http://pmse.scu.edu.cn

柔性抗冻导电凝胶的构筑

徐艺倩，卢麒麟

（闽江学院 福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室，福建 福州 350108）

摘要：为解决传统水凝胶材料在低温时发生冻结，导致其部分力学功能丧失的问题，文中利用甘油体系纳米纤维素（CNC）与α-硫辛酸之间的氢键，再以$FeCl_3$为交联剂，进一步诱导硫辛酸聚合形成凝胶网络，构筑了柔性抗冻导电凝胶CNC/α-硫辛酸凝胶。该凝胶具有优异的力学性能、导电性能及灵敏的应变传感性能。CNC/α-硫辛酸凝胶的拉伸性能和抗冻测试表明，甘油体系纳米纤维素含量为1.5 g时，凝胶的拉伸断裂应力达到16 kPa，断裂伸长率为805.5%，且在－40 ℃的低温条件下电导率仍能维持在0.029 S/m，抗冻导电性能良好。应变传感性能测试表明，凝胶具有灵敏的应变传感能力，在应变150%~200%时，凝胶的灵敏度系数（*GF*）值达到2.36，能够进行人体运动监测，表明CNC/α-硫辛酸凝胶可作为柔性应变传感器用于智能可穿戴设备。

关键词：纳米复合凝胶；柔性抗冻导电；应变传感；纳米纤维素；α-硫辛酸

中图分类号：TP212 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）06-0144-08

水凝胶在组织工程、柔性可拉伸传感器、生物医学材料等领域都发挥了重要的作用[1,2]。纳米纤维素）（CNC）作为一种纳米级天然聚合物，具有可降解、高结晶度、机械强力性能好、高比表面积等特性[3]，可以作为制备水凝胶的优良材料。近年来，基于纳米纤维素制备水凝胶的研究方法备受关注，目前主要有物理交联与化学交联2种方法[4]。例如，可以在细菌纳米纤维素上接枝聚合物，并通过电子束辐照的方法成功合成复合水凝胶[5]，将该复合水凝胶用于伤口敷料，具有持久性和易去除性。为了克服传统化学交联所引起的凝胶脆性大、力学性能差等缺点，许多研究者通过改善水凝胶结构不均匀性或者引入能量耗散机制来使凝胶力学性能得到提升，如纳米纤维复合凝胶等[6]。基于纳米纤维素制备的水凝胶即是一类优异的仿生材料，拥有水凝胶高强力、软弹等类组织功能特性，以及纤维高长径比、各向异性等结构优势[7]，将其进一步改性及机械处理，可实现良好的导电性、韧性、延展性、生物相容性等特点，其卓越的材料特性使其成为可穿戴柔性传感器最有前景的基体材料，可拓宽凝胶的发展与应用前景。

为了使水凝胶在低温的环境条件下仍然能保持良好的力学性及导电性能，并拓宽其在可穿戴传感器领域的应用，提高凝胶的抗冻性是关键。解决凝胶抗冻问题最常见的方法是在体系中引入醇类等有机溶剂[8]，这些有机溶剂与水发生强烈的氢键作用，使得水分子之间的氢键作用减弱，抑制了冰晶的形成与成核增大[9]。例如甘油中的小分子邻位醇所含的羟基，可与水分子之间以氢键结合，从而降低水的凝固点，使得凝胶的抗冻能力、力学性能等得到提升，为人体运动检测、智能设备的使用提供了新的设计思路。

本文旨在用绿色环保、力学性能好、比表面积大、可降解的纳米纤维素为原材料，使其与α-硫辛酸

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0118
收稿日期：2023-08-16
基金项目：福建省科技创新重点项目（高校类）（2021G02011）；福建省自然科学基金面上项目（2021J011034）；福州市科技重大“揭榜挂帅”项目（2023-ZD-007）；国家自然科学基金资助项目（32301529）；闽江学院引进人才项目（MJY18010）
通讯联系人：卢麒麟，主要从事生物质纤维功能材料研究，E-mail: qilinlu@mju.edu.cn

发生氢键结合,可有效消除α-硫辛酸开环聚合过程中产生的自由基,防止其发生闭环解聚,再以$FeCl_3$为交联剂,进一步诱导α-硫辛酸聚合形成凝胶网络,制备出一种具有柔性抗冻导电性能的纳米复合凝胶,同时探究该凝胶在不同温度条件下的导电能力、传感性能的变化及其作为应变传感器在可穿戴传感领域的功能化应用。将凝胶组装成柔性应变传感器,利用电信号的传输与转化对身体各个部位(手指、手肘、膝盖、行走)进行连续、实时的监测,测试该凝胶作为应变传感器的稳定性与灵敏性。

