

丙烯酰胺/液态金属导电水凝胶的制备及性能研究

关新宇, 李昊文, 魏安宁, 穆金城*, 陈亚辉*

塔里木大学化学化工学院, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2025年8月8日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年11月6日

摘要

本文以海藻酸钠(SA)和丙烯酰胺(AM)为基体, 引入碳纳米管(CNT)和液态金属(LM)作为功能填料, 用N,N'-亚甲基双丙烯酰胺作为交联剂, 过硫酸铵为引发剂, 采用自由基聚合相结合的策略, 成功制备了具有优异导电性能的PAM/SA/CNT/LM双网络水凝胶。采用傅里叶红外光谱仪、力学拉伸机和数字万用表等对双网络水凝胶进行测试与表征。结果表明: 液态金属的引入提高了双网络水凝胶的导电性且具有优异的力学性能, 无水氯化钙进一步改善了水凝胶的抗冻抗脱水性。

关键词

水凝胶, 碳纳米管, 液态金属, 应变传感, 导电性

Preparation and Performance Study of Liquid Metal-Based Conductive Hydrogels

Xinyu Guan, Haowen Li, Anning Wei, Jingcheng Mu*, Yahui Chen*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

Received: August 8, 2025; accepted: August 18, 2025; published: November 6, 2025

Abstract

In this study, sodium alginate (SA) and acrylamide (AM) were employed as the matrix materials, with carbon nanotubes (CNT) and liquid metal (LM) innovatively incorporated as functional fillers. Using a free-radical polymerization strategy, we successfully fabricated a double-network conductive hydrogel fiber, PAM/SA/CNT/LM, with outstanding properties. During preparation, N,N'-methylenebisacrylamide was selected as the crosslinking agent, and ammonium persulfate served as the

*通讯作者。

文章引用: 关新宇, 李昊文, 魏安宁, 穆金城, 陈亚辉. 丙烯酰胺/液态金属导电水凝胶的制备及性能研究[J]. 物理化学进展, 2025, 14(4): 591-599. DOI: 10.12677/japc.2025.144056

initiator, constructing a stable three-dimensional network structure. Systematic material characterization confirmed that the synthesized hydrogel possesses an ideal chemical structure and remarkable performance.

Keywords

Hydrogel, Carbon Nanotube (CNT), Liquid Metal (LM), Strain Sensing, Electrical Conductivity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着可穿戴技术的快速发展, 柔性传感器在多个领域展现出广阔的应用前景, 包括健康监测[1]、运动识别[2]以及人机交互[3]等等。柔性传感器的核心优势在于其能够适应复杂的、动态的人体表面运动, 同时保持高灵敏度与测量的精度, 这正是实现与人体无缝集成的关键性能[4]。近年来, 基于水凝胶的柔性传感器因其出色的柔韧性、良好的生物相容性以及优异的耐环境性, 受到了研究者的广泛关注。目前, 柔性传感材料的研究主要集中在以下几个方向: 导电聚合物、碳基材料(如石墨烯和碳纳米管)、金属纳米材料[5]。然而, 在实际应用中, 柔性传感器常常面临复杂的机械变形以及环境因素(如温度、湿度和压力)的干扰, 这些都会显著影响其响应速度和检测精度。

水凝胶作为一种纳米/微米级材料, 具有较高的比表面积, 易于组装成多层级复杂结构, 不仅有助于实现水凝胶器件的小型化, 还能增加传感的区域, 从而满足多样化传感应用的需求。近年来, 研究者已采用多种技术手段成功制备水凝胶, 包括静电纺丝、3D 打印、模板辅助成型等。为进一步赋予其导电性能, 通常在水凝胶基体中引入石墨烯(GO)、碳纳米管(CNT)或 MXene 等高导电性纳米填料[6], 从而获得高柔韧性和导电性的高性能导电水凝胶。然而, 一个关键问题在于柔性水凝胶基质与刚性导电填料之间往往存在界面相容性差的问题, 容易导致应力集中、界面脱粘, 进而削弱水凝胶的整体力学性能, 如拉伸性、韧性, 严重制约了其在可穿戴设备和柔性电子中的实际应用。因此, 如何协同优化导电性、灵敏度与机械稳定性, 设计出兼具优异电学响应特性和强韧力学性能的导电水凝胶, 仍是当前面临的重要挑战和研究重点[7] [8]。共晶镓铟合金(EGaIn)作为一种新型软性导电液态金属(LM), 因其优异的导电性、良好的生物相容性、出色的可变形能力以及较低的毒性, 在可穿戴电子器件领域受到了广泛关注[1]。液态金属不仅可以显著提升水凝胶材料的导电性能, 还能有效适应聚合物基体在拉伸或弯曲过程中的形变, 从而增强材料的柔韧性和整体力学性能[9]。此外, 研究表明, 在超声处理过程中, EGaIn 表面会生成 Ga^{3+} 离子, 这些离子能够与水凝胶中的羧基和羟基发生配位作用, 形成具有能量耗散能力的动态牺牲键, 从而进一步提升材料的韧性和机械强度[10]。为解决这一问题, 研究中常采用多种界面稳定剂来改善 LM 在水凝胶中的分散状态, 例如碳纳米管(CNT)、纤维素纳米纤维(CNF)以及聚多巴胺(PDA)等[11], 这些材料能够有效防止液态金属颗粒的聚集, 提高其在基体中的均匀性与稳定性。其中, 碳纳米管因其较高的长径比、优异的柔韧性和出色的导电性能, 成为增强水凝胶性能的理想选择之一。

