

引用格式:陈涛,沈莹,Melissa Yazhen-Pang Yan,等.有机水凝胶的构建及应用研究进展[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(3):1-12. [Chen Tao, Shen Ying, Melissa Yazhen-Pang Yan, et al. Research progress on the construction and application of organohydrogels[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2026, 44(3): 1-12.]

## 有机水凝胶的构建及应用研究进展

陈涛<sup>1,2</sup>, 沈莹<sup>1,2</sup>, Melissa Yazhen-Pang Yan<sup>3</sup>, 乐晓霞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 海洋关键材料全国重点实验室, 浙江省极端环境材料表面与界面重点实验室, 浙江 宁波 315201; 2. 中国科学院大学 化学科学学院, 北京 100049; 3. 浙江省镇海中学, 浙江 宁波 315201)

**摘要:**有机水凝胶由不混溶的亲水与疏水组分构成, 因在环境适应性方面具有显著优势, 可广泛应用于软执行器、人工传感器、储能装置等领域。通过系统综述有机水凝胶在结构设计与应用拓展方面的最新研究进展, 重点分析了典型有机水凝胶体系(异质网络型、混合溶剂型、乳液基型、宏观杂化型)的构建策略, 进一步概述了该类材料在软执行器、柔性电子设备、防伪平台等方面的潜在应用。最后, 针对当前该领域面临的挑战, 分别以材料类型和应用领域为导向, 提出了融合跨尺度结构调控、动态功能集成与绿色制备工艺等未来发展路径。

**关键词:**有机水凝胶; 异质结构; 环境适应性; 宏观杂化凝胶; 乳液基型凝胶

中图分类号: TQ427 文献标识码: A 文章编号: 1004—5570(2026)03—0001—12

DOI: 10.16614/j.gznj.zrb.2026.03.001

## Research progress on the construction and application of organohydrogels

Chen Tao<sup>1,2</sup>, Shen Ying<sup>1,2</sup>, Melissa Yazhen-Pang Yan<sup>3</sup>, Le Xiaoxia<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Zhejiang Key Laboratory of Extreme-environmental Material Surfaces and Interfaces, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China; 2. School of Chemical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhenhai High School of Zhejiang, Ningbo, Zhejiang 315201, China)

**Abstract:** Organohydrogels are composed of immiscible hydrophilic and hydrophobic components, offering remarkable advantages in environmental adaptability and enabling broad applications in soft actuators, artificial sensors, energy storage devices, and etc. This review systematically summarizes the latest research progress in the structural design and application development of organohydrogels. It focuses on analyzing the construction strategies of four representative organohydrogels systems, including gels with heterogeneous networks, gels with binary solvent, emulsion-based gels, and macroscopic hybrid gels. Furthermore, their potential applications in soft actuators, flexible electronic devices, and anti-counterfeiting platforms are outlined. Finally, in response to current challenges in the field, this article proposes future development pathways guided by both material types and application fields, including integrate cross-scale structural regulation, dynamic functional integration, and green preparation processes.

**Keywords:** organohydrogels; heterogeneous structure; environmental adaptability; macroscopic hybrid gels; emulsion-based gels

收稿日期: 2025-12-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(B类)(22322508); 宁波市自然科学基金项目(2023J408)

作者简介: 陈涛(1978-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 仿生智能高分子材料, E-mail: tao.chen@nimte.ac.cn.

## 0 引言

聚合物凝胶是一类典型的软固体材料,由三维网络结构和分散介质共同构成。根据分散介质的不同,凝胶可进一步分为水凝胶<sup>[1]</sup>(介质为水)、气凝胶<sup>[2]</sup>(介质为空气)和有机凝胶<sup>[3]</sup>(介质为有机溶剂)。水凝胶作为研究最为广泛的聚合物凝胶之一,虽凭借良好的生物相容性<sup>[4]</sup>与可调的理化性质<sup>[5]</sup>,在组织工程<sup>[6]</sup>、软执行器<sup>[7]</sup>、生物电子学<sup>[8]</sup>及水净化<sup>[9]</sup>等领域取得了显著进展,但传统水凝胶通常仅由单一亲水网络构成,存在环境适应性不足、性能在外界溶剂或温度变化条件下难以保持稳定<sup>[10]</sup>等缺陷。

近年来,同时包含亲水与亲脂组分的有机水凝胶,因在复杂或恶劣环境下能表现出优异的适应能力而受到广泛关注<sup>[11]</sup>。目前,研究人员已在有机水凝胶的结构设计<sup>[12]</sup>、制备方法<sup>[13]</sup>与性能调控<sup>[14]</sup>方面开展了大量工作,致力于提升其环境适应性<sup>[15]</sup>、力学可调性<sup>[16]</sup>、润湿行为<sup>[17]</sup>等关键特性,且这些性能优异的有机水凝胶也已被应用于形状记忆材料<sup>[18]</sup>、防冻与抗脱水材料<sup>[19]</sup>、表面可重构系统<sup>[20-21]</sup>、软执行器<sup>[22]</sup>及传感<sup>[23]</sup>等多个前沿领域。

鉴于此,本文根据组成与构建方法对有机水凝胶进行了分类(图1),系统总结、探析了其前景的功能特性,同时预测了该领域的未来发展方向,旨在为有机水凝胶材料的开发及新应用的拓展提供参考。

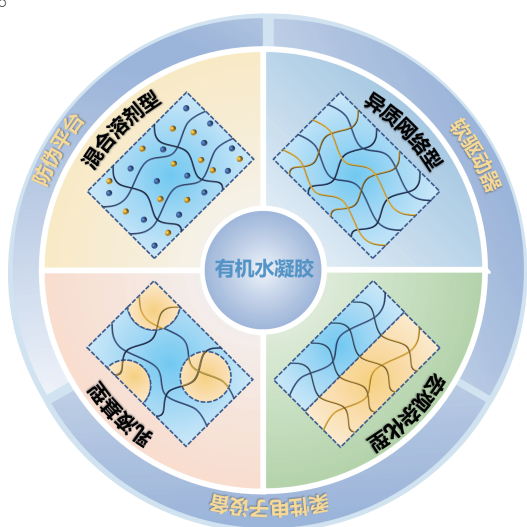


图1 各种结构的有机水凝胶及其应用领域

Fig. 1 Overview of organohydrogels with various structures and application fields

## 1 有机水凝胶体系的构建

通常,凝胶系统主要由3D聚合物网络和内部溶剂组成。对于有机水凝胶,聚合物网络可通过亲水单体、疏水单体或两者聚合获得,溶剂可以是水、有机溶剂或两者兼有。目前,根据化学成分和结构,开发的有机水凝胶可分为:异质网络型有机水凝胶、混合溶剂型有机水凝胶、乳液基型有机水凝胶、宏观杂化型有机水凝胶。

