动态双网络水凝胶的制备及其柔性传感应用研究

廖小玲[1],王翠凤[1],吴启锐[2],王 涛[1]*

(1.福建信息职业技术学院智能制造学院,福建 福州 350003;2.中国科学院福建物质结构研究所,福建 福州 350003)

摘 要:柔性可穿戴设备被广泛地应用于人工智能、健康监测和仿生电子皮肤等领域。然而,柔性传感器存在力学性能低、导电性能弱以及传感性能差等问题,限制其在可穿戴设备领域的应用。研究提出动态双网络协同强化理念,通过MXene纳米片与聚乙烯醇(PVA)、丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)的可控自组装,成功构建具有梯度互穿结构的PVA/聚丙烯酰胺-丙烯酸(PAMAA)/MXene(PPM)水凝胶。PPM水凝胶表现出优异的导电性和力学性能,拉伸应变为2 052%,拉伸强度为1.29 MPa,能量耗散率小于8%,电导率为5.72 S/m。利用PPM水凝胶制备可穿戴柔性传感器。该传感器能够精准响应不同变形量和应变速率下的信号变化,并成功用于人体运动监测。研究为柔性传感技术提供了新的实现途径。

关键词:柔性传感器;可穿戴设备;水凝胶;MXene

中图分类号:TP212.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0079-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.014

Study on Preparation of Dynamic Double Network Hydrogel and Its Application in Flexible Sensing

LIAO Xiaoling[1], WANG Cuifeng[1], WU Qirui[2], WANG Tao[1]*

(1. Intelligent Manufacturing College, Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350003, China;
2. Fujian Institute of Matter Structure, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Flexible wearable devices have been widely applied in fields such as artificial intelligence, health monitoring, and biomimetic electronic skin. However, flexible sensors suffer from low mechanical properties, weak electrical conductivity, and poor sensing performance, which limit their applications in the wearable device field. The study proposed a dynamic dual-network synergistic reinforcement concept. Through the controllable self-assembly of MXene nanosheets with polyvinyl alcohol (PVA), acrylic acid (AA), and acrylamide (AM), a PVA/poly(acrylamide-*co*-acrylic acid) (PAMAA)/MXene (PPM) hydrogel with a gradient interpenetrating structure was successfully constructed. The PPM hydrogel exhibited excellent electrical conductivity and mechanical properties. The tensile strain was 2 052%, the tensile strength was 1.29 MPa, the energy dissipation rate was less than 8%, and the electrical conductivity was 5.72 S/m.. A wearable flexible sensor was fabricated using the PPM hydrogel. This sensor accurately responded to signal changes under different deformation magnitudes and strain rates, and was successfully applied to human motion monitoring. The study provides a novel implementation pathway for flexible sensing technology.

Keywords: Flexible sensor; Wearable devices; Hydrogel; MXene

目前,柔性智能可穿戴电子设备在健康监测、人机交互及仿生电子皮肤等领域的突破性应用,正推动生物电子技术的革新进程[1-3]。作为可穿戴系统的核心组件,柔性传感器通过将机械刺激实时转换为可量化电信号,为精准解析人体生理特征提供关键技术支撑[4-6]。在众多候选材料中,导电水凝胶凭借其本征可拉伸性、结构柔韧性和生物相容性优势,被视为构建高性能传感器的理想基材[7-10]。然而,现有水凝胶基传感器面临力学、电学和传感性能难

收稿日期Submitted date 2025-08-23;修回日期Revised date 2025-09-26;录用日期Accepted date 2025-10-28

基金项目:福建省增材制造创新中心开放基金项目(ZCZZ211-04)

*联系人,110524@fjpit.edu.cn

引用本文:廖小玲,王翠凤,吴启锐,等.动态双网络水凝胶的制备及其柔性传感应用研究[J].塑料科技,2026,54(8):79-84.

Citation: LIAO X L, WANG C F, WU Q R, et al. Study on preparation of dynamic double network hydrogel and its application in flexible sensing[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 79-84.