基于上述研究背景, 本研究采用模板法结合自由基聚合工艺, 成功制备出一种具有双网络结构的聚丙烯酰胺/明胶/海藻酸钠/碳纳米管/液态金属(PAM/SA/CNT/LM)导电水凝胶纤维[12]。该纤维材料不仅展现出良好的力学性能和优异的导电性, 还被进一步组装为应变传感器, 对其传感性能进行了系统测试。实验结果表明, 该传感器具备优异的应变响应特性[13], 能够灵敏地感知人体运动状态。通过将其贴附于

手指、手腕和膝盖等部位，成功实现了对人体关节运动的实时监测，显示出其在可穿戴健康监测和柔性电子领域的广阔应用前景。

2. 实验部分

2.1. 材料

海藻酸钠(SA, 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司), 羧基化多壁碳纳米管(CNT, 江苏先丰纳米材料科技有限公司), 液态金属(LM, 镓铟合金, 75%镓/25%铟, 东莞市鼎冠金属科技有限公司), 丙烯酰胺(AM)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司(中国上海)。N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)购自天津大茂化学试剂厂, 过硫酸铵(APS)购自天津市北联精细化学品开发有限公司。氯化锂(LiCl)购自上海山蒲化工有限公司。无水氯化钙(CaCl_2)天津市致远化学试剂有限公司提供。所有化学品均为分析纯级, 并按收到的方式使用, 无需进一步纯化。

2.2. PAM/SA/CNT/LM 水凝胶的制备

将少量 LM 与 CNT 粉末放入烧杯中后加入 10 mL 去离子水, 并将烧杯置于冰水浴中冷却, 对烧杯中的混合溶液进行超声处理, 将超声功率调节至 28 kHz, 持续超声 10 分钟后取出。随后向溶液中加入少量 SA(海藻酸钠)、丙烯酰胺(AM), 并在室温下持续磁力搅拌 0.5 h, 以确保充分混合与溶胀。之后依次加入 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)作为交联剂、过硫酸铵(APS)作为引发剂, 迅速搅拌约 30 秒以确保反应均匀启动。随后将混合液迅速转移至聚四氟乙烯模具中, 并将模具置于 60℃烘箱中加热反应 5 h, 完成水凝胶的聚合过程。反应结束后, 取出所得水凝胶样品, 将其分别浸泡于一定浓度的氯化钙(CaCl_2)溶液中, 进行 2 小时的离子交联处理。处理完成后取出样品, 密封保存, 以备后续性能测试与应用研究。

2.3. 光谱和形态分析

样品的傅里叶变换红外(FTIR)光谱使用 VQF-530A 傅里叶红外光谱仪(AC 220 V $\pm$ 22 V 50 Hz $\pm$ 18%, 北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司), 频率范围为 400–4000 cm^{-1} 。

2.4. 机械测试

采用东莞市智取精密仪器有限公司电动拉力试验机(多功能版), 在室温下进行单轴拉伸试验。拉伸速度设定为 35 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。将水凝胶样品制成矩形(24 mm $\times$ 4 mm $\times$ 2.5 mm)。通过应力–应变曲线估算断裂功。耗散能量由加载–卸载曲线之间的面积计算得到。

2.5. 附着力测试

对水凝胶的界面粘附性能进行了系统测试, 重点评估其不同基材上的粘接强度, 包括玻璃、木材、钢。实验中, 将水凝胶样品裁剪为尺寸为 30 mm $\times$ 30 mm 的方片, 并将其粘贴于两块相同材质的基材之间, 构建对称粘接结构。粘接性能测试采用电动拉力试验机进行拉伸剪切试验, 拉伸速率为 20 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。通过记录加载过程中达到的最大力值, 并结合粘接界面的实际接触面积, 计算得出相应的粘接强度。

2.6. 电信号测试

使用数字万用表(Keithley, 2400)测量了导电水凝胶的电信号变化为了检测人体的手指屈曲、手腕屈曲、喉咙吞咽动作和心跳脉冲运动, 将水凝胶样品切成圆圈(半径 = 5 mm; 厚度 = 1 mm), 用 PDMS 密封, 防止水凝胶蒸发并粘附在人体的相应部位。用两块铜箔与铜丝焊接, 将圆形水凝胶的末端夹住。这两根铜线的另一端被连接了起来到 Keithley, 2400 的正负终端。这个水凝胶传感器的相对电阻也发生了

