

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.05.001

芳纶纳米纤维/碳纳米管复合气凝胶传感器的制备及其性能

杨光, 金钊, 闫静
(天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对导电气凝胶结构稳定性差导致传感性能不佳的问题, 提出以去质子化方法制备芳纶纳米纤维(ANFs), 并与改性碳纳米管(CNTs)进行共混, 得到具有高压缩回弹性、高灵敏度的复合气凝胶传感器, 并对其热学性能、力学性能和传感性能进行表征。实验结果表明: ANFs与CNTs之间混合均匀, 并通过氢键连接形成了稳定的内部网状结构, 气凝胶能承受50%的压缩比, 并在100次的压缩循环后, 完全恢复到初始状态; 更重要的是, 复合气凝胶在压缩循环中展现出稳定的电信号输出以及0.1 kPa的超低检测极限, 因而在柔性应变传感器领域具有较大的应用潜力。

关键词: 芳纶纳米纤维; 碳纳米管; 气凝胶; 柔性应变传感器

中图分类号: TS102.528; TQ342.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)05-0001-07

Preparation and performances of aramid nanofiber/carbon nanotube composite aerogel sensor

YANG Guang, JIN Zhao, YAN Jing

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

Abstract: Aiming at the issue of poor structural stability in conductive aerogels that causes unstable sensing performance, aramid nanofiber (ANFs) were prepared by deprotonation method and blended with modified carbon nanotubes (CNTs) to obtain a highly sensitive composite conductive aerogel sensor with high compression resilience. Its thermal, mechanical and sensing properties were characterized. The experimental results showed that the ANFs and CNTs were mixed uniformly, forming a stable internal network structure through hydrogen bonding. The aerogel could bear a compression ratio of 50% and completely return to the initial shape after 100 compression cycles. More importantly, the composite aerogel showed stable electrical signals and ultra-low detection limit of 0.1 kPa in the compression cycles, which indicated that it has great application potential in the field of flexible strain sensors.

Key words: aramid nanofiber; carbon nanotube; aerogel; flexible strain sensor

近年来,随着智能产业的快速发展,可穿戴传感器设备不断出现在人们生活的各个方面,包括仿生肢体、健康运动监测设备和医疗设备^[1-3]。其中,高性能柔性应变传感器在智能可穿戴设备中发挥着极其关键的作用^[4]。柔性应变传感器按照不同的工作机制可分为压阻式、压电式、摩擦式和电容式^[5-8]。相比于其他类型传感器,压阻式传感器由于具有简单的结构、出色的压力灵敏度、宽检测范围和较快的响应时间等诸多优点被广泛研究^[9-10],这些特性也使其成为未来可穿戴

智能电子传感元件的理想候选者^[11-12]。然而,如何制备兼具轻质、高灵敏度、低检测极限和宽检测范围等传感性能的柔性压阻传感器仍然是困扰其进一步应用的主要挑战。

气凝胶是指通过溶胶-凝胶法结合特定的干燥方式,使气体取代凝胶中的液相而形成的一种纳米级多孔固体材料。作为世界上最轻质的固体,其具有极高孔隙率、低密度、高比表面积、高介电强度和低导热率等优异特性,这些特性使得气凝胶在航空航天、能源

收稿日期: 2023-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52103267)

通信作者: 杨光(1985—),男,博士,教授,主要研究方向为智能纺织品与可穿戴器件。E-mail: gyang@tiangong.edu.cn

储存、生物医学设备、涂层和传感器等领域的应用中表现出巨大的潜力^[13-14]。此外,导电气凝胶的多孔网状结构使其具有优异的可压缩性,同时在其受到一定应力发生形变时,内部导电网络发生改变,从而实现较高的灵敏度,因此导电气凝胶在柔性传感器方面的发展与应用备受关注^[15-16]。例如,Cao等^[17]设计了一种聚丙烯腈纳米纤维/石墨烯(PAN/GA)气凝胶,其中PAN纳米纤维组成的3D互连微结构充当支撑整个石墨烯导电网络的支架。PAN纳米纤维和石墨烯纳米片的协同效应赋予了气凝胶优异的力学性能和传感性能。当用作压阻传感器时,PAN/GA气凝胶具有良好的压缩弹性、快速响应时间(≈ 37 ms)、良好结构稳定性(2 600次循环后,电流信号值保持率为91.57%)和线性灵敏度。因此,该气凝胶压阻传感器在健康检测领域显示出巨大的应用潜力。Wang等^[18]使用纳米纤维素/芳纶纳米纤维(CNF/ANF)气凝胶作为模板来控制内部聚吡咯导电网络的原位形成,进而制备了一种具有有序结构、优异导电性、阻燃性和良好机械性能的轻质导电气凝胶。将其作为压阻传感器,该气凝胶展现出高的应变灵敏度,因此可实时感知人体运动和生理健康(如手腕脉搏的跳动)状态。