以协同提升的核心瓶颈[11-15]。为提升导电性而引入高含量导电填料(如纳米颗粒、碳材料、液态金属和聚合物等)的策略,虽可构建有效渗流网络,却导致材料延展性急剧下降及界面应力集中,致使传感稳定性与循环寿命显著劣化。这种性能互斥现象严重制约其在动态生理信号监测中的实际应用[16-17]。为突破上述瓶颈,研究人员通过复合体系设计进行多维度探索。AAKYIIR等[18]开发的二维过渡金属碳氮化物(MXene)/硅氧烷复合凝胶虽实现了1.2 S/m的高电导率,但其断裂强度(0.25 MPa)与延展性(应变<40%)难以匹配动态监测需求。LIU等[19]构建的聚乙烯醇(PVA)/聚苯胺/MXene三元体系虽展现了4.1 MPa的超高韧性,却因电导率不足(0.22 S/m)阻碍了实时信号传输效率。以上研究表明,传统复合策略难以实现力学-电学性能的协同优化,其根本原因在于刚性填料与柔性基体的界面相容性缺陷以及高填料含量引发的网络拓扑结构破坏[20-26]。

本文提出动态双网络协同强化机制,通过MXene纳米片与PVA、丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)的可控自组装,成功构建具有梯度互穿结构的PVA/聚丙烯酰胺-丙烯酸(PAMAA)/MXene (PPM)水凝胶,以满足人体健康监测等领域的应用需求。通过优化MXene的含量,开发一系列兼具超高延展性、优异韧性和卓越导电性的PPM水凝胶。同时,基于MXene与聚合物双网络之间可逆的动态非共价键交联,该水凝胶被赋予良好的回弹性和低能量耗散特性。上述设计使PPM水凝胶在个性化健康监护与可穿戴设备等领域展现出显著的应用潜力。

1 实验部分

1.1 主要原料

PVA,1799,上海麦克林生化科技有限公司;AA,质量分数98%,上海麦克林生化科技有限公司;AM,分析纯,质量分数≥99.5%,上海麦克林生化科技有限公司;光引发剂苯基双(2,4,6-三甲基苯甲酰)、氧化膦(Irgacure 819),分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;MXene粉末,江苏先丰纳米材料科技有限公司。

1.2 仪器与设备

扫描电子显微镜(SEM),JSM-7600F,日本电子株式会社;X射线衍射仪(XRD),DY5261Xpert3,美国CEM公司;万能材料试验机,AG-X plus-50N,日本株式会社岛津制作所;数字源表,Keithley 2450,美国Keithley公司;电化学分析仪,CHI660E,上海辰华仪器有限公司。

1.3 样品制备

图1为PPM水凝胶的物相组成及其相互作用。从图1可以看出,通过简单的一锅法合成PPM水凝胶。表1为PPM水凝胶的配方。首先,在装有1 g的PVA的圆底烧瓶中加入10 g去离子水,在95 ℃的油浴锅中搅拌直至溶解,形成透明的水溶液。然后,分别加入5 g AM和0.5 g AA至烧瓶中,继续搅拌30 min。此外,将不同质量分数(相对于PVA的质量)的MXene粉末和1%氧化膦加入溶液中搅拌2 h,形成均匀的黑色液体,并通过针尖超声进一步促进MXene的分散。最后,将PVA/AM/AA/MXene的混合物缓慢注射到玻璃模具中,将得到的溶液置于405 nm波长的紫外灯室中,持续45 min,直至凝胶化,得到最终的PPM水凝胶。

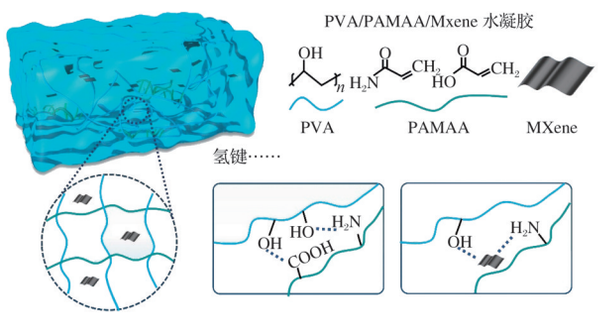


图1 PPM水凝胶的物相组成及其相互作用

Fig.1 Phase composition and interaction of PPM hydrogel

表1 PPM水凝胶的配方

Tab.1 Formula of PPM hydrogel

样品	m_{PVA}/g	m_{AA}/g	m_{AM}/g	w_{MXene}/%
1	1	0.5	5	0.5
2	1	0.5	5	1.0
3	1	0.5	5	1.5
4	1	0.5	5	2.0

