

导电水凝胶基柔性电子传感系统——柔性电子创新实验设计

王腾蛟^{1,*}, 程天¹, 刘荣珺¹, 王泽一², 乔宇轩², 王安¹, 李鹏^{1,*}

¹ 西北工业大学柔性电子研究院, 西安 710129

² 西北工业大学教育实验学院, 西安 710129

摘要: 导电水凝胶兼具生物医用材料和导电材料特征, 可应用于医疗康复、运动监测和人机交互等领域。为提高柔性电子学专业本科生的创新意识与实验技能, 本实验设计了一种纳米凝胶材料交联的导电水凝胶, 通过探索加聚型水凝胶聚合过程中引发剂浓度和交联机制, 阐明材料结构组分对水凝胶基柔性电子器件使用耐久性能及传感性能的影响。通过创新实验设计, 柔性电子学专业本科生可以学习到高分子乳液聚合、水凝胶制备以及应力应变传感性能表征等知识点, 深入理解交联剂结构设计对材料功能性的影响。此外, 本实验还设计了基于水凝胶柔性电子传感器的可穿戴传感系统, 通过集成可控制小车移动的智能手套, 以及用于控制电脑游戏的水凝胶控制器, 将前沿科研与本科实验教学任务紧密结合, 有利于激发柔性电子、材料、电子信息等专业本科生对于科研的兴趣和创新探索的科研精神。

关键词: 柔性电子; 乳液聚合; 导电水凝胶; 纳米凝胶; 柔性应变传感器

中图分类号: G64; O6

Conductive Hydrogel-based Flexible Electronic System: Innovative Experimental Design in Flexible Electronics

Tengjiao Wang^{1,*}, Tian Cheng¹, Rongjun Liu¹, Zeyi Wang², Yuxuan Qiao², An Wang¹, Peng Li^{1,*}

¹ Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China.

² Honors College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China.

Abstract: Conductive hydrogels amalgamate characteristics of both biomedical materials and conductive materials, finding applications in medical rehabilitation, motion monitoring, and human-machine interaction among others. To enhance the innovative awareness and experimental skills of undergraduate students majoring in flexible electronics, this experiment designs a conductive hydrogel crosslinked by nanogel materials. By exploring the initiator concentration and cross-linking mechanisms during the polymerization of co-polymeric hydrogels, the impact of material structural components on the durability and sensing performance of hydrogel-based flexible electronic devices were elucidated. Through taking part in this novel experimental design, undergraduates majored in flexible electronics can acquire key points on polymer emulsion polymerization, hydrogel synthesis, stress-strain sensing property characterization, gaining a deeper understanding of the influence of cross-linking agent structural design on material functionality. Additionally, this experiment developed a hydrogel based flexible and wearable sensing system based on hydrogel flexible electronic sensors. By integrating a smart glove capable of controlling a small car's movement and a hydrogel controller for computer game control, we tightly merge cutting-edge research with undergraduate

收稿: 2023-09-25; 录用: 2023-11-01; 网络发表: 2023-11-06

*通讯作者, Emails: iamtjwang@nwpu.edu.cn (王腾蛟); iampli@nwpu.edu.cn (李鹏)

基金资助: 西北工业大学2023年度教育教学改革研究项目(2023JGY58); 西北工业大学2023年度课程建设项目(KCJS23ZP098, KCJS23WT27); 西北工业大学2023年度研究生培养质量提升项目

experimental teaching tasks. This integration is beneficial in stimulating the research interest and innovative exploration spirit among undergraduates majoring in flexible electronics, materials, and electronic information.

Key Words: Flexible electronics; Emulsion polymerization; Conductive hydrogel; Nanogel; Flexible strain sensor

近年来, 柔性电子产业技术快速发展, 以可穿戴设备为代表的柔性电子设备在医疗康复^[1,2]、运动监测^[3]和人机交互^[4]等领域具有广泛的应用前景, 其中先进柔性电子材料的研发对该产业的发展起到了极大的推动作用。柔性电子材料可以克服传统刚性材料本身质地坚硬、机械性能无法与人类皮肤组织匹配的缺点。以导电水凝胶为例, 导电水凝胶兼具亲水基体^[5]和导电介质^[6]的特点, 通常可以根据施加应力显著改变其电学性质^[7], 在柔性传感、人工“肌肉”^[8]、软仿生机器人^[9]等诸多领域中发挥着越来越重要的作用。同时, 导电水凝胶作为代表性柔性电子材料, 其化学制备过程安全简易, 合成实验平台要求门槛低, 所需化学药品来源广泛^[10,11], 可以融入到本科实验课程学习中, 用于培训开拓本科生的实验技能与对科研前沿的了解。

为了尽快推进以“柔性电子学”为代表的交叉学科基础教育以及产学研教学, 西北工业大学率先创立“柔性电子学”前沿交叉学科专业。其中, 笔者参与设计“柔性电子学”本科教学体系, 提出开设“柔性电子创新实验设计”系列本科实验课程, 旨在培养以柔性电子学为知识背景, 具有扎实理论功底、广阔国际化视野和独立创新精神的复合型人才。实验课“柔性电子创新实验设计”有助于提升本科生专业教育水平, 培养柔性电子领域的专业技术人才。基于这一背景, 我们为本科生设计了一种实验方法——以活性纳米凝胶为交联剂构建具有高力学强度的导电水凝胶。这一方法实现了导电水凝胶的简单和可控的合成, 并使得合成的水凝胶具有较好的力学特性, 快速的传感响应速度。