芳纶纳米纤维(ANFs)源自对苯二甲酰胺(PPTA)纤维(商品名为Kevlar纤维),它不仅具有大长径比和高比表面积等纳米结构特点,而且还保持了优异的力学、化学和耐热性能,使其在各个领域中展现出巨大的应用潜力^[19]。得益于ANF的优点,ANF气凝胶具有高压缩性、高优异的结构稳定性和热稳定性,其结合导电填料制备ANF导电气凝胶可被用作高性能压阻传感器^[5]。Wang等^[20]将ANFs与MXene导电填料相结合,利用真空抽滤的方法制备了ANF/MXene复合气凝胶。该气凝胶具有三维多孔结构,体积密度低至 25 mg/cm^3 ,同时MXene为气凝胶提供了优异的导电性。一系列的实验表明,ANF/MXene气凝胶传感器具有良好的传感性能,如宽检测范围(2%~80%压缩应变)、高灵敏特性(128 kPa^{-1})和超低的检测极限(100 Pa),这使其在检测人体轻微运动到剧烈运动方面发挥着准确的监测作用。然而,MXene中的金属原子极易氧化且其价格高昂,这就限制了该导电复合气凝胶的广泛应用。基于此,本文以商业化芳纶纤维为原料,利用去质子化的方法制备ANF分散液,结合常用的碳纳米管(CNTs)作为导电填料,通过ANFs和CNTs之间氢键构筑,获得结构均一的导电ANF/CNT气凝胶,并系统研究气凝胶的隔热性能、力学性能和传感特性。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

材料:对位芳纶(PPTA)长丝(直径为 $4\sim 20 \mu\text{m}$,长度为 $5\sim 10 \text{ cm}$),日本帝人株式会社;氢氧化钾(KOH,分析纯)、二甲基亚砜(DMSO,分析纯),天津市科密欧化学试剂有限公司;碳纳米管(CNTs,直径为 $10\sim 20 \text{ nm}$,长度为 $10\sim 30 \mu\text{m}$,纯度 $>98\%$),江苏先丰纳米材料科技有限公司;无水乙醇(分析纯),天津市风船化学试剂科技有限公司。

仪器:Flex SEM1000型台式能谱一体扫描电镜,日本日立公司;FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技有限公司;XploRA PLUS型激光共焦扫描成像拉曼光谱仪,日本Horiba公司;TSE502B型电子万能试验机,深圳万测试验设备有限公司;DAQ 6510型精密万用表,英国吉时利有限公司;TG 209 F3 Tarsus型热重分析仪,德国耐驰仪器制造有限公司;Fotric 343型红外热像仪,上海飞础科智慧科技有限公司。

1.2 样品制备

1.2.1 芳纶纳米纤维分散液的制备

将 0.6 g 芳纶长丝剪切为 5 mm 左右的短纤维,使用无水乙醇去除纤维表面杂质后,加入到由 H_2O 、KOH和DMSO组成的混合体系中(芳纶与KOH的质量比为 $2:3$, H_2O 与DMSO的体积比为 $1:25$),形成总质量为 100 g 的纤维分散液,常温下搅拌 4 h 左右,得到深红色的ANF分散液,质量浓度为 6.0 mg/mL 。

1.2.2 ANF/CNT复合气凝胶的制备

ANF/CNT复合气凝胶的制备示意图如图1所示。

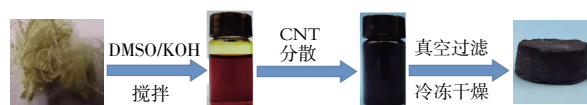


图1 ANF/CNT基气凝胶的制备

Fig.1 Preparation of ANF/CNT aerogel

首先在 0.1 g KOH和 16.6 mL DMSO体系中,加入一定量的CNTs,配制出质量浓度依次为 2.5 、 4.0 、 6.0 mg/mL 的CNT分散液,然后进行磁力搅拌和超声处理,直至CNT完全分散均匀。将上述处理好的CNT分散液分别加入 16.6 mL ANF分散液中搅拌 7 d ,最终制得均匀的ANF/CNT分散液。将 66.4 mL 去离子水缓慢加入ANF/CNT分散液,使ANF再质子化还原,经多次去离子水洗涤并抽滤后,将其转移到自制的冷冻装置中,利用液氮进行冷冻成形,最后冷冻干燥 72 h 后获得CNTs质量分数分别为 30% 、 40% 、 50% 的ANF/CNT

