

# 聚乙烯醇/碳纳米管复合薄膜柔性电阻式传感器的制备及应变传感性能研究

张磊<sup>1</sup>, 苑东明<sup>2</sup>

(1. 河南科技职业大学机电工程学院, 河南 周口 466000; 2. 周口理工职业学院, 河南 周口 466000)

**摘要:** 以多壁碳纳米管和聚乙烯醇为基础材料, 采用溶液共混结合流延成膜工艺, 构建具有三维导电网络结构的柔性复合薄膜, 并应用于电阻式应变传感器的研发, 系统探讨导电填料添加量对薄膜微观结构、综合力学性能、导电特性以及传感响应行为的影响规律。结果表明: 当碳纳米管添加质量分数达到3%时, 复合薄膜在保持良好柔韧性的同时(断裂伸长率156%), 导电性能和机械强度均达到最优水平, 电导率为2.3 S/m, 拉伸强度提升至45.2 MPa。基于该最优配方制作的传感器件在宽应变区间(0~50%)内展现出优异的线性传感特性, 其灵敏因子达12.5, 电信号响应速度快于250 ms, 在经历1 000次重复加载-卸载循环后, 仍能维持超过95%的初始信号强度。通过人体多部位佩戴测试验证, 该传感器能够有效捕捉手指关节、腕关节、肘关节的屈伸动作, 甚至可识别喉部吞咽等细微生理活动信号。研究结果为新型柔性传感技术的工程化开发奠定基础。

**关键词:** 碳纳米管; 聚乙烯醇; 柔性传感器; 应变传感; 导电复合材料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0098-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.018

## Preparation and Strain Sensing Performance Study of Polyvinyl Alcohol/Carbon Nanotube Composite Film Flexible Resistive Sensor

ZHANG Lei<sup>1</sup>, YUAN Dongming<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, China; 2. Zhoukou Polytechnic Vocational College, Zhoukou 466000, China)

**Abstract:** Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and polyvinyl alcohol (PVA) were employed as base materials, and flexible composite films with three-dimensional conductive network structures were constructed via solution blending combined with casting film technology, which were subsequently applied to the development of resistive strain sensors. The influence of conductive filler content on the microstructure, comprehensive mechanical properties, conductive characteristics, and sensing response behavior of the films was systematically investigated. The results indicated that when the mass fraction of carbon nanotubes reached 3%, the composite film achieved optimal electrical conductivity and mechanical strength while maintaining good flexibility (elongation at break of 156%), with an electrical conductivity of 2.3 S/m and tensile strength increased to 45.2 MPa. The sensor device fabricated based on this optimal formulation exhibited excellent linear sensing characteristics over a wide strain range (0~50%), with a gauge factor of 12.5, electrical signal response speed faster than 250 ms, and maintained over 95% of the initial signal intensity after 1 000 repeated loading-unloading cycles. Multi-site human body wearing tests verified that the sensor could effectively capture the flexion and extension movements of finger joints, wrist joints, and elbow joints, and even identify subtle physiological activity signals such as throat swallowing. The research results laid foundations for the engineering development of novel flexible sensing technology.

**Keywords:** Carbon nanotubes; Polyvinyl alcohol; Flexible sensor; Strain sensing; Conductive composites

收稿日期 Submitted date 2025-08-09; 修回日期 Revised date 2025-09-30; 录用日期 Accepted date 2025-12-16

基金项目: 2023年度河南省高等教育教学改革研究与实践项目(豫教[2024]02069)

联系人, zhang\_plastics@126.com

引用本文: 张磊, 苑东明. 聚乙烯醇/碳纳米管复合薄膜柔性电阻式传感器的制备及应变传感性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 98-104.

Citation: ZHANG L, YUAN D M. Preparation and strain sensing performance study of polyvinyl alcohol/carbon nanotube composite film flexible resistive sensor[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 98-104.

物联网技术和人工智能的深入发展使智能可穿戴设备在健康监护、人机交互和运动分析等领域展现出巨大的应用价值<sup>[1-5]</sup>。基于近年来碳系复合材料、异质结构及梯度设计等方面的研究,柔性应变传感器作为可穿戴设备的核心传感元件,能够实时精准监测人体运动与生理信号,在慢性病管理、康复医疗及运动训练等领域具有重要应用价值<sup>[6-9]</sup>。相较于传统刚性传感器,柔性应变传感器具有优异的可弯曲性、可拉伸性和皮肤亲和性,能够与人体表面实现无缝贴合,极大提升佩戴舒适度和信号采集准确性。因此,开发高性能柔性应变传感器已成为柔性电子领域的研究热点。

