

# 自供电水凝胶传感器及其应用

周松<sup>1</sup>, 宁华龙<sup>2</sup>, 陈相燕<sup>2</sup>, 冯玉娇<sup>2</sup>, 徐文龙<sup>2\*</sup>

(1.烟台职业学院基础教学部, 山东烟台 264670; 2.鲁东大学化学与材料科学学院, 山东烟台 264025)

**摘要:**自供电水凝胶传感器融合水凝胶材料特性与能量捕获技术,解决传统传感器舒适性和生物相容性差,以及依赖外部电源导致的体积笨重和续航不足等瓶颈问题。水凝胶凭借其高含水量、可调机械性能、自粘性及导电性,可与异质表面无缝贴合,灵敏精准捕获传感信号。自供电机制可将机械形变、热能、光能或生化能等转化为电能,实现了无源供能和器件的轻量化设计。因此,兼具舒适性、灵敏性及能量自给的自供电水凝胶传感器在健康监测、动态交互、环境感知等领域有重大应用潜力。本文系统总结聚合物水凝胶材料的分类、性质和自供电机理,介绍自供电水凝胶传感器的应用前沿,为未来器件设计和跨领域应用提供参考。

**关键词:**水凝胶;自供电;传感器;健康医疗;动态交互;环境监测

**中图分类号:**O648 **文献标志码:**A

**引用格式:**周松,宁华龙,陈相燕,等.自供电水凝胶传感器及其应用[J].山东大学学报(理学版),2025,60(10):79-104.

## Self-powered hydrogel sensors and their applications

ZHOU Song<sup>1</sup>, NING Hualong<sup>2</sup>, CHEN Xiangyan<sup>2</sup>, FENG Yujiao<sup>2</sup>, XU Wenlong<sup>2\*</sup>

(1. Basic Teaching Department, Yantai Vocational College, Yantai 264670, Shandong, China; 2. School of Chemistry and Materials Science, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China)

**Abstract:** Self-powered hydrogel sensors integrate hydrogel material properties with energy capture technology, solving the bottlenecks of traditional sensors, such as poor comfort and biocompatibility, as well as bulky size and lack of range due to reliance on external power sources. With its high water content, tunable mechanical properties, self-adhesion and conductivity, the hydrogel seamlessly adheres to heterogeneous surfaces and captures sensing signals with sensitivity and precision. The self-powered mechanism can convert mechanical deformation, thermal, optical or biochemical energy into electrical energy, realizing energy supply and lightweight design of the device. Therefore, self-powered hydrogel sensors, which combine comfort, sensitivity and energy self-sufficiency, have significant potential applications in the fields of health monitoring, dynamic interaction and environment sensing. In this paper, we systematically summarize the classification, properties, and self-powered mechanism of polymer hydrogel materials, and introduce the application frontiers of self-powered hydrogel sensors, which will provide references for future device design and cross-field applications.

**Key words:** hydrogel; self-power; sensors; healthcare; dynamic interaction; environmental monitoring

## 0 引言

随着柔性电子技术的快速发展,柔性传感设备在医疗、工业、环境等领域展现出巨大潜力。传统传感器依赖外部电源或刚性电池供电,存在体积笨重、生物相容性差、续航能力不足等局限,难以满足长期植入、动态监测和柔性集成等新兴需求<sup>[1-3]</sup>。在此背景下,水凝胶材料凭借其独特的理化性质,成为新一代智能传感器的理想材料。聚合物水凝胶是通过化学交联或物理交联形成的具有三维网络结构的高分子材料,其高含水量、可调节的机械性能及优异的导电性,使其既能模拟生物组织的柔软特性,又能实现灵敏、高效的信号传

收稿日期:2025-03-23; 网络出版时间:2025-09-30 16:26:27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22472073)

第一作者:周松(1989—),女,讲师,研究方向为机器学习辅助的柔性传感与人机交互。E-mail:zhousong242727@163.com

\*通信作者:徐文龙(1989—),男,副教授,博士,研究方向为凝胶制备、性能及其在柔性传感、能源转换与农业方面的应用。

E-mail:xuwenlong@ldu.edu.cn

递<sup>[4-6]</sup>。自供电技术因其无需外部电源供能的特性成为研究热点,通过引入压电材料、摩擦电纳米发电机(TENG)或利用塞贝克效应、光电效应等机制研发的自供电水凝胶传感器可将机械形变、人体动能、温度变化、光照甚至生物分子(如酶、微生物等)化学能直接转化为电能,从而摆脱对传统电源的依赖<sup>[7-11]</sup>。自供电水凝胶传感器实现了传感功能与能量供给的一体化,成为柔性电子领域的前沿方向。这种器件不仅具有轻量化的结构,还具有良好的适形附着性和生物相容性,能够与异质表面无缝贴合,实现对复杂动态的精准监测。尽管不同类型的自供电水凝胶在灵敏度、响应时间、拉伸率、自修复效率等关键技术指标上存在差异,但可根据其优势匹配应用场景,目前已成功设计不同功能的传感器并广泛应用于健康医疗、动态识别、信息安全、环境监测等领域<sup>[2,7,12-24]</sup>。本文系统总结了聚合物水凝胶的分类和性质,梳理了五类自供电水凝胶传感器的供电机理和材料特征,同时综述了自供电水凝胶传感器在健康医疗、动态交互和信息安全、环境监测等领域的最新进展,为自供电水凝胶传感器的设计和应用提供参考。

## 1 聚合物水凝胶的分类与结构

水凝胶研究可以追溯到1960年,Wichterle和Lim<sup>[25]</sup>首次制备了聚(2-羟乙基甲基丙烯酸酯)水凝胶,由于其亲水特性和生物相容性,该凝胶在隐形眼镜和眼科手术方面具有应用前景,作为一种独特且极具潜力的材料受到了广泛关注。聚合物水凝胶,本质上是一类以水为分散介质,由亲水性聚合物通过化学交联或物理交联形成具有三维网络结构的高分子材料<sup>[26-28]</sup>。其内部丰富的亲水基团赋予水凝胶独特的吸水溶胀特性,而且能够保持形态不溶解于水。这一特性使得聚合物水凝胶在外观和触感上与生物组织极为相似。因此,聚合物水凝胶在生物医学、环境保护、智能传感等众多领域展现出巨大的应用价值,开启了材料科学的新探索方向。

### 1.1 聚合物水凝胶的分类

#### 1.1.1 按交联方式分类

聚合物水凝胶三维网络结构的形成主要依赖于共价相互作用和非共价相互作用<sup>[29-30]</sup>,根据作用力的不同可以将聚合物水凝胶分为物理交联水凝胶、化学交联水凝胶和物理化学双交联水凝胶三类<sup>[31]</sup>。