1.4 性能测试与表征

力学性能测试:采用万能材料试验机对试件的力学性能进行了测量,试件规格满足GB/T 528—2009的要求,为60 mm的哑铃形试样。仪器的工作速度保持100 mm/min。测量得到的位移-载荷数据,进一步计算得到试件的应力和应变。

$$\sigma_0 = F_0/A_0 \tag{1}$$

$$\varepsilon = \Delta l/l_0 \tag{2}$$

式(1)~式(2)中:σ_0为应力,MPa;F_0为试件所受的载荷,N;A_0为载荷作用在试件上的横截面积,mm^2;ε为应变;Δl为试件变形长度,mm;l_0为试件的原始标距,mm。

相对电阻变化率($\Delta R/R_0$)测试:将组装的传感器连接在数字源表上,记录电阻的实时变化,从而计算得到$\Delta R/R_0$和灵敏度。

电导率(σ)测试:将制备的试件连接至电化学分析仪,对试件进行的阻抗分析,σ计算公式为:

$$\sigma = L/AR_\varepsilon \tag{3}$$

式(3)中:σ为电导率,S/m;L为电极之间的凝胶厚度,mm;A为凝胶样品的面积,cm^2。

2 结果与讨论

2.1 PPM水凝胶的制备及其物相分析

针对柔性传感器材料普遍存在的力学强度低、导电性差及动态响应迟缓等问题,本研究创新性地构建了基于PVA/PAMAA双网络基体的复合水凝胶体系。在基质中

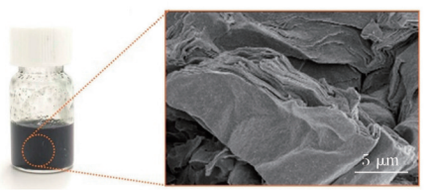
引入MXene二维材料，经过溶解、搅拌和超声混合后，良好地分散在溶液中，赋予其高导电性能。利用光固化诱导聚合的方法，成功制备出PPM水凝胶。在PPM凝胶体系中，PVA链和PAMAA链共同组成了凝胶骨架，其中的酰胺基团(—$CONH_2$)、羧酸基团(—COOH)与羟基(—OH)与MXene表面官能团(—O、—F)之间通过氢键联结，形成具有优异力学性能的柔性材料。

图2为PPM水凝胶前驱液的光学图像、MXene的SEM图像以及PPM水凝胶、MXene的XRD谱图。从图2a可以看出，MXene粉末分散在单体溶液中，形成黑色不透明的前驱体。从图2b可以看出，MXene片层状的微结构暴露出足够的比表面积，能够有效地与聚合物网络形成强有力的键合作用。从图2c可以看出，MXene在7°处出现特征衍射峰，但制备成PPM凝胶后，7°处对应的衍射峰消失，表明MXene被较好地分散在凝胶网络中。

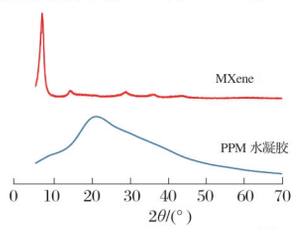
2.2 PPM水凝胶的力学性能分析

力学性能作为关键的参数，在柔性传感领域起着至关重要的作用，优异的力学性能能够响应不同载荷环境下的外力刺激。通过一锅法合成的PPM双网络水凝胶显示出超强的柔韧性和可拉伸性。

图3为PPM水凝胶的力学性能。从图3a可以看出，将制备的PPM水凝胶裁剪成条状，可以实现弯曲、扭转和拉伸等力学行为而不会发生断裂，证明其具有良好的弹性性能，能够满足柔性可穿戴设备的应用需求。为了进一步量化PPM水凝胶的力学性能，进行了一系列的力学性能试验，测试了不同MXene含量的PPM水凝胶的典型拉伸力学性能。从图3b可以看出，PPM水凝胶的力学性能差异显著。