变化用 Keithley, 2400 在 30 V 的恒定电压下进行检测, 基于对不同的张力和身体运动。相对变化在阻力中, 由式 1 给出

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \times 100\%$$

R_0 为初始电阻, R 为受到变形后的电阻。

3. 结果与讨论

1) 傅里叶红外光谱分析

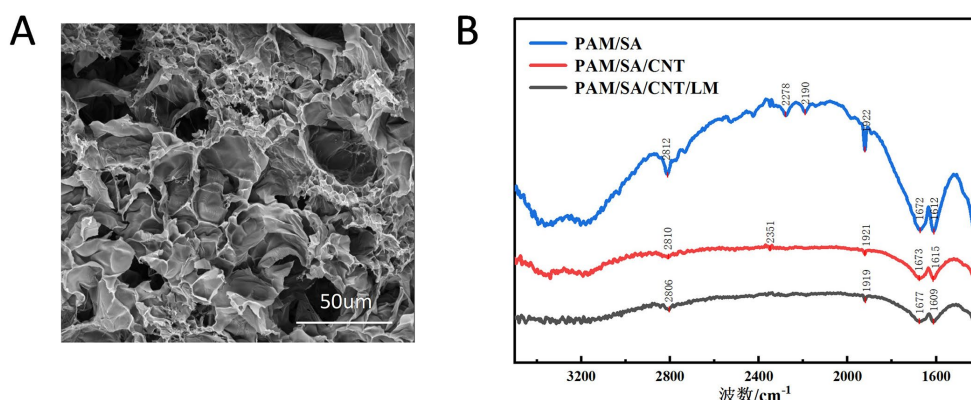


Figure 1. (A) SEM images of PAM/SA/CNT/LM hydrogel; (B) FTIR spectra of PAM/SA, PAM/SA/CNT, and PAM/SA/CNT/LM hydrogel fibers

图 1. (A) PAM/SA/CNT/LM 水凝胶 SEM 图像; (B) PAM/SA、PAM/SA/CNT 和 PAM/SA/CNT/LM 水凝胶纤维的红外光谱图

如图 1(A)所示, CNT 作为高强度、高模量的纳米材料, 能够显著提升复合材料的力学性能。其均匀分散在基体中, 形成物理交联点, 限制裂纹扩展并提高材料的整体强度和韧性。此外, 多孔结构也有助于吸收和分散外力, 进一步增强材料的抗冲击性能。LM 的引入使得材料具备动态可逆的变形能力。在受到外力作用时, LM 可以在孔隙中流动, 从而耗散能量; 而在应力释放后, LM 又可以迅速恢复到原始状态, 使材料实现自修复。因此, 含有 LM 的复合材料表现出优异的自恢复性能。CNT 本身具有良好的导电性, 当其在基体中形成连续的网络结构时, 可以显著降低材料的电阻。同时, LM 作为一种高导电性的金属, 在孔隙中填充并与 CNT 接触, 进一步增强了导电路径的连续性和稳定性。由于 CNT 和 LM 在基体中的协同作用, 复合材料展现出对机械变形的高度敏感性。如图 1B 所示, PAM/SA (蓝色曲线) 在 2812 cm^{-1} 处有一个强吸收峰, 这是由于聚丙烯酰胺(PAM)中的 C-H 伸缩振动。在 1672 cm^{-1} 和 1612 cm^{-1} 处有两个明显的吸收峰, 分别对应于酰胺 I 带(C=O 伸缩振动)和酰胺 II 带(N-H 弯曲振动), 表明 PAM 分子链中的酰胺基团。在 1922 cm^{-1} 处有一个吸收峰, 可能与 N-H 弯曲振动有关。PAM/SA/CNT (红色曲线) 在 2810 cm^{-1} 处的吸收峰与 PAM/SA 相似, 但强度略有降低, 这可能是由于 CNT 的引入对 C-H 伸缩振动产生了一定的影响。在 1673 cm^{-1} 和 1615 cm^{-1} 处的吸收峰与 PAM/SA 类似, 但强度略有增加, 表明 CNT 的加入可能增强了酰胺基团的振动。在 1919 cm^{-1} 处的吸收峰与 PAM/SA 相比, 强度略有降低, 可能与 CNT 的引入改变了 N-H 弯曲振动的环境有关。PAM/SA/CNT/LM (黑色曲线) 在 2806 cm^{-1} 处的吸收峰进一步减弱, 表明 LM 的加入对 C-H 伸缩振动产生了更大的影响。在 1677 cm^{-1} 和 1609 cm^{-1} 处的吸收峰与前两种材料相比, 位置略有偏移, 强度也有所变化, 表明 LM 的加入对酰胺基团的振动产生了影响。在 1919 cm^{-1} 处的吸收峰几乎消失, 表明 LM 的加入显著改变了 N-H 弯曲振动的特性。