导电聚合物复合材料具有制备工艺简单、成本低廉、力学性能可调等优势,被广泛应用于柔性传感器的开发与构建<sup>[10-13]</sup>。聚乙烯醇(PVA)以其优异的水溶性、成膜性、生物相容性与环境友好特性,被视为柔性基底材料的重要候选材料<sup>[14-18]</sup>。然而,纯PVA不具备导电性能,需要引入导电填料构建三维导电网络。碳纳米管(CNTs)因其卓越的导电性能(电导率达 $10^6$  S/m)、高长径比( $>1\ 000$ )及出色的力学强度(拉伸强度约100 GPa),成为构建柔性导电复合材料的首选填料<sup>[19-21]</sup>。CNTs在聚合物基体中能够形成渗流导电网络,当外部应变改变CNTs间的接触状态和隧穿距离时,材料电阻发生相应变化,从而实现对应变的有效感知<sup>[22]</sup>。

近年来,研究人员在碳纳米材料/聚合物复合传感器领域取得了诸多进展。孙泽营等<sup>[23]</sup>以离子液体1-丁基-3-甲基咪唑氯盐([Bmim]Cl)溶解纤维素与角蛋白,以环氧氯丙烷(ECH)为交联剂,使纤维素(CE)和角蛋白(FK)形成交联网络,利用离子液体对石墨烯或CNTs的 $\pi$ - $\pi$ 堆积的屏蔽作用,使CNTs或石墨烯均匀分散于CE/FK复合体系中,提升材料的导电性能与力学性能。研究表明,所得复合薄膜的拉伸强度和断裂应变分别达到64.5 MPa和58.0%,弯曲 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 时电阻相应增加10%、14%和35%,可通过薄膜形变引发的电阻变化监测人体运动行为。邵敏等<sup>[24]</sup>将氧化石墨烯-聚乙烯醇(GO-PVA)溶液涂覆于光纤布拉格光栅(FBG)表面进行湿度增敏。首先对传感器的湿度响应进行理论研究,随后采用提拉镀膜法制备传感器样品,探讨湿敏溶液混合比例和薄膜厚度对湿度灵敏度的影响。该传感器具有制作简便、湿度灵敏度高、稳定性好的优点,具有较大的应用潜力。袁霖等<sup>[25]</sup>以糖颗粒(SPs)为造孔剂、羰基铁粉(CIPs)为磁响应填料、CNTs为导电填料,与硅橡胶复合,制得柔性多孔CNT-CIP/硅橡胶复合材料,并以此为介电层制备柔性压容传感器。结果表明,其在0~5 Hz频率范围内的有效应力检测范围为0.07~180.00 kPa,优于大多数文献报道的柔性压容传感器。尽管CNTs/聚合物复合传感器研究取得了重要进展,但在传感性能、制备工艺和实际应用之间寻求最佳平衡仍面临挑战<sup>[26-27]</sup>。特别是在PVA/CNTs体系中,如何优化填料含量

以同时获得高灵敏度、宽线性范围、快速响应和长期稳定性等综合性能,尚缺乏系统深入的研究。

因此,本研究采用简便的溶液共混-流延成膜工艺,系统探究CNTs添加量对PVA基复合薄膜微观结构、力学性能、导电特性及传感响应行为的影响规律,确定最优配方。在此基础上,深入评价了传感器的应变-电阻线性特性、响应/恢复时间、循环稳定性,并通过多部位人体佩戴实验验证其在实际运动监测中的应用潜力。本研究为开发低成本、高性能、易加工的柔性应变传感器提供新的思路,同时也为PVA/CNTs复合材料在智能可穿戴领域的应用奠定基础。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

PVA,醇解度99%,聚合度1 750,上海麦克林生化科技股份有限公司;CNTs,质量分数 $>95\%$ ,外径10~20 nm,长度10~30  $\mu\text{m}$ ,南京先丰纳米材料科技有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),化学纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;去离子水,自制。

### 1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), Nicolet iS50, 美国赛默飞世尔公司;电子万能材料试验机, CTM2050, 新三思材料检测有限公司;四探针电阻率测试仪, ST2722-SD, 苏州晶格电子有限公司;差示扫描量热仪(DSC), DSC 214, 德国耐驰公司;热重分析仪(TG), TGA 550, 美国TA仪器公司;数字源表, Keithley 2400, 美国泰克公司;超声波清洗器, KQ-300DE, 昆山市超声仪器有限公司;磁力搅拌器, 78-1, 常州国华电器有限公司;电热鼓风干燥箱, DHG-9070A, 上海一恒科学仪器有限公司。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 CNTs分散液的制备

称取一定量CNTs于烧杯中,将质量分数为0.5%的CNTs作为分散剂加入SDS中,加入适量去离子水,超声处理2 h(功率400 W,频率40 kHz),得到均匀的CNTs分散液。静置24 h后,取上层分散液备用。