1　实验部分

1.1　主要原料

α-硫辛酸:分析纯,上海泰坦科技有限公司;竹纤维:α-纤维素含量≥95%,福建省南纸股份有限公司;甘油、乙醇、氯化铁:分析纯,国药集团化学试剂科技有限公司。

1.2　柔性抗冻导电凝胶的构筑

将竹纤维加入含有硫酸的甘油中,置于胶体磨中进行研磨,制得分散于甘油体系中的纳米纤维素,即为甘油体系纳米纤维素。取1.5 g甘油体系纳米纤维素溶于7.5 mL乙醇与15 mL的甘油混合溶液中,并将其置于磁力搅拌器中充分搅拌使其分散均匀,待溶液呈现透明后,向其中加入4.5 g α-硫辛酸固体,加大转速搅拌至固体溶解,得到均匀的纳米纤维素/α-硫辛酸混合液。

取$FeCl_3$溶于无水乙醇中,配置成1 mol/L的$FeCl_3$乙醇溶液,取$FeCl_3$乙醇溶液15 mL,将其加入到纳米纤维素/α-硫辛酸混合液中,室温置于磁力搅拌器中进行交联反应,反应结束后超声消泡,分别倒入培养皿与培养板中成型,制得柔性抗冻导电凝胶CNC/α-硫辛酸凝胶。作为对照,由甘油体系纳米纤维素(0 g,0.5 g,1 g和2 g)与α-硫辛酸形成的凝胶也按照上述方法制备。

1.3　测试与表征

1.3.1　*化学结构分析*:用傅里叶变换红外光谱(FT-IR,奥豪斯仪器(常州)有限公司iS50型)来表征样品的化学结构。扫描范围为400~4000 cm^{-1},扫描次数为32次。

1.3.2　*表面形貌分析*:将样品先进行冷冻干燥、制样。再将样品黏附在导电胶带上并进行喷金处理,最后使用扫描电子显微镜(SEM,TM4000Plus型,日本日立公司)在加速电压15 kV下观察样品的形貌。

1.3.3　*力学性能测试*:使用万能材料拉伸机(广东越联公司Instron 5967型)测试CNC/α-硫辛酸凝胶的力学性能。进行拉伸测试时,将CNC/α-硫辛酸凝胶样品裁切成哑铃型,使用20 kg的力学传感器,以20 mm/min的速度进行拉伸,并在拉伸参数100%的条件下进行拉伸测试。

1.3.4　*电导率测定*:使用数字电桥(常州同惠电子股份有限公司TH2830型)对CNC/α-硫辛酸凝胶进行导电性能测试。将凝胶样品裁切成一定规格的长方形,将样品置于导电铜片上,调整铜片与水凝胶之间的距离,使两者的表面相切,用数字电桥装置配套的电极夹夹住铜片,形成导电通路,在数字电桥上读出电阻阻值,分析CNC/α-硫辛酸凝胶的电导率。用式(1)计算电导率(σ,单位S/m)

$$\sigma = \frac{L}{RS} \tag{1}$$

式中:R——电阻,kΩ;L——长度,m;S——横截面积,m^2。

1.3.5　*电化学性能分析*:使用AUTOLAB PGSTAT302N型电化学工作站对CNC/α-硫辛酸凝胶进行电化学性能分析,先将样品倒入90 mL的培养皿中,经72 h后成型。再将样品薄膜裁成4 cm×2 cm的长方形,用与电化学工作站配套的电极夹住CNC/α-硫辛酸凝胶,注意在进行测试时不要移动电极夹与凝胶,以免造成试验误差。选择交流阻抗测试方法和循环伏安测试方法对凝胶进行测试,分析CNC/α-硫辛酸凝胶的电化学性能。

1.3.6　*抗冻性能分析*:将形状大小一样的样品分别放在0 ℃、常温、－20 ℃和－40 ℃的温度中冷冻7 h,将冷冻后的样品立即置于数字电桥进行电阻测试,记录凝胶的电阻。其次,将冷冻后的样品与小灯泡连接成闭合回路,根据小灯泡的亮度变化、样品的外观形态以及其在弯曲、扭转变形下的力学形态来观察冷冻后样品的抗冻性。用式(1)计算电导率。

1.3.7　*应变传感性能分析*:使用导线连接该凝胶(45 mm×22 mm×3.83 mm)的两端,将其组装成柔性应变传感器,使用数字电桥装置记录该CNC/α-硫辛酸凝