在该创新实践教学中, 我们将导电水凝胶组装为柔性应力应变传感器与Arduino开发板相结合, 制备可远程控制小车的智能可穿戴设备。此外, 借助材料的力学性能以及良好的导电性实现了钢琴按键模拟以及游戏手柄控制。该创新实践教学能帮助学生更加深入地理解导电水凝胶纳米结构与功能间的联系。通过将材料科学与电子技术结合, 兼顾学科前沿的创新性和实验操作的实践性, 将科研与实验教学任务紧密结合, 有利于激发培养学生的科研兴趣和创新精神。

1 实验设计

该创新实践教学旨在将科研的严谨性与趣味性相结合, 从而促进学生们对课本中理论知识的深入理解, 同时提高学生们对前沿科学领域的研究兴趣。图1为该创新实验教学的设计思路, 设计一种以活性纳米凝胶为交联剂构建纳米结构导电水凝胶的制备方法, 并将该水凝胶基柔性电子传感器集成到柔性电子器件中, 制备用于控制小车移动的智能手套, 以及用于控制电脑游戏的水凝胶系统。在水凝胶的制备中, 我们通过设置无引发剂组、无交联剂组、化学交联剂组以及纳米凝胶交联剂组制备导电水凝胶并测试其力学性能, 来探究引发剂、交联机制、交联剂种类等变量对导电水凝胶机械性能的影响。

2 实验内容

2.1 试剂与仪器

2.1.1 试剂

丙烯酸(Acrylic acid, AA), 聚(乙二醇)甲基醚丙烯酸酯(Poly(ethylene glycol)methyl ether acrylate, PEGA, $M_n = 480 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), 2-(二甲胺)丙烯酸乙酯(*N,N*-Dimethylethylenediamine, DMAEA)购自阿拉丁试剂(上海)有限公司, *N,N'*-亚甲基双丙烯酰胺(*N,N'*-Methylenebisacrylamide, MBA), 过硫酸钾(Potassium persulfate, KPS), 3-[二甲基-[3-(2-甲基丙烯-2-烯酰氨基)丙基]氮杂酰]丙烷-1-磺酸盐(*N,N*-

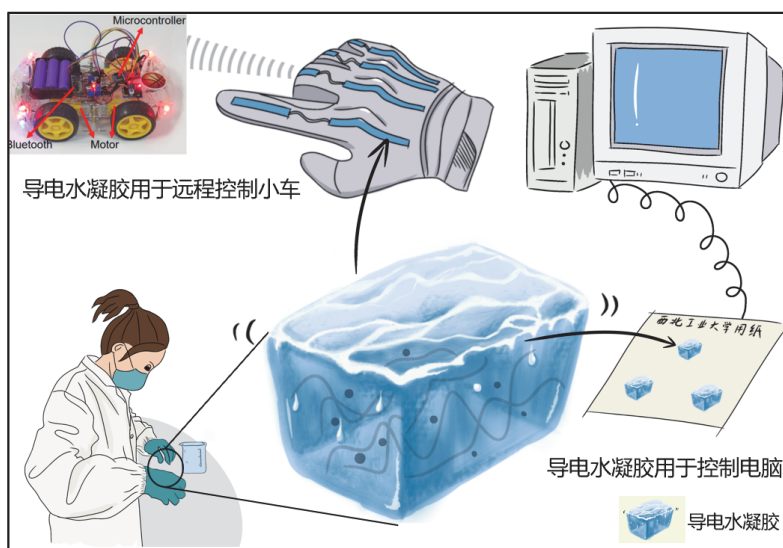


图1 导电水凝胶及其应用示意图

Dimethyl-*N*-(3-methacrylamidopropyl)-*N*-(3-sulfopropyl) ammonium betaine, SPP), 氯化钠(NaCl)购自上海天体科技有限公司。十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, SDS)购自美国Oxoid公司。上述试剂均为分析级试剂, 无需进一步纯化直接使用。

2.1.2 仪器

电子天平, 磁力搅拌器(海道尔夫公司, 德国, Hei-Connect), 干式恒温器(杭州奥盛仪器有限公司, MK200-4), 涡旋混匀仪(上海泰坦科技股份有限公司, VM-T2), 万能材料测试机(英斯特朗试验设备贸易有限公司, 3344), 数字源表(泰克有限责任公司, Keithley 2450), 扫描电子显微镜(赛默飞世尔科技, 美国, Verios G4), 透射电子显微镜(日立公司, 日本, HT7800), 车载控制模块的单片机控制模块采用Arduino nano v3.0单片机, 蓝牙模块采用HC-05, 电机驱动模块采用L298v, 电源模块采用DC-DC。

2.2 实验步骤

2.2.1 活化纳米凝胶的制备

将SPP (2 mmol, 585 mg), PEGA (240 μL)和MBA (0.10mmol, 15.4 mg)溶于8.66 mL超纯水中, 用氩气鼓泡, 去除溶液中的溶解氧。然后加入对应量的KPS ($0.188 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 100 μL)和SDS ($0.185 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 1 mL), 并继续向烧瓶内吹氩气并立即密封烧瓶。然后加热至70 $^{\circ}\text{C}$, 在300 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下反应30 min。最后将合成的溶液在冰水浴中冷却至0 $^{\circ}\text{C}$ 备用。