#### 1.3.2 PVA/CNTs复合薄膜的制备

表1为PVA/CNTs复合薄膜的配方。将5.0 g PVA溶于95 mL去离子水,在 $90^\circ\text{C}$ 下磁力搅拌2 h至完全溶解,得到质量分数5%的PVA溶液,冷却至室温。根据表1配方,将不同含量的CNTs分散液加入PVA溶液中,超声处理30 min后,在室温下磁力搅拌2 h,得到均匀的PVA/CNTs混合溶液。将混合溶液倒入聚四氟乙烯培养皿中,在 $45^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥24 h,待水分完全挥发后,小心揭下薄膜,在 $60^\circ\text{C}$ 真空干燥12 h,得到PVA/CNTs复合薄膜。根据CNTs质量分数将样品命名为PVA/CNTs-X,其中X代表CNTs的质量分数。纯PVA薄膜的制备方法相同,不加入CNTs。

表1 PVA/CNTs复合薄膜的配方

Tab.1 Formula of PVA/CNTs composite films

样品名称	$m_{\text{PVA}}/\text{g}$	$w_{\text{CNTs}}/\%$	$v_{\text{去离子水}}/\text{mL}$
纯PVA	5.0	0	95
PVA/CNTs-0.5	5.0	0.5	95
PVA/CNTs-1.0	5.0	1.0	95
PVA/CNTs-2.0	5.0	2.0	95
PVA/CNTs-3.0	5.0	3.0	95
PVA/CNTs-5.0	5.0	5.0	95

#### 1.4 性能测试与表征

**FTIR 测试:** 采用KBr压片法测试,波数范围为400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次,分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ ,分析CNTs与PVA的相互作用。

**力学性能测试:** 按照GB/T 1040.3—2006测试样品的拉伸强度、断裂伸长率和弹性模量。样品尺寸为80 mm×10 mm,厚度为0.05 mm,拉伸速率为10 mm/min,夹具间初始距离为50 mm。每组样品测试5个平行样,取平均值。

**电导率测试:** 采用四探针法测试薄膜电导率。样品尺寸为20 mm×20 mm,室温下测试,每个样品测试5个点,取平均值。电导率( $\sigma$ )的计算公式为:

$$\sigma = \ln 2 / (\pi t R) \approx 4.532 / (t R) \quad (1)$$

式(1)中: $t$ 为薄膜厚度,cm; $R$ 为测得的电阻, $\Omega$ 。

**传感性能测试:** 将传感器固定在电子万能材料试验机上进行应变-电阻响应测试,拉伸速率为10 mm/min,施加不同应变(0~50%),同时用数字源表记录电阻变化。灵敏度系数为相对电阻变化( $\Delta R/R_0$ )和 $\varepsilon$ 的比值。其中, $\Delta R$ 为电阻变化量, $\Omega$ ; $R_0$ 为初始电阻, $\Omega$ ; $\varepsilon$ 为应变。

**循环稳定性测试:** 对传感器施加10%应变的循环拉伸,频率0.5 Hz,记录1 000次循环的电阻变化,分析信号稳定性和耐疲劳性。

**响应时间测试:** 施加10%阶跃应变,记录电阻从初始值变化到稳定值90%所需的时间(响应时间),释放应变后记录电阻恢复到初始值110%所需的时间(恢复时间)。

**实际应用测试:** 将传感器用医用胶带粘附于人体关节部位(手指、手腕、肘部、喉部),记录不同运动状态下的电阻信号变化。

**DSC 测试:**  $\text{N}_2$ 气氛,升温速率为10  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,温度范围为30~250  $^\circ\text{C}$ ,样品质量为5~8 mg。

**TG 测试:**  $\text{N}_2$ 气氛,升温速率为10  $^\circ\text{C}/\text{min}$ ,温度范围为30~600  $^\circ\text{C}$ ,样品质量为5~10 mg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PVA/CNTs复合薄膜的结构表征

图1为PVA/CNTs复合薄膜的FTIR谱图。从图1可以看出,纯PVA在3 200~3 500  $\text{cm}^{-1}$ 处出现较宽的吸收峰,归属于O—H伸缩振动;2 900  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应C—H伸

缩振动;1 720  $\text{cm}^{-1}$ 处的弱峰归属于残留醋酸基团的C=O伸缩振动;1 090  $\text{cm}^{-1}$ 处的强峰对应C—O伸缩振动。加入CNTs后,复合薄膜的特征峰位置基本保持不变,但3 200~3 500  $\text{cm}^{-1}$ 处的O—H伸缩振动峰发生轻微红移,峰强度随CNTs含量的增加而减弱。这表明CNTs表面的含氧官能团(如羧基、羟基)与PVA分子链上的羟基之间形成氢键作用,增强了两相界面结合。此外,随着CNTs含量的增加,1 720  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰强度逐渐增强,可能是由于CNTs表面氧化产生的羧基所致。FTIR结果证实CNTs与PVA基体间存在良好的相互作用,有利于CNTs在PVA基体中的均匀分散。

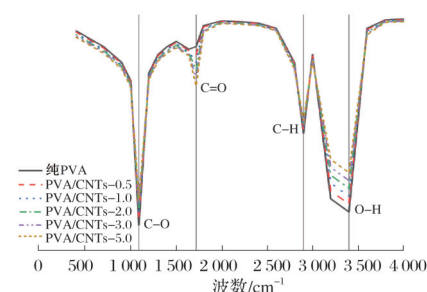


图1 PVA/CNTs复合薄膜的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of PVA/CNTs composite films