复合气凝胶,将样品依次命名为:ANF/CNT-30、ANF/CNT-40、ANF/CNT-50。

1.3 测试与表征

(1)形貌观察:利用台式能谱一体扫描电镜观察纯 ANF 气凝胶以及 ANF/CNT 复合气凝胶的形貌,加速电压为 10 kV,测试前样品进行喷金处理。

(2)化学结构表征:利用傅里叶变换红外光谱仪在室温下表征 ANF 气凝胶和 ANF/CNT 复合气凝胶的官能团变化,扫描范围为 $500\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$;利用激光共焦扫描成像拉曼光谱仪对 ANF、CNT、ANF/CNT 复合气凝胶进行分子结构分析,扫描范围 $0\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,波长 785 nm 。

(3)热重性能测试:气凝胶样品在烘箱内充分干燥后,采用热重分析仪进行热失重测试。在氮气氛围下,测试温度范围为 $25\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

(4)隔热性能测试:将气凝胶水平放置于加热台上,设定加热台温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,在气凝胶保持 30 min 后,借助红外热像仪记录气凝胶上表面的温度。

(5)力学性能测试:利用电子万能试验机对样品进行压缩测试,压缩速率为 $50\text{ mm}/\text{min}$ 。

(6)传感性能测试:由电子万能试验机与精密万用表组装的传感性能测试平台进行表征,此平台可以实现对样品压缩过程中对传感器的电阻进行实时监测。

2 结果与讨论

2.1 ANF/CNT 复合气凝胶的机理分析

芳纶(PPTA)纤维的结构如图2所示。

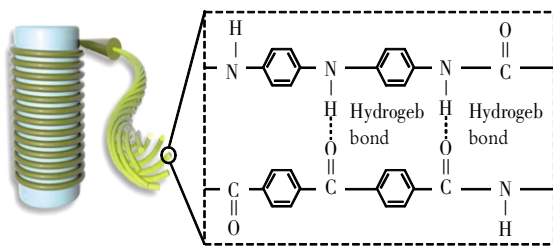


图2 芳纶纤维结构

Fig.2 Structure of aramid fiber

由图2可以看出,PPTA分子链上存在大量的N—H和C=O基团,二者相互作用使相邻分子链之间形成高密度氢键,进而赋予芳纶纤维出色的力学性能,其拉伸模量和抗拉强度分别达到了 90 GPa 和 3.6 GPa ^[21]。有趣的是,芳纶纤维可以在 DMSO/KOH 溶液中劈裂成单个或几个分子链粗细(即去质子化过程),同时可进一步质子化还原成纳米纤维^[22]。基于这一机理,本工作分别

将芳纶纤维和CNT溶于DMSO/KOH溶液,制备了ANF和CNT分散液,然后将两溶液混合在一起制备出均匀稳定的ANF/CNT分散液,在这一过程中,芳纶纤维被剥离成超细纤维,而CNT在KOH的作用下其表面可生成极性基团,其可与PPTA分子链形成氢键,从而增强了ANF和CNT的相容性,有助于均匀稳定的ANF/CNT分散液的形成。当进一步加入去离子水并将溶液pH值调节至中性后,ANF由于质子化效应重建氢键,结合ANF和CNT之间的氢键作用,二者在去离子水中均匀且稳定存在。ANF/CNT复合气凝胶通过真空辅助抽滤和冷冻干燥的方法制备而成,从而尽可能地保留其内部的多孔结构。得益于其内部多孔结构,纯气凝胶和复合气凝胶均展现出超低的体密度,CNT质量分数为0、30%、40%、50%的气凝胶的密度依次为 13.5 、 19.2 、 22.5 、 $26.9\text{ mg}/\text{cm}^3$ 。