2) 水凝胶的力学性能

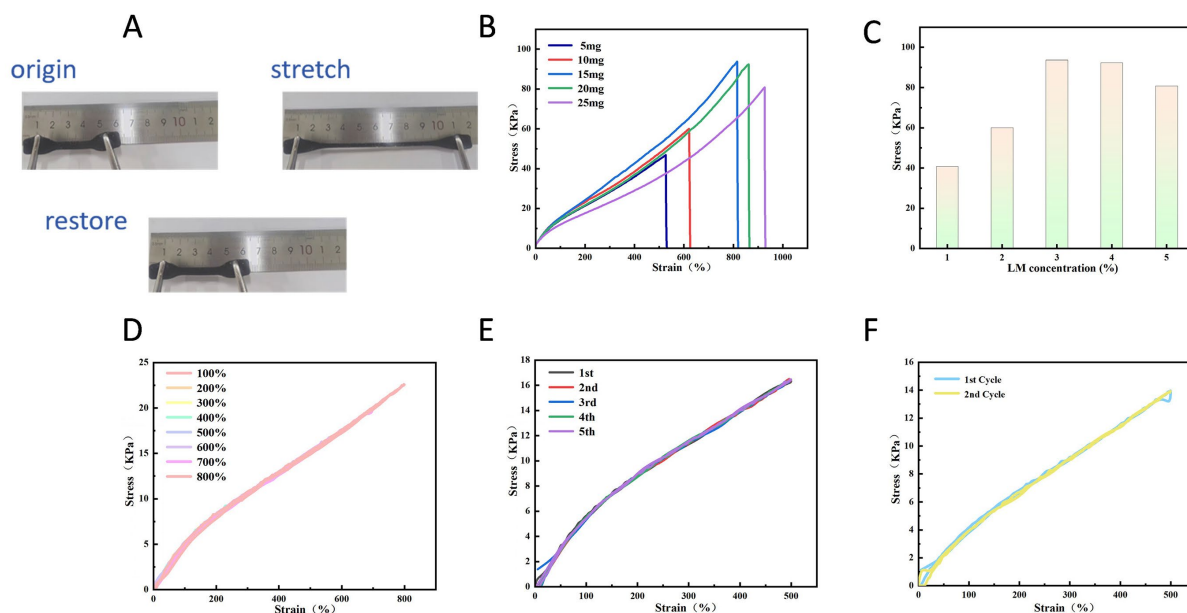


Figure 2. (A) Photographs of hydrogels with varying liquid metal content during stretching and recovery; (B) Effect of liquid metal content on mechanical properties of hydrogels; (C) Maximum stress of hydrogels with different liquid metal contents; (D) Cyclic tensile curves of hydrogels at 100%~800% strain; (E) Five consecutive cycles at 500% strain; (F) Self-recovery test after 120 s resting period.

图 2. (A) 不同液态金属含量水凝胶的照片被拉伸和恢复; (B) 不同液态金属含量对水凝胶力学性能的影响; (C) 不同液态金属含量水凝胶的最大应力; (D) 100%~800%应变下水凝胶的循环拉伸曲线; (E) 500%应变下水凝胶的 5 次循环; (F) 120 s 静息后的自恢复试验

机械性能对水凝胶电子皮肤至关重要。如图 2(A)所示, 水凝胶表现出优异的拉伸能力, 可以维持拉伸而不损坏。在研究过程中观察到, 随着 LM 含量的逐步增加, 水凝胶表现出断裂应力应变及吸收能量, 表现先上升后下降的趋势如图 2(B)。当 LM 浓度达到 15 mg 时, 它的机械性能达到最佳状态。其拉伸强度达到 93.7 kPa, 断裂伸长率高达 815.8%, 断裂功则高达 0.664 MJ/m³。因此在后续实验中, 我们均采用含有 15 mgLM 的水凝胶。提升水凝胶的韧性主要得益于其独特的三螺旋结构, 三螺旋结构可以有利于能量耗散。然而一旦 LM 含量过于密集, 这种增强效果便会减小, 导致机械性能的衰退。通过连续的加载-卸载拉伸试验来考察其能量耗散情况。滞回线随应变基本不变, 如图 2(D), 每次加载曲线与前一次卸载曲线接近且基本重叠, 说明加载过程中破坏的物理键在卸载后得到极大部分恢复。相同伸长率为 500% 的条件下, 经过第五个周期后, 磁滞回线基本重合, 耗散能量基本保持不变, 如图 2(E)。为评估水凝胶的自恢复性能, 进行了多周期的加载-卸载拉伸测试, 并设置 120 秒的静置恢复时间间隔(如图 2(F)所示)。水凝胶表现出优异的恢复能力, 其应力恢复率达到 97.82%, 表明材料在短时间内即可实现力学响应的快速重建。这说明在足够的时间内, 水凝胶内部的动态键(如氢键、离子相互作用等)能够充分重构, 使网络结构几乎完全恢复至初始状态, 从而实现力学性能的高度自愈合。该结果充分体现了水凝胶出色的自恢复特性, 为其在可重复使用、高耐久性柔性电子器件 and 智能软体传感器中的应用提供了坚实基础。

这一结果证实, 水凝胶通过动态氢键实现了高效的能量耗散与可逆网络重建, 使其在反复形变条件下仍能保持结构完整性与功能稳定性, 适用于高耐久性柔性电子器件和可穿戴传感器等应用。