### 2.2 PVA/CNTs复合薄膜的力学性能

图2为PVA/CNTs复合薄膜的力学性能。从图2a可以看出,纯PVA薄膜的拉伸强度为38.5 MPa。加入少量CNTs后,复合薄膜的拉伸强度显著提高,当CNTs质量分数为3.0%时,拉伸强度达到最大值45.2 MPa,较纯PVA提高17.4%。这是因为CNTs具有优异的力学性能,在PVA基体中起到增强作用,同时CNTs与PVA间的氢键作用增强了界面结合,有利于应力传递。继续增加CNTs质量分数至5.0%时,拉伸强度反而降至42.8 MPa,这可能是由于CNTs含量过高,导致局部团聚,形成应力集中点。

从图2b可以看出,断裂伸长率随CNTs含量的增加呈先降低后保持稳定的趋势。PVA的断裂伸长率为180%,加入0.5% CNTs后降至168%,当CNTs质量分数达到3.0%时,断裂伸长率稳定在156%左右。这是因为刚性CNTs的引入限制PVA分子链的运动,降低了材料的延展性。然而,相比其他刚性填料,CNTs由于其高长径比能够在较低含量下形成有效地增强网络,因此复合薄膜仍保持良好的柔韧性,可满足柔性传感器的应用需求。

从图2c可以看出,弹性模量随CNTs含量的增加而提高。纯PVA的弹性模量为1.2 GPa,当CNTs质量分数为3.0%时,弹性模量提高至1.8 GPa。这表明CNTs的加入有效提高复合薄膜的刚度。

综合力学性能测试结果,PVA/CNTs-3.0复合薄膜达到强度-韧性的最佳平衡,适用于制备柔性传感器。

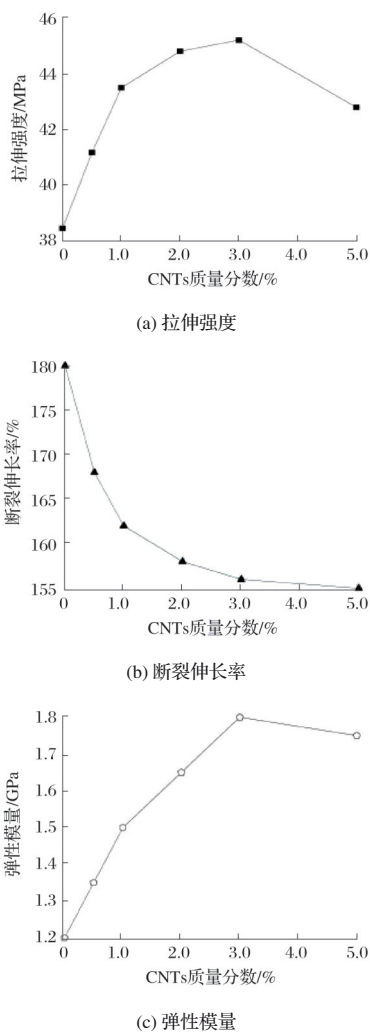


图2 PVA/CNTs复合薄膜的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of PVA/CNTs composite films

### 2.3 PVA/CNTs复合薄膜的电学性能

图3为PVA/CNTs复合薄膜的电导率。从图3可以看出,纯PVA薄膜为绝缘体,电导率低于 $10^{-8}$  S/m。当CNTs质量分数增加至0.5%时,电导率提高至 $1.2 \times 10^{-4}$  S/m,但仍处于较低水平。继续增加CNTs质量分数至1.0%时,电导率急剧增加至0.15 S/m,提高约1 000倍,表明复合薄膜发生绝缘体-导体转变,达到渗流阈值。当CNTs质量分数为3.0%时,电导率达到2.3 S/m。进一步增加CNTs质量分数至5.0%,电导率增加至3.1 S/m,但增幅明显放缓。

这种变化规律符合渗流理论。在低CNTs含量下,CNTs颗粒相互分离,无法形成连续的导电通路,复合薄膜呈现绝缘性。当CNTs质量分数达到渗流阈值(约1.0%)时,CNTs颗粒在PVA基体中相互接触或接近,形成三维导电网络,电导率急剧增加。继续增加CNTs含量,导电网络更加完善,电导率进一步提高,但由于导电通路已基本建立,增幅逐渐减小。值得注意的是,本研究制备的PVA/CNTs复合薄膜渗流阈值较低,这得益于CNTs的高长径比和超声-搅拌复合分散工艺,使CNTs在PVA基体中实现较好的分散。