### 1.1 异质网络型有机水凝胶

异质网络型有机水凝胶特指通过分子网络设计,将化学性质互补的亲水高分子网络与疏水(或亲油)高分子网络结合于同一体系的凝胶材料。这是有机水凝胶实现其独特性能最为关键的构建策略之一,具有异质网络的有机水凝胶最早由 Gao 等<sup>[24]</sup>通过两步互穿法制备。如图2(a)所示,研究者采用原位聚合法将甲基丙烯酸十二烷基酯(LMA)和甲基丙烯酸正丁酯(BMA)组成的亲油性聚合物网络引入亲水性聚(N,N-二甲基丙烯酰胺)(PDMA)网络中。该技术的关键在于选用对水凝胶网络和亲油性单体均具有良好亲和力的乙醇作为溶剂。由于水凝胶网络与有机凝胶网络的共存,制备出的有机水凝胶不仅具备自适应表面润湿性,还能在宽温域内保持稳定的弹性性能,故在防冰、异相催化及抗结蜡等领域展现出应用潜力。需要注意的是,此类非均相网络有机水凝胶的单体选择通常受限,如水凝胶网络多由 PDMA、PNIPAM 等构成,而有机凝胶网络则由聚甲基丙烯酸正丁酯(PBMA)、PLMA、聚甲基丙烯酸硬脂酯(PSMA)等烷基类聚合网络组成。

除互穿网络结构外,具有层状结构的非均相有机水凝胶是另一典型类型。互穿结构多通过两步聚合实现,而层状结构则通常由一步自组装形成。本课题组曾通过外场剪切作用使衣康酸十二烷基甘油酯(DGI)自组装形成双层结构<sup>[25]</sup>,再经紫外光聚合成功构建了由 PDGI 与互穿网络聚丙烯酰胺-聚丙烯酸(PAAM-PAAc)组成的层状结构光子有机水凝胶纤维,见图2(b)。该结构可用于开发交互式电子光纤传感器,并可通过二次光聚合形成双网络水凝胶(PDGI/PAAM)。此类有机水凝胶传感器表现出优异的稳定性、快速响应性、耐低温特性及低频依赖性。然而,其发展仍受限于自组装条件,存在可组装单体种类有限、对温度等组装参数

要求严苛等问题。

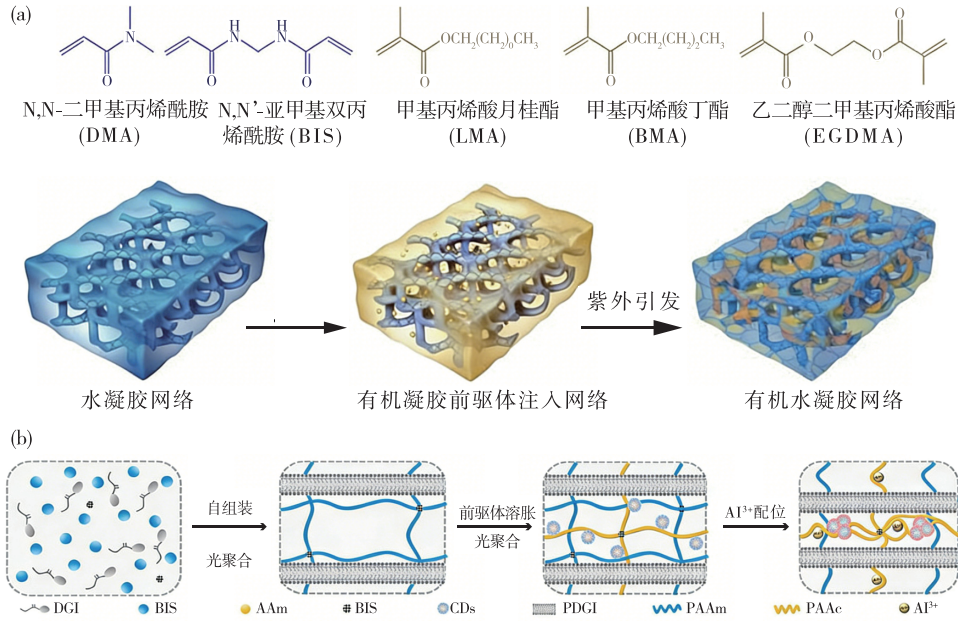


图2 异质网络有机水凝胶的构建

Fig. 2 Construction of heterogeneous-structured organohydrogels

注:(a)通过两步互渗技术制备含有亲水性聚合物链和亲油性聚合物链的异质网络有机水凝胶<sup>[24]</sup>;  
(b)具有结构色的光子有机水凝胶纤维的制备工艺<sup>[25]</sup>。

## 1.2 混合溶剂型有机水凝胶

混合溶剂型有机水凝胶的关键构建策略,是引入由有机溶剂与水构成的二元分散介质,从而获得组分均匀、结构连续的材料体系。值得注意的是,所选有机溶剂需与水具有高相容性,如二甲基亚砜(DMSO)、乙二醇(EG)或甘油等。该类有机水凝胶的制备主要采用2种方法:凝胶溶剂后处理置换法、直接在含助溶剂的体系中原位聚合法。Su等<sup>[26]</sup>将导电MXene纳米片均匀掺入聚乙烯醇(PVA)水凝胶网络,并结合冷冻-铸造技术(定向冷冻)形成蜂窝状的各向异性骨架结构,再将冷冻的PVA/MXene水凝胶浸入柠檬酸钠( $\text{Na}_3\text{Cit}$ ),1 mol/L甘油/水(Gly/ $\text{H}_2\text{O}$ ,重量比为1:1)二元溶液中,在低温下实现溶剂置换和盐析,成功开发了强韧耐疲劳的MXene纳米复合有机水凝胶,见图3(a)。该方法有效改善了传统导电水凝胶在长期稳定性和耐久性方面的不足,所得有机水凝胶展现出卓越的性能(如刚性8.74 MPa、强度21.20 MPa、可伸缩性1556%、韧性 $184.26 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、断裂能量 $768.3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、疲劳阈值 $7.86 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )和功能(环境稳定性和导电性)可调性,在软体机器人、人造皮肤及极端环境人机交互等领域展现出应用潜力。

此外,基于二元溶剂的有机水凝胶也可通过在

多组分溶剂中直接诱导凝胶化制备。Sun等<sup>[27]</sup>创新性地采用碱木质素- $\text{Cu}^{2+}$ (AL- $\text{Cu}^{2+}$ )自催化体系,在碱性水-EG溶剂中引发丙烯酰胺(AAM)聚合,制备出可用于摩擦纳米发电机(TENG)的导电有机水凝胶,见图3(b)。该材料具有极高的抗冻(温度下限 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ )/抗干燥(温度上限 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ )特性与自粘附性能( $\approx 31.4 \text{ kPa}$ ),为开发适应极端环境的绿色功能材料与能量收集装置提供了新思路。尽管混合溶剂型有机水凝胶在极端条件下能表现出优良性能,但仍存在一个共性问题,即当其暴露于外界水分或化学溶剂时,易因介质交换导致性能衰减。

## 1.3 乳液基型有机水凝胶

乳液基型有机水凝胶是近年来备受关注的新型凝胶材料,其制备包括乳化过程与后续的原位聚合过程2个关键步骤,最终在微观尺度形成不混溶的连续相与分散相结构。如图4(a)所示,Fang等<sup>[28]</sup>报道了通过一锅法聚合水包油乳液制备微球-网络结构的MXene基有机水凝胶系统。该乳液体系包含水相前驱体(水性聚合物单体丙烯酰胺AAM、交联剂N',N'-亚甲基双丙烯酰胺MBA)、油相前驱体(熔融石蜡、亲油性大分子单体甲基丙烯酸十二烷基酯LMA、交联剂甲基丙烯酸