3) 水凝胶的自粘性能

水凝胶的粘附性能对于柔性传感器与人体皮肤的稳定结合至关重要, 它直接影响设备的便携性、穿

戴舒适性以及传感精度。图 3(B)显示了水凝胶对木头、铜、玻璃、塑料和橡胶等不同材料的良好粘附能力。这种优异的粘附性主要归因于 LM(液态金属)的引入,它们通过氢键、离子键以及静电相互作用等多种机制,增强了水凝胶与基材之间的界面结合力。这些多尺度相互作用协同作用,使水凝胶在不同表面均能实现稳定的粘附。为进一步量化粘附性能,采用 20 mm/min 的拉伸速率进行了 180°剪切粘附测试(图 3(A))。结果显示,制备的水凝胶展示了对多种材料表面具有优异的自粘附性能,这使得它在可穿戴电子产品领域展现了潜在的应用价值。为了进一步量化这种自粘附性能,我们通过搭剪试验评估了其粘接强度。根据图 3(C)和图 3(D)的结果显示,水凝胶对橡胶、塑料、玻璃、铜片以及木材的粘接强度分别达到了 0.51 KPa、1.01 KPa、3.00 KPa、3.56 KPa 和 4.19 KPa。该水凝胶所具备的自粘特性主要归因于其内部形成的氢键以及水凝胶与基材之间建立的配位键。这些相互作用不仅保证了水凝胶与不同材料间的稳固结合,也为其实现多功能应用提供了可能。特别是,这种组合机制增强了水凝胶对硬质及柔性基材的适应性,使其成为开发可穿戴电子设备的理想选择。

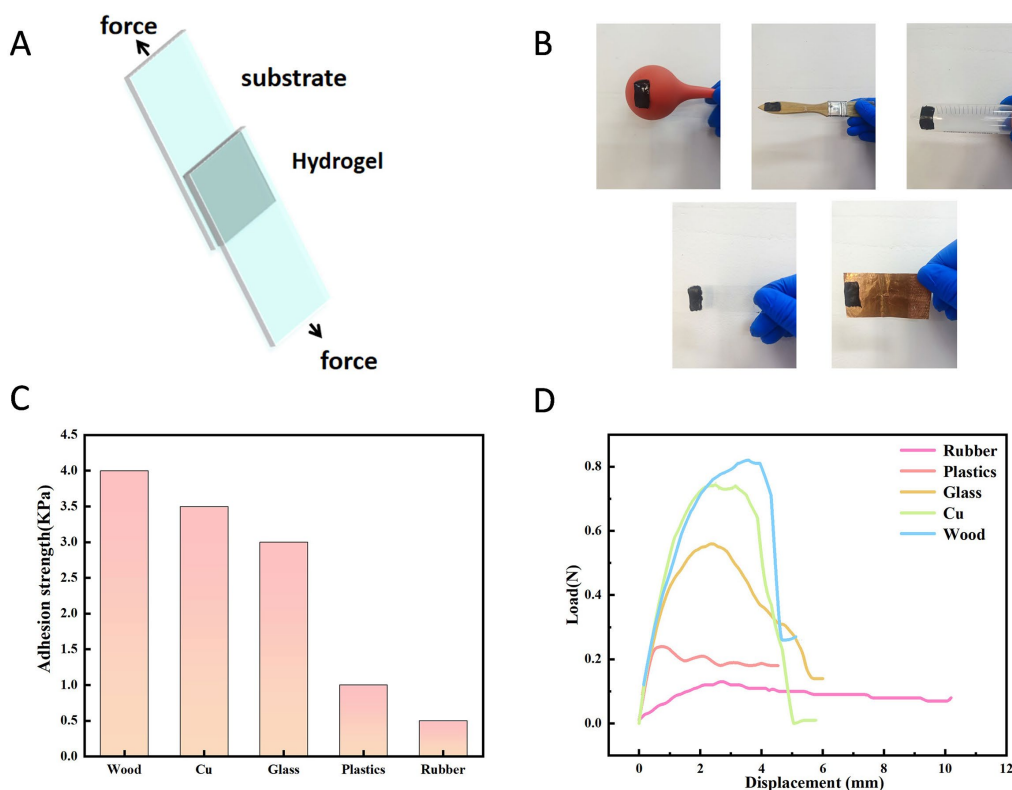


Figure 3. (A) Schematic diagram of shear adhesion test; (B) Adhesion images on different substrates; (C) Adhesion strength of hydrogels on various substrates; (D) Peel-off curves of hydrogels on different substrates
图 3. (A) 剪切粘附试验示意图; (B) 在不同基材上的附着图像; (C) 水凝胶在不同底物上的附着强度; (D) 水凝胶在不同底物上的剥离曲线

4) 水凝胶的耐环境性能

为探究 PAM/SA/CNT/LM 水凝胶的低温耐受性能,我们将含有水凝胶样品分别置于不同温度环境 (-20°C 、 -10°C 、 0°C 和 20°C) 中恒温处理 6 小时,随后观察其物理状态与功能表现。如图 4(A)~(D)所示,该水凝胶在 -20°C 至 20°C 的宽温范围内仍能保持正常发光特性,未出现性能中断或结构破坏。值得注意的是,在低至 -20°C 的极端条件下,水凝胶仍未发生结冰现象,这表明配方中的钙离子成功发挥了防冻剂的作用,有效抑制了水分子的结晶,维持了水凝胶内部的柔韧性和离子导电性。此外,为评估其长期环