综合考虑电导率和力学性能,PVA/CNTs-3.0复合薄膜具有优异的综合性能,适合用于制备高性能柔性传感器。

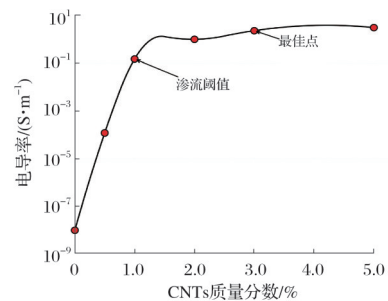


图3 PVA/CNTs复合薄膜的电导率

Fig.3 Electrical conductivity of PVA/CNTs composite films

### 2.4 传感器的应变传感性能

#### 2.4.1 应变-电阻响应

图4为传感器的应变-电阻响应。从图4a可以看出,在0~50%应变范围内,相对电阻变化与应变呈现良好的线性关系。当应变为10%时, $\Delta R/R_0$ 为1.25;当应变增加至50%时, $\Delta R/R_0$ 达到6.25。通过线性拟合计算得到灵敏度系数为12.5,线性相关系数 $R^2$ 为0.998 14,表明该传感器具有优异的线性响应特性。从图4b可以看出,灵敏度系数随CNTs含量增加呈现先增大后减小的趋势。PVA/CNTs-1.0传感器的灵敏度系数为8.2,PVA/CNTs-2.0的灵敏度系数为10.8,PVA/CNTs-3.0的灵敏度系数达到最高值12.5。继续增加CNTs质量分数至5.0%时,灵敏度系数反而降至9.6。这一现象可以从传感机理解释,当应变作用于传感器时,CNTs间距增大,隧道电阻增加,导致电阻升高。在低CNTs含量下,导电网络较为稀疏,应变引起的网络破坏程度较轻,灵敏度相对较低。随着CNTs含量增加,导电网络更加完善,应变对网络结构的影响更显著,灵敏度提高。但CNTs含量过高时,导电通路过于密集,部分通路在应变作用下仍能保持连接,反而导致灵敏度下降。

因此,PVA/CNTs-3.0传感器在灵敏度和电导率之间达到了最佳平衡。

#### 2.4.2 循环稳定性

图5为PVA/CNTs-3.0传感器在10%应变下的循环稳定性。从图5a可以看出,传感器对重复加载-卸载应变表现出良好的可逆响应,电阻变化曲线规律且重复性好。从图5b可以看出,在前100次循环中, $\Delta R/R_0$ 略有降低,从1.25降至1.21,这可能是由于初期拉伸使PVA分子链取向和CNTs网络发生轻微调整所致。在随后的900次循环中, $\Delta R/R_0$ 基本保持稳定,在1.19~1.21波动。经过1 000次循环后,信号保持率为95.2%,表明该传感器具有优异的循环稳定性和耐疲劳性能。

这种良好的循环稳定性归因于以下几个方面:(1)CNTs与PVA间的氢键作用增强了界面结合,减少循环拉伸过程中的界面滑移。(2)PVA良好的弹性使薄膜在卸载后能够恢复原始形态。(3)CNTs形成的三维导电网络具有一定的

冗余性,即使部分通路在循环过程中发生微小变化,整体导电性能仍能保持稳定。优异的循环稳定性使该传感器适合长期可靠的人体运动监测应用。

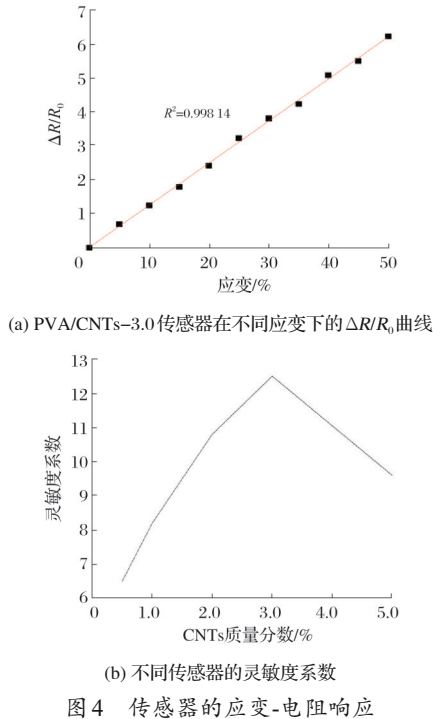


图4 传感器的应变-电阻响应  
Fig.4 Strain-resistance response of sensors

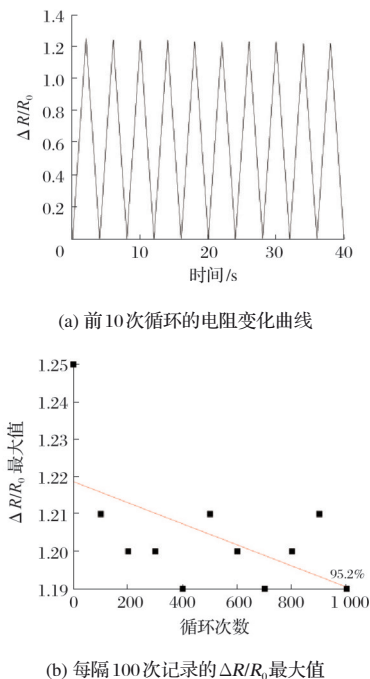


图5 PVA/CNTs-3.0传感器在10%应变下的循环稳定性  
Fig.5 Cyclic stability of PVA/CNTs-3.0 sensor under 10% strain

