聚乙烯醇/石墨烯纳米复合材料的电阻式应变传感性能研究

王 怀[1],司文陵[2],丁雪晨[1]

(1.河南轻工职业学院,河南 郑州 450008;2.河南地矿职业学院,河南 郑州 451464)

摘 要:以聚乙烯醇(PVA)为基体,以还原氧化石墨烯(rGO)为导电填料,采用溶液共混-流延成膜法制备PVA/rGO纳米复合薄膜。对复合薄膜的结构与热学性能进行表征,系统考察rGO含量对复合材料力学性能、导电性能及电阻式应变传感性能的影响。结果表明:rGO在PVA基体中能够形成均匀的导电网络。当rGO质量分数为2.0%时,复合薄膜的导电渗滤阈值约为0.75%,拉伸强度达到65.2 MPa,应变灵敏系数在0~10%应变范围内为5.5,在10%~50%应变范围内可达18.0。经500次拉伸循环测试后,信号偏移量低于3.5%,响应时间约80 ms。PVA/rGO-2.0%复合薄膜展现出优异的应变传感性能与循环稳定性,在柔性可穿戴传感器领域具有潜在的应用价值。

关键词:聚乙烯醇;石墨烯;纳米复合材料;应变传感

中图分类号:TB332 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0043-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.008

Study on Resistive Strain Sensing Performance of Polyvinyl Alcohol/Graphene Nanocomposites

WANG Huai[1], SI Wenling[2], DING Xuechen[1]

(1. Henan Vocational College of Light Industry, Zhengzhou 450008, China;
2. Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: Polyvinyl alcohol (PVA) was used as the matrix and reduced graphene oxide (rGO) was employed as the conductive filler to prepare PVA/rGO nanocomposite films via a solution blending-casting method. The structure and thermal properties of the composite films were characterized, and the effects of rGO content on the mechanical properties, electrical conductivity, and resistive strain-sensing performance of the composites were systematically investigated. The results showed that rGO could form a uniform conductive network within the PVA matrix. At an rGO mass fraction of 2.0%, the composite films exhibited an electrical percolation threshold of approximately 0.75%, a tensile strength of 65.2 MPa, and strain gauge factors of 5.5 in the strain range of 0~10% and 18.0 in the range of 10%~50%. After a test of 500 stretching cycles, the signal drift was below 3.5%, and the response time was approximately 80 ms. The PVA/rGO-2.0% composite films demonstrated excellent strain-sensing performance and cyclic stability, indicating potential application in flexible wearable sensors.

Keywords: PVA; Graphene; Nanocomposites; Strain sensing

柔性电子技术与物联网技术的快速发展,使柔性应变传感器在人体运动监测、健康管理、人机交互及结构健康监测等领域受到广泛关注[1-3]。传统金属箔式应变片技术成熟,但存在应变范围窄、柔性差、难以贴合曲面等局限,难以满足新型柔性传感器件的发展需求[4]。因此,开发兼具高灵敏度、宽应变范围和良好柔性的新型应变传感材料已成为研究热点。在众多柔性基体材料中,聚乙烯醇(PVA)因优异的水溶性、成膜性、生物相容性和力学性能等特性,成为制备柔性传感器的理想基体材料之一[5-7]。PVA分子链上含有大量羟基,可与多种纳米填料形成氢键,有利于填料均匀分散与界面结合[8]。然而,纯PVA为绝缘材料,需要引入导电填料构建导电网络,以实现电阻式应变

收稿日期Submitted date 2025-12-15;修回日期Revised date 2026-01-08;录用日期Accepted date 2026-02-12

基金项目:2025年度河南省科技攻关项目(252102210112)

联系人,wanghuai6688@163.com

引用本文:王怀,司文陵,丁雪晨.聚乙烯醇/石墨烯纳米复合材料的电阻式应变传感性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):43-48.

Citation: WANG H, SI W L, DING X C. Study on resistive strain sensing performance of polyvinyl alcohol/graphene nanocomposites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 43-48.