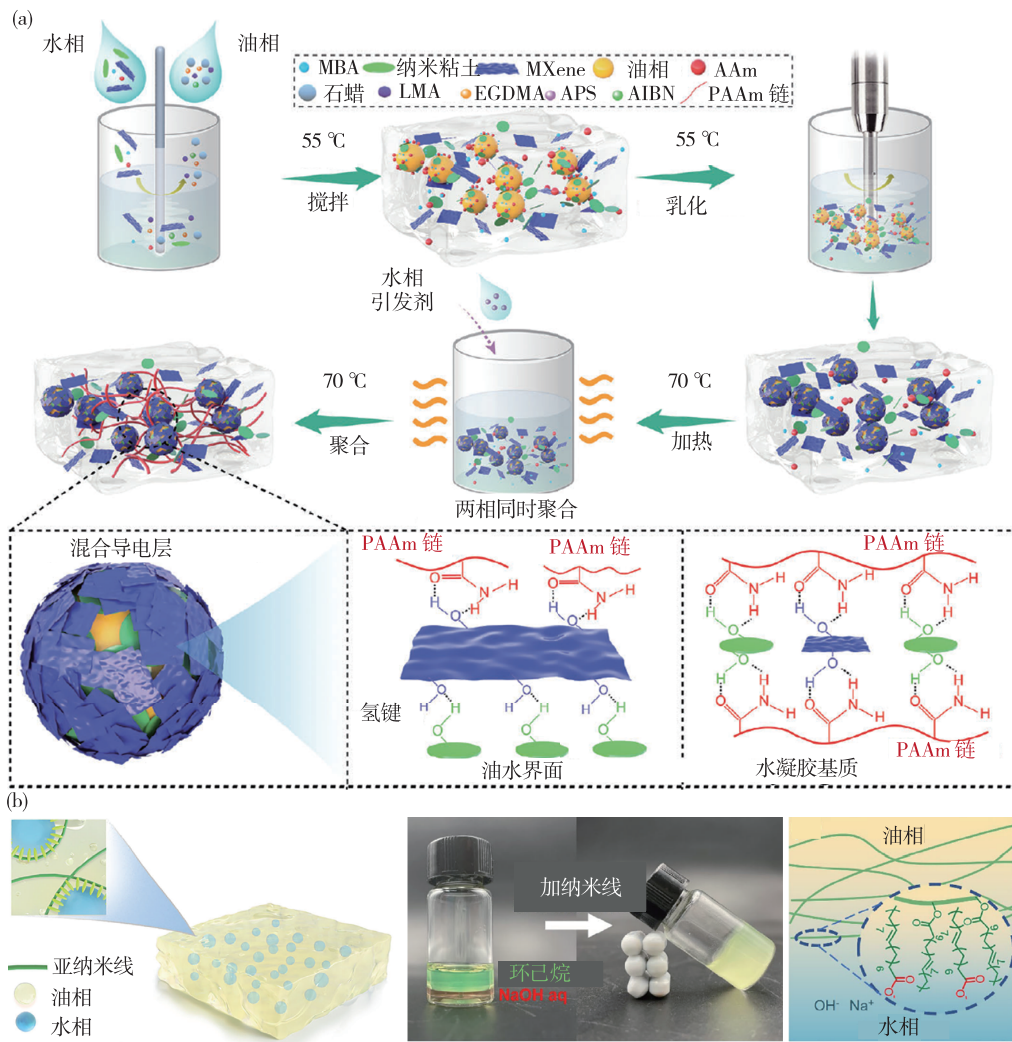


图4 乳液基型有机水凝胶的构建

Fig. 4 Construction of emulsion-based organohydrogels

注:(a)通过原位乳液聚合技术制备水包油型有机水凝胶<sup>[28]</sup>; (b)利用亚纳米制备的油包水型有机水凝胶<sup>[29]</sup>。

策略。如图5(a)所示,研究者将双键修饰的纳米颗粒引入水凝胶和有机凝胶前驱体的相分离溶液的界面中,借助界面聚合共价键合亲水网络与疏水网络,赋予两相形成强界面相互作用结构(质量分数为0.1%的MPS-SiO<sub>2</sub>表现出约220 N·m<sup>-1</sup>高粘附强度)<sup>[30]</sup>。该研究为宏观有机水凝胶杂化材料的设计提供了重要借鉴,可广泛应用于有机凝胶/水凝胶的功能化改性。

除直接粘接外,通过在已有凝胶表面诱导第二相凝胶生长是另一种有效途径。本课题组利用两步互穿技术合成的各向异性杂化有机水凝胶,可用于按需变形<sup>[31]</sup>:首先利用自由基反应引入热响应单体NIPAM和碱铬单体SVBP制备聚(N-异丙基丙烯酰胺-co-4-(2-磺基乙基)-1-(4-乙基苄基)吡啶甜菜碱)(p(NIPAM-SVBP))水凝胶基层,随

后将油前驱体(甲基丙烯酸十二烷基酯LMA、EGDMA)引入水凝胶网络,在纵向梯度紫外光的照射下在原位发生共聚,见图5(b)。新形成的疏水网络穿透预先存在的亲水网络,基于高分子链段的缠结助力于界面的牢固锁定。所得杂化材料同时具备优异的温度刺激响应特性与基于SVBP碱络合特性的光热驱动性能, $v_{avg}$ 最高可达6(°)·s<sup>-1</sup>。基于连缠结策略提升宏观杂化型有机水凝胶的界面结合强度,因无需依赖任何界面偶联分子,这为制备有机水凝胶杂化材料提供了一种新颖通用的途径。

## 2 有机水凝胶系统的应用

结构决定性能,性能进一步决定了其潜在的应

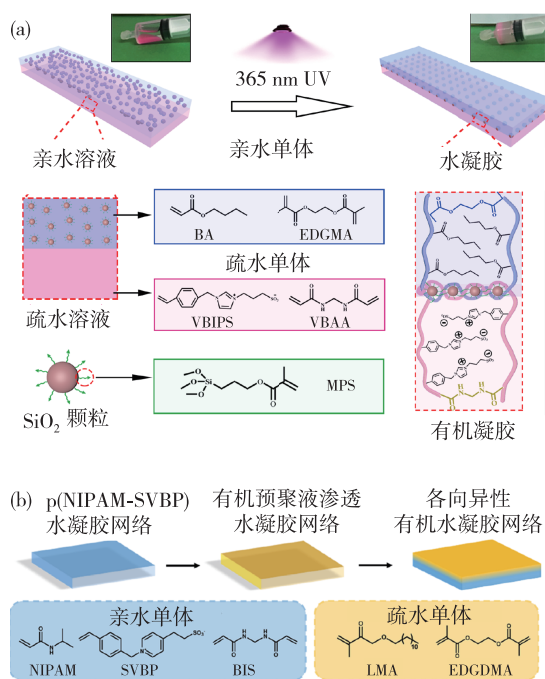


图 5 宏观杂化型有机水凝胶的构建

Fig. 5 Construction of macroscopic hybrid organohydrogels  
注:(a)通过界面铆钉策略制备水凝胶-有机凝胶双层致动器<sup>[30]</sup>; (b)利用链缔结策略制备各向异性的杂化有机水凝胶<sup>[31]</sup>。