2.2 ANF/CNT 复合气凝胶的形貌表征

图3为ANF气凝胶和ANF/CNT复合气凝胶的实物图与SEM图。

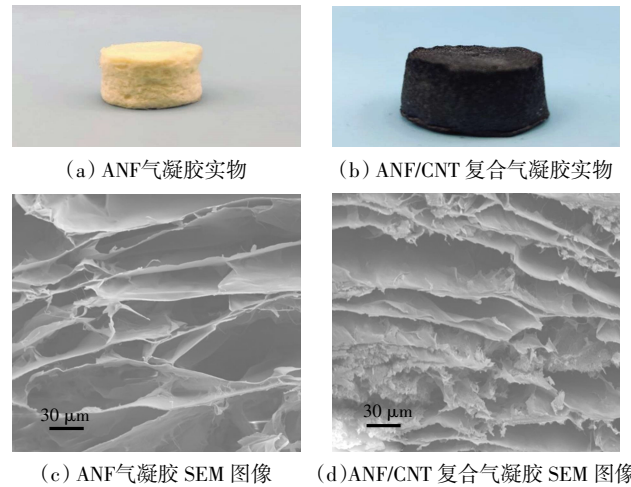


图3 ANF气凝胶和ANF/CNT复合气凝胶实物及电镜照片

Fig.3 Photos and SEM images of ANF aerogel and ANF/CNT composite aerogel

由图3(a)观察到,纯ANF气凝胶显示了ANF本来的特征,具有独特的淡黄色。一旦加入CNT导电材料,气凝胶的颜色从淡黄色转变成黑色,如图3(b)所示。从截面SEM图像可以看出,图3(c)和图3(d)受益于从下到上的定向冷冻策略,液氮驱动冰晶垂直生长,因此纯气凝胶和复合气凝胶内部都表现出均匀的三维定向层状结构,其反映了冰晶生长的方向垂直于孔隙的方向。层状结构在应对压缩时,能提供足够的压缩空间,为进一步产生更好的传感特性提供了基础。此外,ANF气凝胶呈现光滑分层结构,这是由于大量氢键相互作用以及高度定向的结构集结形成的。而复合气

凝胶的层状结构显示出相对粗糙的表面,这是由于CNTs在表面突出形成的,同时可以观察到ANFs与CNTs之间的氢键作用使二者之间的连接较为紧密。没有观察到CNTs有明显的聚集结构,说明CNTs均匀地分散在气凝胶内部,这为气凝胶提供了良好的导电性。

2.3 ANF/CNT复合气凝胶中的界面作用分析

为了证明ANFs与CNTs之间存在丰富的氢键,以致于二者在复合气凝胶中形成了稳定的结合,本文分别对ANF气凝胶、ANF/CNT复合气凝胶以及纯CNT进行了FTIR和拉曼分析,如图4所示。

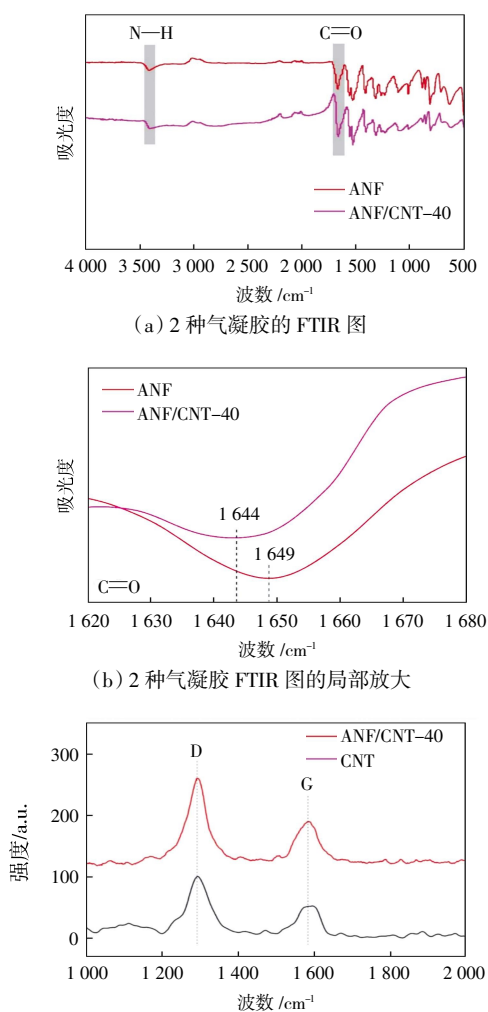


图4 ANF气凝胶、ANF/CNT复合气凝胶以及纯CNT的FTIR和拉曼分析

Fig.4 FTIR and Raman spectra of ANF aerogel, ANF/CNT-40 composite aerogels and raw CNT

从图4(a)和图4(b)中可以看出,1649 cm^{-1} 和3323 cm^{-1} 处的特征峰分别对应于ANF中的C=O和N-H拉伸振动,可见复合气凝胶中的吸收峰与ANF气凝胶相比没有明显的位置变化,说明CNTs的加入没有改变ANFs的整体结构。同时具体分析ANFs的C=O

可以看出,该特征峰从1649 cm^{-1} 移到1644 cm^{-1} 处,这可能是由于ANF和CNT之间形成了强氢键作用导致的。由图4(c)可以看出,D波段($\approx 1305 \text{ cm}^{-1}$)归因于CNT的 SP^3 缺陷,G波段($\approx 1580 \text{ cm}^{-1}$)表示CNT结构中C-C的 SP^2 键。 I_D/I_G (D波段和G波段之间的强度比)描述了CNT的改性程度。 I_D/I_G 值越大,CNT结构的缺陷就越多。当CNT被KOH处理形成气凝胶之后, I_D/I_G 值从1.88增加到2.12,CNT结构的缺陷增加,表明大量的羟基嫁接到了CNT表面,这就为CNT和ANF之间的氢键形成提供了基础。

