http://pmse.scu.edu.cn

植酸诱导壳聚糖抗冻导电水凝胶传感器的构建

陈开留，魏 蕊，靳晓雅，陈俊为，王汉琛，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：水凝胶出色的可拉伸性、柔韧性和生物相容性，使其成为可穿戴柔性传感器的理想之选。但水凝胶传感器在低温环境容易发生冻结，造成导电性能和力学性能受损，阻碍了其实际应用的推广。文中将植酸引入壳聚糖制备了具有优异力学性能、导电性、抗冻性和应变传感性能的壳聚糖/聚乙烯亚胺/植酸（CS/PEI/PA，CPP）双网络交联水凝胶。对其形貌、结构组成、力学性能、导电性能、抗冻性能及传感性能进行了分析。结果表明，加入4 mL植酸时，CPP4水凝胶的拉伸断裂应力为0.362 MPa，断裂伸长率为210.2%。在室温条件下其电导率达到5.58 S/m，在－20 ℃下其电导率仍有4.34 S/m，表明其导电性能和抗冻性能良好。同时，该水凝胶作为柔性应变传感器具有优异的灵敏性，可根据人体不同运动给出不同且重复的电信号，表明CPP4水凝胶可用于实时监测人体运动，在柔性可穿戴传感器方面具有良好的应用前景。

关键词：植酸；壳聚糖水凝胶；导电；抗冻；传感
中图分类号：TQ427.2+6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）06-0088-08

近年来，基于人机交互、电子皮肤及摩擦电纳米发电机（TENG）等柔性电子领域的潜在应用前景，人们致力于开发具有多种性能（如可拉伸性、耐久性和刺激响应性）的新型材料[1~3]。其中，水凝胶因其应变响应能力、优异力学性能和可调导电性等综合特性而备受关注。通过将弹性水凝胶基质（例如聚丙烯酰胺）与导电填料（如金属纳米线、碳基材料和导电聚合物）相结合，已构建了多种具有三维交联网络结构的导电水凝胶[4~6]。然而，含有大量合成聚合物的水凝胶与生物组织的相容性较差，会导致人体皮肤出现瘙痒、刺痛或刺激。此外，合成聚合物的滥用不仅会导致石油储备迅速减少，还会引发严重的生态问题[7, 8]。

生物高分子，包括明胶、纤维素、木质素和壳聚糖，具有良好的生物相容性和生态友好性，将其作为天然水凝胶底物，有望减轻对环境和人类的危害[9~12]。其中，壳聚糖作为自然中大量存在的碱性多糖，因其可调控性和抗菌性而备受人们的关注。Zhang等开发了聚乙烯亚胺/聚丙烯酸/壳聚糖（PEI/PAA/CS）多功能水凝胶，PEI/PAA/CS优良的生物相容性使其可应用于止血和组织修复[13]。Sikorski等[14]发现盐酸和乙酸可进一步提升壳聚糖的抗菌活性。

迄今为止，生物高分子水凝胶在柔性电子领域的应用已经得到了深入研究。然而，大多数研究集中在改善材料的力学性能和功能，很少关注克服水凝胶在极端温度条件下的缺点。例如，传统的导电水凝胶在0 ℃以下会冻结，失去弹性和导电性，这限制了它们在低温的使用[15]。向导电水凝胶中引入抗冻填料，如金属离子或有机溶剂等，是赋予水凝胶低温工作潜力的主要方法，但金属离子在低温状态下会受离子迁移速率影响，导电性较差，而大多数有机溶剂的易燃性和固有毒性阻碍了其在水凝胶中的应

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0110
收稿日期：2024-06-20
基金项目：福建省发树慈善基金会资助研究专项(MFK24001)；国家自然科学基金资助项目（32301529）；福州市科技重大揭榜挂帅项目（2023-ZD-007）；闽江学院引进人才项目（MJY18010）
通讯联系人：卢麒麟，主要从事功能纤维低碳材料研究，E-mail: qilinlu@mju.edu.cn