用前景。与均质水凝胶或有机凝胶相比,有机水凝胶凭借其独特的异质网络结构,展现出卓越的环境适应性<sup>[32-33]</sup>、快速的刺激响应性<sup>[33-34]</sup>及复杂的多功能集成特性<sup>[35-36]</sup>。具体而言,通过有机溶剂或疏水网络的引入形成的分子间氢键作用,既能有效降低水的冰点以赋予材料抗冻性能,又能增强其在高温环境下的水分保持能力。此外,通过亲水与疏水组分 2 种理化性质截然不同的成分之间的协同作用,可在有机水凝胶体系中实现力学性能的可控切换与快速刺激响应。目前,有机水凝胶在前沿领域的应用,主要包括高性能软执行器<sup>[37]</sup>、宽温域作业的柔性电子器件<sup>[38]</sup>、高安全性防伪平台<sup>[39]</sup>等方向。

### 2.1 软执行器

水凝胶材料在外部刺激下能发生形状或位置变化,是软执行器的理想材料<sup>[40]</sup>,其驱动力来源于材料内部不对称结构(如典型的双层结构等)导致的差异化溶胀行为。在有机水凝胶体系中,通过构建各向异性结构同样可实现驱动功能<sup>[41]</sup>。基于水凝胶与有机凝胶网络均具备可设计性,开发多功能集成的软执行器成为可能<sup>[42-44]</sup>。本课题组曾报道过一种兼具快速响应与荧光变色协同功能的仿生

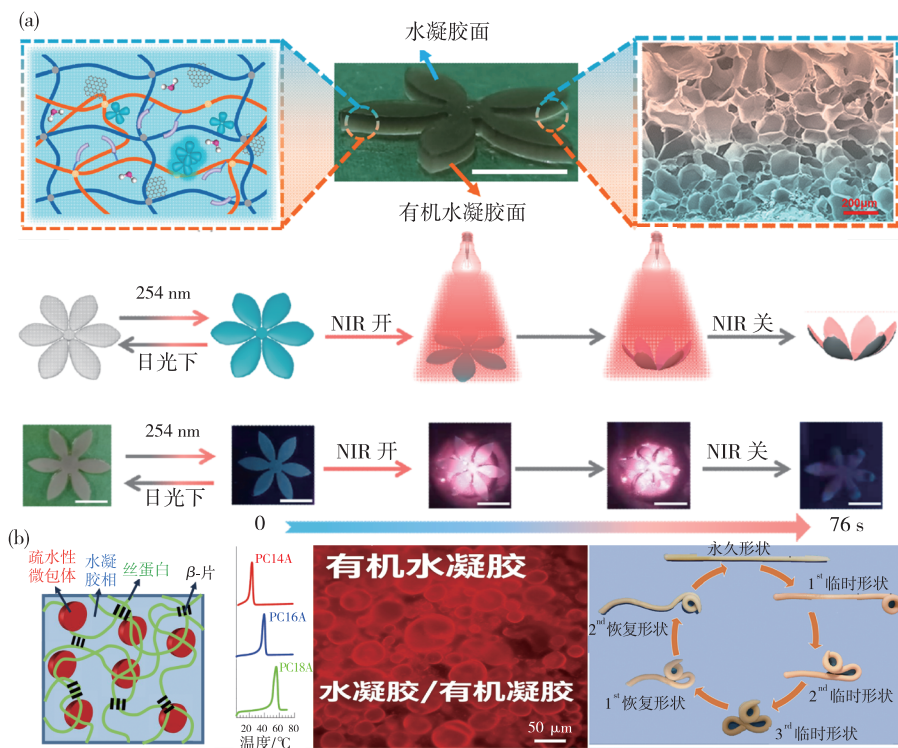


图 6 用于软执行器的有机水凝胶示例

Fig. 6 Example of an organohydrogel for a soft actuator

注:(a)各向异性 rGO-PNIPAM/P(LMA-ATPE-6APA-Eu<sup>3+</sup>) 具有高驱动速度和协同荧光变化的有机水凝胶致动器<sup>[45]</sup>; (b)具有可触发温度的四重形状记忆有机水凝胶<sup>[46]</sup>。

有机水凝胶执行器<sup>[45]</sup>。该材料通过两步互穿法构建了由 rGO 掺杂 PNIPAM 网络与 PLMA 网络组成的各向异性结构,并据调控聚合网络梯度的聚合程度,定制出有机水凝胶执行器的最佳驱动速度(约  $4.375 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )。更进一步,在 PLMA 网络中同时引入荧光单体 ATPE 和配体 6APA,使执行器在热/近红外刺激下实现形状变换与荧光颜色变化的同步调控,见图 6(a)。这种基于有机水凝胶构建多功能软体机器人的策略,为该领域的发展开辟了新的可能性。

除此外,有机水凝胶的异质网络还赋予了材料可调的刺激响应特性。Su 等<sup>[46]</sup>利用丝素蛋白(SF)的乳化性能并基于乳液聚合,制备了高生物相通性的水包油型有机水凝胶,见图 6(b)。具体为:乙醇触发了 SF 从随机卷曲结构到(片结构的

构象变化,SF 作为物理交联剂诱导了连续相中的凝胶化,进而达到稳定混合乳液目的。该材料依托有机凝胶网络的不同长链烃组合(丙烯酸正十四烷基 C14A、丙烯酸正十六烷基 C16A、丙烯酸正十八烷基 C18A),赋予其具有可切换粘弹性和可定制的形状记忆来触发温度特性。与传统水凝胶执行器相比,基于有机水凝胶的执行器能展现出优异的环境适应性,可为制备高性能有机水凝胶执行器提供新思路。

### 2.2 柔性电子设备

优异的黏附性、自愈合能力、类组织模量及电化学性能使水凝胶成为柔性电子器件的理想材料<sup>[44]</sup>。然而,传统水凝胶中的游离水在高温下易蒸发、低温下易冻结的状态,严重影响了器件在极端温度下的结构与功能稳定性。而有机水凝胶凭