物理交联水凝胶主要通过一系列非共价相互作用(氢键、范德华力、疏水作用、主客体作用、离子作用)<sup>[28,32-34]</sup>来构筑水凝胶的三维网络结构。这些非共价键虽然作用较弱,但是数量众多,能够在水凝胶中形成稳定可逆的物理交联网络<sup>[35-36]</sup>。其中,基于氢键交联是制备物理交联水凝胶最常用的技术,许多用于合成水凝胶的天然和合成聚合物都可以形成氢键<sup>[37]</sup>。Zhao等<sup>[38]</sup>报道了以淀粉为原料合成的天然多糖基水凝胶,该水凝胶具有连续氢键网络。构建物理交联网络时,氢键常与疏水相互作用协同发生,当以两性亲水聚合物原料制备水凝胶时,其疏水基团在水溶液中会倾向于聚集,以减少与水分子的接触面积,从而形成疏水微区。这些疏水微区作为物理交联点,将聚合物链连接起来形成水凝胶<sup>[39]</sup>。但是疏水基团的过于聚集可能会改变大分子构象,影响水凝胶部分性能,因此氢键的存在可以与疏水相互作用协同稳定物理交联网络。另外,静电相互作用也能增强凝胶的性能,在Cui等<sup>[33]</sup>的研究中,将阴、阳离子引入水凝胶体系,促进了聚合物间(或内)非共价相互作用(如静电相互作用和氢键)的形成,所合成的物理双网络水凝胶在获得增韧效果的同时,导电性也得以提升。在自供电水凝胶传感器领域,导电性是衡量水凝胶适用性的关键指标之一。因此,离子的添加既可以促进水凝胶的构建,也能优化其自供电性能。随着对非共价键研究的深入,整合多种非共价相互作用的水凝胶正被持续开发。据报道,一种超分子水凝胶利用主-客体相互作用、氢键和配位作用三种非共价键,开发了完全物理交联的体系(图1(a))<sup>[40]</sup>。虽然物理交联水凝胶应用广泛,但其交联点通常是通过较弱的非共价键形成,整体交联密度相对较低,导致其力学性能和稳定性普遍逊色于化学交联水凝胶。因此,开发基于化学交联的水凝胶正逐步兴起,以满足相关需求。

化学交联水凝胶的网络结构通常在交联剂参与下通过高分子链间的共价键连接形成。其制备方法包括自由基聚合<sup>[41-43]</sup>、点击化学反应<sup>[44-45]</sup>、酶促反应<sup>[46]</sup>、席夫碱<sup>[47]</sup>反应以及Diels-Alder反应<sup>[48]</sup>等实现。其中,自由基聚合是化学交联法制备水凝胶的常用方法,其过程涉及在光、热、辐射或引发剂作用下,小分子单体生成自由基,进而经共聚或缩聚反应形成高聚物。该方法对单体的适用范围广、反应条件温和。图1(b)使用了两步自由基聚合,首先热聚合时,过硫酸铵(APS)产生的初级自由基优先攻击热响应性乙烯基(NIPAM)

单体,使其快速链增长形成富含聚异丙基丙烯酰胺(pNIPAM)的网络。之后在室温下经波长为 365 nm 紫外光照射进行 2~4 h 的光聚合反应,最终制备得到双层水凝胶<sup>[49]</sup>。同时,在制备化学交联水凝胶时,为了提高反应的选择性、可控性和速率可以使用点击化学反应交联的策略。该策略制备水凝胶的机制主要是基于特定官能团之间的快速、特异性反应,从而构建起水凝胶的三维网络结构<sup>[50-51]</sup>。如 Milton 等<sup>[52]</sup>通过点击化学(Michael 型加成反应),实现了细胞外基质水凝胶的快速、室温下成型,提供了一种高效制备化学交联水凝胶的策略。此外,可以根据对水凝胶性能的特殊需求而选择不同的制备策略。如利用酶调节制备自修复水凝胶<sup>[53]</sup>;或通过动态席夫碱反应开发自修复的大豆蛋白水凝胶<sup>[47]</sup>。上述制备化学交联水凝胶的策略中,点击化学反应和动态席夫碱反应都涉及到利用动态共价键构筑水凝胶网络结构。除上述方法外,Diels-Alder 反应因在动态共价键构筑过程中无副产物,无不良反应,动态可逆,已成为合成具有动态交联网络性质水凝胶的关键技术。利用该技术,可通过动态共价键(如二硫键、金属配体配位键和硼酯键等)连接水凝胶网络,动态共价键不仅赋予水凝胶具有较高的稳定性,而且在受到损伤后能够自我修复<sup>[54]</sup>,从而直接拓展了化学交联水凝胶的应用领域。

除了上述单纯依靠物理交联和化学交联方式制备水凝胶外,水凝胶三维网络还可以同时包含共价键(动态和非动态)和非共价键相互作用,从而综合了两类水凝胶的优势。其优势主要体现在以下几个方面:首先,力学性能得到优化,能够承受强大外力的同时兼具较高的弹性、韧性和恢复能力;其次,环境稳定性增强,在外界环境(如温度、pH)发生变换时,可通过调整共价键和非共价键协同作用以维持水凝胶网络结构的稳定性和完整性;第三,刺激响应性增强,通过物理与化学交联构建的多元网络结构引入了丰富的官能团,使其对外界刺激做出快速响应。基于以上性能的改善,物理-化学双交联水凝胶在生物医学、环境工程和自供电传感等领域的应用潜力得到拓展。如 Pan 等<sup>[55]</sup>根据物理化学交联水凝胶的特性,采取双交联策略(第一步化学交联、第二步物理交联)制备出具有优异力学性能、较高离子电导率( $35.35 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )和稳定电化学窗口(2.4 V)的水凝胶(图 1(c)),该双交联水凝胶的制备为自供电可穿戴设备的开发提供了一种新途径。

### 1.1.2 按来源分类

从来源角度看,聚合物水凝胶制备原料丰富且类别多样。总体上,聚合物水凝胶的制备原料可分为天然聚合物和合成聚合物两个类别。根据不同的制备原料,聚合物水凝胶可以分为天然聚合物水凝胶、合成聚合物水凝胶以及杂化聚合物水凝胶(含有天然和非天然两种聚合物)3 种。不同的制备原料赋予了聚合物水凝胶多样化的性能及多领域应用。

首先是天然聚合物水凝胶,主要以从自然界获得的高分子材料作为原料,包括多糖(淀粉、壳聚糖、纤维素、海藻酸盐、透明质酸等)、蛋白质(明胶、丝素蛋白、胶原蛋白等)、木质素以及橡胶等<sup>[56-58]</sup>。因原料来自于大自然,因此天然聚合物水凝胶往往具有良好的生物相容性、生物可降解性以及制备成本低廉的优点<sup>[59]</sup>。据此,天然聚合物水凝胶被广泛应用于生物医学等领域。除了兼具上述特性之外,部分天然聚合物水凝胶还可以起到抑制细菌生长的作用<sup>[60-61]</sup>。如基于壳聚糖结构的水凝胶,壳聚糖内的氨基在酸性环境中发生质子化反应,进而产生能与带负电荷细菌的细胞表面结合成为季铵盐,以破坏细菌细胞膜进而杀死细菌<sup>[62]</sup>。如 Li 等<sup>[63]</sup>以壳聚糖和海藻酸钠为原料制备了具有高强度的水凝胶膜,壳聚糖的存在不仅起到抑菌作用,而且其与海藻酸钠结合产生了大量分子间氢键和静电相互作用,提升了水凝胶的机械性能。近些年蛋白质结构工程的发展,使得可设计的蛋白质材料应用在人类和智能系统之间成为可能,基于设计蛋白的水凝胶往往具有良好的弹性恢复、高导电性和稳定性等,适合用于多功能材料的特性。例如研究人员通过对牛血清蛋白的蛋白质结构重构,制备了一种兼具优异的机械可逆性、生物相容性、生物降解性、抗冻性和抗菌性能的蛋白质基水凝胶,并成功将其应用于自供电智能交互系统,不仅实现了人体运动信号的监测和多通道远程信号的采集,还可通过人机交互设计操控机械设备<sup>[64]</sup>,以上为基于天然聚合物开发的水凝胶提供了思路。尽管天然聚合物水凝胶凭借其独特的生物特性,在多个领域展现出显著优势,但也存在着机械性能有限、性能调控相对困难等局限性。为了突破这些瓶颈,科研人员将目光投向了合成聚合物水凝胶。