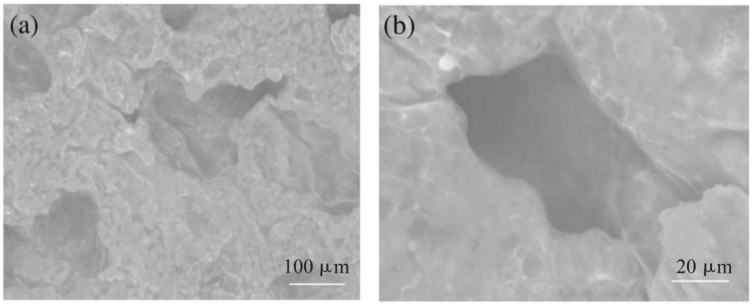


Fig. 1 SEM images of CNC/α-lipoic acid gel at different multiples

胶传感器的实时电阻信号，监测其在手指，手腕、肘关节、膝盖和脚踝各个部位关节的运动情况来测试其应变传感性能。应变灵敏度是应变传感器的核心性能指标之一，可以定义为灵敏度因子（*GF*），如式(3)和式(4)；按照式(2)计算CNC/α-硫辛酸凝胶相对电阻（δ，单位%）

$$\delta = \frac{R-R_0}{R_0} \tag{2}$$

式中：R和R_0——分别为测试过程中凝胶样品的实时电阻和原始电阻，Ω。

$$\varepsilon = \frac{L_t-L_0}{L_0} \tag{3}$$

$$GF = \frac{\delta}{\varepsilon} \tag{4}$$

式中：ε——有机凝胶的伸长率，%；L_t和L_0——分别是有机凝胶的实时长度和原始长度，m。

2 结果与讨论

2.1 形貌与化学结构分析

2.1.1 *形貌观察*：首先对制备所得的CNC/α-硫辛酸凝胶进行冷冻干燥预处理，以免样品表面析出的液体对仪器造成损害，再通过SEM研究该凝胶在不同放大倍数下的内部形貌和微观结构。Fig.1为该CNC/α-硫辛酸凝胶的形态结构。可以看出，在该凝胶中分布着许多不规则的三维网络孔洞结构，而这种结构可以为离子的迁移提供更多的通道[10]，大大提升了离子的传输效率，从而使凝胶具有优异的导电性能。

2.1.2 *化学结构分析*：通过傅里叶变换红外光谱仪对CNC/α-硫辛酸凝胶的分子结构作进一步分析，如Fig.2所示，该凝胶在3310~3380 cm^{-1}处有峰值，归因于O—H键的伸缩振动吸收峰[11]，2920 cm^{-1}与1790 cm^{-1}处的特征峰分别与C—H和C=O的伸缩振动吸收峰相对应[12,13]，1180 cm^{-1}处是C—O伸缩振动吸收峰[14]，可能是由于凝胶体系中甘油的存在所致。

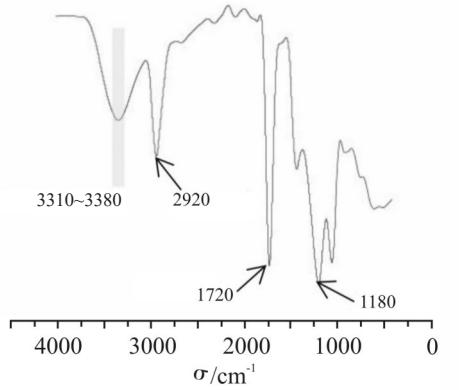


Fig. 2 Infrared spectrum of CNC/α-lipoic acid gel

2.2 力学性能分析

为了探究不同甘油体系纳米纤维素质量对CNC/α-硫辛酸凝胶力学性能的影响，制备了不同甘油体系纳米纤维素含量的凝胶并对其力学性能进行测试。如Fig.3(a)所示，CNC/α-硫辛酸凝胶具有良好的拉伸性能。CNC/α-硫辛酸凝胶的应力由于甘油体系纳米纤维素的加入而呈现出上升的趋势，当甘油体系纳米纤维素的质量为1.5 g，水凝胶的最高断裂应力达16 kPa，断裂伸长率可达805.5%，当再增加纤维的含量（2 g）时，断裂应力下降，断裂伸长率≥1750%，纤维的加入大大提高了其断裂强力与韧性[15]，这表明甘油体系纳米纤维素对于该复合凝胶力学性能的提高起到了重要作用。

2.3 导电性能分析

2.3.1 *电导率分析*：该CNC/α-硫辛酸凝胶具有稳定的导电性，如Fig.4所示，随着甘油体系纳米纤维素量的增加，其电导率呈现出先下降后上升的趋势，原因可能是少量的纤维素未能将全部的α-硫辛酸反