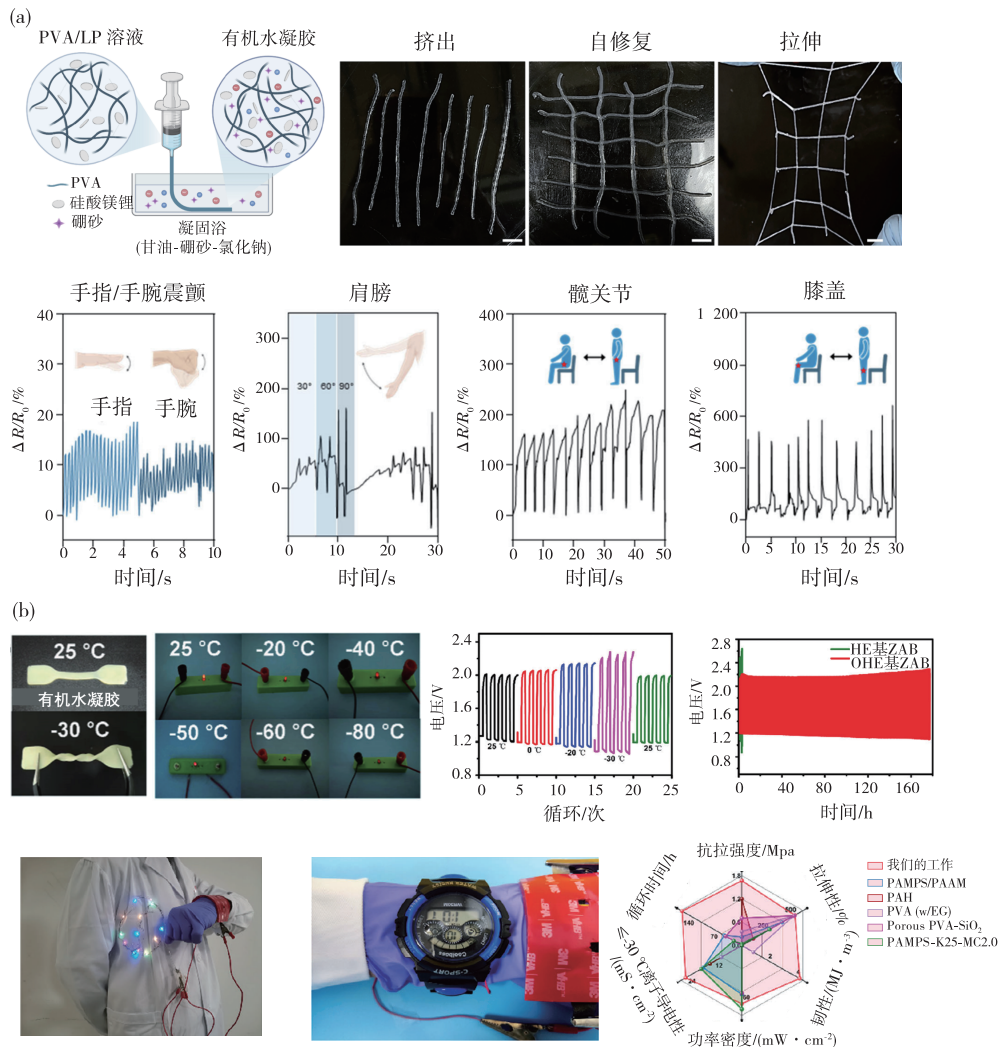


图7 用于柔性电子产品的有机水凝胶示例

Fig. 7 Example of an organohydrogels used in flexible electronics

注:(a) PLBOH 有机水凝胶纤维用于数字医疗设备监测<sup>[51]</sup>; (b) ANF-PVA 有机水凝胶,用于柔性应变传感器和电池<sup>[52]</sup>。

借其卓越的抗冻与抗脱水特性,为拓宽柔性电子器件在复杂气候条件下的长期适用性提供了新的解决方案<sup>[47-48]</sup>。近年来,基于有机水凝胶的响应型传感器<sup>[49]</sup>、电容<sup>[50]</sup>及储能器件<sup>[51]</sup>已取得显著进展。在可穿戴电子领域, Kim 等<sup>[52]</sup>开发了一种可 3D 打印的有机水凝胶纤维(OHF)传感器用于数字医疗设备。此研究以改性后的剪切变稀 PVA/LP 溶液挤入硼砂基的凝胶浴中,基于 PVA 和硼砂之间快速凝胶化制造了有机水凝胶纤维(PLBOH),其中甘油和 NaCl 的加入减轻了体系水分损失。该材料在 -20 °C 环境中储存 7 d 后仍能保持良好的导电性(4.2 S·m<sup>-1</sup>)和柔韧性,可承受拉伸、弯曲与扭曲等多种形变。相比之下,PLBH(浸入硼砂凝胶浴中无甘油)样品因低温冰晶形成显著阻碍内部的离子迁移,电导率显著下降了 74%(降至 2.3 ± 0.53 S·m<sup>-1</sup>)。如图 7(a) 所示,PLBOH 纤维表现出各向异性传感能力,能够成功区分各类小幅运动(手指和手腕屈曲以及震颤)与大幅形变(臀部和膝盖的坐姿和起身运动),为监测和诊断运动障碍及评估肌肉功能提供新的可能。

针对传统导电水凝胶在低温环境下因冻结而导致性能下降的难题, Lü 等<sup>[53]</sup>设计了一种基于共溶剂的离子导电芳纶纳米纤维(ANF)增强聚乙烯醇(ANF-PVA)有机水凝胶。其中,二甲基亚砜(DMSO)/H<sub>2</sub>O 二元溶剂和 ANF 的引入增强了体系中强氢键的相互作用,能显著改善有机水凝胶的力学性能。如图 7(b) 所示, ANF-PVA 有机水凝胶具有优异的抗冻性能,在低温环境中,机械柔韧性(>4 MJ·m<sup>-3</sup>)和导电性(-50 °C 时达 1.1 S·m<sup>-1</sup>)得以保持。此外,基于 ANF-PVA 有机水凝胶的 ZAB 柔性电源,能在室温到零度以下的宽温度范围内表现出高循环稳定性(在 -20 °C 的最佳温度下, >177 h, 532 次循环),该性能远高于 PVA 水凝胶基 ZAB(仅 3 h, 9 次循环),以此构建的柔性储能器件(可在低温环境下工作),实现了基于可穿戴电源的低温作业显示。该研究为适用于零下温度可穿戴柔性电源系统的发展提供了技术支持。目前,有机水凝胶在柔性电子领域的优势主要体现在对极端温度的耐受性,而其他的潜在性能优势有待进一步挖掘与拓展。

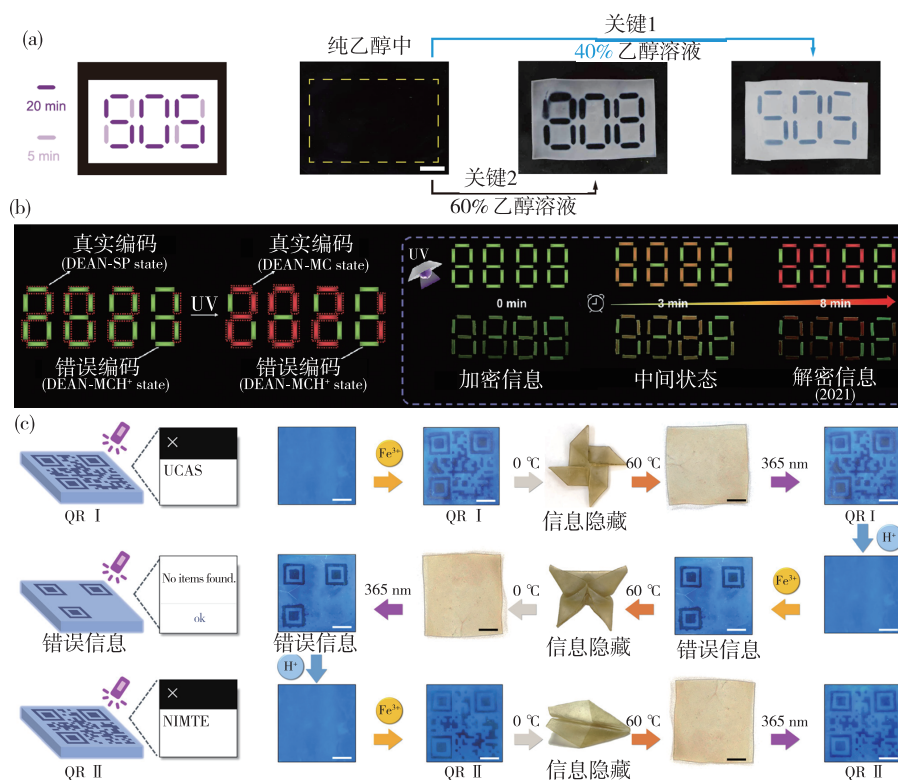


图 8 用于防伪平台的有机水凝胶示例

Fig. 8 Example of an organohydrogel on an anti-counterfeiting platform

注:(a)具有可调节聚合结构的有机水凝胶,用于按需信息加密<sup>[64]</sup>; (b)具有动态荧光变色的有机水凝胶,用于高安全性防伪<sup>[65]</sup>; (c)具有形状记忆性能的荧光有机水凝胶,用于双重加密<sup>[66]</sup>。