### 2.4.3 响应时间与不同应变速率响应

图6为PVA/CNTs-3.0传感器的响应曲线。从图6a可以看出,当施加10%阶跃应变时,传感器电阻从初始值迅速增加,在约180 ms内达到稳定值的90%,表现出快速的响应特性。释放应变后,电阻在约210 ms内恢复到初始值

的110%,恢复时间略长于响应时间,这是因为PVA分子链的松弛需要一定时间。整体而言,该传感器的响应和恢复时间均小于250 ms,能够实时捕捉快速的人体运动信号。从图6b可以看出,在不同拉伸速率下,传感器均能产生稳定的电阻变化信号,且相对电阻( $\Delta R/R_0 + 1$ )变化基本一致,表明传感器在不同工作条件下具有良好的稳定性。拉伸速率的增加会使响应曲线更加陡峭,但最终的 $\Delta R/R_0$ 不受影响。这证实了传感器的应变传感性能主要取决于形变量而非形变速率,适用于监测各种速度的人体运动。

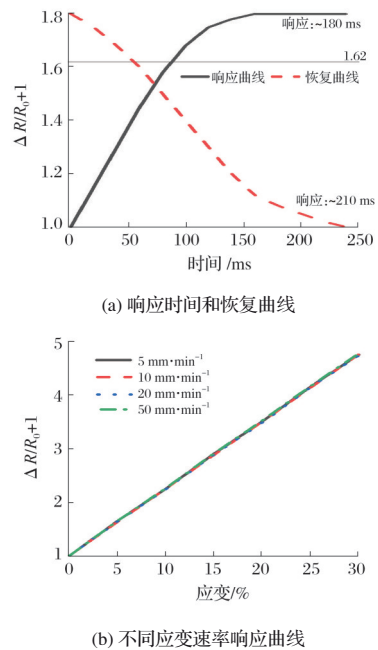


图6 PVA/CNTs-3.0传感器的响应曲线  
Fig.6 Response curves of PVA/CNTs-3.0 sensor

### 2.5 传感器在人体运动监测中的应用

图7为PVA/CNTs-3.0传感器在人体运动监测中的应用。从图7a可以看出,手指从伸直到完全弯曲(约90°),电阻信号从基线值增加至1.8倍,释放后迅速恢复。重复弯曲动作产生高度一致的信号波形,表明传感器能够准确识别手指的精细动作。从图7b可以看出,手腕弯曲产生的应变较手指更大, $\Delta R/R_0$ 达到2.5。信号曲线平滑且重复性好,可区分不同弯曲角度。从图7c可以看出,肘部弯曲时皮肤产生较大应变, $\Delta R/R_0$ 可达3.2。传感器能够清晰记录肘部从伸直到完全弯曲的整个过程,且多次弯曲动作的信号峰值基本一致。从图7d可以看出,吞咽时喉部肌肉运动引起微小的皮肤形变,传感器仍能捕捉到明显的电阻变化信号( $\Delta R/R_0$ 约0.4~0.5)。这表明该传感器不仅适用于大幅度的关节运动监测,还可用于检测微小的生理活动。

上述实验结果充分证明,PVA/CNTs-3.0传感器在人体运动监测方面具有广阔的应用前景,可用于健康监测、康复训练、人机交互等领域。其高灵敏度、良好的循环稳定性和快速响应能力使其成为开发智能可穿戴设备的理想选择。

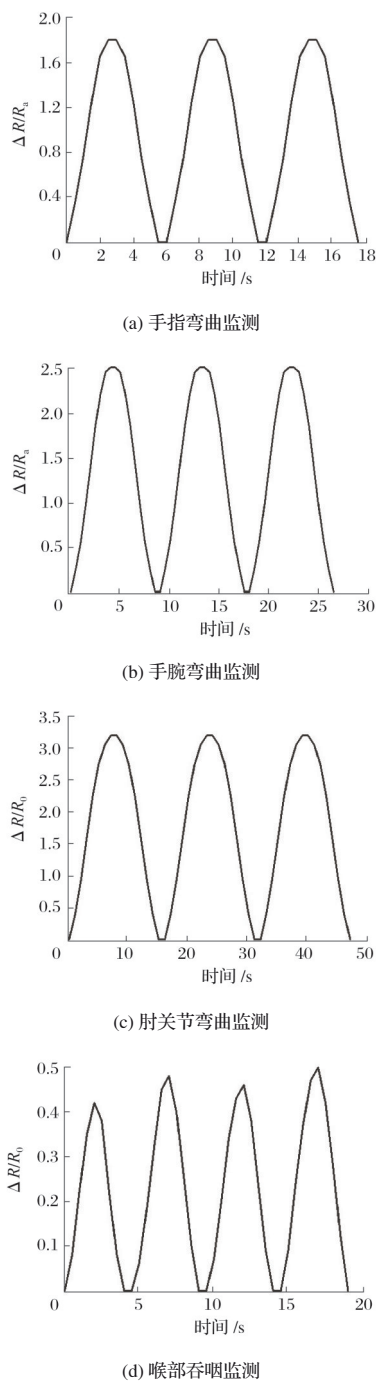


图7 PVA/CNTs-3.0传感器在人体运动监测中的应用  
Fig.7 Application of PVA/CNTs-3.0 sensor  
in human motion monitoring