合成聚合物水凝胶是通过化学合成手段制备的高分子材料来构建的三维网络水凝胶,合成聚合物一般由单体与交联剂通过共聚反应形成,其中单体相互连接构成聚合物骨架。常见的合成聚合物有聚乙烯醇、聚丙烯酸、聚丙烯酰胺、聚 N-异丙基丙烯酰胺、聚乙二醇等<sup>[65-67]</sup>。相较于天然聚合物水凝胶,合成聚合物水凝胶具有高度可调控性,能够对水凝胶的机械强度、溶胀性能、响应特性等进行精准调控<sup>[68-69]</sup>。Huang 等<sup>[66]</sup>根

据合成聚合物水凝胶的可调控性,设计并提供了一种常温常压下可控合成聚合物水凝胶的方法,所制备的合成聚合物水凝胶不仅具有任意可调控的形状,而且可定制其表面密度和多孔结构。得益于良好的可加工特性,该类水凝胶可应用在能量储存、气体传感、吸附污染等多个领域。此外,通过对合成聚合物水凝胶合理设计,合成聚合物水凝胶在应用中展现出以下优势:(1) 优异的机械性能,如良好的柔韧性与可拉伸性;(2) 具备多功能传感特性;(3) 高效的能量收集与转换能力,以及高响应灵敏度。近些年,随着智能传感领域的发展对材料性能要求的不断提高,研究者以丙烯酰胺、三羟基团簇-N-[三(羟甲基)甲基]丙烯酰胺和1-丁基-3-乙烷基咪唑溴化物为单体制备了全聚合水凝胶。该水凝胶高强度、高韧性、低滞后、良好导电性和优异粘附性,适用于多响应、自供电可穿戴传感器<sup>[65]</sup>,此类水凝胶的发展突破了传统传感领域,亦在自供电传感方面有了一定推进。

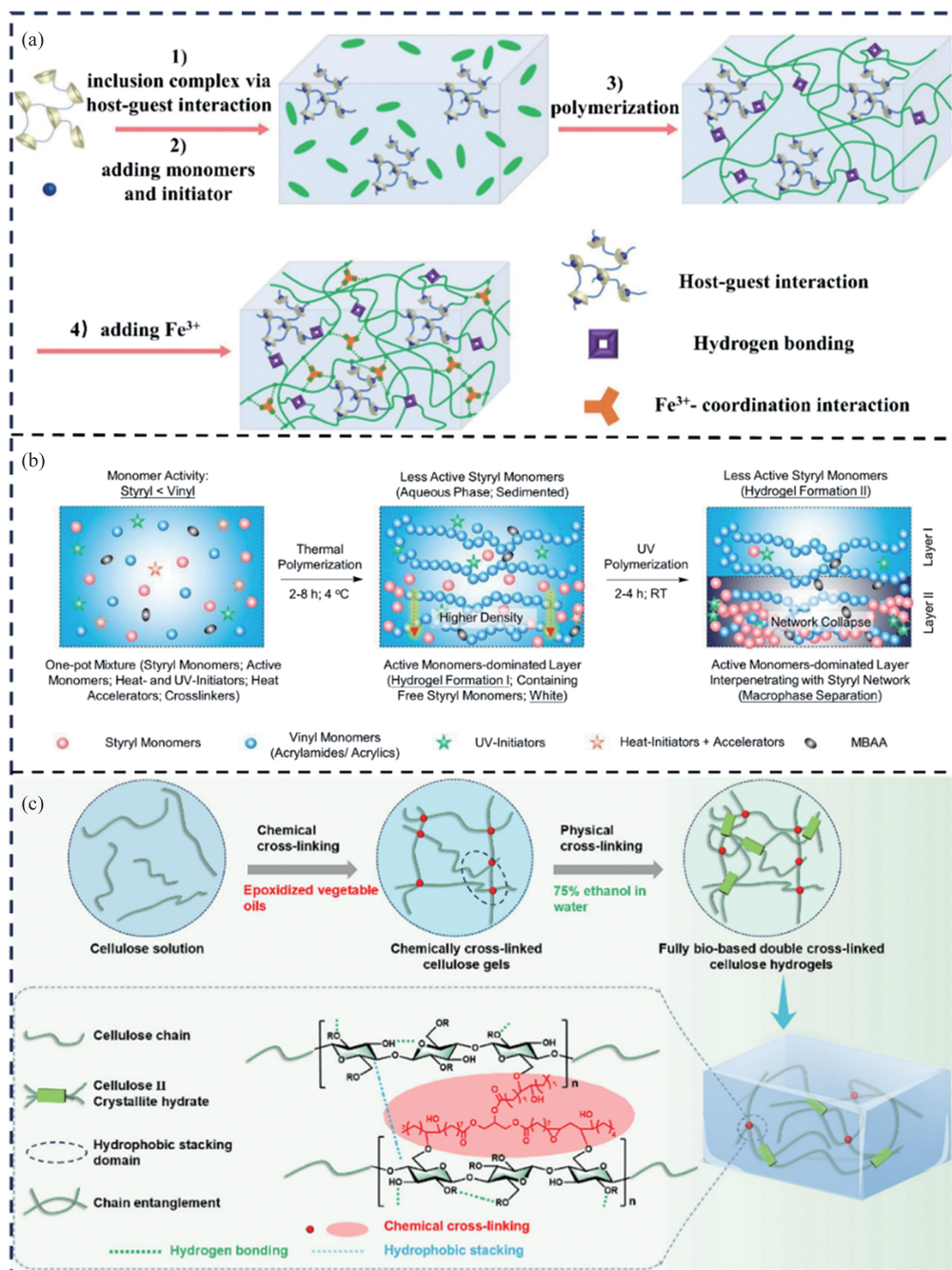


图1 (a) 含三种不同非共价交联方式物理水凝胶的制备<sup>[40]</sup>; (b) 通过自由基诱导的大尺度相分离策略制备双层水凝胶<sup>[49]</sup>; (c) 全生物基双交联纤维素水凝胶的制备<sup>[55]</sup>

Fig.1 (a) Preparation of physical hydrogels incorporating three non-covalent crosslinking mechanisms<sup>[40]</sup>; (b) fabrication of bilayer hydrogels via a radical-induced large-scale phase separation strategy<sup>[49]</sup>; (c) synthesis of fully bio-based double-crosslinked cellulose hydrogels<sup>[55]</sup>

尽管上述两种水凝胶凭借各自独特性能在诸多领域应用广泛,展现出重要价值。然而,随着各行业对材料性能要求的不断攀升,单一类型的水凝胶在满足多样化、高性能需求时逐渐显现出局限性。在此背景下,融合了天然与合成聚合物优势的杂化聚合物水凝胶,因其在突破现有瓶颈、开发性能更卓越且功能更丰富的水凝胶产品方面的潜力,正日益受到研究人员的密切关注与深入探索。在性能上,这类水凝胶既保留了天然聚合物良好的生物相容性和生物可降解性<sup>[70-71]</sup>,另一方面,又具备合成聚合物可调控的性能特点,通过合理设计杂化方式和组成比例,还可以赋予水凝胶多种功能特性。如将壳聚糖和聚乙烯亚胺溶解于羧化纤维素纳米纤维分散液中,随后加入植酸进行交联制备了杂化水凝胶<sup>[20]</sup>,天然和合成聚合物的共同参与使得水凝胶在应变传感器和摩擦纳米发电机(TENG)电极最重要的 3 个性能指标(拉伸性、测量系数和导电性)之间达到了理想的平衡。此结果证明了杂化策略的协同优势及巨大的应用潜力。