传感功能。石墨烯作为一种二维碳纳米材料，具有极高的比表面积以及优异的导电性、力学强度和柔韧性，是构建高性能柔性传感器的理想导电填料[9-11]。相较于碳纳米管(CNTs)[12-13]、炭黑(CB)[14]等其他碳基导电填料，石墨烯及其衍生物具有更大的接触面积和更强的界面相互作用，有利于在较低填充量下形成连续导电通路[15-16]。氧化石墨烯(GO)表面含有丰富的含氧官能团，可在水溶液中稳定分散，通过氢键作用与PVA基体实现良好界面结合[10,17]。经化学或热还原处理后，GO转变为还原氧化石墨烯(rGO)，可在保留部分含氧基团的同时恢复共轭结构，导电性显著提高[18-19]。电阻式应变传感器的工作原理是导电网络在外力作用下发生形变，导致导电通路的断裂与重建，从而引起电阻变化[20-21]。应变灵敏系数(F_G)是衡量应变传感器性能的关键指标，定义为相对电阻变化率与应变的比值。对于聚合物/导电填料复合体系，F_G主要取决于导电网络的微观结构和基体的变形行为[22-23]。当填料含量接近渗滤阈值时，导电网络处于临界连通状态，微小形变即可引起显著的电阻变化，从而获得较高灵敏度[24]。然而，过高的灵敏度往往伴随着较窄的线性范围和较差的循环稳定性，因而需要在灵敏度与稳定性之间进行合理权衡[25-26]。

近年来，聚合物/石墨烯复合应变传感器的研究取得显著进展，天然橡胶/石墨烯、热塑性聚氨酯/石墨烯等体系均展现出良好的传感特性[27]。然而，这些体系多采用有机溶剂加工，存在环境污染问题。PVA/rGO体系可在水溶液中完成制备，工艺绿色简便，PVA优异的成膜性有利于获得结构均匀的薄膜传感器[28-29]。

本研究以PVA为基体，以rGO为导电填料，采用溶液共混-流延成膜法制备不同rGO含量的PVA/rGO纳米复合薄膜，对PVA/rGO纳米复合薄膜的结构与热学性能进行表征，系统研究rGO含量对复合薄膜力学性能、导电性能和应变传感性能的影响规律，探讨应变传感机理，以期为PVA基柔性应变传感器的设计与应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PVA，1799，醇解度99%，上海麦克林生化科技股份有限公司；GO水分散液，质量浓度2 g/L，苏州碳丰石墨烯科技有限公司；水合肼，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；去离子水，实验室自制。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Spectrum Two，美国珀金埃尔默公司；X射线衍射仪(XRD)，D8 Advance，德国布鲁克公司；热重分析仪(TG)，TGA 8000，美国珀金埃尔默公司；差示扫描量热仪(DSC)，Q200，美国沃特世公司；电子万能试验机，CMT4304，深圳市新三思材料检测有限公司；数字式四探针测试仪，RTS-9，广州四探针科技有限公司；高精度数字万用表，34465A，美国是德科技公司；电热恒温鼓风干燥箱，DHG-9070A，上海一恒科学仪器有限公司；磁力搅拌器，DF-101S，巩义市予华仪器有限责任公司；超声波清洗器，KQ-300VDE，昆山舒美超声仪器有限公司；分析天平，BSA224S，德国赛多利斯公司；线性电机拉伸台，自组装。

1.3 样品制备

1.3.1 rGO粉末的制备

取200 mL GO水分散液于500 mL圆底烧瓶中，磁力搅拌下加入2 mL水合肼，在95 ℃油浴中回流反应3 h。在反应过程中，分散液由棕黄色逐渐变为黑色。反应结束后，将产物真空抽滤，去离子水洗涤3次，于60 ℃真空干燥箱中干燥24 h，得到rGO粉末。

1.3.2 PVA/rGO纳米复合薄膜的制备

表1为PVA/rGO复合薄膜的配方。称取5 g PVA加入100 mL去离子水中，在90 ℃水浴条件下磁力搅拌4 h，使PVA完全溶解，得到质量分数为5%的PVA水溶液。按照表1分别称取一定质量的rGO粉末，超声分散于20 mL去离子水中30 min。将rGO分散液加入PVA溶液中，继续在60 ℃水浴条件下磁力搅拌2 h，超声处理1 h，使rGO均匀分散。将混合溶液浇铸于聚四氟乙烯模具中，在40 ℃烘箱中干燥48 h成膜，得到PVA/rGO复合薄膜。按rGO占PVA质量分数的不同，将制备的复合薄膜分别命名为PVA/rGO-0.5%、PVA/rGO-1.0%、PVA/rGO-2.0%、PVA/rGO-3.0%和PVA/rGO-5.0%。同时，制备不添加rGO的PVA薄膜作为对照样品。

表1 PVA/rGO复合薄膜的配方

Tab.1 Formula of PVA/rGO composite films

样品	m_{PVA}/g	m_{rGO}/g	w_{rGO}/%	$V_{去离子水}$/mL
PVA	5	0	0	120
PVA/rGO-0.5%	5	0.025	0.5	120
PVA/rGO-1.0%	5	0.050	1.0	120
PVA/rGO-2.0%	5	0.100	2.0	120
PVA/rGO-3.0%	5	0.150	3.0	120
PVA/rGO-5.0%	5	0.250	5.0	120