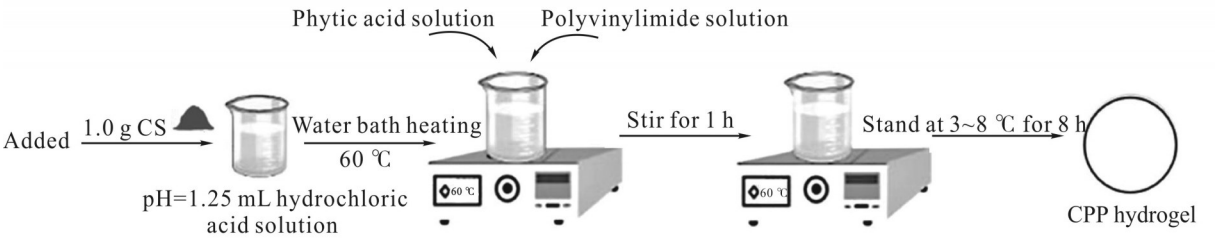


Fig. 1 Preparation process of CPP hydrogels

用[16, 17]。因此,亟需开发一种低温导电性强、生物相容性好的柔性传感水凝胶以满足柔性电子器件的低温工作环境。

本文制定了一种环保且通用的策略,通过溶胶-凝胶法制备了具有抗冻性、高导电性和超灵敏性的壳聚糖/聚乙烯亚胺/植酸(CS/PEI/PA,CPP)双网络交联水凝胶。从天然植物中提取的富磷酸基的植物化学物质植酸(PA),除了作为CPP的交联剂外,还可作为水凝胶的生物基抗冻填料,当它溶解在水中时,会产生丰富的游离氢离子(H^+),可以与CS链上的氨基形成氢键和静电相互作用,从而阻止水凝胶中水的结晶和蒸发。因此,CPP水凝胶展现出了优异的传感性能,如高灵敏度(*GF*=2.61)、良好的抗冻性和高导电性(5.58 S/m)。这些独特的传感特性使水凝胶适用于实时监测人体细微表情和大幅肢体运动。

1　实验部分

1.1　主要原料

壳聚糖(脱乙酰度≥85%,黏度<200 mPa·s)、植酸溶液(50% in H_2O)、聚乙烯亚胺溶液(相对分子质量7×10^4,50%的水溶液):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水乙醇、盐酸(分析纯):国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均直接使用,未进行进一步纯化。所有实验均使用去离子水。

1.2　CPP水凝胶的制备

通过溶胶-凝胶法制备了具有高导电性和超灵敏性的CPP水凝胶。将1 g壳聚糖粉末溶解于25 mL,pH=1的盐酸溶液中,在60 ℃水浴条件下将一定量的植酸溶液加入其中,随后加入2 mL质量分数为20%的聚乙烯亚胺溶液并搅拌1 h,然后将混合溶液旋涂于玻璃板上,控制其厚度为2 mm,在3~8 ℃下静置8 h,制得CPP水凝胶。其中,植酸溶液的加入量分别为0 mL,2 mL,4 mL和6 mL,制备的水凝胶分别标记为CP,CPP2,CPP4和CPP6。

1.3　水凝胶材料的表征

所有用于CPP水凝胶表征的材料均通过真空冷冻干燥获得。CPP水凝胶的形态通过扫描电子显微镜(FE-SEM,MERLIN Compact,德国)进行表征。CPP水凝胶及其组分的傅里叶变换红外(FT-IR)光谱是在400~4000 cm^{-1}范围内,采用IS50光谱仪(Thermo Fisher Scientific,美国)在衰减全反射(ATR)模式下测量。壳聚糖和CPP水凝胶的拉曼光谱是在室温,使用共焦拉曼光谱仪(HORIBA LabRAM HR Evolution)在0~4000 cm^{-1}范围内记录的。X射线衍射(XRD, Nicolet Nexus870,美国)数据在5°~80°范围内,以10(°)/min的扫描速率通过X射线衍射仪进行测试。

1.4　基于CPP水凝胶的柔性应变传感器的构建

将CPP水凝胶薄膜切割成条状样品(15 mm×5 mm×2 mm),然后将2根导电铜丝紧密黏贴在可拉伸水凝胶薄膜的两端以组装电极。最后,使用2片VHB胶带将水凝胶薄膜封装成三明治式的应变传感器。VHB胶带能够最小化环境干扰,以获得稳定的电流信号。

1.5　水凝胶柔性应变传感器的测试

CPP水凝胶的电性能通过LCR数字电桥进行测量。为了实时监测人体运动信号,在VHB胶带的辅助下,将基于CPP水凝胶的应变传感器黏贴在人体相关关节部位或面部。利用LCR数字电桥对铜电极进行导电性能检测。灵敏度(*GF*)通常用于评估传感材料的响应性,其计算公式如式(1):