## 1.2 聚合物水凝胶的结构

聚合物水凝胶作为一种独特的软物质材料,它诸多优异的性能来源于其精妙的结构。聚合物水凝胶的结构主要由聚合物链、交联点、水和功能基团组成。聚合物链是水凝胶结构的骨架基础,通常由大量重复单元(单体)通过共价键连接构成;这些聚合物链之间通过共价键和非共价键相互交织,组成水凝胶的三维网络<sup>[72]</sup>。聚合物链可由天然或合成聚合物组成,天然聚合物链通常赋予水凝胶良好的生物相容性和生物活性,在其在生物医学领域获得广泛应用;而合成的聚合物链则可通过精确的分子设计来调控分子量、链结构和化学性质等,进而赋予水凝胶多样化的性能<sup>[42]</sup>。此外可向聚合物链中引入特殊材料以满足特定应用需求,如将聚偏氟乙烯与水凝胶原有聚合物链结合以制备压电水凝胶传感器<sup>[17]</sup>。聚合物的连接需要交联点,这是使水凝胶区别于线性聚合物溶液或悬浮液的关键特征。交联点的一个重要参数是官能度,涉及连接到每个交联点的聚合物链的数量以及这些交联点在整个交联链内的密度。提高交联点的官能度可以增强和稳定水凝胶的网络结构<sup>[73]</sup>。水是水凝胶三维网络结构的重要支撑因素,水凝胶中的水分为自由水和结合水。自由水填充于水凝胶的大孔隙中,不直接参与聚合物网络的形成和维持,可以自由扩散并充当小分子物质的运输介质<sup>[74]</sup>,同时影响其溶胀性能;结合水则可以结合在聚合物链上的极性基团周围<sup>[75]</sup>,在一定程度上影响水凝胶的韧性和溶胀行为。引入特定功能基团可以赋予水凝胶特殊性能,如离子基团赋予水凝胶离子交换和增强响应性、生物活性基团满足水凝胶在生物医学领域的应用。聚合物网络的不均匀性、水与聚合物链的相分离及制备条件等因素会导致水凝胶结构中存在孔隙,这为聚合物链提供了一定的活动空间,有助于缓解了外力对水凝胶的影响。但是孔隙过多会破坏网络结构的完整性导致力学性能下降。另一方面孔隙也为离子传输提供了通道,为水凝胶在自供电传感领域的应用提供可能<sup>[76]</sup>。上述几部分共同构成水凝胶结构,是维持其三维网络稳定的关键因素。

聚合物网络形态的不同会影响水凝胶的网络结构,根据聚合物网络形态对水凝胶的网络结构划分为均相网络、互穿网络(全互穿和半互穿网络)以及微凝胶网络。首先是均相网络结构,其内部聚合物网络在化学组成和物理性质上高度均一,不存在相分离现象<sup>[77]</sup>。聚合物链的化学结构、分子量分布均匀,交联点与孔隙在空间中呈均匀分布状态,赋予水凝胶良好的稳定性和各向同性。此类网络结构的水凝胶主要适用在对性能一致性要求较高的应用中,如用于密封伤口的可喷涂水凝胶,在实现快速封闭伤口的同时保证了水凝胶网络的均匀<sup>[77]</sup>。全互穿或半互穿网络是改善水凝胶性能的有效方法。全互穿网络是将两个或更多个聚合物网络组合成的聚合物网络<sup>[78]</sup>;半互穿网络则定义为由一个或多个网络与一个或多个直链或支链聚合物构成的聚合物网络,其特征为至少部分直链或支链大分子在分子尺度上贯穿至少一个网络<sup>[79-80]</sup>。互穿网络的设计方法常用于构筑双网络水凝胶<sup>[81]</sup>,在克服单网络水凝胶弊端的基础上,并以其良好的机械、抗溶胀、自修复等性能而被广泛地应用于组织工程、智能传感器、离子吸附等领域。如 Han 等<sup>[82]</sup>设计的半互穿网络水凝胶具有高拉伸率、高导电和信号传输低的特点,该水凝胶可组装成摩擦纳米发电机,为高性能柔性可穿戴自供电监测设备的研究提供了思路。传统水凝胶通常交联成连续的大块体积状态,然而大体积水凝胶并不适用所有情况,例如需要注射或更小尺寸的情况,因此可由纳米/微米级的微凝胶颗粒分散在连续相中构成微凝胶<sup>[83]</sup>。微凝胶颗粒本身具有交联的网络结构,它们在连续相中相互作用,形成宏观的凝胶网络。微凝胶网络具有独特的流变学性质,如剪切变稀行为,在受到剪切力时粘度降低、流动性增加<sup>[84]</sup>,体现了微凝胶在涂层、生物医学和可注射材料方面的应用潜力。如使用微凝胶包封细胞,提高移植细胞的治疗效果<sup>[83]</sup>。

除了上述结构外,水凝胶还具有一些特殊的结构,如仿生有序结构和分层多孔结构,这些结构赋予了水凝胶独特的性能和应用潜力。在增强水凝胶机械性能的策略研究中,天然生物体因有序结构展现出的优越机械性能为该领域提供了重要灵感。受此启发,研究人员构筑了包括束状结构<sup>[85]</sup>、纤维链结构<sup>[86]</sup>、梯度结构<sup>[87]</sup>、阵列结构<sup>[88]</sup>和片层结构等多种仿生有序结构,拓展了水凝胶的多方面应用。水凝胶在实际应用中,其质量输运和体积变化能力受到扩散的限制<sup>[89]</sup>,目前改善水凝胶扩散的典型方法是通过增加孔隙度,然而这会牺牲水凝胶力学性能,或者通过定向限制孔隙来限制总体积流量<sup>[90]</sup>。根据这一问题,Alsaid等<sup>[90]</sup>基于海绵结构通过共溶剂光聚合,制备出具有增强扩散性和机械性能的类型海绵的分层多孔水凝胶,为解决水凝胶扩散与机械性能难以兼顾的问题提供了新途径。上述水凝胶聚合物网络结构展现了水凝胶在多领域应用方面的巨大潜力。

## 2 聚合物水凝胶的性能

### 2.1 溶胀和抗溶胀性能

水凝胶的溶胀是其重要特性之一,水凝胶内部通常含有大量亲水基团,如羟基(—OH)、羧基(—COOH)、氨基(—NH<sub>2</sub>)等<sup>[91]</sup>。水凝胶的三维网络结构具有弹性和延展性,保证其内部能够容纳水分子。当水凝胶处于纯水或低浓度溶液中,水分子会顺着浓度梯度向水凝胶内部扩散,导致水凝胶溶胀。水凝胶的溶胀行为对于自供电传感器的影响是双面的。

水凝胶溶胀时体积增大,在自供电传感器中,这种体积变化可将物理信号转换为电信号。溶胀会改变水凝胶内部的微观结构,进而影响其电学特性。对于离子导电水凝胶,溶胀过程中吸收的液体会引入更多离子,导致离子浓度、传输路径与电导率发生变化,从而产生与溶胀程度相关的电学信号,实现对外界刺激的传感<sup>[92]</sup>。在生物医学传感领域,水凝胶的溶胀特性可用于检测多种生理指标。例如,可植入式自供电生物传感器利用水凝胶的溶胀特性,当其接触生物组织或体液并发生溶胀时,溶胀引起的电信号变化可用于实时监测体内的生理信息<sup>[93]</sup>。