2.4 ANF/CNT复合气凝胶的高温隔热性能分析

气凝胶的热稳定性是其高温隔热的前提,因此对ANF气凝胶和ANF/CNT复合气凝胶进行了热重分析,来评定其热稳定性,如图5所示。

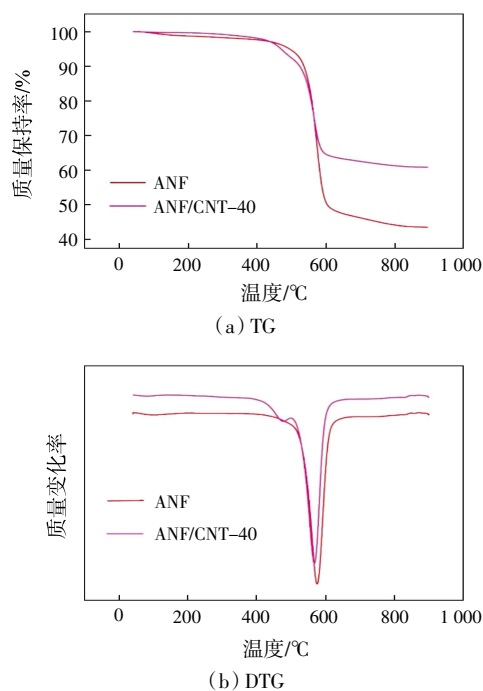


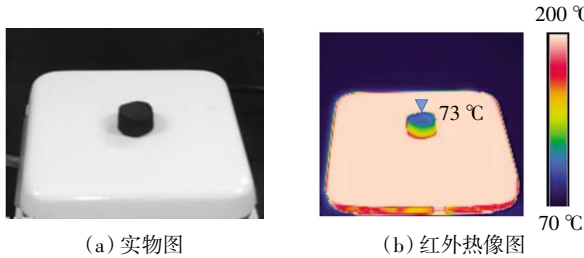
图5 ANF和ANF/CNT气凝胶的热重曲线

Fig.5 Thermogravimetry analysis of ANF and ANF/CNT aerogels

图5(a)和图5(b)分别展示的是氮气气氛下ANF气凝胶和ANF/CNT复合气凝胶的TG和DTG图。由图5可以看出,ANF/CNT复合气凝胶与ANF气凝胶表现出相似的热稳定性。2种气凝胶质量损失都很少,表现出良好的热稳定性。当温度继续上升到500 $^{\circ}\text{C}$,ANF气凝胶仍保持较好的稳定性,复合气凝胶则出现了明显的质量损失,这可归结为复合气凝胶中CNT表面的羟基降解造成的。在500~600 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内2种气凝胶质量损失最大,这一区域是ANF的主要分解区域,其质量损失是由ANF热分解造成的。在温度上升到

600 °C之后,样品质量趋于稳定,复合气凝胶剩余残渣量大于纯气凝胶,其多出来的残渣为未分解的 CNT。由此可见,CNTs 的加入对 ANF 气凝胶的热稳定性几乎没有影响,复合气凝胶可以满足 400 °C 以下的高温环境使用。

将 ANF/CNT 复合气凝胶放置于 200 °C 的加热台上,静置 30 min,最后使用热红外成像仪记录气凝胶上表面的温度,来评价其高温隔热性能,如图 6 所示。



(a) 实物图 (b) 红外热像图

图 6 ANF/CNT 气凝胶的高温隔热性能

Fig.6 Thermal insulation property of ANF/CNT aerogel at high temperature

由图 6 可见,长时间静置后,气凝胶的上表面温度能够稳定保持在 73 °C,其与加热台温度的温差达到 127 °C,展现出良好的隔热性能。这一现象是因为气凝胶内部层层堆叠形成的多孔结构阻挡了高温的蔓延,多孔结构能够将空气包覆在孔隙内,限制其流动,静止的空气阻碍了热量的传播,从而降低气凝胶的导热率。

2.5 ANF/CNT 复合气凝胶的力学性能分析

气凝胶的内部结构直接决定了其力学性能,稳定的内部结构以及优异的压缩回弹性在传感器领域中具有重要价值。为了研究纯 ANF 气凝胶和 ANF/CNT 复合气凝胶的力学性能,本文对气凝胶进行了一系列压缩试验。需要说明的是,所有气凝胶样品都经过了 30%形变的预压缩。图 7 为 ANF 气凝胶和 ANF/CNT 复合气凝胶的压缩-释放过程中的应力-应变曲线。

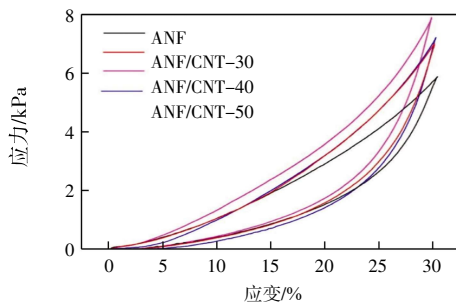


图 7 ANF 气凝胶和 ANF/CNT 复合气凝胶的压缩应力-应变曲线

Fig.7 Compressive stress-strain curves of ANF aerogel and ANF/CNT composite aerogel