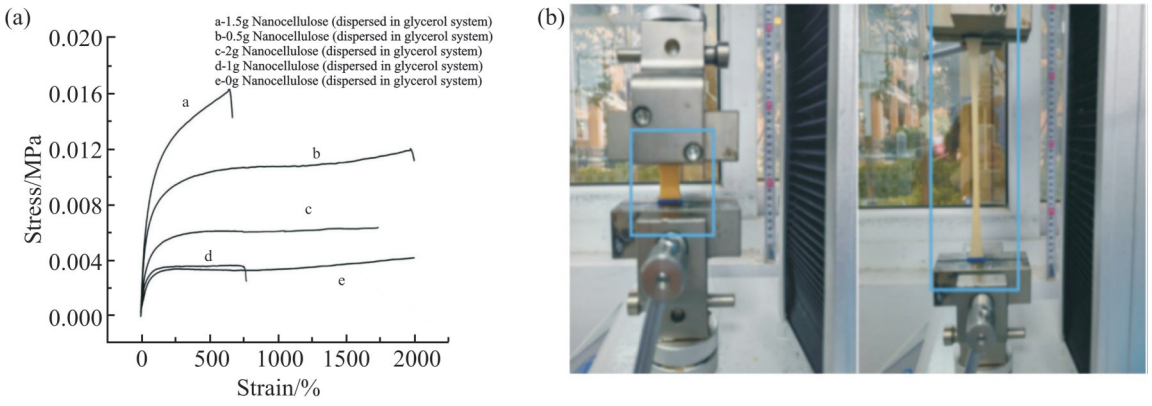


Fig. 3 (a) Stress-strain curves of CNC/ α-lipoic acid gel with different cellulose content; (b) changes of CNC α-lipoic acid gel before and after pulling up

应,从而使体系中残留少量α-硫辛酸,影响了离子的传输通道,随着更多的甘油体系纳米纤维素引入凝胶体系,分层的多孔结构增加,这种层状的多孔结构提供了更大的表面积来提高离子导电;其次,甘油体系纳米纤维素表面的羧基能吸收大量的离子,为离子转移提供了更多的过渡位点[9];又由于Fe^{3+}的加入增加了导电离子,从而使导电性能获得提升[16]。

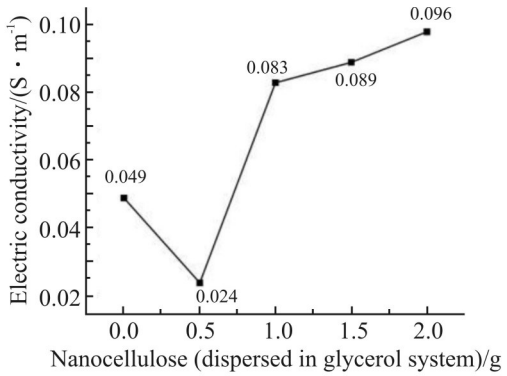


Fig. 4 Conductivity of CNC/α-lipoic acid gel

2.3.2 电化学性能:为了表明该CNC/α-硫辛酸凝胶的电化学性能,对该水凝胶进行交流阻抗测试和循环伏安测试。交流阻抗图进一步验证了该柔性抗冻导电凝胶的电导率,如Fig.5(a),一方面,由于该水凝胶具有疏松多孔的结构,给离子的传输提供了更多的通道,另一方面,Fe^{3+}的引入,及其在水凝胶中分散均匀,提供了更多的导电离子形成导电通路,提高了水凝胶的导电性。Fig.5(b)是在室温,-1~1 V扫描5圈的循环伏安曲线图。可以看出,循环伏安曲线中没有出现明显的氧化还原峰,曲线几乎重叠一致,这表明该CNC/α-硫辛酸凝胶在空气中不易被氧化还原,电化学性能稳定[17]。

2.4 抗冻性能

水凝胶在极限温度,特别是在0 ℃以下,其力学性能与导电性质都会受到很大的影响[18]。将制备的CNC/α-硫辛酸凝胶放置在不同的温度下冷冻7 h,测

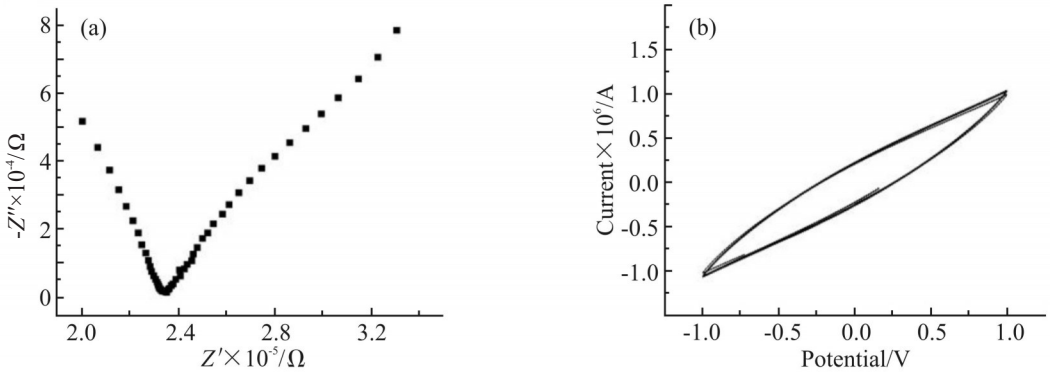


Fig. 5 Electrochemical performance of CNC/α-lipoic acid gel
(a): AC impedance diagram; (b): cyclic voltammetry diagram