但水凝胶的溶胀行为也存在一些不利影响。一是水凝胶过度溶胀或溶胀不均,会改变内部结构,影响电学、力学性能稳定性,导致传感器信号漂移;二是水凝胶达到溶胀需要一定时间影响传感器响应速度;三是水凝胶反复溶胀可能导致其内部结构逐渐破坏影响传感响应的稳定性<sup>[94-95]</sup>。因此,为了解决水凝胶的溶胀问题,抗溶胀水凝胶的开发得到了广泛研究。改善水凝胶抗溶胀性能的策略有多种,如增强水凝胶网络交联密度<sup>[96]</sup>、引入疏水交联链<sup>[97]</sup>、构建互穿双网络<sup>[98]</sup>、水凝胶表面改性<sup>[32]</sup>等。抗溶胀水凝胶既能保持三维网络结构,防止过度溶胀导致的结构破坏,又能不受溶胀干扰,保证输出信号真实反映被测量物的变化,提升传感器传感性能。如Zhang等<sup>[99]</sup>利用共晶溶剂制备的水凝胶在pH 1~11的水下环境中抗溶胀性能良好,而且能够实现水下人体运动检测并传输信息,展现出良好的自供电传感性能。综上,可以根据水凝胶的溶胀与抗溶胀性能,开发水凝胶在自供电传感领域的不同应用,确保传感器在复杂环境下维持结构和性能稳定。

### 2.2 力学性能

水凝胶的力学性能(强度、弹性、韧性等)不仅影响柔性可穿戴电子设备的灵敏度、耐久性和能量转换效率,而且与传感器在生物体上的机械适配性和舒适性密切相关。水凝胶强度指水凝胶抵抗外力破坏的能力,体现在拉伸强度、压缩强度等参数,反映其坚固程度。拉伸强度关乎自供电传感器的形变稳定性,压缩强度则影响其压力传感耐久性。调控这些力学性能有助于优化机械-电转换效率,提升传感器整体性能。拉伸强度 $\sigma_t$ 可根据水凝胶匀速拉伸断裂时的最大拉力值( $F_{\max}$ ),按公式 $\sigma_t = \frac{F_{\max}}{A_0}$ 计算。 $\sigma_t$ 越大,表明拉伸强度

越大。压缩强度 $\sigma_c$ 则按公式 $\sigma_c = \frac{P}{A}$ 计算,用于衡量水凝胶抵抗压缩变形和破坏的能力<sup>[100]</sup>。通常,水凝胶的拉伸强度和压缩强度可通过应力-应变曲线直观表征(如图2(a)和2(b))<sup>[101]</sup>。兼具优异拉伸和压缩强度的水凝胶能适应复杂力学环境,在人体运动或工业场景中维持结构稳定,保障长期可靠性,并拓宽传感器量程。

在关注水凝胶静态力学强度的基础上,其动态弹性行为作为另一个关键性能指标,直接决定了材料在循环载荷下的耐久性和形变恢复能力。因此,弹性也是水凝胶的关键特性。水凝胶的弹性是指其在受到外力作用发生变形后,去除外力能够恢复到原始形状和尺寸的能力。而水凝胶的弹性大小可以根据弹性模量( $E$ )、断裂伸长率( $\varepsilon_b$ )或断裂强度的大小表示。弹性模量( $E$ )的表达式: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ ,其中 $\sigma$ 为应变, $\varepsilon$ 为应力, $E$ 反映了水凝胶抵抗拉伸变形的能力,数值越小弹性越大。水凝胶的弹性决定了能量收集的效率,较低的 $E$ 使得自供电传感器能够敏锐地感知到极其细微的外力变化,将这些微弱的外力信号精准地转化为电信号。另外,低弹性模量水凝胶能发生较大的弹性变形,保证了水凝胶与生物组织之间的力学兼容性,减少了因相互作用而产生的不适感,这种特性使其与生物组织的力学性能高度匹配。当将其应用于传感器时,能完美贴合人体皮肤的各种曲线和轮廓,无论是关节的频繁活动,还是肌肉的细微伸缩,水凝胶传感器都能随之灵活变形,不会对人体运动造成任何阻碍,极大地提升了穿戴的舒适度<sup>[102]</sup>。在自供电传感器中,水凝胶的弹性模量直接影响器件在机械刺激下的形变响应灵敏度,而断裂伸长率则决定了其可承受的最大形变范围。断裂伸长率的表达式: $\varepsilon_b = \frac{L_b - L_0}{L_0} \times 100\%$ , $L_b$ 表示样品断裂时的长度, $L_0$ 表示样品初始时的长度, $\varepsilon_b$ 越大,水凝胶的弹性变形能力越强<sup>[102]</sup>。断裂强度是衡量水凝胶抵抗拉伸破坏的能力,断裂强度越大水凝胶抵抗拉伸破坏的能力越强。如图 2(c)所示<sup>[20]</sup>,不同配比的水凝胶 $E$ 值、断裂伸长率和断裂强度不同,通过调控最优配比,两者在一定条件下可达到最佳数值<sup>[101]</sup>。对于保障自供电传感器在复杂多变的受力环境中稳定运行至关重要。通过调控水凝胶的弹性性能,可以优化传感器在能量收集过程中的机械适应性和形变恢复能力,从而提高自供电系统的稳定性和能量转换效率。

水凝胶的韧性( $U$ )指水凝胶在受力时抵抗断裂、吸收能量并发生较大变形而不破裂的能力。水凝胶的韧性更关注水凝胶在拉伸过程中的延展性和塑性变形能力。水凝胶的韧性一般通过柱状图呈现,在拉伸测试中利用应力-应变曲线下的面积来计算(图 2(d))<sup>[103]</sup>,计算公式为 $U = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma d\varepsilon$ <sup>[102]</sup>。具有良好韧性的水凝胶不仅表现出良好的抗疲劳性能,而且能满足与人体组织的动态贴合能力和舒适性。韧性水凝胶可随皮肤同步拉伸回缩,减少界面剪切力,同时水凝胶的韧性保障了延展性的稳定。水凝胶延展性(通常断裂应变可达 500%~1000%)与人体皮肤(应变范围 10%~50%)形成超弹-粘弹性协同作用<sup>[104]</sup>。这种特性使其在人体运动时,不但能够通过大范围的塑性形变,吸收机械应力,避免因刚性材料与软组织模量差异导致的局部压迫感或皮肤损伤,而且保证水凝胶能够与电极材料形成紧密、稳定的接触界面,减少了接触电阻,提高了电荷传输效率。

水凝胶力学性能的增强策略,如优化聚合物网络、添加增强材料、采用复合交联技术、引入纳米材料以及调整环境因素等<sup>[105]</sup>,可显著提升水凝胶机械强度,拓展水凝胶的应用。如 Li 等<sup>[106]</sup>通过霍夫曼斯特效应来增强水凝胶的机械强度,将韧性提升到 $(16.57 \pm 3.13) \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而水凝胶力学性能的提升往往能增益其传感性能。以 Wang 等<sup>[65]</sup>构筑的双网络水凝胶为例,其低滞后和高韧性等优异力学性能赋予传感器优异的动作捕捉能力,在监测人体运动时可精准、稳定响应各种动作,有效减少信号误差,为自供电可穿戴应变传感器提供了稳定可靠的基础。综上,水凝胶优异的力学性能不仅保证了其在应用中的长寿命和可靠性,而且在自供电传感器中确保了信号输出的稳定性、准确性以及宽范围应力感知能力。因此,优化水凝胶的力学性能至关重要。