## 2.6 PVA/CNTs复合薄膜的热性能分析

图8为PVA和PVA/CNTs-3.0复合薄膜的DSC和TG曲线。从图8a可以看出,纯PVA的玻璃化转变温度( $t_g$ )为63℃,熔融温度( $t_m$ )为185℃。加入3.0% CNTs后,PVA/CNTs-3.0的 $t_g$ 基本保持不变,为64℃,表明少量CNTs的引入未明显改变PVA分子链段的运动能力。 $t_m$ 轻微提高至188℃,这可能是由于CNTs起到成核作用,促进了PVA结晶。此外,PVA/CNTs-3.0的熔融峰强度略有增强,表明结晶度有所提高。总体而言,CNTs对PVA的结晶行为影响较小,复合薄膜保持了良好的热塑性加工性能。

从图8b可以看出,PVA在200~400℃温度范围内发生主要失重,初始分解温度约为245℃,最大降解速率温度为325℃。加入3.0% CNTs后,PVA/CNTs-3.0的初始分解温度提高至268℃,最大降解速率温度提高至342℃,分别提高23℃和17℃。这表明CNTs的引入显著改善了复合薄膜的热稳定性。这一改善归因于CNTs优异的热稳定性和热屏蔽效应,CNTs在PVA基体中形成物理阻隔层,延缓热量和分解产物的传递,从而提高材料的分解温度。在600℃时,PVA的残炭率约为3%,而PVA/CNTs-3.0的残炭率约为6%,进一步证实CNTs对热稳定性的改善作用。

DSC和TG分析表明,PVA/CNTs-3.0复合薄膜具有良好的热稳定性,可在较宽的温度范围内(-20~150℃)稳定工作,满足柔性传感器在不同环境条件下的应用需求。

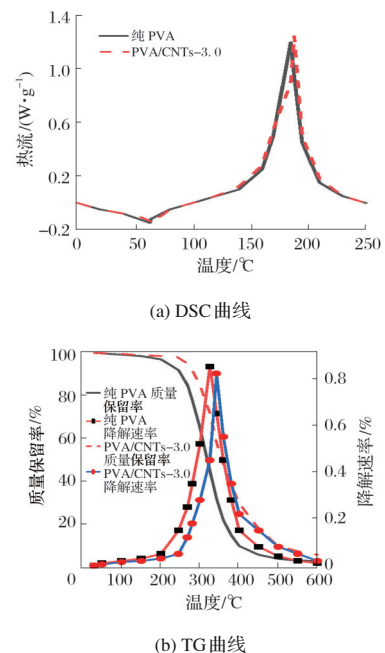


图8 PVA和PVA/CNTs-3.0复合薄膜的DSC和TG曲线  
Fig.8 DSC and TG curves of PVA and  
PVA/CNTs-3.0 composite films

## 3 结论

本研究成功制备PVA/CNTs复合薄膜柔性电阻式传感器,系统研究CNTs含量对复合薄膜结构、力学性能、电学性能及传感性能的影响,结果表明:CNTs在PVA基体中实现良好分散,二者间通过氢键作用形成稳定的界面结合。CNTs的引入显著提高复合薄膜的拉伸强度和弹性模量,当CNTs质量分数为3%时,拉伸强度达到45.2 MPa,较PVA提高17.4%,断裂伸长率保持在156%,强度-韧性平衡良好。PVA/CNTs复合薄膜的电导率随CNTs含量增加呈渗流转变特征,渗流阈值约为CNTs质量分数1.0%,当CNTs质量分数为3.0%时电导率达到2.3 S/m,满足柔性传感器的导电性要求。