### 2.3 防伪平台

凝胶基防伪平台主要依赖材料在外部刺激下,通过发生的光学性能变化来实现信息加密与识别<sup>[53-54]</sup>。有机水凝胶的出现为光学特性的调控提供了更多可能,包括物理色(透明度变化<sup>[55]</sup>,反射颜色变化<sup>[56]</sup>等)与荧光颜色转变<sup>[57-58]</sup>等。一方面,通过溶剂调控诱导异质网络发生相分离<sup>[59]</sup>,可实现材料在透明与不透明状态之间的可逆转换;另一方面,疏水荧光单体可有效引入非均相网络,且聚集行为不易导致荧光猝灭,能为荧光防伪创造条件。

在智能凝胶中,常通过引入微相分离<sup>[60]</sup>、无机添加剂<sup>[61]</sup>、结晶<sup>[62]</sup>、自组装<sup>[63]</sup>等聚集结构来实现物理色调控。Liu 等<sup>[64]</sup>基于聚合网络对微相分离进行数字编程开发了一种软防伪平台,见图 8(a)。原理:热自由基聚合形成的均匀交联密度的有机凝胶网络在紫外光作用下,接枝的交联剂接枝单体(4-苯甲酰苯基丙烯酸酯, 4-ABP)被激活,可用于局部编程凝胶网络的局部交联密度。另外,利用混合溶剂诱导微相分离,可实现信息的显示与隐藏。可见,有机水凝胶在紫外光与溶剂的可编程刺激下能实现信息的按需加密与解密,从而为构建高安全性防伪平台提供有效途径。

引入疏水荧光单体可进一步发展具有荧光响应特性的有机水凝胶防伪材料。据此,本课题组提出了一种荧光颜色随紫外照射动态变化的异质有机水凝胶体系<sup>[65]</sup>。该系统中,萘酰亚胺单元(DEAN)被引入 PDMA 水凝胶网络,螺吡喃单元则修饰于 PSMA 有机凝胶网络。在紫外光照下,螺吡喃转变为部花青形式,与 DEAN 单元发生荧光共振能量转移(FRET),而在质子化作用下,部花青结构发生转变导致 FRET 过程中断。基于此,隐藏信息“2021”可通过差异化的质子化处理进行编码,并在紫外光照下伴随荧光颜色由绿色向橙色、红色的转变进行解密,见图 8(b)。

另外,本课题组还设计了一种引入荧光单体 1-苊基丙烯酸甲酯(PyMA)的 P(DMA-AAc)共聚水凝胶网络与 PSMA 有机凝胶网络互穿构成的有机水凝胶体系 P(DMA-AAc-PyMA)/PSMA<sup>[66]</sup>。其中,蓝色荧光单体(PyMA)因分子内电荷转移(ICT)效应,在 Fe<sup>3+</sup> 处理下形成猝灭荧光图案,并可由 H<sup>+</sup> 抵消荧光猝灭作用,再结合离子压印技术实现信息记录、抹除和重录的连续编码过程。这是因为 PSMA 固有的低温诱导结晶度特性赋予了材

料的形状记忆功能,进而为三维荧光的加密平台奠定了物质基础。此外,通过将结晶调控的形状记忆与光控荧光特性相结合,可实现双重信息加密。如图 8(c)所示,通过离子打印技术获得 UCAC 的二维码图案被折叠隐藏于风车结构中,仅在形状恢复为平面状态并接受 365 nm 紫外光照后,加密信息方可被解密。这说明兼具形状记忆与荧光响应的双重加密平台,在提升信息安全等级方面有强大潜力。虽然有机水凝胶在防伪领域展现出独特优势,但存储容量有限、分辨率较低、编码方式单一等问题的存在,仍需进一步的研究突破。

### 3 结论与展望

虽然亲/疏水组分的独特共存结构赋予了有机水凝胶优异的理化性能,推动了其在软执行器、柔性电子与防伪平台等领域的应用,但仍存在一些挑战。如:1) 为确保在同一聚合体系中的构建过程互不干扰,异质网络型有机水凝胶常面临单体选择上的显著限制,这是亲水与疏水单体之间的化学兼容性冲突所致。可通过分子动力学模拟与机器学习设计新型两亲性大分子单体(或引发剂),从源头上避免聚合网络的相互干扰。2) 混合溶剂型有机水凝胶的局限性主要源于溶剂功能性(如抗冻性、导电性)与副作用(如毒性、挥发性)之间难以调和的矛盾,如为追求低冰点或特定功能引入的有机溶剂,往往伴随生物毒性、环境不友好或对高分子网络溶胀能力的削弱作用。未来可致力于开发绿色、低毒且与网络高度相容的新型共溶剂(如功能性离子液体),并通过理论计算来预测溶剂-网络间的相互作用,实现性能与安全/可持续性的平衡。3) 乳液滴的热力学不稳定性与尺寸/分布的可控性是乳液基型有机水凝胶的根本问题,可导致材料性能的批次差异,而发展精准的乳液模板化(如利用微流控技术)与固定化技术(开发快速光固化或界面聚合技术等)可有效实现高度均一、稳定的内部结构。4) 宏观杂化型有机水凝胶的主要挑战,在于异质材料间的物理/化学界面的不匹配,这不仅导致其在应力或环境作用下易脱层,也限制了其环境适应性。未来研究可聚焦于界面改性(如开发普适性强的动态粘合界面层)与结构设计(如开发力学梯度过渡层),通过优化现有体系与开发新型材料来拓展其性能边界。