$$GF=(\Delta R/R_0)/\varepsilon \quad (1)$$

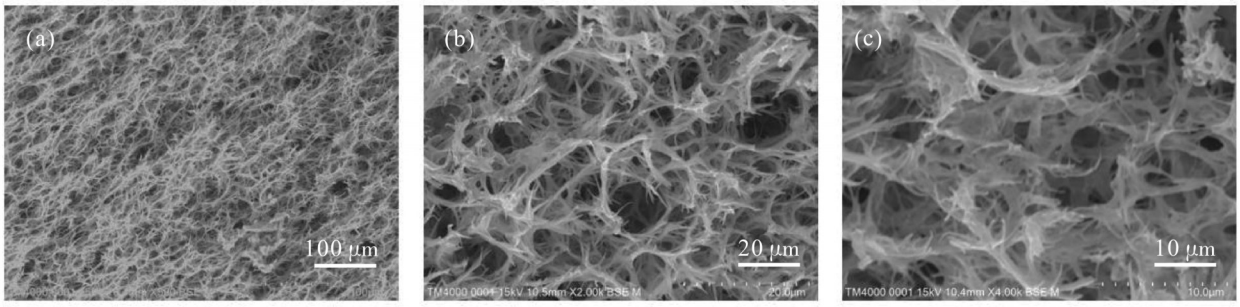


Fig. 2 Cross-sectional SEM images of frozen-dried CPP4 hydrogel: (a) magnified 500 times; (b) magnified 2000 times; (c) magnified 4000 times

式中：R和R_0——分别表示CPP水凝胶的测试电阻值和初始电阻值；ε——施加的应变。

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

通过SEM观察该凝胶在不同放大倍数下的内部形貌和微观结构。Fig.2为CPP4水凝胶在不同放大倍数下的SEM图。可以看出，该凝胶中分布着许多不规则的三维网络孔隙结构，这是因为PA可以与CS链上的氨基形成氢键，而CS上的氨基和羟基又可以与氢键形成稳定的三维网络结构[18]。这种结构为电子的迁移提供了更多的通道，能够有效提高导电水凝胶中电子的传输效率，从而使水凝胶具有优异的导电性[19]。

2.2 化学结构分析

为了表征PA在水凝胶体系中的交联网络，Fig.3显示了CS，PA和CPP4水凝胶的傅里叶变换红外（FT-IR）光谱。在CPP4中，羟基的伸缩振动峰在3450 cm^{-1}。与CS中羟基的伸缩振动峰相比，CPP4中羟基的振动峰展宽，这表明PS与CS之间生成了氢键。CPP4的FT-IR光谱显示，在501 cm^{-1}处有1个新的特征吸收峰，这可归属于PA中的—PO_4^{3-}基团[20]。CPP4水凝胶在2967 cm^{-1}（N—H）和1635 cm^{-1}（C=O）处的峰归属于CS中乙酰氨基的伸缩振动峰，表明CS和PEI被引入水凝胶体系[21]。CPP4中1062 cm^{-1}附近的宽吸收峰是由PA中的P=O伸缩振动引起，加入PA后，PA的磷酸基团与CS的氨基基团之间形成了离子键[22]。此外，CS的—OH还会与PA的—P—O之间形成氢键，在疏水相互作用和范德华力的平衡作用下形成了多孔网络结构，从而固定了水分子，形成了具有优异力学强度的聚合物水凝胶。FT-IR结果表明，壳聚糖、PEI和PA之间通过化学交联的方式形成了CPP水凝胶。

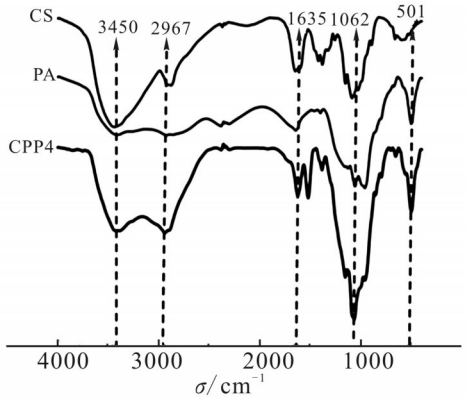


Fig. 3 Infrared spectra of CS, PA and CPP4 hydrogels

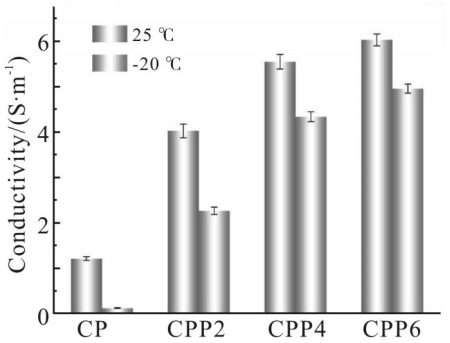


Fig. 4 Conductivity of CPP hydrogels added at different phytic acid dosage and temperature

2.3 导电性能和抗冻性能

Fig.4是加入不同植酸剂量和不同温度时CPP水凝胶的电导率。在25 ℃下，从图中可以看到，随着PA含量增加电导率呈现递增的趋势。当水凝胶中不含植酸时，CP水凝胶的电导率为1.19 S/m，当PA的量为4 mL时，CPP4水凝胶的电导率提升到5.58 S/m，这是因为PA电离时会产生丰富的游离氢