2.2.2 水凝胶的制备

按表1所示向各组试管中分别加入一定量的AA、DMAEA和超纯水, 震荡摇匀后分别放入冰水浴中冷却备用。然后分别向各组试管中加入一定量的不同种类交联剂, 并轻轻摇晃试管使其混合均匀, 将得到的混合物注入模具, 并将模具放在干式恒温器中, 在80 $^{\circ}\text{C}$ 下加热4 h, 然后在室温下反应48 h。

表1 纳米结构水凝胶制备配方设计

| 组别 | AA | DMAEA | 超纯水 | 交联剂 | KPS |
|----|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|-------------------|
| A | 415 μL | 910 μL | 435 μL | MBA (15.4 mg) | 240 μL |
| B | 415 μL | 910 μL | 2435 μL | 0 mL | 240 μL |
| C | 415 μL | 910 μL | 435 μL | 纳米凝胶(2 mL) | 240 μL |
| D | 415 μL | 910 μL | 675 μL | 纳米凝胶(2 mL) | 0 μL |

2.3 测试方法

2.3.1 纳米凝胶微观形貌表征

扫描电子显微镜(SEM)对纳米凝胶进行形貌、粒径表征,测试前进行喷金处理,在5 kV加速电压下进行观察。为了进一步表征纳米凝胶的形貌和粒径,我们采用透射电子显微镜(TEM)进行了测试,工作电压为100 kV。

2.3.2 机械性能测试

反应结束后,观察各组水凝胶成胶现象,并分别从模具中取出成型的水凝胶在室温下用Instron 3344仪器进行不同条件下的机械性能测试。拉伸应力应变测试时,将导电水凝胶制备为长17 mm、宽8 mm、厚2 mm的样条。所有拉伸试验均以 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒定速度进行。拉伸应变定义为样品单位长度产生的形变,即拉伸产生的长度变化与原始长度之比。

2.3.3 传感性能测试

快速响应时间测试中,采用与机械性能测试相同的方法进行拉伸实验。在循环压缩测试中,将水凝胶制成长度为8 mm、直径为11 mm的圆柱体并固定在Instron 3344万能试验机上进行实验。压缩试验以 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的恒定速率进行。为了避免在循环稳定性测试中水分蒸发,在导电水凝胶表面涂抹了硅油。所有传感性能测试均在水凝胶两端连接导线,采用直流电压为1 V的Keithley 2450 SMU电源表进行传感性能测试。为避免导线移动造成误差,在样品的两端粘贴了轻质导电胶带。

2.3.4 无线小车控制

在无线小车控制实验中,将导电水凝胶基柔性应变传感器与可穿戴设备结合组装为智能手套,示意图如图2a,借助材料的力学性能以及良好的导电性能制成模拟传感器,通过Arduino单片机控制器读取传感器电阻值的变化,从而获得模拟信号,给每个读取到的值设置一个阈值电压,某个接口测试到的值大于阈值电压时,赋予数字信号“1”,当测试到的值小于阈值电压时,赋予数字信号“0”。通过蓝牙模块进行无线传输数据,对小车进行远程无线运动控制,小车控制系统如图2b所示。

2.3.5 趣味应用实验

在钢琴按键模拟以及游戏手柄控制实验中,同样将水凝胶制备成长度为8 mm,直径为11 mm的圆柱体。将制备的水凝胶分别接在单片机的A0, A1, A2, A3引脚,按压信号通过相应引脚传输到单片机,与无线小车控制实验同理,单片机对“1”和“0”数字信号进行处理后传输到PC端,借助材料的力学性能以及良好的导电性实现钢琴按键模拟以及游戏手柄控制。