基于PVA/CNTs-3.0复合薄膜的传感器表现出优异的传感性能,在0~50%应变范围内呈现良好的线性响应,灵

敏度系数为12.5,响应时间小于250 ms,经1 000次循环拉伸后信号保持率达95.2%,展现出良好的循环稳定性和快速响应特性。该传感器可准确监测手指、手腕、肘部等关节的弯曲运动以及喉部吞咽等微小生理活动,在可穿戴健康监测、康复训练和人机交互等领域具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 王婷莹. 柔性传感器在可穿戴健康监测设备中的应用[N]. 重庆科技报, 2024-08-20(3).
- [2] 吕婉婷, 李山, 姚付军. 面向汗液的柔性可穿戴传感器在全民健康监测中的应用研究与前景展望[C]//第二届陕西省体育科学大会论文摘要集(专题九). 西安: 陕西省体育科学学会, 陕西省学生体育协会, 西安体育学院体育教学学院, 2024.
- [3] 杜姍, 魏云航, 谭宇浩, 等. 蚕丝基柔性可穿戴传感器在人体健康监测中的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 244-254.
- [4] 苏磊. 化学改性橡胶在柔性电子传感器中的应用探索[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(12): 128-130.
- [5] 王湜, 李艳梅. LC谐振式无源柔性传感器在可穿戴监测中的研究进展[J/OL]. 现代纺织技术, 1-11[2025-12-16]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1249.TS.20250930.1130.008>.
- [6] 解少文. 基于双相碳系纳米导电填料/PDMS柔性复合材料的高灵敏三维力微电容传感器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [7] 刘晓春, 秦煜婷, 霍琛敬, 等. 基于石墨烯/碳纳米管的柔性应变传感器研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1-12[2025-12-16]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20251605>.
- [8] 张德银, 吴章辉, 范红云, 等. 用于监测民航试飞员手部运动信号的AgNWs/LIG柔性应变传感器[J]. 电子元件与材料, 2025, 44(12): 1398-1407.
- [9] 杨泊莘, 毕志辉, 孙权, 等. 基于基底弹性模量梯度设计的灵敏度可调柔性应变传感器研究[J/OL]. 复合材料学报, 1-10[2025-12-16]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20251127.009>.
- [10] 何山, 吴畏慰, 郑佳, 等. 碳纳米管协同银@石墨烯改性氟硅橡胶复合材料的制备及应变传感性能[J/OL]. 高分子材料科学与工程, 1-10[2025-12-16]. <https://doi.org/10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0203>.
- [11] 许仕强, 李健, 谭博文, 等. 预分散多壁碳纳米管/三元乙丙橡胶复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(1): 32-38.
- [12] 林家智, 苏翔宇, 任若茜, 等. 长链有机硅增容剂修饰碳纳米管/硅橡胶导热复合材料的制备与性能研究[J]. 有机硅材料, 2025, 39(6): 1-8.
- [13] 郭妙才, 赵大方, 鹿海军. 碳纳米管/石墨烯杂化碳纤维织物复合材料的力学、导电和雷击性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4487-4498.
- [14] 肖政, 李龙钰, 万相见. 柔性透明电极基底及其在有机光伏中的应用进展[J]. 高分子学报, 2025, 56(11): 1890-1909.
- [15] 夏悦然, 刘彩霞, 马菲, 等. 基于碳纳米管/聚乙烯醇的自愈合柔性电极[J]. 有色金属工程, 2022, 12(7): 68-76.
- [16] 袁浩航, 赵晓铎, 赵蔚祎, 等. 仿生层状聚乙烯醇水凝胶润滑材料的设计、制备和摩擦性能研究[J]. 摩擦学报(中英文), 2024, 44(11): 1592-1601.
- [17] KHAN M M R, RUMON M M H, KHAN M M R, et al. Synthesis of PVA-based hydrogels for biomedical applications: Recent trends and advances[J]. Gels, 2025, 11(2): 88.
- [18] JIA D H, XU L L, PAN D N, et al. Flame-retardant polyvinyl alcohol materials: Mechanisms, design strategies, and multifunctional applications[J]. Polymers, 2025, 17(19): 2649.
- [19] 侯从聪, 安立宝, 王惠颖. 功能化碳纳米管/聚合物复合材料的研究进展[J]. 高分子通报, 2022, 35(6): 36-45.
- [20] 楚电明, 董乾鹏, 白文娟, 等. 碳纤维/碳纳米管界面增强技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(1): 1-7.
- [21] 门海蛟, 宋健尧, 黄秉经, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(21): 45-67.
- [22] JAWAD M K, NOORI F T M, ALI N A, et al. Preparation and characterization of PVA/MWCNT nanocomposites: A composition dependence study of structural, optical and mechanical properties[J]. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2025, 33(1): 51-59.
- [23] 孙泽营, 姜大伟, 孙才英. 石墨烯(碳纳米管)-纤维素/角蛋白复合传感薄膜的制备[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 2959-2967.
- [24] 邵敏, 杨萌, 张文松, 等. 基于氧化石墨烯-聚乙烯醇薄膜的光纤光栅湿度传感器[J]. 光电子·激光, 2024, 35(7): 673-682.
- [25] 袁霖, 黄承毅, 黄培, 等. 基于多孔碳纳米管-羰基铁粉/硅橡胶复合材料的柔性压容传感器[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4740-4751.
- [26] 任毅, 夏锐, 刘宇杰, 等. 碳纳米管/还原氧化石墨烯/聚氨酯电热变色传感纱线的制备及其性能[J]. 毛纺科技, 2024, 52(5): 6-11.
- [27] 李凯泽, 辛勇. 改性碳纳米管增强热塑性聚氨酯复合材料的性能研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(6): 1-5.