(a) PPM水凝胶前驱液的光学图像　(b) MXene的SEM图像



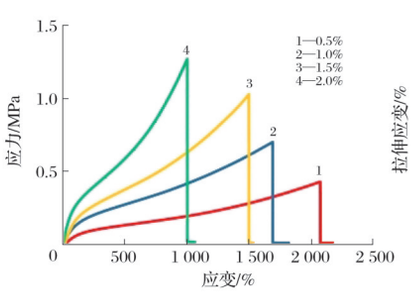
(c) PPM水凝胶和MXene的XRD图谱

图2　PPM水凝胶前驱液的光学图像、MXene的SEM图像以及PPM水凝胶和MXene的XRD谱图

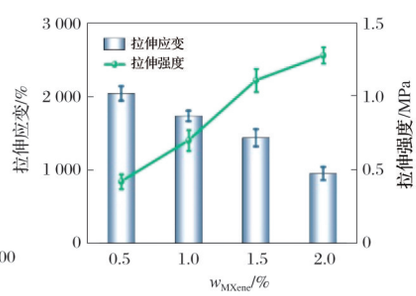
Fig.2 Optical image of PPM hydrogel precursor, SEM image of MXene and XRD pattern of PPM hydrogel and MXene



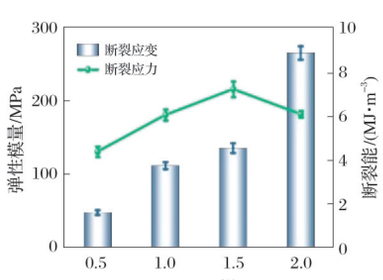
(a) PPM水凝胶在弯曲、扭转和拉伸行为的光学图像



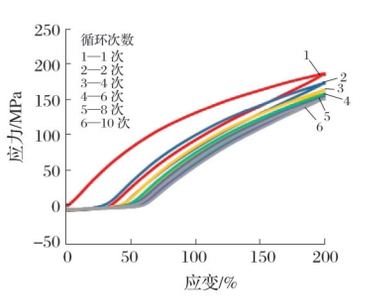
(b) PPM水凝胶应力–应变曲线



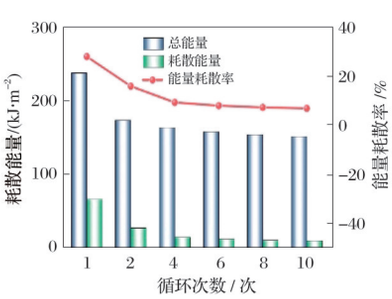
(c) 拉伸应变和拉伸强度



(d) 弹性模量和断裂能



(e) 循环载荷下PPM水凝胶的应力–应变曲线



(f) PPM水凝胶的耗散能量和能量耗散率

图3　PPM水凝胶的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of PPM hydrogel

从图3c和图3d可以看出，随着MXene质量分数从0.5%增加至2.0%，PPM水凝胶的拉伸应变从2 052%降至966%，对应的拉伸强度从0.43 MPa提高至1.29 MPa。此外，PPM水凝胶的弹性模量也表现出类似的变化规律。随着MXene质量分数的提高，凝胶的弹性模量也从49.02 kPa增加至266.85 kPa。值得注意的是，PPM水凝胶的断裂能随着MXene质量分数的增加呈先增加后降低的趋势，依次为4.42、6.08、7.25、6.12 MJ/m^3。这种现象归因于刚性的MXene与聚合物网络中分子链之间的物理纠缠和分子间的作用，提高了PPM水凝胶的交联密度，从而进一步提高水凝胶的力学强度。然而，交联点的增加缩短了链段之间的距离，限制了PPM凝胶中分子链的移动，宏观上表现