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：采用KBr压片法，在傅里叶变换红外光谱仪上进行测试，扫描范围4 000~400 cm^{-1}，分辨率4 cm^{-1}，扫描次数32次。

XRD测试：采用Cu Kα射线(λ=0.154 06 nm)，管电压40 kV，管电流40 mA，扫描范围5°~60°，扫描速率5 (°)/min。

TG测试：采用热重分析仪进行测试，在N_2气氛中以10 ℃/min的升温速率从室温升至600 ℃。

DSC测试：采用差示扫描量热仪进行测试，在N_2气氛中以10 ℃/min的升温速率从室温升至280 ℃，记录第二次升温曲线。

拉伸性能测试：按照GB/T 1040.2—2022进行测试，薄膜试样尺寸为100 mm×10 mm，拉伸速率为50 mm/min，每组测试5个试样，取平均值。

导电性能测试：采用四探针法测试薄膜的体积电导

率。试样尺寸为20 mm×20 mm，每个样品取5个不同位置测试，计算平均值。

应变传感性能测试：将薄膜试样两端用导电银胶固定铜电极，连接至数字万用表，实时记录电阻。利用自组装线性电机拉伸台施加不同大小和速率的应变载荷，同步采集应变与电阻信号。F_G的计算公式为：

$$F_G=\frac{(\Delta R/R_0)}{\varepsilon} \quad (1)$$

式(1)中：ΔR为电阻变化量，Ω；R_0为初始电阻，Ω；ε为应变，%；$\Delta R/R_0$为相对电阻变化率。

循环稳定性测试：在5%应变下，以0.5 Hz的频率进行500次拉伸-释放循环测试，记录电阻变化信号。

响应/恢复时间测试：在5%应变下进行阶跃加载-卸载实验，记录电阻信号的响应与恢复过程。从信号加载到电阻变化达到稳态值90%的时间定义为响应时间，从信号卸载到电阻变化达到稳态值的90%的时间为恢复时间。

2 结果与讨论

2.1 PVA/rGO复合薄膜的FTIR分析

图1为GO、rGO、PVA和PVA/rGO-2.0%复合薄膜的FTIR谱图。从图1可以看出，GO在3 400 cm^{-1}处出现宽而强的O—H伸缩振动吸收峰；1 720 cm^{-1}处为C═O伸缩振动吸收峰；1 620 cm^{-1}处为未被氧化的C═C骨架振动峰；1 225 cm^{-1}和1 050 cm^{-1}处分别为C—OH和C—O—C的吸收峰，表明GO表面含有丰富的含氧官能团。经水合肼还原后，rGO在1 720 cm^{-1}处的C═O吸收峰基本消失；3 400 cm^{-1}处的O—H吸收峰强度显著减弱；而1 580 cm^{-1}处的C═C骨架振动峰增强，说明大部分含氧官能团已被成功还原，共轭结构得到恢复。PVA在3 300 cm^{-1}处出现强而宽的O—H伸缩振动峰；2 940 cm^{-1}处为C—H伸缩振动峰；1 430 cm^{-1}和1 330 cm^{-1}处分别为C—H弯曲振动和O—H面内弯曲振动；1 090 cm^{-1}处为C—O伸缩振动峰。PVA/rGO-2.0%基本保留PVA的特征吸收峰，同时在1 580 cm^{-1}处出现rGO的C═C骨架振动峰，O—H吸收峰位置由3 300 cm^{-1}移动至3 310 cm^{-1}，发生约10 cm^{-1}的蓝移。这表明PVA的羟基与rGO表面残余的含氧基团之间形成氢键相互作用，有利于rGO在PVA基体中的均匀分散和界面结合。

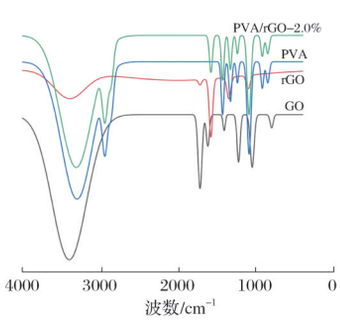


图1 GO、rGO、PVA和PVA/rGO-2.0%复合薄膜的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of GO, rGO, PVA and PVA/rGO-2.0% composite films