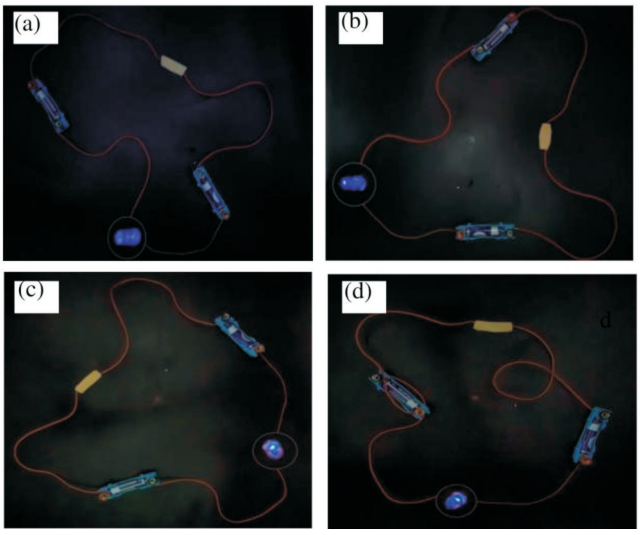


Fig. 6 (a) Brightness of the flexible gel as conductor at normal temperature; (b) brightness of the flexible gel as conductor at 0 ℃; (c) brightness of the flexible gel as conductor at -20 ℃; (d) brightness of the flexible gel as conductor at -40 ℃

Tab. 1 Conductivity of CNC/*α*-lipoic acid gel at different temperatures

CNC/*α*-lipoic acid gel	25 ℃	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃
Resistance/kΩ	1.07	1.31	2.11	2.81
Electric conductivity/(S·m^{-1})	0.080	0.062	0.039	0.029

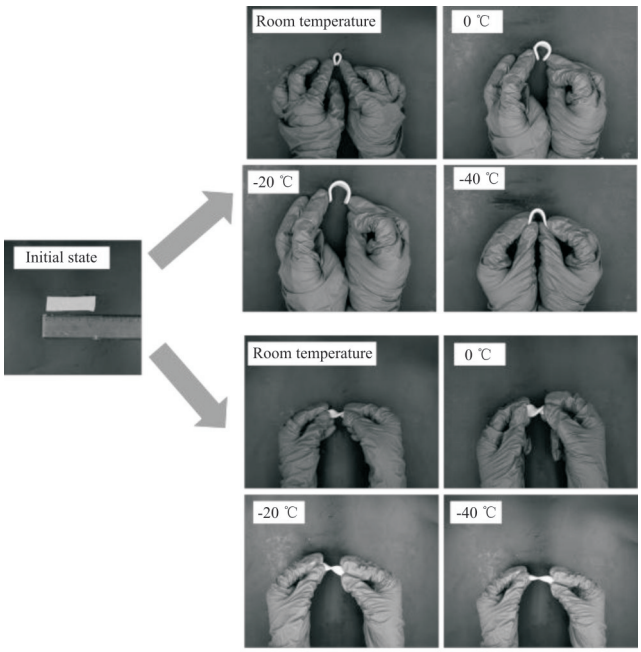


Fig. 7 Bending and torsion of CNC/*α*-lipoic acid gel at different temperatures

得其在不同温度下的电阻，如Tab.1所示，设计一个串联电路，将所制备的CNC/*α*-硫辛酸凝胶通过导线与电灯泡连接，通过小灯泡的发光情况进一步证明该有机凝胶的离子导电性能。

从Tab.1中可以看出，随着温度的下降，凝胶的电导率虽然呈现出下降的趋势，但是在－40 ℃的低温下，其电导率也可达到0.029 S/m。从Fig.6可以看出，当电路被接通时，小灯泡被点亮，在经过7 h的冷

冻后,灯泡亮度略微变暗。原因是该凝胶体系中甘油的存在,赋予了其良好的抗冻性能,即使在低温的条件下,也能够实现离子的传导。通过SEM已知水凝胶具有三维网络孔洞结构,这种多孔结构可提供更多的比表面积来增强离子导电性能[9],这种结构也使得导电水凝胶能提供给Fe^{3+}更多的长程且有序的通道,易于Fe^{3+}的有效扩散和迁移,使凝胶的导电性能在一定的范围内保持稳定。

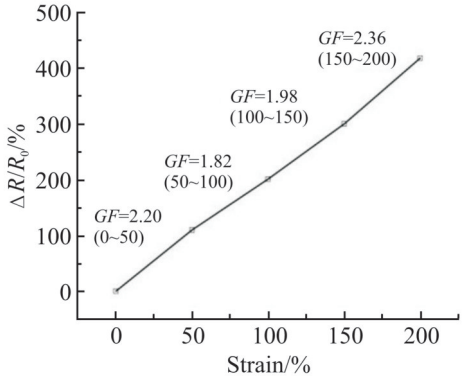


Fig. 8 Relative resistance of CNC/α-lipoic acid gel during stretching process

此外,该有机凝胶在－20 ℃和－40 ℃的低温条件下仍保持其良好的柔韧性,可弯曲、扭转。如Fig.7所示。这种优异的柔韧性一方面归因于甘油体系纳米纤维素与α-硫辛酸发生氢键结合,加上凝胶的交联网络结构与导电Fe^{3+},使其凝固点降低,力学性能维持相对稳定[19],另一方面,甘油中的小分子邻位醇是优异的耐低温有机溶剂[20],通过将这些有机溶剂引入到凝胶中形成复合型共溶剂体系,可以大大提升其抗冻性与柔韧性。