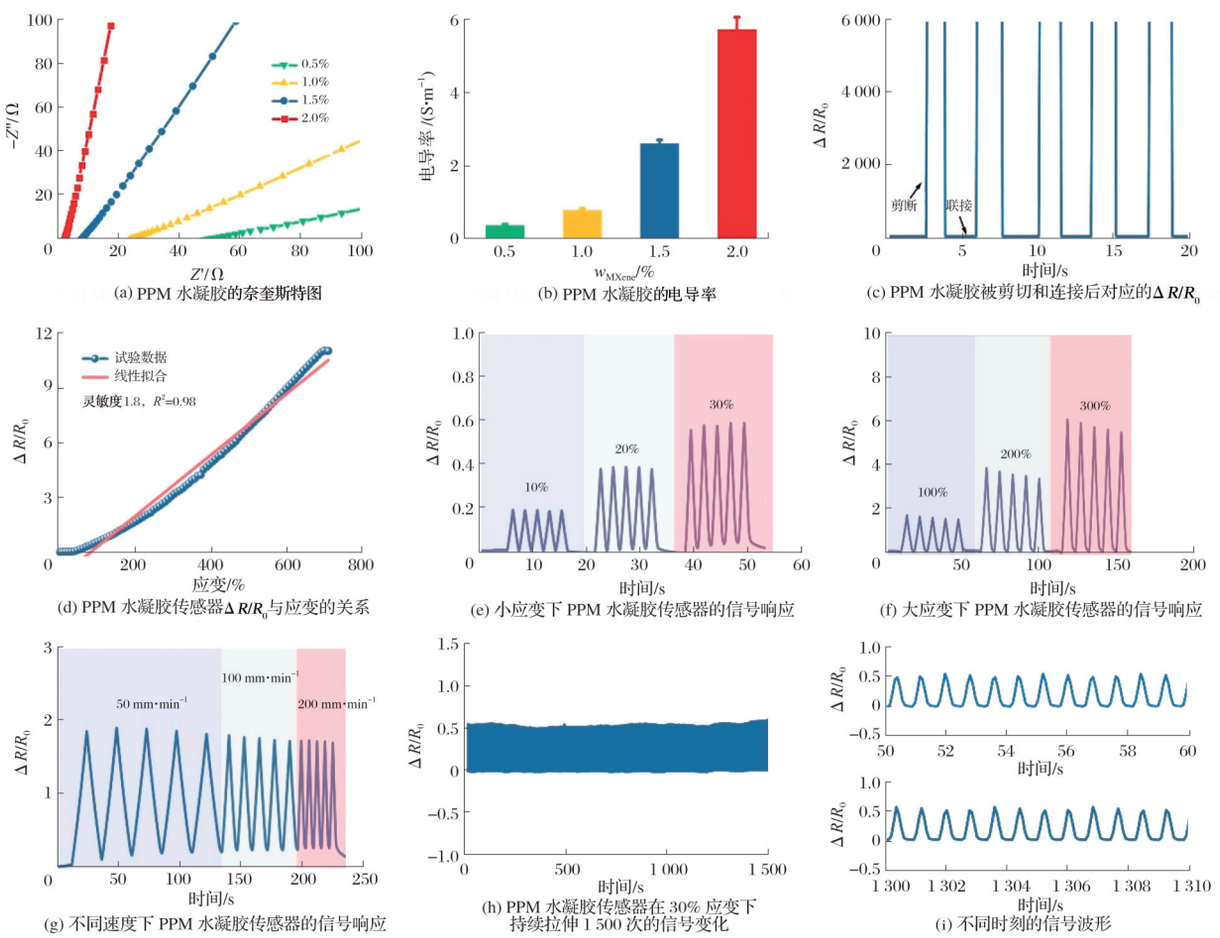
为变形量的减少，从而导致应变逐渐减小。

通过拉伸循环试验进一步研究PPM水凝胶的弹性性能。从图3e可以看出，PPM水凝胶的应力-应变曲线在应变为200%时呈现出显著的滞回曲线。结果表明：被拉伸的水凝胶通过能量耗散的形式恢复到初始状态。同时，PPM水凝胶体系中的网络被严重地削弱，导致在第一次加载、卸载后不能立即恢复。而后续的拉伸循环过程中，PPM水凝胶的拉伸强度并无明显下降，循环曲线没有发生显著的位移或者断裂，从而进一步证明其具有良好的抗疲劳性能。

从图3f可以看出，第一次拉伸循环中，PPM水凝胶表现出67 kJ/m^{3}的耗散能量以及28%的能量耗散率。在后续的拉伸循环中，耗散能量被稳定在10 kJ/m^3，对应的能量耗散率也保持在8%，表明PPM水凝胶具有良好的弹性和形状恢复性能。上述现象主要归因于MXene表面的官能团与双网络之间形成了的多重可逆的动态氢键，在凝胶被拉伸时动态键充当“牺牲键”被优先破坏，以有效地耗散能量。