基于“结构决定性能,性能导向应用”基本原

则,面向关键应用的性能优化路径,未来研究还可聚焦于:1)在介观尺度构建拓扑结构或多级异质结构,通过理论模拟与多尺度表征相结合,仿生构建类生物组织复杂结构,实现性能的多元化突破,从结构层面解决驱动器响应速度与精度方面的瓶颈问题。2)在材料及器件层面,开发低挥发性或自保湿溶剂体系,设计信号自校准或环境补偿机制(如双模传感),并结合封装技术隔绝外界干扰,从而提升柔性电子器件的环境适应性,克服因温湿度变化导致溶剂失衡而引起的信号漂移与基线不稳问题。3)在分子层面引入刺激响应性动态共价键或超分子作用,并结合原位引入多光学功能组分实现协同增效,构建具有多重刺激响应行为的动态防伪体系。同时利用多模式、多层级的加密策略打造高安全性、高信息容量的防伪平台,以解决当前有机水凝胶在防伪应用中面临的信息维度单一、静态特征易复制等问题。此外,有机水凝胶的未来研究还必须正视产业化初期的共性挑战:1)在规模化制备方面,开发连续化、低成本的成型工艺(如3D打印、卷对卷生产),建立原材料与产品的标准化质控体系;2)在生物相容性与环境安全性方面,对生物医学应用材料进行系统的体外与体内安全评估,对环境应用材料预先评估其降解产物与生态毒性。综上,在性能优化与产业化推进的协同下,有机水凝胶有望展现出更优异的综合性能与更广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 孙雨,乐晓霞,路伟,等. 功能高分子水凝胶前沿进展与未来趋势[J]. 前瞻科技,2025,4(1):147-159.
- [2] 吴晓栋,宋梓豪,王伟,等. 气凝胶材料的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(4):405-451.
- [3] Lin Jiehan, Mao Yongqi, Zheng Tianjiang, et al. Electric field-induced dual-gradient heterojunction diodes toward ultrasensitive self-powered ionic skin[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(21):2500949.
- [4] Tordi P, Montes-García V, Tamayo A, et al. Ionically tunable gel electrolytes based on gelatin-alginate biopolymers for high-performance supercapacitors[J]. *Small*, 2025, 21(33):2503937.
- [5] Wu Yue, Shen Ying, Han Junyi, et al. Brush-like polymeric gels enabled photonic crystals toward ultrasensitive cosolvent chromism[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(49):e202414136.
- [6] Zhang Chuankai, Zhou Peirong, Deng Yuyao, et al. Sericin-based conductive hydrogel loaded with MXene@ TA-Eu nanosheets promotes the healing of infected wounds through photothermal antibacterial and electrical stimulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505:151259.
- [7] Wu Baoyi, Si Muqing, Hua Luqin, et al. Cephalopod-inspired chemical-gated hydrogel actuation systems for information 3D-encoding Display[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25):2401659.
- [8] Shan Liangjie, Xue Yu, Chen Xingmei, et al. Mechanically compliant and impedance matching hydrogel bioelectronics for low-voltage peripheral neuromodulation[J]. *Advanced Materials*, 2025, 38(2):e11014.
- [9] Cui Liangliang, Wu Fucai, Wang Wei, et al. Robust and elastic thermoresponsive hydrogels with high swelling properties for efficient solar water purification[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(6):3253-3262.
- [10] Kuzina M A, Kartsev D D, Stratonovich A V, et al. Organogels versus hydrogels: a dvantages, challenges, and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(27):2301421.
- [11] Chen Guoqi, Zhang Yunting, Li Shengnan, et al. Flexible artificial tactility with excellent robustness and temperature tolerance based on organohydrogel sensor array for robot motion detection and object shape recognition[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(45):e2408193.
- [12] 周杭生,黄金,赵天艺,等. 仿生多相限域复合高分子凝胶[J]. 高分子学报,2023,54(11):1641-1662.
- [13] Hu Qiaoman, Li Huan, Chen Xiaoling, et al. Strong tough ionic organohydrogels with negative-thermopower via the synergy of coordination interaction and hofmeister effect[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(46):2406968.
- [14] Han Yupan, Wang Ziqi, Sun Hongling, et al. Temperature-tolerant versatile conductive zwitterionic nanocomposite organohydrogel toward multisensory applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(29):38606-38619.
- [15] Xin Yue, Chen Shousen, Qiu Weicheng, et al. Liquid metal composite organohydrogel based on water-soluble starch stabilizer with supertoughness, self-healing, and harsh-environmental tolerance for an advanced strain sensor[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(13):5425-5434.
- [16] Han Xiaokun, Lu Tianyun, Huang Yanyou, et al. Supramolecular-reinforced hard-phase ionogels with exceptional mechanical robustness and damage tolerance[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(41):e10713.
- [17] Wan Xizi, Xu Xuetao, Liu Xi, et al. A wetting-enabled-transfer (WET) strategy for precise surface patterning of organohydrogels[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(16):

- 2008557.
- [18] Zhao Ziguang, Zhang Kangjun, Liu Yuxia, et al. Highly stretchable, shape memory organohydrogels using phase-transition microinclusions [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(33):1701695.
- [19] Zhao Rongrong, Luo Jianxun, Liu Jiachang, et al. Ultra-flexible, anti-freezing, and adhesive collagen fiber-derived conductive organohydrogel E-skin for strain, humidity, temperature, and bioelectric sensing applications [J]. *Chemistry of Materials*, 2024, 36(17):8141-8158.
- [20] Sapkota A, Shome A, Crutchfield N, et al. Catalyst-free synthesis of a mechanically tailorable, nitric-oxide-releasing organohydrogel and its derived underwater superoleophobic coatings [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(13):19335-19347.
- [21] Lan Jinze, Shi Lianxin, Xiao Wuyi, et al. A rapid self-pumping organohydrogel dressing with hydrophilic fractal microchannels to promote burn wound healing [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(38):2301765.
- [22] Jian Yukun, Wu Baoyi, Le Xiaoxia, et al. Antifreezing and stretchable organohydrogels as soft actuators [J]. *Research*, 2019, 2019:238434.
- [23] Guo Ruyue, Bao Yan, Zhou Junbin, et al. Dual-mode conductive organohydrogel with TA-AgNPs synergy for multi-functional sensing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 522:168188.
- [24] Gao Hainan, Zhao Ziguang, Cai Yudong, et al. Adaptive and freeze-tolerant heteronetwork organohydrogels with enhanced mechanical stability over a wide temperature range [J]. *Nature Communications*, 2017, 8:15911.
- [25] Shang Hui, Sun Yu, Le Xiaoxia, et al. Dynamic metal-ligand coordination enables a hydrogel with rewritable dual-mode pattern display [J]. *Materials Horizons*, 2024, 11(21):5244-5250.
- [26] Su Gehong, Zhang Xiaotian, Zhou Yaping, et al. Biomimetic all-weather strong, tough, and fatigue-resistant composite organohydrogels for electronic artificial ligaments [J]. *Small*, 2025, 21(38):e04139.
- [27] Sun Dan, Feng Yufan, Sun Shaochao, et al. Transparent, self-adhesive, conductive organohydrogels with fast gelation from lignin-based self-catalytic system for extreme environment-resistant triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(28):2201335.
- [28] Fang Ming, Huang Liya, Cui Zhenrong, et al. Phase-transition microcapacitor network in organohydrogel for absorption-dominated electromagnetic interference shielding and multi-mode intelligent responsiveness [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 34(12):1280.
- [29] Yuan Feng, Li Donghang, Li Haoyang, et al. Multi-compatible, self-healing, and temperature-responsive organohydrogels by sub-nanowires [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(19):2500272.
- [30] Xiao Shengwei, He Xiaomin, Qian Jie, et al. Natural lipid inspired hydrogel-organogel bilayer actuator with a tough interface and multiresponsive, rapid, and reversible behaviors [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(16):7646-7658.
- [31] Li Danyang, Le Xiaoxia, Wei Shuxin, et al. Organohydrogel actuators with adjustable stimulus responsiveness for on-demand morphing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(12):16090-16096.
- [32] He Xiaoyan, Ma Penggai, Ma Shuo, et al. Super-stretchable, freezing-resistant and self-powered organohydrogels for extreme environment-adaptable high-performance strain sensors [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(18):11450-11460.
- [33] Ge Zhuo, Zhou Yumei, Ren Hanyu, et al. Janus organohydrogels to realize strain sensitivity, tough adhesion, and environmental stability [J]. *Polymer*, 2024, 307:127257.
- [34] Zhou Qingya, Griffin A, Qian Jin, et al. Mechanically strong and tough organohydrogels for wide temperature tolerant, flexible solid-state supercapacitors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(46):2405962.
- [35] 尚娜, 刘亚飞, 冯辉霞, 等. MXene/PAM/CMC 复合导电水凝胶的制备及其性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2025, 53(S2):173-178.
- [36] 王少伟, 梅泽楷, 金晓月, 等. 自愈合纳米纤维素/MXene 复合水凝胶的制备及其多功能应用研究 [J]. *生物质化学工程*, 2025, 59(4):47-57.
- [37] Xin Yangyang, Zhou Xinran, Joel Tan Ming Rii, et al. 3D-printed electrohydrodynamic pump and development of anti-swelling organohydrogel for soft robotics [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(7):2415210.
- [38] Gu Tengting, Jia Yunqi, Zhang Linjie, et al. Ampere-hour-scale quasi-solid-state zinc-air batteries with a wide operating temperature range ( $-50$  to  $60$  °C) [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(18):15029-15040.
- [39] Cao Xuan, Lv Rulong, Wei Yun. Cationic carbon dot reinforced highly tensile, tough, dehydration resistant polyelectrolyte hydrogels with fluorescence for flexible sensing and information anti-counterfeiting [J]. *Small*, 2025, 21(29):e2501531.
- [40] Cui Xingchen, Zhang Bing, Shao Pingzhi, et al. Sponge-like PNIPAM/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PPy composite hydrogel actuator with rapid response, self-sensing and multiple manipulating manners for complex application scenarios [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 522:168066.
- [41] Oral C B, Su E, Okay O. Silk fibroin-based multiple-shape-memory organohydrogels [J]. *ACS Applied Materi-*