2.2 PVA/rGO复合薄膜的XRD分析

图2为GO、rGO、PVA及PVA/rGO复合薄膜的XRD谱图。从图2可以看出，GO在10.5°处出现尖锐的衍射峰，对应GO的(001)晶面。根据布拉格公式计算得到层间距为0.842 nm，显著大于天然石墨烯的层间距(0.335 nm)，是在氧化过程中含氧官能团和水分子嵌入石墨烯层间所致。经水合肼还原后，rGO在10.5°处的衍射峰完全消失，但在24°处出现一个宽而弥散的衍射峰，对应层间距约为0.370 nm，接近石墨烯的层间距。原因是含氧官能团的去除使石墨烯片层重新堆叠，但由于片层间残余的少量官能团和褶皱结构，层间距仍略大于石墨烯。PVA在19.5°处出现较强的衍射峰，对应PVA的(101)晶面；在40°处出现一个较弱的衍射峰，表明PVA具有半结晶结构。随着rGO含量的增加，PVA/rGO复合薄膜中PVA在19.5°处的衍射峰强度逐渐减弱且半峰宽增大，说明rGO的引入能够抑制PVA分子链的规则排列，降低结晶度。当rGO质量分数达到2.0%及以上时，在24°处可观察到rGO的宽衍射峰，表明rGO以纳米片层形式分散于PVA基体中。随着rGO含量的增加，堆叠程度加大。

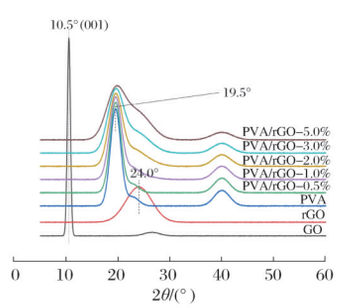
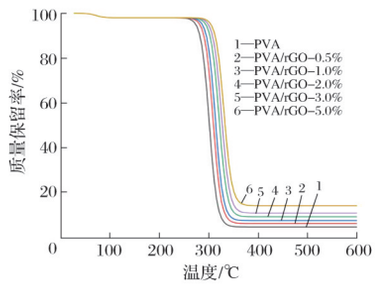


图2 GO、rGO、PVA和PVA/rGO复合薄膜的XRD谱图

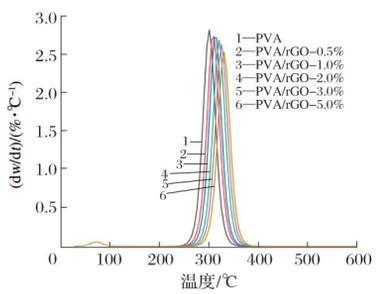
Fig.2 XRD patterns of GO, rGO, PVA and PVA/rGO composite films

2.3 PVA/rGO复合薄膜的热性能分析

图3为PVA和PVA/rGO复合薄膜的TG和DTG曲线，表2为PVA和PVA/rGO复合薄膜的热性能参数。从图3a可以看出，所有样品在100 ℃以下均出现少量质量损失，归因于吸附水的蒸发。PVA及其复合材料的主要热降解过程发生在200~400 ℃温度范围内，包括PVA侧链羟基的脱除和主链的断裂。从表2可以看出，PVA质量损失5%时的温度($t_{5\%}$)为250 ℃。随着rGO含量的增加，复合薄膜的$t_{5\%}$呈逐步升高趋势。PVA/rGO-5.0%的$t_{5\%}$达到280 ℃，较PVA提高30 ℃。从图3b和表2可以看出，最大降解速率温度(t_{max})同样随着rGO含量的增加而升高，PVA的t_{max}为310 ℃，PVA/rGO-5.0%的t_{max}升至340 ℃。原因是rGO具有极高的热稳定性，可在PVA基体中形成物理阻隔层，延缓热量和降解产物的传递，从而提高复合材料的热稳定性。此外，PVA与rGO之间的氢键作用也限制PVA分子链的运动，进一步增强热阻效应。600 ℃残炭率随着rGO含量的增加而增大。这既与rGO本身的高残炭率有关，也说明rGO能够促进PVA基体的炭化过程。



(a) TG曲线



(b) DTG曲线

图3 PVA和PVA/rGO复合薄膜的TG和DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of PVA and PVA/rGO composite films

表2 PVA和PVA/rGO复合薄膜的热性能参数

Tab.2 Thermal properties parameters of PVA and PVA/rGO composite films

样品	$t_{5\%}$/℃	t_{max}/℃	残炭率(600 ℃)/%
PVA	250	310	5.0
PVA/rGO-0.5%	258	318	6.5
PVA/rGO-1.0%	263	322	7.8
PVA/rGO-2.0%	270	330	9.5
PVA/rGO-3.0%	275	335	11.2
PVA/rGO-5.0%	280	340	14.5