境稳定性, 我们采用称重法测试了水凝胶的保水性能, 结果如图 5(E)所示。随着钙离子含量的增加, 不同钙离子水凝胶在 5 天后的保水率呈现缓慢下降的趋势。当钙离子添加量为 1.0 wt% 时, 保水率最高, 可达约 95%, 显著优于其他钙离子含量的样品。这说明适量的氯化钙能够通过增强水凝胶的三维网络结构、引入更多亲水基团以及促进分子间相互作用, 从而有效锁住水分, 提升结构稳定性与保水能力。综上所述, 水凝胶中发挥了协同效应: 这种多功能协同机制使该水凝胶在极端低温环境和长期使用条件下均表现出卓越的稳定性, 为其在可穿戴电子、户外传感及寒冷地区监测等领域的应用提供了有力支持。

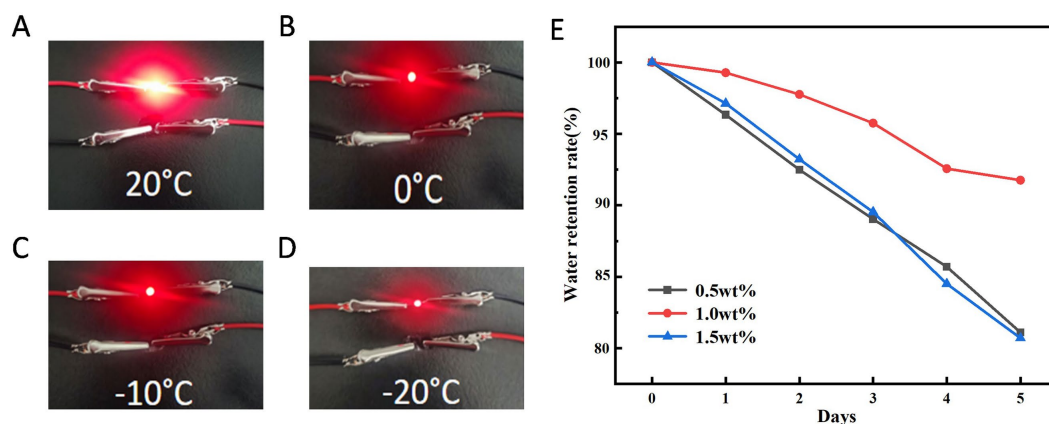


Figure 4. (A)~(D) Illumination intensity of small bulbs powered by hydrogels at different temperatures; (E) Water retention rate of hydrogels with varying calcium ion concentrations

图 4. (A)~(D) 水凝胶在不同温度下的小灯泡发光程度; (E) 不同钙离子浓度水凝胶的保水率

5) 水凝胶的传感性能

液态金属的加入不仅增强了水凝胶的韧性, 还提高了水凝胶的导电性, 使应变传感器更加灵敏和稳定, 如图 5(A)所示。鉴于 PAM/SA/CNT/LM 水凝胶传感器在应变状态下电阻会发生变化, 且该传感器具有高灵敏度, 我们将其分别附着手腕、手指和咽喉部位, 以验证其在实时监测人体运动方面的可行性, 实验情况如图 5(B)~(D)所示。通过将这种高性能的水凝胶传感器贴附在人体的不同部位, 可以有效地捕捉到各部位在进行各种动作时的细微变化。例如, 当附着在手腕和手指上时, 传感器能够精确地检测到关节的运动, 这对于手势识别或手部康复训练中的运动监测非常有用。而当传感器应用于咽喉区域时, 则可用于监测吞咽或说话时喉咙的细微动作, 为语音识别或咽喉健康监测提供数据支持。这些实验结果展示了 PAM/SA/CNT/LM 水凝胶纤维传感器在开发可穿戴健康监测设备和人机交互界面等方面的巨大潜力。此外, 对 PAM/SA/CNT/LM 水凝胶纤维传感器施加一系列不同幅度的拉伸应变(10%至 40%), 并实时监测其电阻响应信号, 结果如图 5(E)所示。传感器能够清晰、准确地区分各个应变水平, 并同步产生相应的相对电阻变化($\Delta R/R_0$), 表现出优异的应变分辨能力。这一特性表明该传感器具有高灵敏度和快速响应动力学, 能够实现对机械变形的实时、精确追踪。为进一步评估其在实际应用中的可靠性, 我们在 10% 拉伸应变条件下对传感器进行了 100 次连续的加载-卸载循环测试, 结果如图 5(F)所示。在整个耐久性测试过程中, 传感器的相对电阻变化保持高度稳定, 未出现明显衰减或漂移, 说明其导电网络结构在反复形变下仍能维持完整性。该水凝胶传感器不仅具备出色的灵敏度和响应速度, 还具有优异的长期稳定性与机械耐久性, 适用于可穿戴电子设备中对动态生理或运动信号的持续、可靠监测。从图 5(G)可以看出, 导电水凝胶的 GF 值在不同应变区间内表现出明显的差异。这种现象可能与材料内部结构的变化有关: 低应变区: 在较小的应变下, 材料内部的导电网络主要通过微小的几何变形和接触点的变化来响应外力, 导致电阻变化较为温和。高应变区: 当应变增大到一定程度时, 材料内部的电电路径可能发