### 2.3 黏附性

水凝胶的黏附性是指其与其他材料表面紧密结合的能力,作为自供电传感器关键材料的重要特性,这种界面结合能力直接影响传感器的能量收集效率和信号稳定性。此外,黏附性使得水凝胶具有多场景适应性。用于伤口敷料时,水凝胶的黏附性使其能够紧密贴合伤口表面,防止细菌侵入,保持伤口湿润,促进伤口愈合<sup>[60]</sup>;在电子器件领域,水凝胶可以作为柔性电极材料,通过黏附在皮肤表面或其他柔性基底上,实现生物电信号的稳定采集<sup>[107]</sup>。

水凝胶通过多种黏附机制(包括物理互锁、化学键合和分子扩散)与基底材料形成稳定界面<sup>[108]</sup>。具有黏附的水凝胶往往能对多种基材进行黏附,通常通过搭接剪切实验测试水凝胶的黏附强度(图 2(f))<sup>[101]</sup>,

如 Lei 等<sup>[101]</sup>开发的水凝胶在测试中对多种基材黏附强度良好(图 2(g)),且在多个循环后对不同基材表现出良好的重复粘合性能(图 2(h))<sup>[101]</sup>。为了更好地应用在各个领域,水凝胶黏附性增强机制正在被广泛研究,如改善水凝胶网络结构、增添黏附促进剂以及对水凝胶表面进行改性等<sup>[109]</sup>。如 Huang 等<sup>[110]</sup>通过在原有水凝胶基础上添加阳离子,增加了静电相互作用,水凝胶对玻璃基底的黏附强度从 3.4 kPa 增加到 97.6 kPa。在摩擦纳米发电机与水凝胶结合的机制上,水凝胶作为摩擦材料,其黏附性使其能够紧密贴合在其他摩擦材料表面。当受到外界机械刺激时,水凝胶与摩擦材料之间发生相对运动,由于黏附性的存在,接触和分离过程更加稳定,从而产生更稳定的摩擦起电效应,实现机械能到电能的高效转换<sup>[111]</sup>。但是,高度黏附性水凝胶在自供电传感领域应用中同样存在缺陷。黏附过程本身需要一定时间,在外界刺激快速变化时(如检测高频振动)水凝胶因黏附而不能及时调整自身状态,造成响应延迟<sup>[112]</sup>。此外,高黏附性水凝胶对环境变化敏感,也会造成信号干扰。在高湿度环境下,水凝胶吸水后黏附力下降、体积膨胀,自供电传感特性改变;温度变化也会影响其黏附性能与内部离子传导效率,致使自供电传感信号不稳定,无法可靠检测物理量的变化。

#### 2.4 生物相容性

随着对柔性可穿戴电子设备和生物医学监测需求的激增,电子设备的安全性变得尤为重要。部分水凝胶凭借其优异的生物相容性,能保证应用生物体的安全性,成为自供电生物传感器的关键材料。具有生物相容性的水凝胶能够模拟细胞外基质环境,与人体组织相容性极佳,极少引发免疫排斥或毒性反应。例如,可穿戴式自修复葡萄糖自适应水凝胶摩擦电诱导传感器用以汗液监测(图 2(i)),水凝胶作为界面材料可减少皮肤刺激,同时维持稳定地汗液收集和葡萄糖检测<sup>[113]</sup>。

以天然大分子为材料合成的生物相容性水凝胶,在与生物体结合时往往离子传导欠佳,难以精确地检测到生物体细微的生理变化。基于此,可采用引入生物活性成分的策略。如将小球藻引入水凝胶制成用于伤口创面愈合的生物医用水凝胶。小球藻光合作用能持续产生生物电流和氧气,既促创面愈合,又作为离子传导介质,协同生物体内离子流动,把生理信号转化为电信号,实现生理参数准确监测<sup>[114]</sup>。在自供电水凝胶生物传感器长期植入生物体时,可能会引发异物反应或纤维囊形成,降低信号采集效率<sup>[115]</sup>,可通过表面功能化修饰(如负载银纳米粒子或抗菌肽)或生物活性界面(如引入细胞外基质成分)的设计来解决<sup>[115-116]</sup>。而未来生物相容性水凝胶的研究主要关注在智能响应性水凝胶,即开发可同步感知生理信号(如葡萄糖水平、pH 值)并自供电的“感知-供能”一体化系统。由此可见,生物相容水凝胶在自供电传感与生物结合的领域存在巨大潜力。

#### 2.5 响应性

水凝胶的响应性源于其三维聚合物网络中亲水基团与外界刺激引发的渗透压变化、链段运动或动态相互作用等物理化学作用<sup>[101]</sup>。响应性直接决定了传感器的灵敏度、响应速度和稳定性,是构建高性能自供电传感器的关键。自供电水凝胶传感器能对多种物理、化学和生物刺激产生响应,为构建多功能自供电传感器提供了丰富的选择。在物理刺激方面,对压力、应变、温度等变化敏感,如在可穿戴设备中,压力响应型水凝胶传感器可将人体运动产生的压力转化为电信号,实现对运动状态的精准监测<sup>[117]</sup>;在化学刺激方面,对 pH 值、离子浓度等变化有反应,如特殊离子的浓度变化会改变水凝胶的离子浓度与电荷分布,产生电信号,实现自供电并监测环境离子污染<sup>[118]</sup>。

而多数水凝胶在多次响应循环过后,其性能会下降,进而会出现疲劳现象。在传感器应用中,水凝胶的疲劳会使其响应信号逐渐减弱,灵敏度降低,影响传感器的使用寿命和准确性。现有解决方法是可以通过构筑响应性水凝胶的多网络结构、表面改性处理或优化制备材料等。如 Xiao 等<sup>[119]</sup>通过掺杂二维材料(石墨氮化碳)制备的水凝胶摩擦纳米发电机在 9 200 次连续触点分离撞击后,能够输出稳定且连续的电压信号(图 2(e)),表明了自供电传感器具有良好的环境耐受性和抗疲劳性。此外,为了在复杂环境中适用,部分柔性传感器开始往集成多功能的方向发展,即水凝胶能同时对不同类型的刺激产生响应。如一种基于热电水凝胶的电子皮肤,能够同时感应温度和应变刺激,利用人体与外部环境之间的温差,实现自供电传感。该水凝胶具有优异的柔韧性和适应性,根据应力变化监测颈部姿势和足部运动等健康指标<sup>[120]</sup>。综上,水凝胶的刺激响应性是启动自供电传感器运转的关键,其多模态响应能力为传感器在多领域的多功能化发展提供可能。