图4为PVA和PVA/rGO复合薄膜的DSC曲线。从图4可以看出，PVA的玻璃化转变温度(t_g)约为72 ℃，熔融峰温度(t_m)约为228 ℃。随着rGO含量的增加，t_g逐渐升高，PVA/rGO-5.0%的t_g升至83 ℃，较PVA提高11 ℃。t_g的升高表明rGO通过氢键和物理约束作用能够限制PVA非晶区分子链的运动自由度。随着rGO含量的增加，t_m略有降低，PVA/rGO-5.0%的t_m降至220 ℃，熔融峰面积减小，说明rGO的引入能够破坏PVA的结晶规整性，使结晶度降低，晶体不完善程度增加，与XRD分析结果吻合。

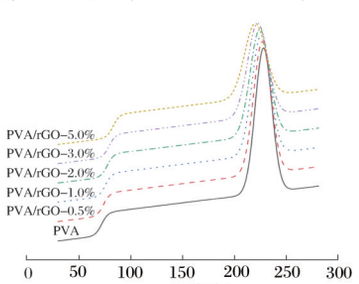


图4 PVA和PVA/rGO复合薄膜的DSC曲线

Fig.4 DSC curves of PVA and PVA/rGO composite films

2.4 PVA/rGO复合薄膜的力学性能分析

图5为PVA和PVA/rGO复合薄膜的应力-应变曲线，表3为PVA和PVA/rGO复合薄膜的力学性能。从表3可以看出，PVA的拉伸强度为45.3 MPa，断裂伸长率为280%。随着rGO质量分数从0增加至2.0%，拉伸强度由45.3 MPa提高至65.2 MPa，增幅达44%。原因是rGO的高强度和大比表面积特性使其能够有效承载和传递应力。同时，PVA分子链与rGO表面之间通过氢键形成强界面结合，增强载荷传递效率。当rGO质量分数超过2.0%后，拉伸强度开始下降，PVA/rGO-5.0%的拉伸强度降至50.8 MPa。原因是过量的rGO因片层间的范德华力而倾向于重新堆叠和团聚，形成应力集中点和缺陷区域，反而削弱增强效果。断裂伸长率随着rGO含量的增加而单调下降，从PVA的280%降至PVA/rGO-5.0%的120%。原因是刚性rGO纳米片能够限制PVA分子链的滑移和取向运动。弹性模量则随rGO含量的增加而持续增大，表明rGO的引入能够提高材料的刚度。综合考虑强度和韧性，PVA/rGO-2.0%具有最佳的力学综合性能。

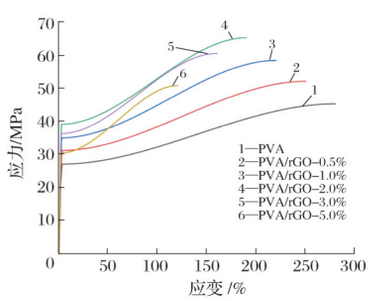


图5 PVA和PVA/rGO复合薄膜的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of PVA and PVA/rGO composite films

表3 PVA和PVA/rGO复合薄膜的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of PVA and PVA/rGO composite films

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/GPa
PVA	45.3±1.8	280±15	1.52±0.08
PVA/rGO-0.5%	52.1±2.1	250±12	1.78±0.10
PVA/rGO-1.0%	58.4±1.5	220±18	2.05±0.12
PVA/rGO-2.0%	65.2±2.3	190±14	2.48±0.15
PVA/rGO-3.0%	60.5±1.9	160±11	2.72±0.11
PVA/rGO-5.0%	50.8±2.5	120±16	2.95±0.18

2.5 PVA/rGO复合薄膜的导电性能分析

图6为PVA/rGO复合薄膜的电导率。从图6可以看出，PVA的电导率约为10^{-10} S/m，属于绝缘材料。当rGO质量分数为0.5%时，电导率跃升至2.5×10^{-6} S/m，增加近4个数量级，表明导电通路开始初步形成。当rGO质量分数从0.5%增加至1.0%时，电导率急剧增加至8.3×10^{-4} S/m，提升两个数量级以上。根据经典渗滤理论，导电填料在绝缘基体中的体积分数达到某一临界值时，导电通路贯穿整个体系，电导率发生突变。利用渗滤方程拟合实验数据，得到渗滤阈值约为0.75%，临界指数约为2.1。较低的渗滤阈值归因于rGO的高长径比和大比表面积，使其

能够在较低含量下形成有效的导电网络。当rGO质量分数为2.0%时，电导率为5.6×10^{-2} S/m，已能满足电阻式应变传感器的基本导电要求。继续增加rGO质量分数至5.0%，电导率达到3.8×10^{-1} S/m，增长速率趋于平缓，表明导电网络已基本饱和。