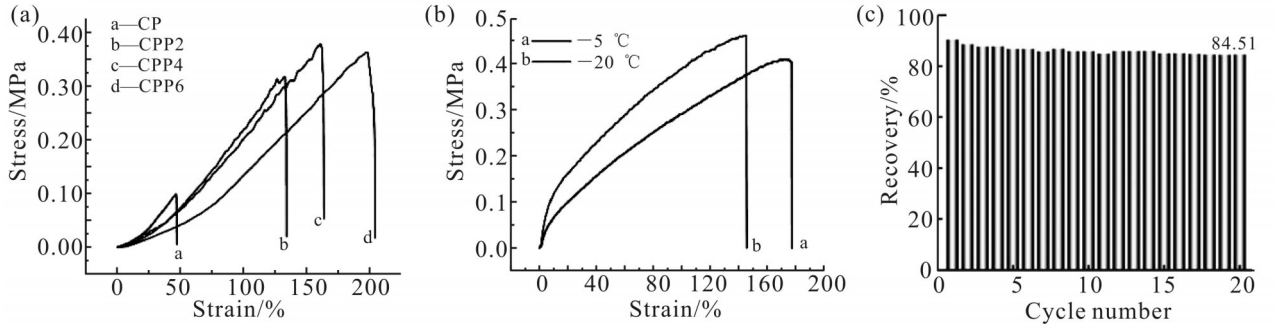


Fig. 5 (a)Tensile stress-strain images of hydrogels with different phytic acid dosages; (b) stress-strain curves of CPP4 hydrogels at different temperatures; (c) compression cycle test diagram of CPP4 hydrogel

离子(H^+),从而增加了CPP水凝胶的离子电导率。在−20 ℃的,CPP水凝胶的电导率也随着PA含量的增加而增大,当水凝胶中不含植酸时,CP水凝胶的电导率为0.1 S/m,与25 ℃下CP的电导率相比,下降了91.6%,PA的量增加至4 mL时,电导率下降百分比由91.6%降低到22.22%,其主要原因是PA磷酸基团和水分子羟基之间形成了强氢键,能防止水分子形成规则的冰晶结构并抑制水的结冰过程,使CPP水凝胶具有高导电性能和抗冻性能[23]。

2.4　力学性能

为了探究植酸的量对CPP水凝胶力学性能的影响,制备了不同植酸剂量的CPP水凝胶并对其力学性能进行测试。如Fig.5(a)所示,所制备的CPP水凝胶具有良好的拉伸性能。CPP水凝胶的应力和拉伸应变随着加入植酸量的增加而呈现出上升的趋势。不加植酸时,CP水凝胶的断裂应力为0.10 MPa。断裂伸长率为48.3%,当加入4 mL植酸时,CPP4水凝胶断裂应力为0.362 MPa,断裂伸长率为210.2%,CPP4水凝胶与CP水凝胶相比,应力增加了0.262 MPa,断裂伸长率增加了161.9%,这表明PA的存在促进了水凝胶内部网络结构的构建,提升了水凝胶网络的交联密度,从而赋予CPP水凝胶优越的力学性能[20]。Fig.5(b)展示了CPP4水凝胶在低温环境下的应力-应变曲线,由于低温环境中水分子的结晶行为被植酸抑制,CPP4水凝胶在−20 ℃下仍有145%的断裂伸长率。此外,Fig.5(c)中可以看出,在第1个压缩循环后,水凝胶的回弹率为91%,20个循环后的回收率保持在80%以上,突出了CPP4水凝胶稳健的网络结构。

2.5　热重分析

Fig.6是CPP4水凝胶的TGA曲线。可以看出,CPP4水凝胶的质量损失主要分为3个阶段。第1阶段为147.8～198.5 ℃,主要由水凝胶中结合水和结晶水的蒸发引起。第2阶段为198.5～500.2 ℃,此阶段CPP4水凝胶质量损失可归因于水凝胶中PA与CS结合形成的氢键发生断裂,同时,壳聚糖上的糖环和乙酰氨基也会发生缓慢裂解,从而产生质量损失。第3阶段为500.2～600.0 ℃,残余主链在这个区间段发生降解,当主链完全降解后,失重现象趋于平缓,并引发炭化过程。热分解过程结束后,样品的剩余质量为41.2%。从图中可以看出CPP4水凝胶的热稳定性较好,这主要是因为CPP4水凝胶中多重氢键和多种动态共价键协同作用,在凝胶内部交联形成了三维交联网络结构,增强了其结构稳定性,从而提高了热稳定性[24]。