2.5　应变传感性能

CNC/α-硫辛酸凝胶具有优异的力学性能和良好的灵敏度,如Fig.8所示,CNC/α-硫辛酸凝胶的应变与相对电阻之间存在一定的关系,当处于0~50%的较小应变时,*GF*=2.20,当应变为150%~200%时,*GF*达到2.36,且在不同程度的拉伸变形下其灵敏度*GF*呈现出很高的稳定性,表明该凝胶在柔性可穿戴领域具有很大的潜在应用价值。

将基于CNC/α-硫辛酸凝胶制备的应变传感器黏附在人体肘肌处,随着肌肉的收缩-舒展产生应变,其电阻发生相应的改变,从而达到对人体运动的实时监测。Fig.9(a)为手指在不同弯曲角度(30°,90°

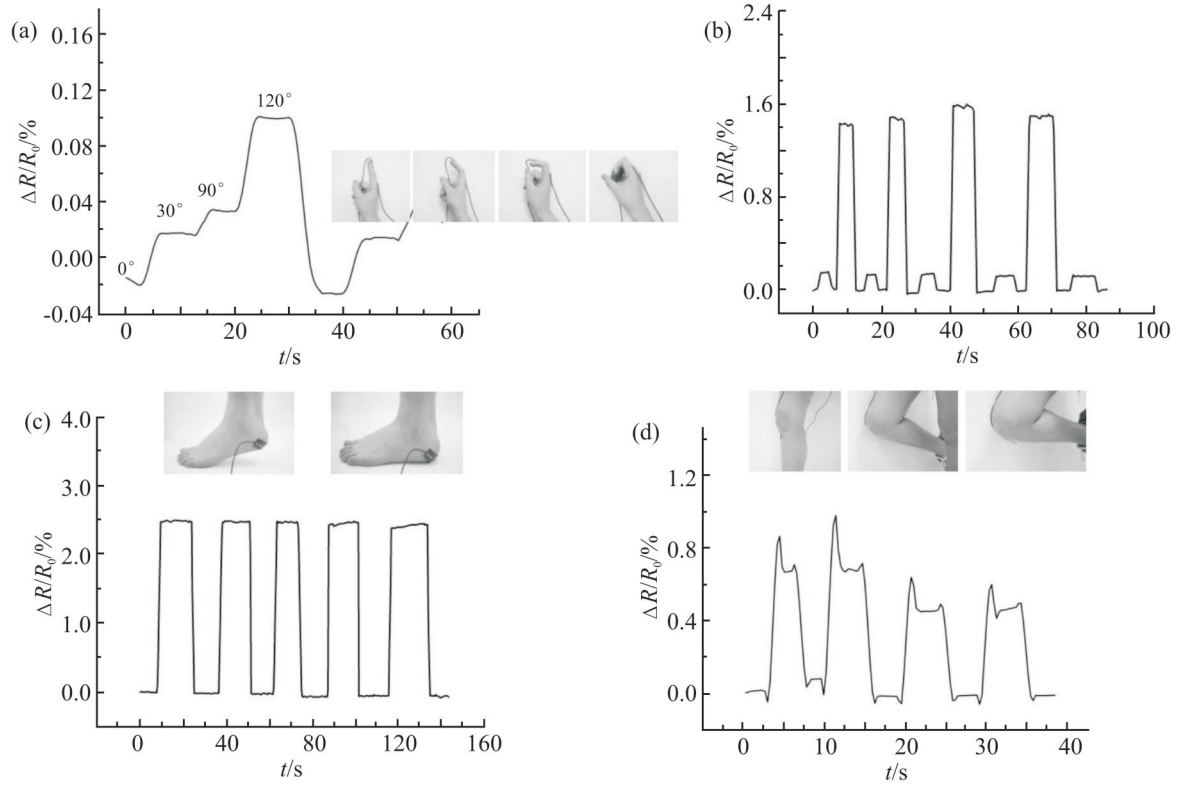


Fig. 9 CNC/α-lipoic acid gel used as wearable strain sensor to monitor various human movements in real time: (a) finger bending; (b) elbow bending; (c) walking; (d) knee bending