2.3 PPM水凝胶的导电性与传感性能分析

理想的传感器需要具备优异的电学稳定性和传感性能。为了评价PPM水凝胶基传感器用于可穿戴设备的潜力，采用电化学工作站对PPM传感器进行一系列的阻抗测试。图4为PPM水凝胶的导电性与传感性能。其中，Z'为实部阻抗；Z''为虚部阻抗。



(a) PPM水凝胶的奈奎斯特图　(b) PPM水凝胶的电导率　(c) PPM水凝胶被剪切和连接后对应的$\Delta R/R_0$

(d) PPM水凝胶传感器$\Delta R/R_0$与应变的关系　(e) 小应变下PPM水凝胶传感器的信号响应　(f) 大应变下PPM水凝胶传感器的信号响应

(g) 不同速度下PPM水凝胶传感器的信号响应　(h) PPM水凝胶传感器在30%应变下持续拉伸1 500次的信号变化　(i) 不同时刻的信号波形

图4 PPM水凝胶的导电性与传感性能

Fig.4 Conductivity and sensing properties of PPM hydrogel

从图4a可以看出，随着MXene质量分数的增加，PPM水凝胶的电阻呈现明显的下降，对应的电导率(图4b)从0.40 S/m增加至5.72 S/m。由于MXene是具有极佳导电性能的二维材料，将其引入聚合物网络中可以赋予PPM凝胶优异的导电性。不仅如此，将PPM传感器裁剪成两片，使其反复接触、分离，测量其电学稳定性。从图4c可以看出，被反复连接在一起的PPM传感器能够在极短的时间内恢复导电通路，并且保持稳定的电阻变化，显示出其应用于可穿戴设备时良好的鲁棒性。通过计算$\Delta R/R_0$相对于应变曲线的斜率，确定PPM传感器的灵敏度。从图4d可以看出，PPM传感器在800%的应变范围内，灵敏度为1.8，数据拟合后，R^2=0.98，展示出线性关系。

从图4e和图4f可以看出，在10%~30%的小应变拉伸下，$\Delta R/R_0$显示出对形变引起信号变化的精准表达，能够识别微小机械刺激下的机电信号。同理，在较大应变下(100%~300%)，$\Delta R/R_0$同样显示出稳定且准确的机电响应。值得注意的是，大应变下与小应变下的信号响应，呈现出规律性的倍数关系，进一步验证了传感器的线性相关性。

此外，通过施加不同速度的载荷，以测量其信号的响应速度。

从图4g可以看出，在100%的应变下对PPM传感器施加50~200 mm/min的加载速度，对应的$\Delta R/R_0$仍然显示出稳定且精准的信号表达。传感器的耐用性和稳定性对于确保长期使用至关重要。从图4h和图4i可以看出，PPM水凝胶传感器在30%应变下超过连续1 500次循环后的信号与初始信号具有相同的响应，显示出优异的耐久性和可靠性(保持良好的振幅和波形)。

2.4 PPM水凝胶柔性传感器的应用

PPM水凝胶传感器显示出优异的力学性能、高导电性和优异的传感性能，可将其作为可穿戴传感器应用于检测人体各种生理运动。图5为PPM水凝胶传感器对人体不同部位的生理信号监测。从图5a可以看出，将PPM传感器贴附在手腕处，手腕弯曲的角度不同，对应的电阻信号也会相应的增加。当手腕伸直时，相对电阻信号瞬间恢复到初始状态，这表明基于PPM水凝胶的传感器具有较高的灵敏特性。从图5b可以看出，将传感器安装在手指关节处，当手指弯曲程度增加时，相对电阻信号也呈阶梯形增长，且反复的弯曲伸直对应的信号也同样精准地表达。此外，为了证明基于水凝胶的传感器在实际检测中的可行性，将人体的主要关节(肘关节和膝关节)作为位置来监测人体运动，包括行走、跑步等动作(图5c~图5e)。实验结果表明，通过$\Delta R/R_0$的差异和信号波形的不同，可以实现对不同身体姿势的识别，证明了PPM传感器监测人体运动的实时性、准确性和可重复性。