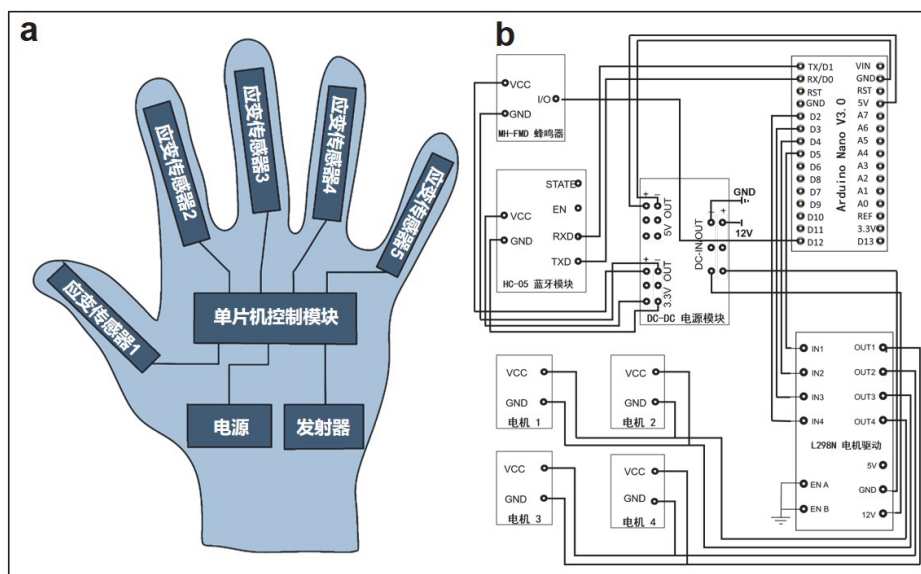


图2 (a) 水凝胶基柔性应变传感器智能手套示意图; (b) 小车控制电路

3 结果与讨论

图3为导电水凝胶制备示意图，首先，以KPS为引发剂，以SDS为乳化剂，SPP、MBA和PEGA为原料，在70 °C下自由基乳液聚合30 min，合成了含不饱和双键的两性离子纳米凝胶。其中，PEGA被用来提高SPP的溶解度，两亲分子在纳米凝胶表面的附着抑制了单体和自由基的扩散。因此，在纳米凝胶中可以可控地保留不饱和双键。纳米凝胶上的不饱和双键通过控制交联密度从而对水凝胶网络的形成至关重要。随后，将DMAEA和AA分别作为阳离子单体和阴离子单体，在80 °C下与纳米凝胶交联4 h制备为水凝胶。在这一步中，KPS热诱导分解引发DMAEA和AA单体聚合，并通过纳米凝胶上的不饱和双键进行化学交联。

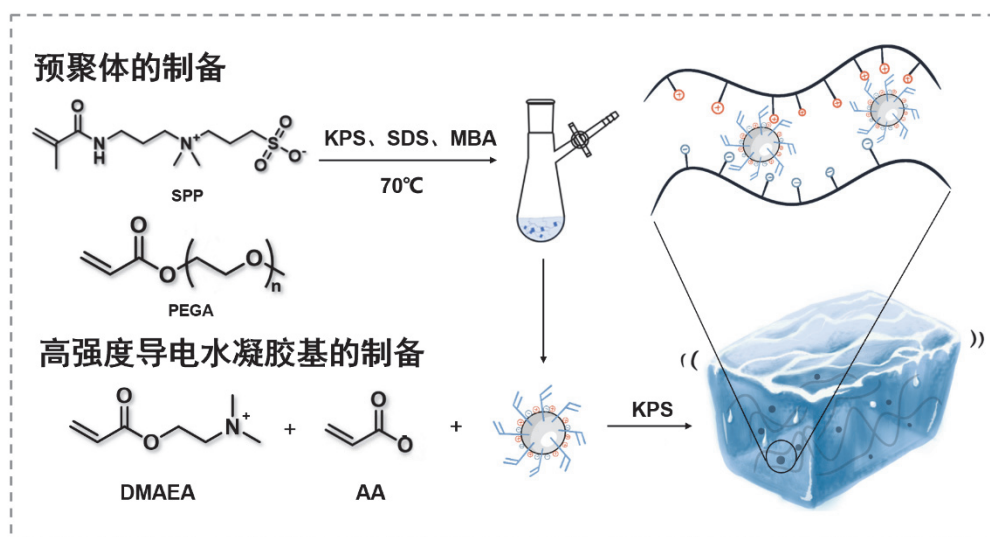


图3 导电水凝胶的制备过程示意图

作为交联点的纳米凝胶对于导电水凝胶的机械性能起着重要作用，因此对纳米凝胶的微观形貌进行了观察。图4a和4b为所制纳米凝胶的SEM与TEM图像，可以看出纳米凝胶呈颗粒状，尺寸小于100 nm，且分散性较好，较小的粒径可以赋予纳米凝胶较大的比表面积，从而有更多的交联点，使交联程度更高。另外，较好的分散性避免了团聚现象，从而避免了纳米凝胶聚集在某些区域导致的水凝胶强度和硬度非均匀分布。而这种非均匀分布会导致水凝胶在使用过程中出现裂纹和疲劳等问题。因此，较小的粒径和较好的分散性有助于导电水凝胶的交联和机械性能的提升^[12,13]。