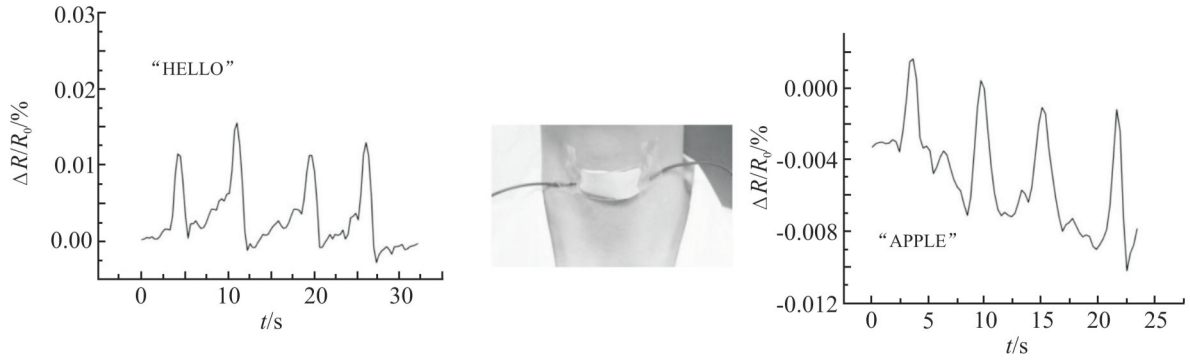


Fig. 10 CNC/ *α*-lipoic acid gel as wearable strain sensor for monitoring human throat vocalizations

和120°)时的相对电阻变化图,由图可知,当手指以30°,90°和120°的角度进行弯曲时,相对电阻逐渐上升,当手指保持一定角度时,应变传感器的$\Delta R/R_0$也保持在一定的数值范围,这表明,基于CNC/*α*-硫辛酸凝胶制备的传感器具有很高的稳定性,同样,在手腕的运动上也表现出相同的特性。随着各个部位的运动,水凝胶应变传感器的相对电阻变化响应曲线可以同时变化到相应的位置,在各个部位保持在不同角度时,相对电阻变化也相应地保持不变,如手肘在从90°弯曲到120°时(Fig.9(b)),相对电阻从约15%增加到了大致140%。当各个部位逐渐运动到初始状态时,水凝胶应变传感器的相对电阻变化也能立即回到原始状态,并且从图中可以看出,在进行重复的动作时,该水凝胶的相对电阻的变化具有周期性且可重复,具有高度一致性,这表明该水凝胶柔性应变传感器具有稳定的电信号输出性能和较高的灵敏度。

此外,CNC/*α*-硫辛酸凝胶应变传感器还能够监测微小的人体活动,如Fig.10,通过将水凝胶应变传感器连接到喉咙上,由不同单词(APPLE和HELLO)发出的不同的音调,同样可以进行快速精准的应变传感,出现重复稳定的电信号。因此,这类柔性抗冻导电凝胶在用于可穿戴传感器领域具有很大的应用前景与潜力。

3 结论

以甘油体系的纳米纤维素为基质、*α*-硫辛酸为构筑单元、氯化铁为交联剂和离子导体,通过自由基聚合制备了CNC/*α*-硫辛酸柔性抗冻导电凝胶。凝胶的拉伸断裂应力达到16 kPa,断裂伸长率达805.5%。凝胶在－40 ℃的低温条件下仍保持其良好的导电性与柔韧性,电导率仍可达到0.029 S/m,抗冻性能良好。该凝胶作为柔性应变传感器具有优异、稳定的灵敏性(在应变150%~200%下,*GF*=2.36),对于人体手指、手腕、手肘、膝盖、行走和喉结的运动变化能够进行稳定、灵敏的监测。

参考文献:

[1] Manuel G, Alberto P, Rui M A D, *et al*. Natural-based hydrogels for tissue engineering applications[J]. Molecules, 2020, 25: 5858.

[2] Huang S H, Hong X Q, Zhao M Y, *et al.* Nanocomposite hydrogels for biomedical applications[J]. Bioengineering & Translational Medicine, 2022, 7: e10315-e10315.

[3] 金志文, 车玉菊. 纤维素纳米晶须及其水凝胶的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(2): 183-190.
Jin Z W, Che Y J. Research progress of cellulose nanocrystals and their hydrogels[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(2): 183-190.

[4] 丁梓译, 金浩天, 马晓帆, 等. 纳米纤维素基水凝胶的制备策略及其在传感应用进展[J]. 化学试剂, 2023, 40(11): 1-9.
Ding Z Y, Jin H T, Ma X F, *et al.* Preparation strategy of nanocellulose based hydrogels and its application in sensing[J]. Chemical Reagents, 2023, 40(11): 1-9.

[5] Xiangyi C, Ran H L, Yi X L, *et al*. Fabrication and evaluation of bacterial nanocellulose/poly(acrylic acid)/graphene oxide composite hydrogel: characterizations and biocompatibility studies for wound dressing[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B, Applied Biomaterials, 2019, 107: 2140-2151.

[6] Huang X X, Li J C, Luo J, *et al.* Research progress on double-network hydrogels[J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102757.