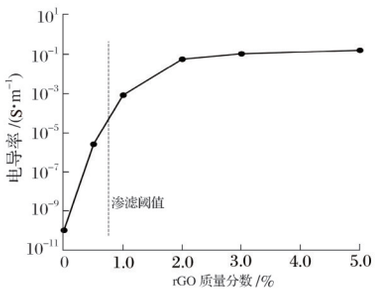


图6 PVA/rGO复合薄膜的电导率

Fig.6 Conductivity of PVA/rGO composite films

2.6 PVA/rGO复合薄膜的应变传感性能分析

图7为PVA/rGO复合薄膜的$\Delta R/R_0$，表4为PVA/rGO复合薄膜在不同应变范围内的F_G。从图7和表4可以看出，所有复合薄膜的$\Delta R/R_0$均随应变的增大而增大，呈现明显的非线性特征。在小应变区间(0~10%)，各样品的$\Delta R/R_0$相对平缓，F_G较小；而在大应变区间(10%~50%)，$\Delta R/R_0$加速增长，F_G显著增大。这种分段式灵敏度特征是导电填料/聚合物复合传感器的典型行为。在小应变下，rGO片层之间的间距略微增大，导电通路的数量仅发生轻微变化，电阻变化较小；在大应变下，rGO片层间距离进一步增大，部分导电通路发生断裂，导致电阻急剧增加。

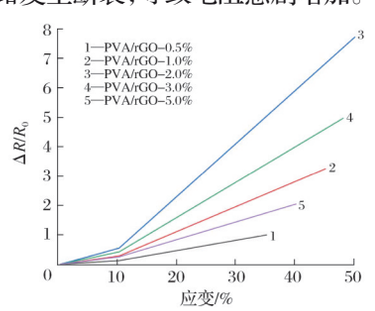


图7 PVA/rGO复合薄膜的$\Delta R/R_0$

Fig.7 $\Delta R/R_0$ of PVA/rGO composite films

表4 PVA/rGO复合薄膜在不同应变范围内的F_G

Tab.4 F_G of PVA/rGO composite films at different strain ranges

样品	F_G(0~10%)	F_G(10%~50%)	最大可检测应变/%
PVA/rGO-0.5%	1.2	3.5	35
PVA/rGO-1.0%	2.8	8.5	45
PVA/rGO-2.0%	5.5	18.0	50
PVA/rGO-3.0%	4.2	12.0	48
PVA/rGO-5.0%	2.5	6.0	40

PVA/rGO-2.0%在所有样品中展现出最高的灵敏度，低应变区F_G为5.5，高应变区F_G达到18.0，最大可检测应变为50%。原因是2.0% rGO位于渗滤阈值附近，导电网络处于临界连通状态，对形变高度敏感。当rGO质量分数低于2.0%时，导电网络不够完善，虽然初始电阻较高，但信噪比较低，灵敏度受限。当rGO质量分数高于2.0%时，导电网络过于致密，需要更大的应变才能引起显著的通路断裂，因此灵敏度降低。这一规律揭示了导电填料含量与灵敏度之间存在最优匹配关系，即填料含量略高于渗滤阈值时可获得最佳的传感性能。

2.7 PVA/rGO复合薄膜的循环稳定性分析

图8为PVA/rGO-2.0%复合薄膜500次拉伸循环的电阻响应。从图8可以看出，PVA/rGO-2.0%复合薄膜在500次循环过程中展现出稳定的电阻响应特性，每次拉伸-释放循环均发生规律性的电阻变化峰。在前50次循环中，可观察到基线电阻存在轻微的上漂趋势。主要是在首次拉伸过程中PVA分子链发生不可逆的取向和滑移以及rGO导电网络的微小调整所致。随着循环次数的增加，基线电阻趋于稳定，电阻变化幅度保持基本恒定。经500次循环后，信号偏移量约为3.5%，电阻变化峰值的变异系数低于2.8%，表明PVA/rGO-2.0%复合薄膜具有优异的循环耐久性和信号重复性。该复合薄膜良好的循环稳定性可归因于以下因素：(1) PVA基体本身具有良好的弹性恢复能力，在5%应变范围内能够实现有效的弹性变形与恢复；(2) rGO与PVA之间的氢键界面作用使导电网络在反复变形过程中能够可逆地断裂与重建；(3) rGO纳米片层的高柔韧性使其能够随基体的变形而弯曲、滑移而不发生断裂破坏。