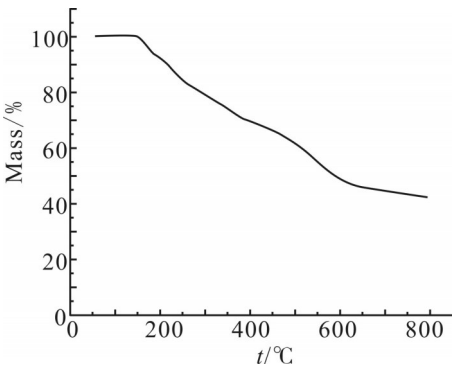


Fig. 6 TGA curve of CPP4 hydrogel

2.6　应变传感性能

CPP水凝胶由于其高导电性和力学柔韧性而具有作为柔性可穿戴应变传感器的潜力。组装的水凝

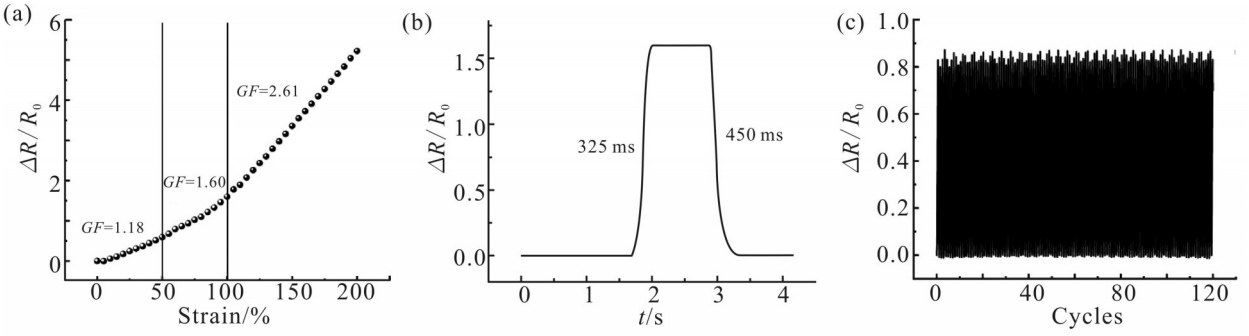


Fig. 7 Strain sensitivity of the CPP4 hydrogel sensors: (a) relative resistance change of CPP4 hydrogel during stretching process; (b) response and recovery time of the sensor when the relative resistance change is 1.61; (c) sensor stability measurement for 200 stretching cycles

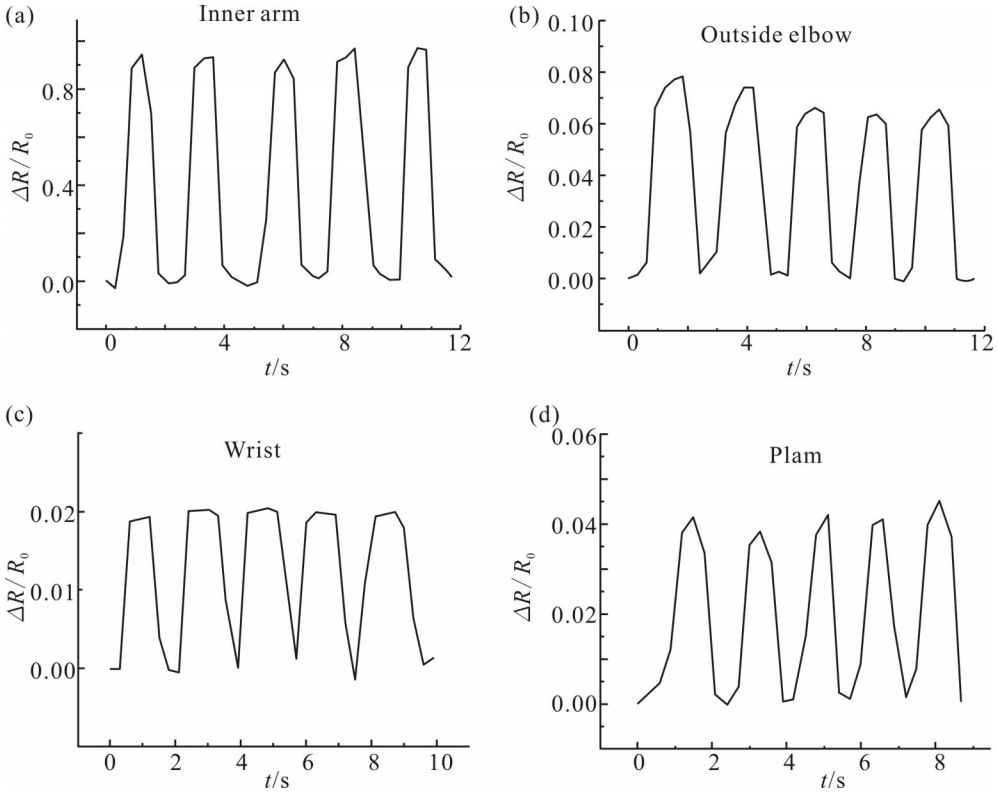


Fig. 8 Application of CPP hydrogels as strain-responsive sensors for monitoring various human movements in real-time: (a) inward bending of the arm; (b) outward stretching of the arm; (c) bending of the wrist; (d) bending of the palm

