware, and transparent strain sensor based on oriented electrospun nanofibers for wearable electronic applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435: 135004.

- [13] GONG X X, FEI G T, FU W B, et al. Flexible strain sensor with high performance based on PANI/PDMS films[J]. *Organic Electronics*, 2017, 47: 51–56.
- [14] ZHU X X, ZHOU Y M, YE C. Preparation and performance of AgNWs/PDMS film-based flexible strain sensor[J]. *Materials*, 2023, 16(2): 641.
- [15] HUANG K Y, NING H M, HU N, et al. Ultrasensitive MWCNT/PDMS composite strain sensor fabricated by laser ablation process[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 192: 108105.
- [16] XU Y F, CHEN M G, YU S J, et al. High-performance flexible strain sensors based on silver film wrinkles modulated by liquid PDMS substrates[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(48): 33697–33706.
- [17] VERMA L, KARNAWAL I, CHAUDHARY V, et al. Design and fabrication of flexible carbon fabric PDMS-based strain sensor for human motion monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(15): 16729–16735.
- [18] YAN J, LI M F, WANG Z W, et al. Highly tough, multi-stimuli-responsive, and fast self-healing supramolecular networks toward strain sensor application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389: 123468.
- [19] RASHMI E V, VIJAYALAKSHMI K P, BALACHANDRAN N, et al. Soft-segment free polyurethanes and their self-healable films[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 146: 105709.
- [20] LIU J, MA X N, TONG Y P, et al. Self-healing polyurethane based on ditelluride bonds[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 318–325.
- [21] AN Z W, XUE R, YE K, et al. Recent advances in self-healing polyurethane based on dynamic covalent bonds combined with other self-healing methods[J]. *Nanoscale*, 2023, 15(14): 6505–6520.
- [22] WONG C S, HASSAN N I, SU'AIT M S, et al. Photo-activated self-healing bio-based polyurethanes[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 140: 111613.
- [23] XU J H, CHEN J Y, ZHANG Y N, et al. A fast room-temperature self-healing glassy polyurethane[J]. *Angewandte Chemie (International Ed)*, 2021, 60(14): 7947–7955.
- [24] SONG Y H, LI J L, SONG G J, et al. Self-healing polyurethane elastomers with high mechanical properties based on synergistically thermo-reversible and quadruple hydrogen bonds[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(2): 1302–1311.
- [25] YANG S W, WANG S, DU X S, et al. Mechanically robust self-healing and recyclable flame-retarded polyurethane elastomer based on thermoreversible crosslinking network and multiple hydrogen bonds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 391: 123544.
- [26] LI J Q, NIU H B, YU M X, et al. Coordinate mechanical property and self-healing performance by hydrogen bonding promoting microphase separation structures in waterborne polyurethanes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(23): e55467.
- [27] TAN T, SIEW W H, HAN L, et al. Self-healing of electrical damage in microphase-separated polyurethane elastomers with robust dielectric strength utilizing dynamic hydrogen bonding networks[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(9): 7132–7143.
- [28] YANG X, LIU J Z, FAN D Y, et al. Scalable manufacturing of real-time self-healing strain sensors based on brominated natural rubber[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389: 124448.
- [29] GUO Q Q, ZHANG X X, ZHAO F Y, et al. Protein-inspired self-healable Ti₃C₂ MXenes/rubber-based supramolecular elastomer for intelligent sensing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2788–2797.
- [30] SONG Y X, XU W M, RONG M Z, et al. A sunlight self-healable transparent strain sensor with high sensitivity and durability based on a silver nanowire/polyurethane composite film[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(5): 2315–2325.
- [31] LING L, LIU F, LI J H, et al. Self-healable and mechanically reinforced multidimensional-carbon/polyurethane dielectric nanocomposite incorporates various functionalities for capacitive strain sensor applications[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2018, 219(23): 1800369.
- [32] PIGNANELLI J, BILLET B, STRAETEN M, et al. Imine and metal-ligand dynamic bonds in soft polymers for autonomous self-healing capacitive-based pressure sensors[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(38): 7654–7662.
- [33] LIU H, LI Y L, DAI K, et al. Electrically conductive thermoplastic elastomer nanocomposites at ultralow graphene loading levels for strain sensor applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(1): 157–166.

本文引文格式:

杨光, 丁云鹏, 邢任权, 等. 基于高强度自修复聚氨酯的柔性应变传感器制备及其性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(3): 31–38.

YANG G, DING Y P, XING R Q, et al. Fabrication and properties of flexible strain sensor based on highly tough and self-healing polyurethane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(3): 31–38(in Chinese).