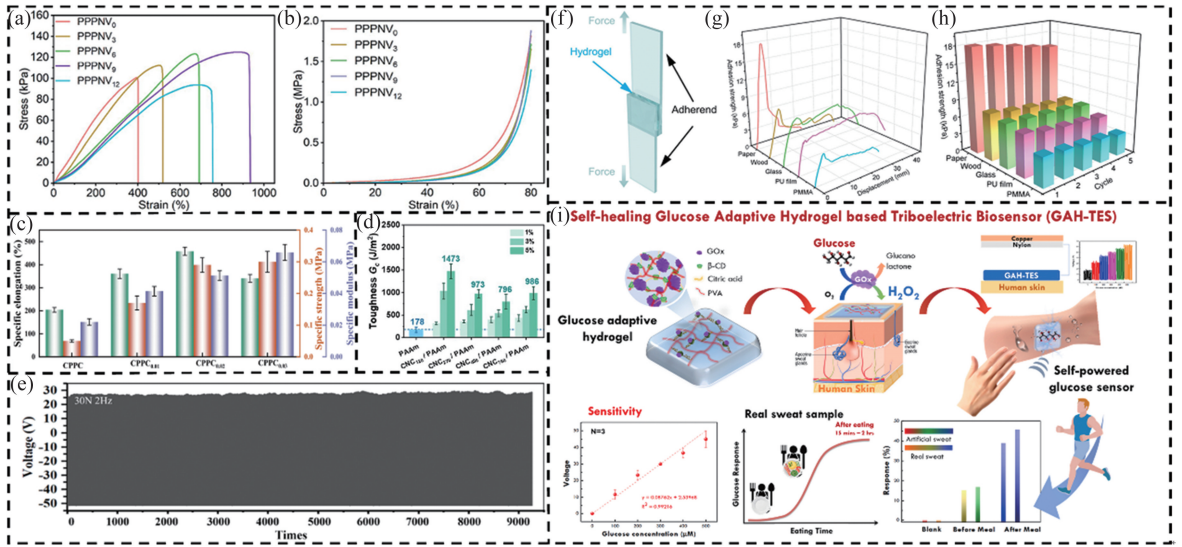


图 2 (a—b) 不同 PPPNV 水凝胶的拉伸和压缩应力-应变曲线<sup>[101]</sup>; (c) CPPC<sub>x</sub> 水凝胶的特定断裂伸长率、断裂强度和弹性模量<sup>[20]</sup>; (d) PAAM 和 CNC<sub>x</sub>/PAAM 样品的韧性<sup>[103]</sup>; (e) g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PVA 水凝胶摩擦纳米发电机耐久性试验结果<sup>[119]</sup>; (f) 搭接剪切实验示意图; (g) 水凝胶在各种基底上的剥离曲线; (h) 水凝胶在不同基材上的重复粘性性能测试结果<sup>[101]</sup>; (i) 用于汗液监测的自修复葡萄糖自适应水凝胶基摩擦电诱导传感器<sup>[113]</sup>

Fig.2 (a—b) tensile and compressive stress-strain curves of different PPPNV hydrogels<sup>[101]</sup>; (c) specific elongation at break, tensile strength, and elastic modulus of CPPC<sub>x</sub> hydrogel<sup>[20]</sup>; (d) toughness of PAAM and CNC<sub>x</sub>/PAAM samples<sup>[103]</sup>; (e) durability test results of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/PVA Hydrogel TENG<sup>[119]</sup>; (f) schematic of lap shear test; (g) peel curves of hydrogels on various substrates; (h) test results of repeated adhesion performance of hydrogels on different substrates<sup>[101]</sup>; (i) self-healing glucose-adaptive hydrogel-based triboelectric-induced sensor for sweat monitoring<sup>[113]</sup>

### 3 自供电水凝胶传感器

自供电水凝胶传感器是一种结合水凝胶材料与自供能技术的新兴传感装置。水凝胶凭借其高柔性、自粘性、生物相容性和环境响应性,可有效感知压力、形变、温度等变化;同时通过集成压电效应、摩擦电效应、塞贝克效应、光电效应、生物电化学反应等自供电机理(表 1),实现无需外部电源的能量自给。

表 1 各种自供电机理的工作原理及优劣势

Table 1 Working principle, advantages and disadvantages of various self-power supply mechanisms

效应类型	工作原理	优势	劣势	挑战	尚未解决的核心问题
压电效应	在外力(如压力、形变)作用下,材料内部的正负电荷发生重新分布,导致电压或电流的产生。	高灵敏度和快速响应,适用于微小压力或变形的检测,适用于动态检测。	材料依赖性,需要使用特定压电材料,应用场景受限且输出电压较低,需要放大电路。	能量转导损耗高(>50%),力学稳定性差,压电常数低。	如何降低机械能-电能转换中的分子间摩擦和键断裂损耗;优化压电相分布与聚合物基体界面相容性。
摩擦电效应	两种不同材料接触和分离时,电子从一个表面转移到另一个表面,产生电荷积累,形成电压差。	材料选择广泛且成本低。结构简单,可直接产生电压。	材料耐久性差、易磨损,能量转换效率较低且输出不稳定。	高湿度环境电荷耗散(湿度>80%时输出衰减>70%),表面磨损导致寿命缩短。	摩擦副材料在动态接触中的耐久性提升;复杂环境下的电荷保持机制。
热电效应	在材料两端存在温差时,电子在热梯度作用下迁移,形成电压或电流。	能够回收废热,具有环境友好性,通过温度差驱动无需外部电源,结构简单,可持续。	高性能材料成本高,通常需要较大温差才能产生明显的电能,能量转换效率率低。	塞贝克系数低(普遍<1 mV·K <sup>-1</sup> ),热导率匹配困难;自修复能力有限。	如何协同优化电导率(σ)和热导率(κ)以提高 ZT 值;维持稳定温差梯度的材料设计。
光电效应	光子撞击材料时,激发电子跳跃,形成电流或电压。	通过光能产生电能,能量转换效率高且响应速度快,利用环境光或太阳能光源可再生。	依赖光照强度与波长,无法在低光照环境中工作,需要使用高效的光敏材料,成本较高。	光谱响应范围窄(主要依赖 UV),光生载流子复合率高(>90%)导致光电转换效率低下。	可见光-近红外区光捕获效率低;电转换与生化功能的协同机制;大规模制备成本高。

### 3.1 压电水凝胶传感器

压电效应是指某些材料在受到机械应力(如压力、拉伸、弯曲或振动)时,其内部的电偶极矩发生重新排列,导致电荷重新分布,从而在材料表面形成电势差,进而产生电压或电流<sup>[121]</sup>。压电效应主要分为正压电效应和逆压电效应,前者是在外力作用下材料内部产生电荷,后者则是在电场作用下材料发生形变<sup>[122]</sup>。压电效应的本质来源于材料的非中心对称晶体结构(如石英、钛酸钡等),并非所有非中心对称晶体都具有压电性<sup>[123-124]</sup>。以常见的压电材料为例,在无外力作用时,晶体内部的原子或离子呈规则排列,电偶极矩相互抵消,因此材料整体不显电性。但当施加外力作用后,晶体结构发生畸变,原子或离子间的相对位置发生改变,电偶极矩重新排列,导致材料内部电荷分离并在材料表面形成电位差<sup>[125]</sup>。逆压电效应则与正压电效应相反,当给压电材料施加外部电场时,电场力促使材料内部的带电粒子移动,打破原有的受力平衡,引发原子或离子按照电场方向重新排列,最终导致材料在宏观形态上发生改变,如收缩、膨胀或弯曲等。这两种现象使压电材料在受到外力时能自发地产生电信号,而在外电场作用下可以通过形变响应外部电场的变化,具有独特的双向电响应特性<sup>[126]</sup>。