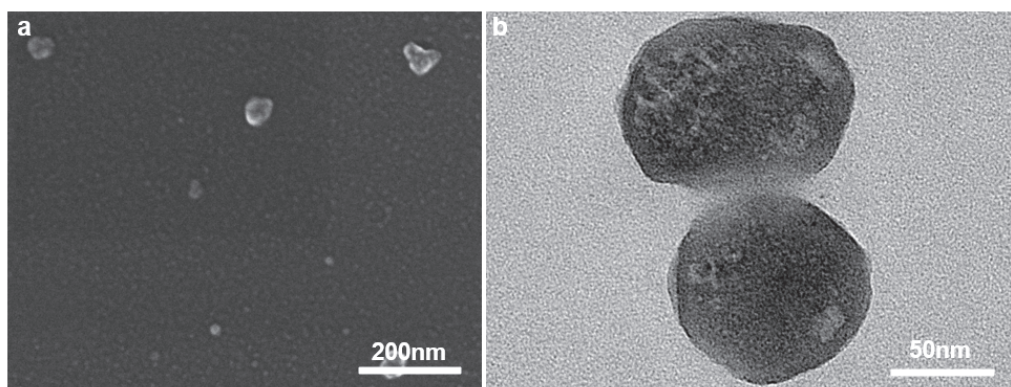


图4 纳米凝胶的(a) SEM图像；(b) TEM图像

3.1 机械性能

应用于可穿戴设备的导电水凝胶区别于其他传统材料，不仅要求吸收和保留大量水分，而且它们的杨氏模量(500 kPa–1 MPa)必须与人体皮肤相似，从而消除刚性设备带来的不适。另一方面，导电水凝胶需要具有很高的拉伸率来适应人体关节运动的大变形^[14]。此外，由于可穿戴设备随着时间的推移容易损坏和老化，因此导电水凝胶需要有极强的抗疲劳特性或通过动态共价反应进行自我修复^[15]。因此，我们对所合成的导电水凝胶进行了机械性能测试。在水凝胶的制备中，D组由于缺少引发剂KPS，因此加热时不会产生自由基引发的链式反应，分子间仅依靠DMAEA分子中的正电荷以及AA分子中的负电荷之间的静电作用力相互连接，但这种作用力较弱，因此无法形成凝胶。这证明了引发剂在聚合物聚合过程中的重要作用。该对照组旨在让本科生体会引发剂在链式聚合反应中的作用。除了D组外，其余三组均成功制备为水凝胶。图5a为不同条件下制备的水凝胶的拉伸应力-应变曲线，可以看出含有纳米凝胶的C组水凝胶的断裂伸长率与抗拉强度均最大，这是由于纳米凝胶在水凝胶中充当了交联点的作用，在拉伸过程中，纳米凝胶的形变起到承载应力集中的作用，从而提高了抗拉强度^[16]；另一方面，在拉伸断裂过程中，纳米凝胶与聚合物链的离子键起到了牺牲键的作用，从而实现了补强效果^[17]。此外，聚合物交联程度对材料的力学性能也有显著影响^[18]。一般来说，随交联密度的增加，拉伸强度会先增加再减小。这是因为交联程度适度增加时，有助于分子链的定向排列与结晶，使拉伸强度增加；而交联密度过高时，交联网络则阻碍分子链的定向排列，同时也会加重交联键分布的不均匀性，致使应力分布不均匀，所以拉伸强度下降^[19]。图中可以看出，添加MBA的A组水凝胶的断裂伸长率，抗拉强度均明显小于C组，这可能是由于交联程度过大导致的。而B组由于存在DMAEA与AA之间正负电荷之间的静电吸引力，从而产生一定的取向排列现象，致使拉伸强度大于A组。图5b为不同拉伸程度下的循环拉伸曲线，在100%至300%的不同拉伸程度下，加载卸载时曲线位移不明显，说明该水凝胶弹性较好。图5c为不同拉伸程度下水凝胶的机械性能演示，该水凝胶可以被拉伸至500%而不出现明显断裂，证明了水凝胶有着极强的韧性。

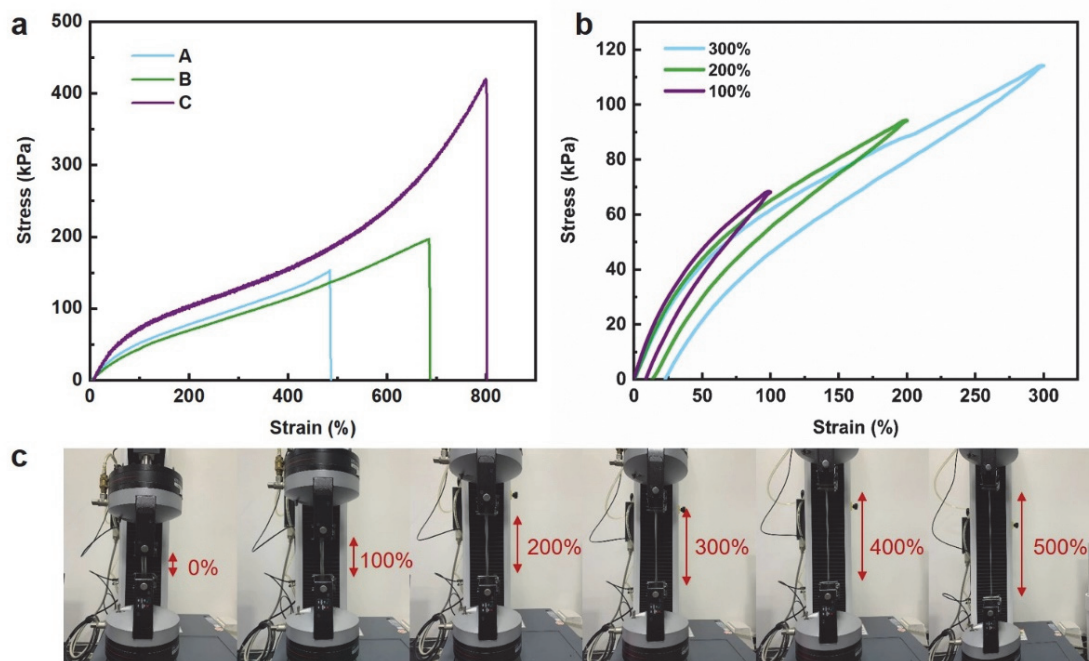


图5 (a) 不同条件下制备的水凝胶的拉伸应力-应变曲线：A, B, C组分别对应MBA交联，无交联剂，纳米凝胶交联；(b) 不同拉伸程度下的循环拉伸曲线；(c) 不同拉伸程度下水凝胶的机械性能演示

另外，为了让本科生更真切地了解水凝胶极强的力学性能，分别对导电水凝胶进行了可视化机械性能测试，如图6所示。该导电水凝胶具有卓越的柔韧性和弹性，可以承受高强度的变形，即压缩(-20%)和拉伸(+300%)，并恢复到原来的长度，没有任何明显的物理损伤，如图6a和图6b。此外导电水凝胶还能承受弯曲或刀片切割，如图6c和图6d。导电水凝胶的柔韧性和可恢复性有助于开发灵敏度和稳定性更高的基于水凝胶的柔性电子器件^[20,21]。