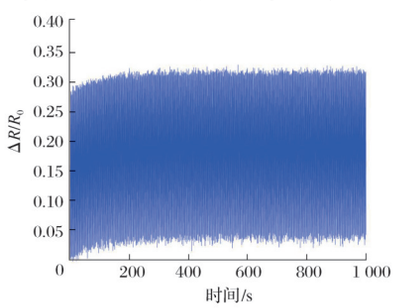


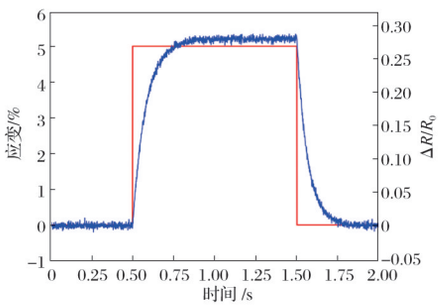
图8 PVA/rGO-2.0%复合薄膜500次拉伸循环的电阻响应

Fig.8 Resistance response of PVA/rGO-2.0% composite film during 500 stretching cycles

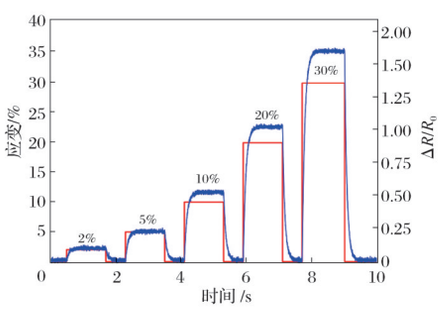
2.8 PVA/rGO复合薄膜的响应与恢复性能分析

图9为PVA/rGO-2.0%复合薄膜的响应与恢复特性。从图9a可以看出，当施加5%阶跃应变时，PVA/rGO-2.0%复合薄膜的电阻迅速升高并在约80 ms内达到稳态值的90%，即响应时间约为80 ms。在卸载应变后，电阻迅速恢复，恢复时间约为95 ms。较短的响应与恢复时间表明，导电网络对外力的感知灵敏且变形恢复迅速。从图9b可以看出，复合薄膜能够准确区分不同幅值的应变输入，电阻变化幅度与施加应变之间保持良好的对应关系。在2%~30%的应变范围内，每个应变水平下的电阻响应均清晰可辨，加载和卸载过程的电阻变化曲线对称性良好，无明显的滞后现象，表明该复合薄膜具有优异的应变分辨能力和动态传感性能。该复合薄膜快速的响应特性主要得益于以下方面：(1) rGO在PVA基体中形成均匀且连续性良好的导电网络，应变引起的网络结构变化能够迅速反映为电阻信

号的改变。(2) PVA基体在小应变范围内具有良好的弹性恢复性能，使卸载后导电网络能够快速恢复至初始状态。(3)采用溶液共混-流延工艺制备的薄膜结构均匀致密，界面结合良好，减少应变传递过程中的能量耗散和时间延迟。



(a) 单次阶跃应变加载–卸载过程的电阻响应



(b) 不同应变幅值(2%、5%、10%、20%、30%)下的阶梯式响应

图 9　PVA/rGO-2.0% 复合薄膜的响应与恢复特性

Fig.9 Response and recovery characteristics of PVA/rGO-2.0% composite film

3　结论

本研究采用溶液共混-流延成膜法成功制备PVA/rGO纳米复合薄膜。FTIR分析表明，rGO表面残余的含氧基团与PVA的羟基之间形成氢键相互作用。XRD分析表明，rGO的引入能够降低PVA的结晶度。rGO的引入显著提高PVA复合薄膜的热稳定性，PVA/rGO-5.0%的$t_{5\%}$较PVA升高30 ℃。PVA/rGO-2.0%具有最佳的力学综合性能，拉伸强度达65.2 MPa，较PVA提高44%。PVA/rGO体系的导电渗滤阈值约为0.75%。PVA/rGO-2.0%展现出最优的应变传感性能，低应变区(0~10%) F_G为5.5，高应变区(10%~50%) F_G达18.0，最大可检测应变为50%。PVA/rGO-2.0%复合薄膜经500次拉伸循环后信号偏移量低于3.5%，响应时间约80 ms，恢复时间约95 ms，展现出优异的循环稳定性和快速响应特性。

参考文献

[1] 江文静, 廖静文, 张雪慧, 等. 导电复合水凝胶的分类及其在柔性可穿戴设备中的应用[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 1879-1895.

[2] 胡魁, 王映月, 王昊昱, 等. 高强度耐低温纳米纤维素/聚乙烯醇导电复合水凝胶制备及其在柔性传感中的应用[J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 1060-1070.

[3] 张姗姗, 张强, 马兴飞. 面向柔性可穿戴传感器的高韧性双网络离子导电水凝胶[J]. 高分子通报, 2024, 37(11): 1636-1644.