胶应变传感器在应变范围为0~200%时具有应变依赖的响应性，如Fig.7(a)所示，相对电阻变化($\Delta R/R_0$)随着应变的增加逐渐增加。应变灵敏度源于水凝胶变形引起的电阻变化，在拉伸过程中，水凝胶中自由离子的传输路径变得又长又窄，导致电阻增加。传感器的灵敏度系数（*GF*）是评价水凝胶应变传感器灵敏度的核心指标之一，它是线性应变区域相对电阻变化曲线的斜率。CPP4水凝胶传感器的*GF*在0~200%的测量范围内不是固定的参数。在应变范围为0~50%和50%~100%时，水凝胶传感器的*GF*分别为1.18和1.60，而在应变范围为100%~200%时，GF最高可达2.61，这表明CPP4水凝胶在不同程度的拉伸变形下表现出极高的传感灵敏性[25]。不仅如此，当CPP4水凝胶作为传感器时，还具备出色的响应能力和恢复能力。如Fig.7(b)所示，在拉伸和恢复过程中，当相对电阻变化为1.61时，传感器的响应和恢复时间分别为325 ms和450 ms。这种快速响应有利于实时监测人体运动。此外，通过拉伸-释放循环实验研究了CPP4水凝胶的传感稳定性。如Fig.7(c)所示，CPP4水凝胶传感器在200次拉伸循环中表现出

稳定的响应,表明该水凝胶在长期拉伸循环过程中具有出色的稳定性和耐久性,使得CPP4水凝胶在柔性可穿戴领域具有很大的潜在应用价值。

CPP4水凝胶较高的应变灵敏度和传感稳定性使其有望作为皮肤附着的可穿戴传感器监测人体活动。如Fig.8(a)所示,将基于CPP4水凝胶制备的应变传感器黏附在人体手臂内侧,当手臂弯曲时,由于关节运动拉伸了水凝胶传感器,其相对电阻($\Delta R/R_0$)增加。当手臂伸直时,相对电阻的变化同步恢复。此外,弯曲-伸直过程中的信号具有出色的可重复性,表明应变传感器具有出色的稳定性和可逆性。同样地,在手肘外侧、手腕和手掌的运动中也表现出相同的特性。如Fig.8(b~d)所示,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对应到相应的位置,手肘外侧、手腕和手掌的运动也多次以稳定的信号记录下来,这表明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,CPP4水凝胶应变传感器还能够监测微小的人体活动,如Fig.9(a~d)所示,当做出手指弯曲、微笑、挑眉和皱眉的微小活动时,该应变传感器显示出重复的电信号,这表明CPP4水凝胶传感器对各种运