由图 7 可以看出,所有的气凝胶都有良好的压缩回弹性。随着 CNT 的含量增加,气凝胶的压缩应力峰

值也随之增加,其在 CNT 质量分数为 40%时达到最大,这表明 CNT 和 ANF 之间形成了较强的结合力,形成了稳定的内部多孔结构。进一步增加 CNT 质量分数到 50%时,气凝胶压缩强力反而有所下降,这可能是由于过多 CNT 的存在阻碍了 ANF 质子化还原,从而影响了 ANF 的骨架构建。图 8 可视化地展示了 ANF/CNT-40 复合气凝胶的压缩回弹性。当复合气凝胶在受到外力压缩后,一旦释放外部压力,气凝胶基本能够恢复到初始高度,进一步证明了气凝胶优异的压缩回弹性。为了评定复合气凝胶的抗压缩疲劳性,30%形变下对该复合气凝胶施加 100 次的压缩循环,如图 9 所示。

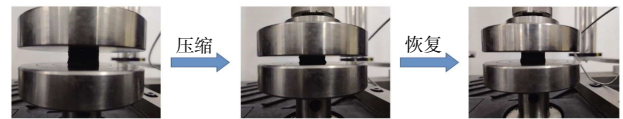


图 8 ANF/CNT-40 复合气凝胶的压缩回弹性展示

Fig.8 Photos showing the compressive elasticity of ANF/CNT-40 composite aerogel

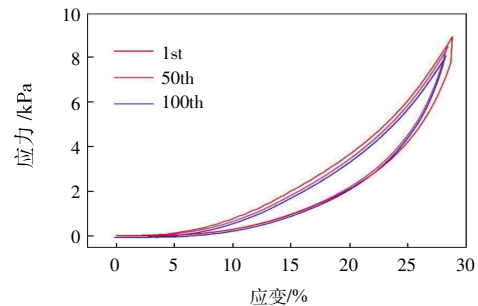


图 9 30%形变下,ANF/CNT-40 复合气凝胶 100 次压缩循环下的应力-应变曲线

Fig.9 Compressive stress-strain curves of ANF/CNT-40 composite aerogel under 100 compression cycles under 30% deformation

由图 9 可以看出,复合气凝胶在经过 100 次的压缩循环后,虽然最大压缩应力有所降低,但应力-应变曲线仍表现为闭合的迟滞回线,复合气凝胶几乎没有出现塑性变形。这些现象表明,层状三维多孔网络为复合气凝胶提供了优异的力学性能和特定的空间结构,使其得以承受外部应力和形变。复合气凝胶出色的可压缩回弹性能够很好地满足压阻传感器的要求。

2.6 ANF/CNT 复合气凝胶的传感性能分析

在充分考虑力学性能和导电性的情况下,本文选择了 ANF/CNT-40 复合气凝胶展示其在传感方面的应用。用导电银浆将复合气凝胶上下面与两根导线电极相连接,组成一个简单的压阻传感器,并使用精密电阻数据采集器实时监控传感器电阻变化。ANF/CNT 复合气凝胶的传感性能如图 10 所示。