生更显著的重构，如 CNT 或 LM 的重新排列、断裂和再连接等，从而引起电阻的快速变化。

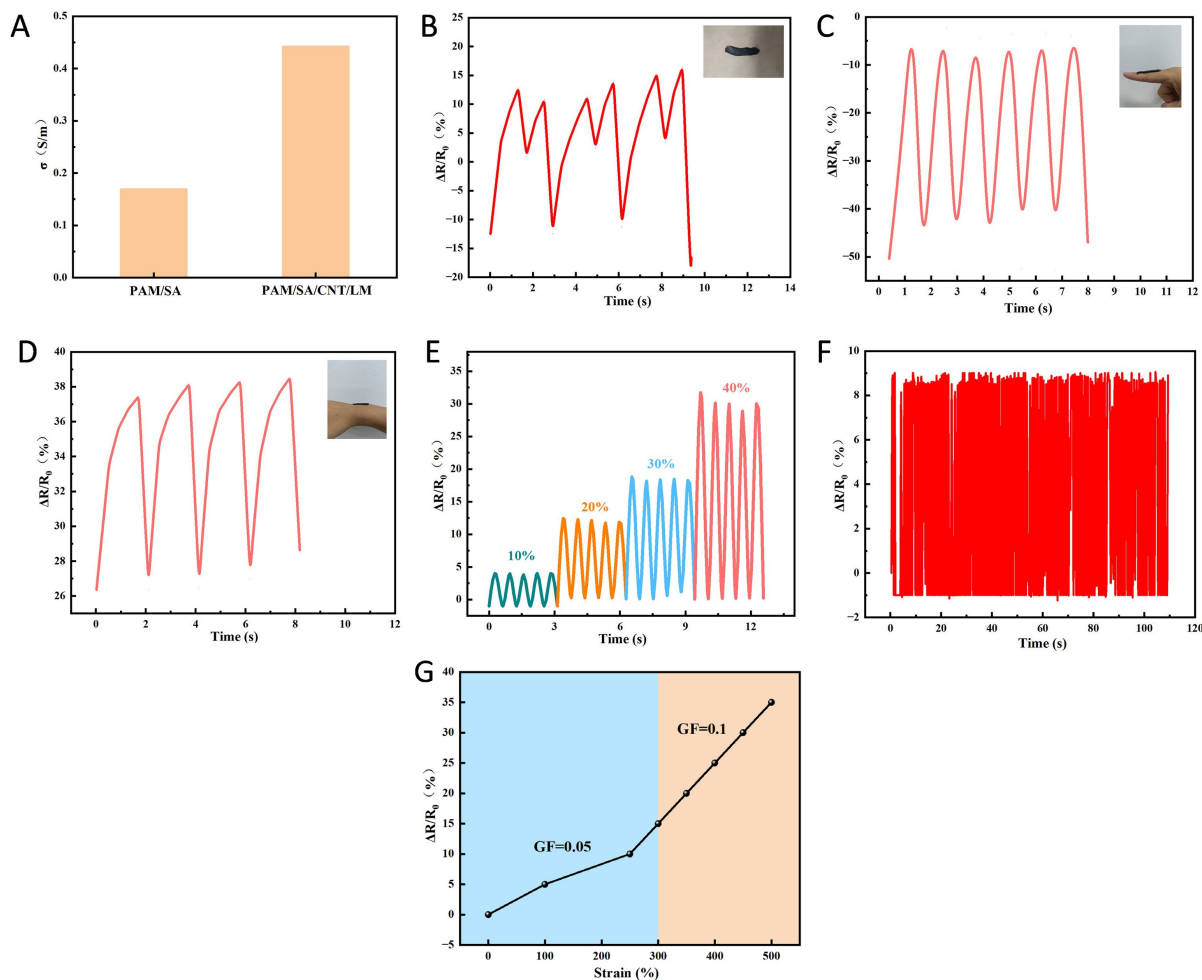


Figure 5. (A) Electrical conductivity of PAM/SA and PAM/SA/CNT/LM conductive hydrogels; Strain sensing performance of hydrogels monitoring: (B) Hydrogel sensing performance throat, (C) Finger bending, and (D) Wrist flexion; (E) Relative resistance changes under different strain deformations; (F) Cyclic stability test showing relative resistance changes over 100 cycles at 10% strain; (G) GF value of PAM/SA/CNT/LM conductive hydrogel

图 5. (A) PAM/SA 和 PAM/SA/CNT/LM 导电凝胶的电导率; (B) 水凝胶的传感性能喉咙; (C) 手指; (D) 手腕; (E) 水凝胶在不同形状变量下的相对电阻变化; (F) 水凝胶在 10%应变下 100 次循环的相对电阻变化; (G) PAM/SA/CNT/LM 导电水凝胶 GF 值