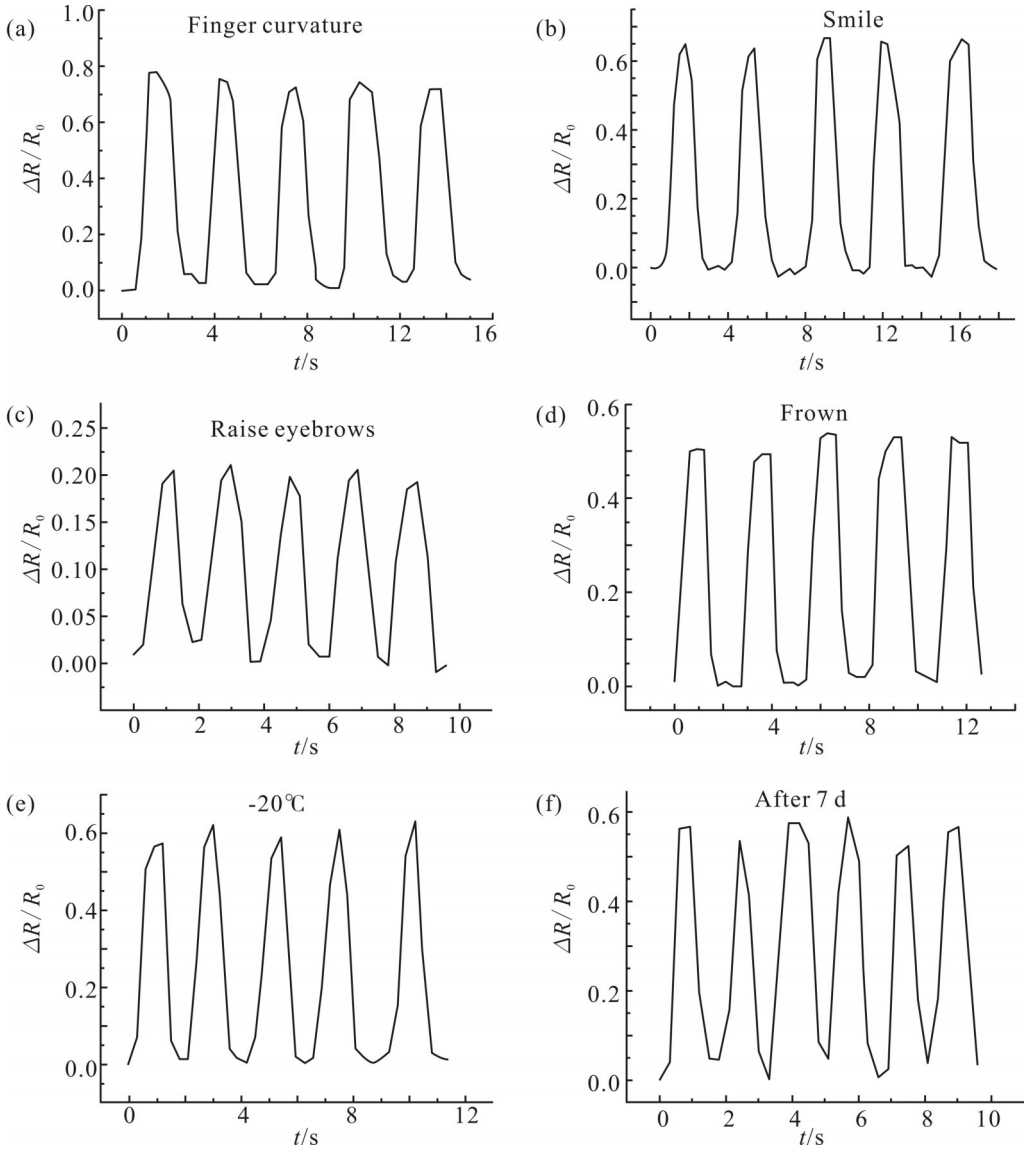


Fig. 9 CPP hydrogel acts as wearable strain sensor that can be used to monitor tiny human movements: (a) finger flexing; (b) smiling; (c) eyebrow raising; (d) frowning; (e) change in $\Delta R/R_0$ of the sensor's finger bending in the working environment of -20 ℃ over time; (f) change in $\Delta R/R_0$ of the sensor's finger bending over time during storage in an open environment for 7 d

动都表现出出色的应变响应。令人印象深刻的是，由于水凝胶良好的低温耐受性和保水性，CPP传感器可以在恶劣条件下工作，在－20 ℃监测人体手指弯曲和在开放环境中存储7 d后仍表现出良好的稳定性 (Fig.9(e~f))。因此，该柔性抗冻导水电凝胶在可穿戴传感器领域的应用前景与潜力巨大。

3 结论

基于H_2O/PA二元溶剂体系，构建了一种具有抗冻性、高导电性和超灵敏性的壳聚糖/聚乙烯亚胺/植酸（CS/PEI/PA，CPP）双网络交联水凝胶。CPP4水凝胶的拉伸断裂应力为0.362 MPa，断裂伸长率为210.2%，在室温条件下其电导率达到5.58 S/m。由于PA与水分子之间存在较强的氢键，加入PA显著降低了水凝胶的冰点，使得CPP4水凝胶在－20 ℃的低温时电导率仍有4.34 S/m，具有良好的抗冻性能。因此，基于高导电性、超灵敏、宽响应温度和长期稳定设计的CPP传感器可以满足极端天气下可穿戴柔性电子设备的要求，并有望应用于极端气候地区人类生命监测和科学研究。

参考文献：

[1] Zhang Y, Chen L, Xie M, *et al.* Ultra-fast programmable human-machine interface enabled by 3D printed degradable conductive hydrogel[J]. Materials Today Physics, 2022, 27: 100794.

[2] Heidari H. Electronic skins with a global attraction[J]. Nature Electronics, 2018, 1: 578-579.

[3] Zhu M, Wang Y, Lou M, *et al.* Bioinspired transparent and antibacterial electronic skin for sensitive tactile sensing[J]. Nano Energy, 2021, 8: 105669.

[4] Li S, Qin H, Zhang T, *et al.* Highly tough bioinspired ternary hydrogels synergistically reinforced by graphene/xonotlite network[J]. Small, 2018, 14: 1800673.

[5] Huang X, Wang L, Shen Z, *et al.* Super-stretchable and self-healing hydrogel with a three-dimensional silver nanowires network structure for wearable sensor and electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 137136.

[6] Arndt C, Hauck M, Wacker I, *et al*. Microengineered hollow graphene tube systems generate conductive hydrogels with extremely low filler concentration[J]. Nano Letters, 2021, 21: 3690-3697.

[7] Wright S L, Kelly F J. Threat to human health from environmental plastics[J]. BMJ, 2017, 358: j4334.

[8] Jambeck J R, Walker-Franklin I. The impacts of plastics' life cycle[J]. One Earth, 2023, 6: 600-606.