上述结果证实了PPM水凝胶具有实际应用能力，显示出其在柔性可穿戴设备中的潜在应用价值。

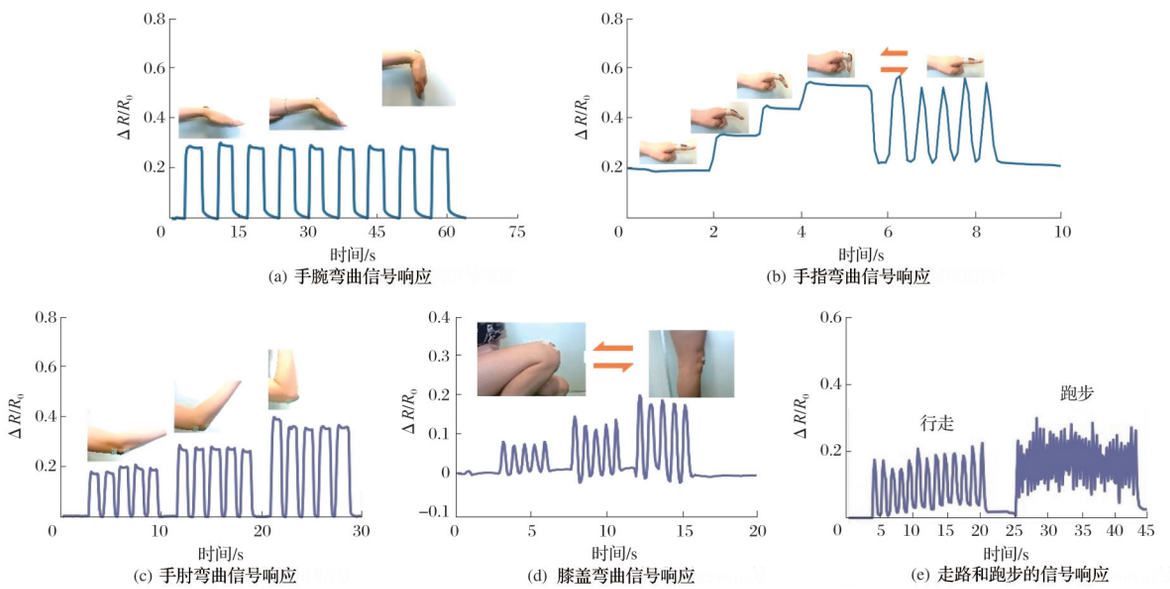


图5 PPM水凝胶传感器对人体不同部位的生理信号监测

Fig.5 Physiological signal monitoring of different parts of human body by PPM hydrogel sensor

3 结论

本文采用简便的一步法合成一种具有优异的力学性能、电导率和灵敏度的新型双网络水凝胶。在分子设计方面，利用MXene和聚合物网络的固有特性，通过巧妙的结构设计，在一个简单的体系中实现了显著的综合性能。通过利用MXene与凝胶双网络之间的氢键作用，PPM水凝胶表现出优异的力学性能，拉伸应变为2 052%，拉伸强度为1.29 MPa。能量耗散率为8%，显示出优异的抗疲劳特性。此外，将MXene引入PPM水凝胶中构建了理想的导电网络结构，赋予PPM水凝胶超强的电导率，约为5.72 S/m。利用PPM水凝胶优异的特性将其组装成可穿戴传感器，可以较高的灵敏度、稳定性和可重复性实时检测和区分各种人体运动。PPM水凝胶将成为制造下一代高性能传感器的多功能平台，包括可穿戴设备、人机界面和电子皮肤。

参考文献

[1] 刘臻, 李拜天, 纪国栋. 硼酸盐功能化纤维素纳米晶/聚酰胺共混物的3D打印结构化水凝胶设计[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 97-101.

[2] 王向鹏, 高艺伦, 李宴汝, 等. 碳基材料复合水凝胶在吸附中的研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(7): 135-140.

[3] YE X R, SHI B H, LI M, et al. All-textile sensors for Boxing punch force and velocity detection[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107114.

[4] YANG S D, ZHANG H, SUN X, et al. 3D-printed liquid metal-in-hydrogel solar evaporator: Merging spectrum-manipulated micro-nano architecture and surface engineering for solar desalination[J]. ACS Nano, 2024, 18(7): 5847-5863..