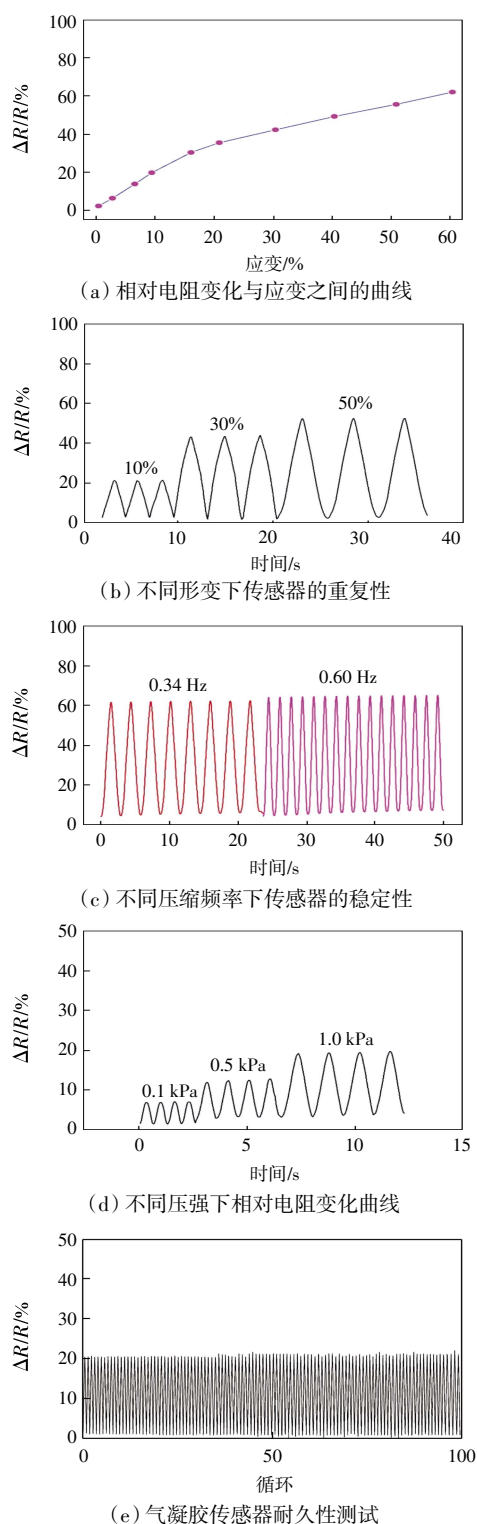


图 10 ANF/CNT-40 复合气凝胶的传感性能

Fig.10 Sensing performance of ANF/CNT-40 composite aerogels

当施加外力时,气凝胶发生压缩形变,其电阻值迅速减小。从图 10(a)中可以观察到,随着应变的发生,电阻变化率可分为 2 个阶段:在 0~15% 范围内,电阻变化相对较快,而形变超过 15% 后,电阻变化率有所减缓,2 个阶段内电阻均呈线性变化。根据传感器灵

敏度(GF)进一步表征气凝胶传感能力,定义 $GF=(\Delta R/R_0)/\Delta\varepsilon$, 其中 $\Delta R/R_0$ 用于表示压缩过程中的相对电阻变化, ΔR 表示压缩前后的电阻差值, R_0 表示压缩前的初始电阻值, $\Delta\varepsilon$ 表示压缩应变变化。因此,在 0~15% 阶段,气凝胶的 GF 达到了 1.94;在 15%~60% 应变阶段,气凝胶 GF 则降为 0.7。这一压阻特性主要取决于气凝胶的三维层状多孔结构,随着压强的增大,CNTs 之间的结合增多,气凝胶内部构建了更多的导电路径,从而使得气凝胶高度方向上电阻变小。复合气凝胶在不同压缩应变(10%、30%、50%)条件下电阻变化率的重复性展示如图 10(b)。在相同压缩应变下,气凝胶电阻变化率基本一致,展现出良好的可重复性。图 10(c)展示了复合气凝胶对不同频率外部应力的响应特性。在相同的压缩形变下调节压缩速度,气凝胶电信号呈现出稳定的状态,没有任何增加或衰减的现象。与其他柔性传感器相比,气凝胶传感器最大的特点之一是微压力检测能力。图 10(d)显示了 ANF/CNT 复合气凝胶对不同压强的精准响应。正如预期的那样,电阻变化率随着压强(0.1、0.5、1.0 kPa)增加而有了明显提高。由图 10(d)还可以看出,复合气凝胶能够对 0.1 kPa 的微小压强做出响应,且具有良好的重复性,证明其具有高灵敏的压阻特性。图 10(e)展示了复合气凝胶的抗疲劳测试结果,由图 10(e)可以看出,气凝胶经 100 次压缩循环后信号输出依然稳定,无任何信号衰减,这些现象都归功于复合气凝胶具有良好的压缩回弹性。以上结果表明 ANF/CNT 复合气凝胶在可穿戴轻量化电子设备中具有广阔的应用前景。

3 结 论

本文以 ANF 为基体材料,以 CNTs 为导电填料,通过二者之间的氢键结合制备出均匀的 ANF/CNT 分散液,然后利用冷冻干燥工艺制备了具有导电性的复合气凝胶,并研究其结构和性能,得出结论如下:

(1) SEM 图像显示,ANF/CNT 复合气凝胶具有三维定向多孔结构,CNT 在内部结构中分布较为均匀,没有明显的团聚。

(2) FTIR 和拉曼光谱分析表明,ANFs 与 CNTs 之间有稳定的氢键连接,形成了稳定的内部多孔结构。低于 40% CNT 的加入不会破坏气凝胶稳定的内部结构,因此其保留了出色的压缩回弹性。气凝胶能承受 50% 的压缩比,并在 100 次压缩循环后完全恢复。

(3) ANF/CNT 复合气凝胶具有优异的热稳定性以及隔热性能,其表面温差达到了 127 °C。ANF/CNT-40

复合气凝胶对不同形变、不同频率的压缩表现出高度响应、可重复性及良好的耐久性,同时其具有 0.1 kPa 的超低压检测极限,可将其用于柔性应变传感器。

参考文献:

- [1] ZHANG H X, NIU W B, ZHANG S F. Extremely stretchable and self-healable electrical skin with mechanical adaptability, an ultrawide linear response range, and excellent temperature tolerance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(27): 24639–24647.
- [2] CHEN J W, YU Q L, CUI X H, et al. An overview of stretchable strain sensors from conductive polymer nanocomposites[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(38): 11710–11730.
- [3] 田明伟,张高品,曲雨君,等. 导电纤维及其传感器在可穿戴智能纺织品领域的应用 [J]. *纺织高校基础科学学报*, 2021, 34(3):51–59.
TIAN M W, ZHANG G J, QU L J, et al. The application of conductive fibers and its flexible sensors in wearable intelligent textiles field[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2021, 34(3): 51–59(in Chinese).
- [4] 赵颖会,武辰爽,王亚洲,等. MXene 改性纺织品在柔性应变传感领域研究进展[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2022, 35(1):48–60.
ZHAO Y H, WU C S, WANG Y Z, et al. Research progress of MXene-modified textiles in the field of flexible strain sensing[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2022, 35(1):48–60(in Chinese).
- [5] WANG C Y, XIA K L, WANG H M, et al. Advanced carbon for flexible and wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(9): e1801072.
- [6] WANG Z F, JIANG R J, LI G M, et al. Flexible dual-mode tactile sensor derived from three-dimensional porous carbon architecture[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(27): 22685–22693.
- [7] MANNFELD S C B, TEE B C K, STOLTENBERG R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers [J]. *Nature Materials*, 2010, 9: 859–864.
- [8] CHEN J W, ZHU Y T, HUANG J R, et al. Advances in responsively conductive polymer composites and sensing applications[J]. *Polymer Reviews*, 2021, 61(1): 157–193.
- [9] AMJADI M, KYUNG K U, PARK I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1678–1698.
- [10] TRUNG T Q, LEE N E. Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4338–4372.
- [11] STASSI S, CAUDA V, CANAVESE G, et al. Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: A review[J]. *Sensors*, 2014, 14(3): 5296–5332.
- [12] ARABY S, QIU A D, WANG R Y, et al. Aerogels based on carbon nanomaterials[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(20): 9157–9189.
- [13] 南静静,支超,何小祎,等. 3D 织物/气凝胶多功能复合材料的制备与性能分析[J]. *西安工程大学学报*, 2022, 36(5): 1–7.
NAN J J, ZHI C, HE X Y, et al. Preparation and property analysis of 3D fabric/aerogel multifunctional composites[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2022, 36(5):1–7. (in Chinese)
- [14] 周慧敏,丁新波,刘涛,等. 纤维素/MXene 复合气凝胶的制备及其对亚甲基蓝的吸附机制 [J]. *现代纺织技术*. 2023, 31(4):93–102.
ZHOU H M, DING X B, LIU T, et al. Preparation of the cellulose/MXene composite aerogel and its adsorption mechanism for methylene blue[J]. *Advanced Textile Technology*, 2023, 31(4): 93–102.
- [15] YANG J, LI Y, ZHENG Y Y, et al. Versatile aerogels for sensors[J]. *Small*, 2019, 15(41): e1902826.
- [16] DAI L, WANG Y, ZOU X J, et al. Ultrasensitive physical, bio, and chemical sensors derived from 1-, 2-, and 3-D nanocellulosic materials[J]. *Small*, 2020, 16(13): e1906567.
- [17] CAO X Y, ZHANG J, CHEN S W, et al. 1D/2D nanomaterials synergistic, compressible, and response rapidly 3D graphene aerogel for piezoresistive sensor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(35): 2003618.
- [18] WANG S J, MENG W Y, LV H F, et al. Thermal insulating, light-weight and conductive cellulose/aramid nanofibers composite aerogel for pressure sensing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 270: 118414.
- [19] XIAO S S, MEI H, HAN D Y, et al. Ultralight lamellar amorphous carbon foam nanostructured by SiC nanowires for tunable electromagnetic wave absorption[J]. *Carbon*, 2017, 122: 718–725.
- [20] WANG L, ZHANG M Y, YANG B, et al. Highly compressible, thermally stable, light-weight, and robust aramid nanofibers/Ti₃AlC₂ MXene composite aerogel for sensitive pressure sensor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10633–10647.
- [21] HU Y H, YANG G, ZHOU J T, et al. Proton donor-regulated mechanically robust aramid nanofiber aerogel membranes for high-temperature thermal insulation[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4): 5984–5993.
- [22] YANG M, CAO K Q, SUI L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: A new nanoscale building block[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(9): 6945–6954.

本文引文格式:

杨光,金钊,闫静. 芳纶纳米纤维/碳纳米管复合气凝胶传感器的制备及其性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(5): 1–7.
YANG G, JIN Z, YAN J. Preparation and performances of aramid nanofiber/carbon nanotube composite aerogel sensor[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(5): 1–7(in Chinese).