[4] 巫舒, 嵇俊, 苏浩源, 等. 壳聚糖导电水凝胶在功能性柔性应变传感器中的应用研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(8): 87-97.

[5] 江宇佳, 唐宁, 胡君. 高力学性能聚乙烯醇基物理交联凝胶材料研究进展[J]. 材料工程, 2026, 54(1): 103-113.

[6] 沈湘凌, 陈广杰, 李知行, 等. 纳米纤维素基湿度响应智能器件的研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2294-2307.

[7] 楼恒屹, 万军民. PVA-AgNWs@PVA水凝胶纤维制备及传感性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(6): 735-742.

[8] 潘依诺, 杨春冰, 杜赵群, 等. MXene基羊绒织物压力传感器的构筑及性能[J]. 现代纺织技术, 2025, 33(10): 115-122.

[9] GAHRAMANLI L, BELLUCCI S, et al. Fabrication of graphene oxide-reinforced polyvinyl alcohol and study effect of thermal annealing of GO/PVA nanocomposites on their properties[J]. Journal of Ovonic Research, 2024, 20(5): 715-730.

[10] 彭凯铭. 微波还原氧化石墨烯的高品质宏量均匀制备方法及电磁屏蔽性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2025.

[11] 易雯, 陈逸菲, 赵明明, 等. 导电复合纱基柔性电阻式应变传感器的研究进展[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(4): 12-23.

[12] 岳欣琰, 洪剑寒. 一维结构可穿戴柔性传感器研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(2): 27-39.

[13] 谭耀红, 刘呈坤, 谭晓峰. 纱线基智能可穿戴设备的几何结构设计研究进展[J]. 纺织导报, 2024(4): 44-49.

[14] 贺军, 郭书文, 李琳, 等. 面向智能可穿戴纺织品的聚合物基柔性传感器的研究进展[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(11): 27-33.

[15] 高雪婷, 孟庆喆, 张韶姣, 等. 氧化石墨烯补强羧基丁腈胶乳复合胶膜的结构与性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(4): 273-278.

[16] 韩利硕, 罗森, 吴少微, 等. 基于聚二甲基硅氧烷柔性传感器的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(8): 182-190.

[17] 楼晨霞. GO/CMC-Na协同增强PVA/PVP水凝胶的制备及其在柔性应变传感中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.

[18] 李维浩, 刘杰, 孙治斌, 等. GO/CNC/PVA复合水凝胶制备与性能[J]. 纺织高校基础科学学报, 2022, 35(4): 45-51.

[19] 赵为陶, 姚雪烽, 严艺, 等. rGO/AgNPs/改性PVA柔性应变传感薄膜的制备及其性能[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(4): 80-88.

[20] 杨学伦, 岳瑞恒, 黄财洋, 等. 氧化石墨烯改性聚乙烯醇缩丁醛透明高分子薄膜研究[J]. 高分子通报, 2024, 37(12): 1801-1813.

[21] 吴振兴, 罗检民, 贺华, 等. 关于提高电阻应变式称重传感器综合性能的探讨[J]. 衡器, 2024, 53(8): 13-16.

[22] 胡海龙, 马亚伦, 张帆, 等. 柔性纳米复合材料压阻式应变传感器的研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 1-22.

[23] 孟金华, 李沂蒙, 魏乐倩, 等. 双重导电网络柔性应变/温度传感器的制备及健康监测应用[J]. 高分子学报, 2024, 55(9): 1165-1178.

[24] 陈蕤, 常晓华, 韩媛媛, 等. 水凝胶基柔性应变传感材料设计及研究进展[J]. 高分子通报, 2025, 38(8): 1193-1208.

[25] 胡煦煦, 魏子健, 谢兆新, 等. 兼具应变传感和电磁屏蔽双功能的柔性水凝胶基聚合物的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6554-6571.

[26] 王俣琦, 常晓华, 陈建闻, 等. 水凝胶基柔性电磁屏蔽材料研究进展[J]. 高分子学报, 2026, 57(3): 636-653.

[27] SELVIN J G C, SURESH BABU S K, SREE V H, et al. PVA/rGO composites for advanced electronic devices: A comprehensive analysis of structural, electrical, and mechanical properties and concentrations [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2025, 36 (17): 1060.

[28] SUN C, LI P, HUANG H G, et al. Plasticization stretching strategy towards high strength nacre-like graphene-based composites[J]. Composites Communications, 2021, 27: 100815.

[29] HUANG J W, XU Z X, ZHANG J, et al. Recent advances in porous polymer-based flexible piezoresistive pressure sensors[J]. Polymers, 2025, 17(19): 2584.