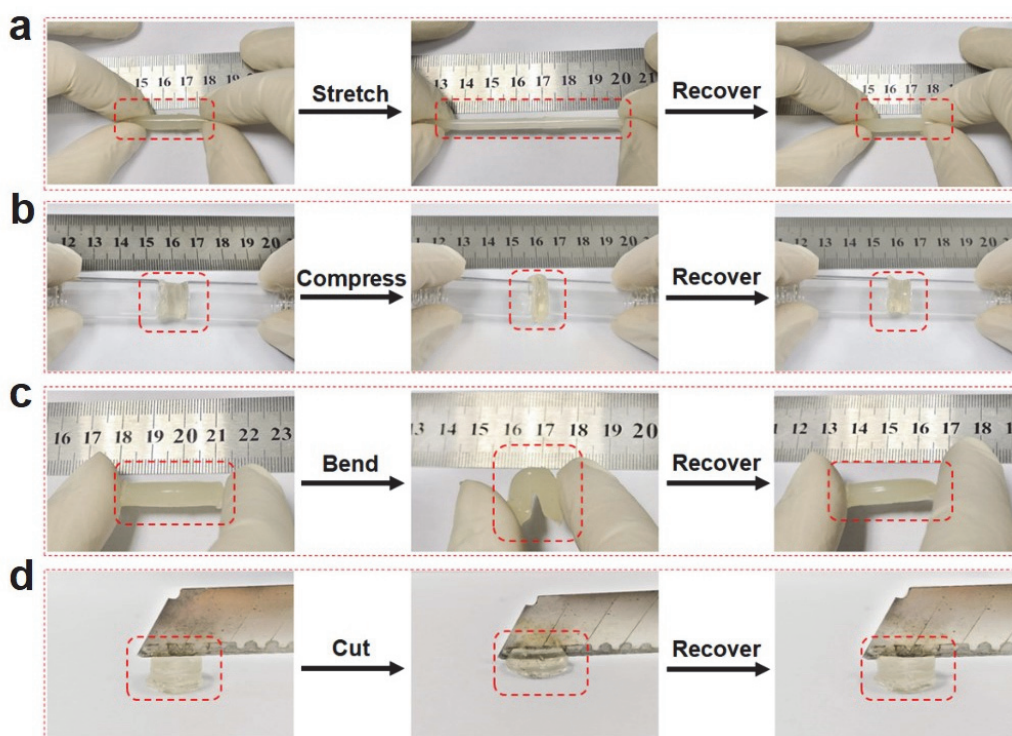


图6 施加不同应力下水凝胶的机械性能演示：(a) 拉伸；(b) 挤压；(c) 弯曲；(d) 剪切

3.2 传感性能测试

在探究了力学性能后，进一步测试了导电水凝胶作为柔性电子器件的潜力。研究了电阻变化($\Delta R/R_0$)与拉伸时间之间的关系，如图7a所示， $\Delta R/R_0$ 约等于70%时，用时仅为327 ms，证明该导电水

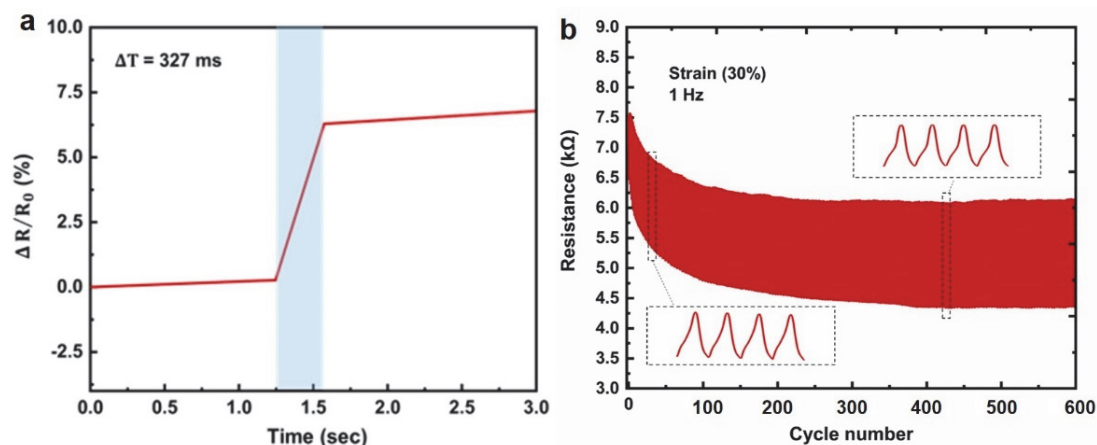


图7 (a) 快速响应时间曲线；(b) 水凝胶在应变为30%的条件下循环压缩600次时的阻抗-循环次数图

凝胶有着极快的响应速度。同时，该响应时间曲线呈现很好的线性特征， $\Delta R/R_0$ 随着拉伸时间的增加而增加，这使其能够更好的适应应变传感器使用。此外，测试研究了该水凝胶的机械耐久性，在应变为30%，频率为1 Hz的条件下进行了600次连续压缩试验，测试条件稳定后阻抗趋于平缓，几乎没有观察到明显的性能损失，这表明该水凝胶机械耐久性极佳^[22]。