[7] 陈涛. 纳米复合水凝胶纤维的仿生构筑及其传感性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
Chen T. Study on bionic construction and sensing properties of nanocomposite hydrogel fibers[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.

[8] Sun H, Zhu J, Baumann D, *et al.* Hierarchical 3D electrodes for electrochemical energy storage[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 4: 45-60.

[9] Wang H Q, Li Z, Zuo M, *et al.* Stretchable, freezing- tolerant conductive hydrogel for wearable electronics reinforced by cellulose nanocrystals toward multiple hydrogen bonding[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 280: 119018.

[10] Huang Y P, Lai F L, Zhang L S, *et al.* Elastic carbon aerogels reconstructed from electrospun nanofibers and graphene as three-dimensional networked matrix for efficient energy storage/conversion[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31541.

[11] Wu Z, Zhang P, Zhang H, *et al.* Tough porous nanocomposite hydrogel for water treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126754.

[12] Chen K, Zhang S, Li A, *et al*. Bioinspired interfacial chelating-like reinforcement strategy toward mechanically enhanced lamellar materials[J]. ACS Nano, 2018, 12: 4269-4279.

[13] Rambabu N, Panthapulakkal S, Sain M, *et al*. Production of nanocellulose fibers from pinecone biomass: evaluation and optimization of chemical and mechanical treatment conditions on mechanical properties of nanocellulose films[J]. Industrial Crops and Products, 201, 83: 746-754.

[14] 许浩, 魏延, 徐双梦, 等. 基于壳聚糖/β-甘油磷酸钠(CS/β-GP)温敏型水凝胶的细胞表面壳化及对癌细胞行为的影响研究[J]. 功能材料, 2021, 52(5): 5121-5126.
Xu H, Wei Y, Xu S M, *et al.* Effect of temperature sensitive hydrogel based on chitosan/sodium β- glycerophosphate (CS/β-GP) on cell surface chitylation and behavior of cancer cells[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(05): 5121-5126.

[15] Wei D, Liu Q, Liu Z, *et al.* Modified nano microfibrillated cellulose/carboxymethyl chitosan composite hydrogel with giant network structure and quick gelation formability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 561-568.

[16] Wang S, Lei J, Yi X, *et al.* Fabrication of polypyrrole- grafted gelatin- based hydrogel with conductive, self- healing, and injectable properties[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2: 3016-3023.

[17] 宫悦. PDA@CNTs导电水凝胶的制备及其在柔性应变传感器中的应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
Gong Y. Preparation of PDA@CNTs hydrogel and its application in flexible strain sensor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

[18] Zheng H J, Huang Q Q, Lu M J, *et al.* Anti- freezing nanocomposite organohydrogels with high strength and toughness[J]. Polymers, 2022, 14: 3721-3721.

[19] Chao N, Hui J Z, Biao Y, *et al.* A tough anti- freezing and conductive nanocomposite interpenetrated organohydrogel mediated by hydrogen bonding[J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45: 14392-14400.

[20] 王思恒, 杨欣欣, 黄旭娟, 等. 抗冻水凝胶的制备及其在柔性电子领域的应用[J]. 精细化工, 2021, 38(6): 1081-1091.
Wang S H, Yang X X, Huang X J, *et al*. Preparation of antifreeze hydrogels and their application in flexible electronics[J]. Fine Chemicals, 2021, 38(6): 1081-1091.

Construction of Flexible Antifreeze Conductive Gel

Yiqian Xu，Qilin Lu

(*Fujian Key Laboratory of Novel Functional Textile Fibers and Materials, Minjiang University, Fuzhou 350108, China*)

ABSTRACT: In order to solve the problem that traditional hydrogel materials freeze at low temperature, which leads to the loss of mechanical functions, this study made glycerol system nanocellulose and α- lipoic acid hydrogen bond, and then used $FeCl_3$ as crosslinking agent to further induce the polymerization of lipoic acid to form a gel network, and constructed a flexible antifreeze conductive gel (CNC/α- lipoic acid gel). The gel has excellent mechanical properties, electrical conductivity and sensitive strain sensing properties. The tensile and antifreeze results of CNC/ α-alpha-sulfuric acid gel show that when the content of nanocellulose in glycerol system is 1.5 g, the tensile fracture stress of the gel reaches 16 kPa, the elongation at break is 805.5%, and the conductivity remains at 0.029 S/m at the low temperature of -40 ℃, indicating good antifreeze conductivity. The strain sensing performance shows that the gel has a sensitive strain sensing ability. When the strain is 150% ~200% , the sensitivity coefficient (*GF*) of the gel reaches 2.36, which can be used for human movement monitoring, indicating that CNC/α-lipoic acid gel can be used as flexible strain sensor for smart wearable devices.

Keywords: nanocomposite gel; flexible antifreeze conduction; strain sensing; nano-cellulose; *α* lipoic acid