- als & Interfaces, 2024, 16(41):56146-56158.
- [42] 魏进欢, 韦文龙, 李忠举, 等. GelMA 水凝胶 3D 生物打印支架在伤口愈合中的研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(S2):100-105.
- [43] 陈一元, 卢凌彬. 自修复有机凝胶研究进展[J]. 江西化工, 2025, 41(4):84-89.
- [44] 邓勇. 纤维素基压电离子有机水凝胶的制备及其在柔性可穿戴领域的应用[D]. 南宁:广西大学, 2025.
- [45] Shang Hui, Le Xiaoxia, Si Muqing, et al. Biomimetic organohydrogel actuator with high response speed and synergistic fluorescent variation [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429:132290.
- [46] Su E, Oral C B, Okay O. Quadruple shape-memory organohydrogels with adjustable trigger temperatures[J]. ACS Omega, 2025, 10(33):37950-37960.
- [47] 方鸿力. 聚磺酸甜菜碱基自愈水凝胶传感器的制备及性能研究[D]. 南京:南京林业大学, 2025.
- [48] Shen Jiabin, Feng Tao, Li Chen, et al. Highly robust and fatigue-resistant organic hydrogel composite elastomer fibers with multi-sensing capabilities [J]. Science China (Materials), 2025, 68(12):4534-4545.
- [49] 王营超. 纳米木质素功能化导电有机水凝胶的构建及其在可穿戴传感器中的应用研究[D]. 天津:天津科技大学, 2024.
- [50] Rahman M S, Dixit K, Rahman M T, et al. ZIF-67-incorporated multifunctional nanocomposite organohydrogel for wearable pressure and temperature sensing applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 510:161532.
- [51] Gao Bingbing, Liang Yingpei, Lu Huijuan, et al. Carbonyl chitosan-induced solar thermal healable and ultratough organohydrogel for dual-mode energy production/storage [J]. Nano Energy, 2025, 134:110536.
- [52] Kim T I, Park Y W, Park M, et al. 3D-printable, durable, and wearable poly(vinyl alcohol)/nanosilicate/borax organohydrogel fibers for digital healthcare devices [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2025, 7(12):5611-5621.
- [53] Lü Jiayu, Zhou Qingya, Wang Haifeng, et al. Mechanically strong, freeze-resistant, and ionically conductive organohydrogels for flexible strain sensors and batteries[J]. Advanced Science, 2023, 10(9):2206591.
- [54] Shen Ying, Le Xiaoxia, Wu Yue, et al. Stimulus-responsive polymer materials toward multi-mode and multi-level information anti-counterfeiting: recent advances and future challenges [J]. Chemical Society Reviews, 2024, 53(2):606-623.
- [55] Sun Yu, Le Xiaoxia, Zhou Shiyu, et al. Recent progress in smart polymeric gel-based information storage for anti-counterfeiting [J]. Advanced Materials, 2022, 34:2201262.
- [56] Jiang Qinbo, Chen Meiyu, Qin Zeyu, et al. Stable and thermochromic organohydrogels for thermostatically controlled display windows [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 489:151259.
- [57] Sun Yu, Le Xiaoxia, Shang Hui, et al. Dual-mode hydrogels with structural and fluorescent colors toward multi-stage secure information encryption [J]. Advanced Materials, 2024, 36(28):2401589.
- [58] Jia Hong, Chen Zihao, Chen Yiping, et al. A real-time display screen based on organohydrogel with tunable fluorescence [J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(21):2400673.
- [59] Deng Junwen, Liu Deyu, Liu Haiqi, et al. Persistent room-temperature phosphorescent organohydrogels based on nonaromatic luminogens crosslinked by hydrogen bonds [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(48):2408821.
- [60] Lu Gangchen, Zhang Yanan, Chen Luying, et al. High performance composite phase change materials enhanced via evaporation-induced hydrogen bond network refactoring [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493:152425.
- [61] Chen Zihao, Jia Hong, Liu Zihan, et al. Multistage safety code based on responsive CdS photonic crystal organohydrogel [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480:148185.
- [62] Shan Fuqing, Le Xiaoxia, Shang Hui, et al. Regulating aggregated structures in organohydrogels for on-demand information encryption [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(5):7405-7413.
- [63] Han Yang, Guo Yunzhou, Nakajima T, et al. Thermoresponsive lamellar hydrogels with tunable turbidity, structural color, and anisotropic swelling [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(49):57687-57698.
- [64] Liu Bohan, Chen Zheqi, Zhao Junjie, et al. Digitally programmable microphase separation in polymer network generates microstructure pattern [J]. ACS Nano, 2024, 18(50):34353-34362.
- [65] Le Xiaoxia, Shang Hui, Wu Shuangshuang, et al. Heterogeneous fluorescent organohydrogel enables dynamic anti-counterfeiting [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(52):2108365.
- [66] Sun Yu, Shang Hui, Le Xiaoxia, et al. An organohydrogel with tunable fluorescence and shape-memory property for advanced anti-counterfeiting [J]. RSC Applied Polymers, 2024, 2(3):426-433.

责任编辑:赵建华