3.3 水凝胶基柔性控制系统

通过与Arduino开发板相结合，制备了用于控制小车的智能手套，如图8以及表2所示，成功将手指端的动作信号变化传输至小车以实现无线控制。通过简单地弯曲不同手指，使水凝胶产生应变，并将信号转变为数字信号“1”和“0”的不同组合，实现信息的传递，使小车可以灵敏地进行“前”“后”“左”“右”等多方向运行。该实验与无线传感技术相结合，将柔性可穿戴设备的应用范围进一步拓展，本科生在实验中将自己制备的材料投入了实际应用，从而培养了学生的实验信心与兴趣。



图8 导电水凝胶控制系统控制小车(a) 前进；(b) 后退；(c) 左右转向

表2 数字信号控制小车

| 手指弯曲 | 引脚IN1 | 引脚IN2 | 引脚IN3 | 引脚IN4 | 左电机 | 右电机 | 小车运动状态 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|
| 食指 | 1 | 0 | 1 | 0 | 正转 | 正转 | 前进 |
| 中指 | 1 | 0 | 0 | 1 | 正转 | 反转 | 右转 |
| 无名指 | 0 | 1 | 1 | 0 | 反转 | 正转 | 左转 |
| 小指 | 0 | 1 | 0 | 1 | 反转 | 反转 | 后退 |
| 全弯曲 | 1 | 1 | 1 | 1 | 停止 | 停止 | 停止 |
| 拇指 | | | | | 蜂鸣器工作 | | |

为进一步提高学生的动手能力与实验兴趣，我们将该导电水凝胶控制系统与电脑音乐程序和“贪吃蛇”游戏相结合，并通过同样的方法，将按压水凝胶的动作信号转化为数字信号，传递信息实现了对钢琴按键的模拟，从而控制电脑程序中钢琴的演奏，如图9a。另外，在“贪吃蛇”游戏中通过按压分管不同方向的水凝胶按照同样原理实现了对“贪吃蛇”运动方向的控制，如图9b。该实验与

电脑操作相结合, 更好的满足了实际需求。在这样的实验课程中, 践行了将基础与前沿并重, 理论与实践并重, 传授与启发并重, 多学科交叉融合, 完善了教学方法, 实现了高质量课程体系的构建。