4. 结论与展望

以海藻酸钠(SA)和丙烯酰胺(AM)为基体，引入碳纳米管(CNT)和液态金属(LM)作为功能填料制备的双网络水凝胶，具有良好的力学性能，其拉伸强度达到 93.7 kPa，断裂伸长率高达 815.8%，表明材料具有优异的柔韧性和机械强度。在导电性能方面，测得电导率为 0.441 S/m 具有良好的导电性。特别值得关注的是，该水凝胶展现出优异的应变传感性能，表现出显著的应变响应特性。经过多次循环测试，材料展现出良好的稳定性和可靠性，验证了其在实际应用中的耐用性。本研究成功将该水凝胶应用于人体运动监测领域。实验证明，该传感器能够精准地监测手指弯曲、手腕转动和喉咙震动等各种人体运动信号，展现出广阔的应用前景。这种高性能导电水凝胶的研发为柔性电子器件和可穿戴设备的发展提供了新的材料选择和技术支持。

基金项目

- 1) 2024 年兵团本科教育教学改革研究项目“基于《化工环保与安全》课程建设探索服务南疆经济发展的产学研合作创新模式”(项目编号: BTBKXM-2024-Y18)。
- 2) 塔里木大学第五批本科课程思政示范项目, 项目编号: TDKCSZ22516。

参考文献

- [1] Liu, Y., Wang, F., Hu, Z., Li, M., Ouyang, S., Wu, Y., *et al.* (2024) Applications of Cellulose-Based Flexible Self-Healing Sensors for Human Health Monitoring. *Nano Energy*, **127**, Article ID: 109790. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109790>
- [2] Ren, J., Wu, Z., Wang, B., Zheng, L., Han, S. and Hu, J. (2024) Multifunctional Chitosan-Based Composite Hydrogels Engineered for Sensing Applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, **278**, Article ID: 134956. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134956>
- [3] Yue, X., Wang, X., Shao, J., Wang, H., Chen, Y., Zhang, K., *et al.* (2024) One-Dimensional Flexible Capacitive Sensor with Large Strain and High Stability for Human Motion Monitoring. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 59412-59423. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c14974>
- [4] Fu, C., Ni, Y., Chen, L., Huang, F., Miao, Q. and Huang, L. (2022) Design of Asymmetric-Adhesion Lignin-Reinforced Hydrogels Based on Disulfide Bond Crosslinking for Strain Sensing Application. *International Journal of Biological Macromolecules*, **212**, 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.101>
- [5] Huang, G., Guo, H., Tang, Z., Peng, S., Liang, H., Meng, G., *et al.* (2023) Tough Hydrophobic Hydrogels for Monitoring Human Moderate Motions in both Air and Underwater Environments. *Chemistry of Materials*, **35**, 5953-5962. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c00867>
- [6] Zhang, Y., Yuan, B., Zhang, Y., Cao, Q., Yang, C., Li, Y., *et al.* (2020) Biomimetic Lignin/Poly(ionic Liquids) Composite Hydrogel Dressing with Excellent Mechanical Strength, Self-Healing Properties, and Reusability. *Chemical Engineering Journal*, **400**, Article ID: 125984. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125984>
- [7] Zhou, L., Li, Y., Xiao, J., Chen, S., Tu, Q., Yuan, M., *et al.* (2023) Liquid Metal-Doped Conductive Hydrogel for Construction of Multifunctional Sensors. *Analytical Chemistry*, **95**, 3811-3820. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c05118>
- [8] Jiang, L., Lu, H., Cui, W. and Ran, R. (2025) Physical Hydrogel Evaporators with Uniformly Dispersed Hydrophobic Components for Freshwater and Electricity Cogeneration. *Chemical Engineering Journal*, **503**, Article ID: 158431. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158431>
- [9] Dong, J., Hou, J., Peng, Y., Zhang, Y., Liu, H., Long, J., *et al.* (2024) Breathable and Stretchable Epidermal Electronics for Health Management: Recent Advances and Challenges. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2409071. <https://doi.org/10.1002/adma.202409071>
- [10] Cheng, Y., Zang, J., Zhao, X., Wang, H. and Hu, Y. (2022) Nanocellulose-Enhanced Organohydrogel with High-Strength, Conductivity, and Anti-Freezing Properties for Wearable Strain Sensors. *Carbohydrate Polymers*, **277**, Article ID: 118872. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118872>
- [11] Li, G., Li, C., Li, G., Yu, D., Song, Z., Wang, H., *et al.* (2021) Development of Conductive Hydrogels for Fabricating Flexible Strain Sensors. *Small*, **18**, Article ID: 2101518. <https://doi.org/10.1002/sml.202101518>
- [12] Wu, M., Wang, X., Xia, Y., Zhu, Y., Zhu, S., Jia, C., *et al.* (2022) Stretchable Freezing-Tolerant Triboelectric Nanogenerator and Strain Sensor Based on Transparent, Long-Term Stable, and Highly Conductive Gelatin-Based Organohydrogel. *Nano Energy*, **95**, Article ID: 106967. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.106967>
- [13] Liu, Y., Chen, D., Gu, P., Liu, Y., Wang, B., Xu, X., *et al.* (2025) Wearable Flexible Sensors Based on Dual-Network Ionic Hydrogels with Xanthan Gum/Sodium Alginate/Polyacrylamide/Gallium Indium Alloy. *International Journal of Biological Macromolecules*, **309**, Article ID: 142749. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142749>