[9] Zhang L, Liu J, Zheng X, *et al*. Pullulan dialdehyde crosslinked gelatin hydrogels with high strength for biomedical applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 216: 45-53.

[10] Yan R, Sun Q, Shi X, *et al*. Skin-interfaced self-powered pressure and strain sensors based on fish gelatin-based hydrogel for wireless wound strain and human motion detection[J]. Nano Energy, 2023, 118: 108932.

[11] Wan H, Chen Y, Tao Y, *et al.* MXene-mediated cellulose conductive hydrogel with ultrastretchability and self-healing ability[J]. ACS Nano, 2023, 17: 20699-20710.

[12] He X, Bai T, Lu J, *et al*. High-strength, anisotropic bamboo hydrogel via in situ lignin modification for ion-selective transport and sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148416.

[13] Ni P, Ye S, Xiong S, *et al*. A chitosan-optimized polyethyleneimine/polyacrylic acid multifunctional hydrogel for reducing the risk of ulcerative arterial bleeding[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2023, 11: 5207-5222.

[14] Sikorski D, Bauer M, Frączyk J, *et al*. Antibacterial and antifungal properties of modified chitosan nonwovens[J]. Polymers, 2022, 14: 1690.

[15] Zhang H, Xue K, Shao C, *et al*. Recent progress in bioinspired design strategies for freeze resistant hydrogel platforms toward flexible electronics[J]. Chemistry of Materials, 2023, 35: 10316-10347.

[16] Yan Z, Jiang S, Xi J, *et al*. Frost-resistant nanocellulose-based organohydrogel with high mechanical strength and transparency [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 661: 879-887.

[17] Xu C, Yang K, Zhu G, *et al*. Anti-freezing multifunctional conductive hydrogels: from structure design to flexible electronic devices[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2024, 8: 381-403,

[18] Lv S, Zhang S, Zuo J, *et al.* Progress in preparation and properties of chitosan-based hydrogels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124915.

[19] Huang Y, Lai F, Zhang L, *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.

[20] Yin Q, Liu J, Zhong Z, *et al*. Synthesis of phytic acid-modified chitosan and the research of the corrosion inhibition and antibacterial properties[J]. International Journal of Biological

Macromolecules, 2023, 253: 126905.

[21] Zeng L, Liu B, Gao G. Physically crosslinked polyvinyl alcohol/chitosan-phytic acid hydrogels for wearable sensors with highly conductive, recyclable and antibacterial properties[J]. Science China Materials, 2023, 66: 4062-4070.

[22] Song D, Kang B, Zhao Z, *et al*. Stretchable self-healing hydrogels capable of heavy metal ion scavenging[J]. RSC Advances, 2019, 9: 19039-19047.

[23] Yang C, Liu J, Liu P, *et al.* Phytic acid extracted cellulose nanocrystals for designing self-healing and anti-freezing hydrogels' flexible sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152276.

[24] Torres F G, De-la-Torre G E. Polysaccharide-based triboelectric nanogenerators: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117055.

[25] Liu W, Xie R, Zhu J, *et al.* A temperature responsive adhesive hydrogel for fabrication of flexible electronic sensors[J]. NPJ Flexible Electronics, 2022, 6: 68.

Construction of Phytic Acid-Induced Chitosan Antifreeze Conductive Hydrogel Sensor

Kailiu Chen, Rui Wei, Xiaoya Jin, Junwei Chen, Hanchen Wang, Qilin Lu

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

ABSTRACT: Hydrogels have excellent stretchability, flexibility and biocompatibility, making them ideal for wearable flexible sensors. However, hydrogel sensor is easy to freeze in low temperature environment, resulting in damage to electrical conductivity and mechanical properties, which hinders the popularization of its practical application. In this study, phytic acid was introduced into chitosan to prepare chitosan/polyvinylimide/phytic acid (CS/PEI/PA, CPP) double network crosslinked hydrogels with excellent mechanical properties, electrical conductivity, freeze resistance and strain sensing properties. The morphology, structural composition, mechanical properties, electrical conductivity, antifreeze properties and sensing properties were analyzed. The experimental results show that when 4 mL phytic acid is added, the tensile fracture stress of CPP4 hydrogel is 0.362 MPa and the elongation at break is 210.2%. At room temperature, the conductivity reaches 5.58 S/m, and at −20 ℃, the conductivity remains at 4.34 S/m, indicating that the conductivity and frost resistance are good. At the same time, the hydrogel has excellent sensitivity as flexible strain sensor, which can give different and repeated electrical signals according to different human movements, indicating that CPP4 hydrogel can be used for real-time monitoring of human movement, and has a good application prospect in flexible wearable sensors.

Keywords: phytic acid; chitosan hydrogel; conduct electricity; antifreeze; sense