[5] 牛丽丽, 王培, 刘彦彬, 等. CNTs/PANI复合水凝胶电极材料的制备及电化学性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(12): 29-33.

[6] LI W Z, ZHENG S J, ZOU X Y, et al. Tough hydrogels with isotropic and unprecedented crack propagation resistance[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(43): 2207348.

[7] QI S Y, YUAN W Z. Robust and adhesive double-solvent phase change

hydrogel with reversible transparency and shape memory for thermal management and information encryption[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 473: 145329.

[8] 张超, 吴力立. 单宁交联聚氨酯水凝胶的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(9): 35-39.

[9] 芮国芬, 刘海燕, 曹峥, 等. 金属离子溶液浸泡策略提升聚丙烯酸水凝胶微珠的力学性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(6): 121-125.

[10] LI T Q, LI X, YANG J M, et al. Healable ionic conductors with extremely low-hysteresis and high mechanical strength enabled by hydrophobic domain-locked reversible interactions[J]. Advanced Materials, 2023, 35(51): 2307990.

[11] WU Q R, XU Y D, HAN S J, et al. Versatile hydrogel based on a controlled microphase-separation strategy for both liquid- and solid-phase 3D printing[J]. ACS Nano, 2024, 18(45): 31148-31159.

[12] DING S W, LI Z H, LIN G X, et al. Enhancing mass transfer in anion exchange membrane water electrolysis by overlaid nickel mesh substrate[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(8): 3719-3726.

[13] ZHONG D L, WU C, JIANG Y W, et al. High-speed and large-scale intrinsically stretchable integrated circuits[J]. Nature, 2024, 627(8003): 313-320.

[14] XIONG D J, RUAN P F, LI Z A, et al. A general strategy for sustainable 3D printing based on a multifunctional photoinitiator[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2024, 63(31): e202406047.

[15] TAO Y, XUE Y, WANG F C, et al. Polyurethane vitrimers engineered with nitrogen-coordinating cyclic boronic diester bonds for sustainable bioelectronics[J]. Small, 2024, 20(52): 2408557.

[16] CHEN A B, ZHANG J Y, ZHU J D, et al. Self-adhesive electronic skin for ultra-sensitive healthcare monitoring[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(10): 4977-4986.

[17] KANG J, MUN J, ZHENG Y, et al. Tough-interface-enabled stretchable electronics using non-stretchable polymer semiconductors and conductors[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(12): 1265-1271.

[18] AAKYIIR M, TANNER B, YAP P L, et al. 3D printing interface-modified PDMS/MXene nanocomposites for stretchable conductors[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 117: 174-182.

[19] LIU S D, LI D S, WANG Y, et al. Flexible, high-strength and multifunctional polyvinyl alcohol/MXene/polyaniline hydrogel enhancing skin wound healing[J]. Biomaterials Science, 2022, 10(13): 3585-3596.

[20] YANG G G, ZHU K H, GUO W, et al. Adhesive and hydrophobic bilayer hydrogel enabled on-skin biosensors for high-fidelity classification of human emotion[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(29): 2200457.

[21] PAN Z, FU Q Q, WANG M H, et al. Designing nanohesives for rapid, universal, and robust hydrogel adhesion[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5378.

[22] TANG W, GAO Y D, DONG Z Y, et al. Sustainable and untethered soft robots created using printable and recyclable ferromagnetic fibers[J]. Bio-Design and Manufacturing, 2024, 7(6): 926-937.

[23] NGUYEN L T, DU PREZ F E. Direct restoration of photocurable cross-linkers for repeated light-based 3D printing of covalent adaptable networks[J]. Materials Horizons, 2024, 11(24): 6408-6415.

[24] NEUMANN S E, KWON J, GROPP C, et al. The propensity for covalent organic frameworks to template polymer entanglement[J]. Science, 2024, 383(6689): 1337-1343.

[25] LEI Z P, CHEN H X, HUANG S F, et al. New advances in covalent network polymers via dynamic covalent chemistry[J]. Chemical Reviews, 2024, 124(12): 7829-7906.

[26] JEONG Y J, PARK S Y. Light-responsive actuator of azobenzene-containing main-chain liquid crystal elastomers with allyl sulfide dynamic exchangeable linkages[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(2): 2788-2801.