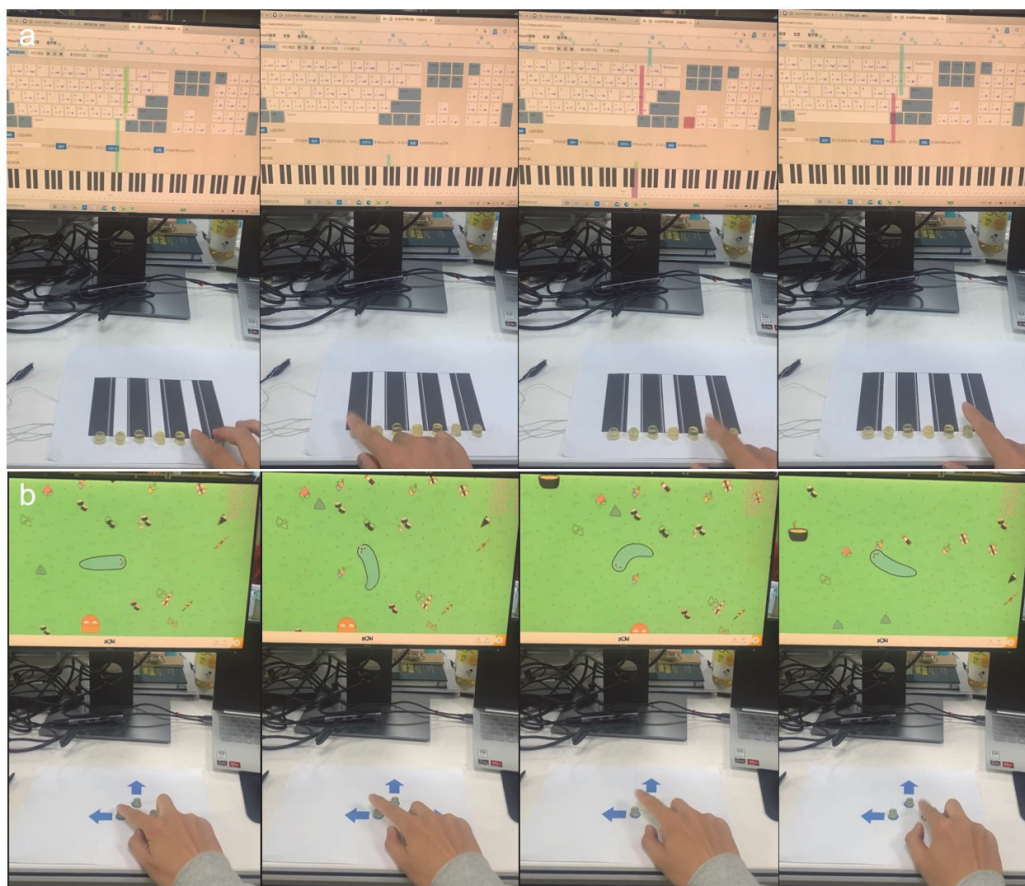


图9 导电水凝胶控制系统

(a) 模拟钢琴琴键; (b) 对“贪吃蛇”游戏进行方向控制

3.4 教学理念与效果

目前, 该“柔性电子创新实验设计”实践课程已经完成部分授课, 并取得了不错的效果。通过综合性的创新实验训练, 开发学生利用所掌握理论知识解决实践中具体问题的能力。该实验课程定位为柔性电子学专业中创新实验课程, 是一门实现本科生向研究生过渡的工具课。通过该创新实验教学有望进一步丰富和完善“四个回归”的教学理念: 回归常识, 对学生严格要求, 夯实学生的学科基础, 努力提高本科教学质量; 回归本分, 潜心教书育人, 努力提高教学教育水平; 回归初心, 培养学生适应时代发展需要的专业素养和过硬本领, 全面提高学生的社会责任感, 创新精神和实践能力; 回归梦想, 努力创新教学理念, 全面提升学生主动思考的能力。该创新实验教学将科研的严谨性与趣味性相结合, 不仅极大促进了学生们对书本中理论知识的深入理解, 同时提高了学生们对前沿领域的研究兴趣。

4 结语

本实验以活性纳米凝胶为交联剂构建导电水凝胶, 极大程度地改善了导电水凝胶的力学性能与传感性能, 进而制备为柔性传感器。SEM与TEM证明纳米凝胶粒径小于100 nm, 且粒径分布均匀。机械性能测试阐明了导电水凝胶制备过程中不同微观结构和交联机制对水凝胶力学性能的影响, 最

终制备导电水凝胶可以被拉伸至500%而不出现明显断裂。研究了纳米结构导电水凝胶作为柔性传感器的传感性能, $\Delta R/R_0$ 约等于70%时, 响应时间仅为327 ms, 并且在频率为1 Hz条件下进行600次连续压缩试验后性能没有明显下降。通过将该水凝胶基柔性传感器集成到电路中制备了用于控制小车移动的智能手套以及用于控制电脑游戏的水凝胶系统, 有利于激发学生对于科研的兴趣和创新探索的科研精神。总之, 在本教学实验设计中, 学生通过自主操作设备进行探究, 能更灵活地掌握并运用高分子溶液聚合、水凝胶成型、应力应变性能表征、传感器的组装以及器件的应用等知识。

参 考 文 献

- [1] 李秋平, 朱琳, 胡敏杰, 罗利娟, 吴昊. 大学化学, **2021**, *36* (6), 2008007.
- [2] 张来英, 苟洪瑀, 庄海妮, 秦宇航, 邱惠娟, 吴伟泰. 大学化学, **2023**, *38* (12), 212.
- [3] 邢璐艺, 张健恒, 郑艺华. 青岛大学学报(工程技术版), **2023**, *38* (3), 88.
- [4] 郑湃, 李成熙, 殷悦, 张荣, 鲍劲松, 王柏村, 谢海波, 王力翠. 机械工程学报, **2023**, *59* (6), 173.
- [5] 鲍伟丰, 齐盼弟, 卢志威. 电源技术, **2023**, *47* (7), 844.
- [6] Miguel, F.; Barbosa, F.; Ferreira, F. C.; Silva, J. C. *Gels* **2022**, *8* (11), 710.
- [7] 李志云, 邢佩雯, 刘敏, 马晓燕. 大学化学, **2016**, *31* (11), 61.
- [8] Palza, H.; Zapata, P.; Angulo-Pineda, C. *Materials* **2019**, *12* (2), 277.
- [9] Kim, H.; Ahn, S.; Mackie, D. M.; Kwon, J.; Kim, S. H.; Choi, C.; Moon, Y. H.; Lee, H. B.; Ko, S. H. *Mater. Today* **2020**, *41*, 243.
- [10] Cui, S.; Zhang, S.; Zhang, F.; Lin, R.; Tang, C.; Jing, X. *Carbohydr. Polym.* **2024**, *323*, 121385.
- [11] Sagdic, K.; Fernández-Lavado, E.; Mariello, M.; Akouissi, O.; Lacour, S. P. *MRS Bull.* **2023**, *48* (5), 495.
- [12] Lavrador, P.; Esteves, M. R.; Gaspar, V. M.; Mano, J. F. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31* (8), 2005941.
- [13] Campea, M. A.; Majcher, M. J.; Lofts, A.; Hoare, T. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31* (33), 2102355.
- [14] Wang, Z.; Wei, H.; Huang, Y.; Wei, Y.; Chen, J. *Chem. Soc. Rev.* **2023**, *52* (9), 2992.
- [15] Zhu, J.; Tao, J.; Yan, W.; Song, W. *Natl. Sci. Rev.* **2023**, *10* (9), 2.
- [16] 王忠善, 肖添远, 刘潇笛, 曹欣雨, 贾文超, 石海强. 中国造纸学报, **2023**, *38* (3), 69.
- [17] 邵长优. 具有强韧自愈性能的纳米纤维素复合水凝胶制备和应用研究[博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [18] 王思永. 海藻酸钙凝胶基仿生人工肌肉的输出力性能提升及机理研究[博士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [19] 董闯. 小分子诱导聚乙烯醇结晶构建强韧水凝胶[博士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [20] Rahmani, P.; Shojaei, A. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2021**, *298*, 102553.
- [21] Wang, L.; Xu, T.; Zhang, X. *Trends Analyt. Chem.* **2021**, *134*, 116130.
- [22] Park, C.; Kim, M. S.; Kim, H. H.; Sunwoo, S.; Jung, D. J.; Choi, M. K.; Kim, D. *Appl. Phys. Rev.* **2022**, *9* (2), 021312.