压电水凝胶传感器是一种结合了水凝胶材料的变形响应特性和压电效应的电响应机制的新型传感器<sup>[127]</sup>。现有研究主要聚焦于引入特定组分,利用成分特性优化水凝胶在压电自供电应用中的性能。如以纤维素和聚偏二氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))制备的水凝胶,因纤维素与P(VDF-TrFE)链作用,偶极子随机排列,无电位差。受压时偶极子重排产生电位差,经电极连入电路后产生电信号,实现机械能到电能的转化(图3(a))<sup>[128]</sup>。此外,水凝胶材料的特殊结构使其在受到外力作用时具有良好的形变能力。通常情况下,当外力作用于水凝胶时,水凝胶内部的水分分布和结构会发生变化,导致其体积和形态发生相应的变化,这种变化使水凝胶能够敏感地响应外部环境的变化<sup>[129]</sup>。在水凝胶中加入压电材料后,当水凝胶发生形变时,压电材料的晶体结构对称性被破坏,电偶极矩重新排列,导致电荷分离从而在表面形成电势差<sup>[130-131]</sup>。并且水凝胶本身具有一定的导电性,尤其是在水凝胶中掺入导电材料(如碳纳米管、石墨烯或导电聚合物)后,可在水凝胶中形成导电网络,能帮助电荷在水凝胶内部快速传输,优化电荷的传输效率,提高信号的稳定性;但导电材料的过量掺杂,会使其大量聚集,扰乱水凝胶的规整网络结构,造成高分子链排列无序。此时,水凝胶受外力时,难以有效极化与分离电荷,以及过量的导电材料在水凝胶中形成的屏蔽层,都削弱了压电效应<sup>[132]</sup>。在实际应用中,水凝胶的压电效应导致的电势差变化被捕捉并转换为电信号,这些电信号可以实时反映外部物理参数的变化,如压力、振动、触摸等。水凝胶的结构特性使其在外力作用下表现出较高的敏感性,因此压电水凝胶传感器能够精确监测微小的物理变化<sup>[133]</sup>。压电水凝胶传感器的自供电特性使其成为一种理想的传感器,在不依赖外部电源的情况下,通过机械刺激即可产生电信号,使其在可穿戴设备、智能医疗、机器人和环境监测等领域具有巨大的应用前景<sup>[134-135]</sup>。

### 3.2 摩擦电水凝胶传感器

摩擦电效应是指两种不同材料在接触或摩擦后,由于电子或电荷的转移,导致材料表面分别带上相反的电荷,从而产生静电电势差的现象<sup>[136]</sup>。该效应的核心机制包括接触起电和静电感应:接触起电是材料接触分离后因电子转移产生表面电荷;静电感应则是电荷积累后,在外电场作用下导体内部电荷的重新分布。在接触起电过程中,材料内部原子结构差异导致其电子亲和性不同<sup>[137]</sup>。通常,电子亲和性较强的材料更倾向于吸收电子,而电子亲和性较差的材料更容易失去电子<sup>[138]</sup>。这种差异驱动电子自发地从低电子亲和能材料转移到高电子亲和能材料转移,进而在材料表面形成稳定的电荷积累,使一种材料带正电,另一种材料带负电<sup>[139]</sup>。多数水凝胶自供电机制为摩擦起电和静电感应,如Sheng等<sup>[9]</sup>制备的海藻酸钠/硫酸锌/聚丙烯-丙烯酰胺(SA-Zn)水凝胶摩擦纳米发电机,将水凝胶封装在硅橡胶基板内,并外接了一根铜导线(如图3(b))。其工作原理如下:当非橡胶介电材料(如PMMA)与硅橡胶层接触时,界面产生等量异号电荷,此时外部电路无电流。二者分离向上移动过程中,导电水凝胶产生正电荷补偿硅橡胶负电荷,导致电子从SA-Zn水凝胶流向铜线,产生瞬时电流信号(如图3(c))<sup>[9]</sup>。在静电感应过程中,当带有静电荷的材料靠近导体材料时,导体中的自由电子会在电场作用下发生移动,使导体内部的电荷重新分布,从而使导体两端带有相反的电荷,但导体整体保持电中性<sup>[140]</sup>。在摩擦或分离的过程中,两种材料的紧密接触进一步增强了电荷转移,并且由于材料表面状态的不均匀性,接触面积增加,使得材料表面的电荷积累更加明显。当两种材料分离时,材料间势垒升高,转移的电子被束缚在表面,形成稳定的电荷积累,因此分离后电荷不能自发回

流<sup>[137]</sup>。这种电荷积累和分离的过程,使摩擦电效应持续存在,因此当带电材料接触导体或外电路时,积累的电荷可以通过电路进行传输,进而形成电流,从而实现能量转换<sup>[141]</sup>。

摩擦电水凝胶传感器结合了摩擦电效应和水凝胶材料的变形响应特性,能够通过接触和摩擦产生电信号。传感器通常由多层材料组成,包括导电水凝胶材料层、摩擦电材料层和电极<sup>[142]</sup>。当外力作用于传感器时,水凝胶材料发生形变并与摩擦电材料层进行接触从而开始摩擦。这一过程会使电子从摩擦电材料转移到水凝胶材料或反向转移,具体取决于两者的摩擦电性差异<sup>[143]</sup>。摩擦电材料通常具有较强的电负性,在与水凝胶层摩擦时,摩擦电材料会捕获电子带负电,而水凝胶作为导电层通过电极收集电荷带正电,从而在两个材料表面产生正负电荷积累。这种电荷积累会在电极之间产生电势差,形成电压信号,并通过导电通路将电信号传输到外部电路<sup>[141]</sup>。信号的大小与施加的外力成正比,因此可以通过监测电压变化进而感知外界力的变化情况<sup>[144]</sup>。摩擦电水凝胶传感器的这种自供电优势,使其在无需外部电源的条件下,通过机械摩擦或接触产生电信号。这使得它成为理想的传感器,广泛应用于可穿戴设备、人工智能、智能交互等领域<sup>[145-146]</sup>。通过摩擦电效应,摩擦电水凝胶传感器能够高效地捕捉和传输外部物理变化,提供可靠的数据支持,为智能系统和人机交互提供更多的创新可能。

### 3.3 热电水凝胶传感器

热电效应是指某些材料在受到温度梯度作用时,材料内部会产生电势差,进而形成电流<sup>[147]</sup>。这一现象源于材料对热能和电能的相互转换能力,受到材料本身电子结构、载流子输运特性以及热导性和电导性的共同影响。具体来说,当一个材料的一端被加热,而另一端保持较低的温度时,材料内部的自由载流子(如电子或空穴)会在温度梯度的作用下,从高温区域向低温区域迁移,这种迁移导致材料内部的电荷分布发生变化,进而在两端之间形成电势差<sup>[148]</sup>。如果外部电路接通,这一电势差将驱动电流流动,从而实现热能向电能的转换。根据热电效应的不同表现形式,主要可以分为塞贝克效应、珀尔帖效应和汤姆逊效应<sup>[149]</sup>。塞贝克效应的本质是温度梯度导致电势差,当两个不同导体或半导体的两端处于不同的温度时,界面处的载流子在温度梯度的作用下发生定向迁移,从而导致材料内部的电势分布发生变化,若形成闭合回路,则会在电路中产生电流<sup>[150]</sup>。帕尔帖效应是指电流通过两种不同材料组成的回路时,由于载流子能量状态的不同,两种材料连接的两端会发生吸热或放热现象,从而引起温度变化。汤姆逊效应则是指在材料中,当温度沿着材料的长度方向形成梯度时,电流的流动会导致材料内部不同位置因载流子能量变化而吸收或释放热量<sup>[151]</sup>。热电效应的本质来源于材料的热导性、电导性及其对温度变化的响应,尤其是在半导体材料中,热电性能尤其显著。

热电水凝胶传感器是一种基于热电效应和水凝胶材料特性的新型传感器,它能够将温度变化直接转换为电信号,实现无外部电源的温度感知<sup>[152]</sup>。这类传感器通常由具有高热电性能的功能化水凝胶组成,并结合导电聚合物、碳基纳米材料或离子导电体系,以提高其热电转换效率和灵敏度。其核心工作原理主要依赖于塞贝克效应,即当材料内形成温度差时,载流子(电子或离子)会发生迁移,从而导致电荷重新分布,形成稳定的热电势差<sup>[153]</sup>。水凝胶中主要载流子为可移动的离子(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{H}^+$ ),其独特的离子传输机制使其在低温环境下仍能保持良好的热电性能。水凝胶通常具有较低的热导率,有助于维持较大的温度梯度,提高传感器的灵敏度和信号输出强度<sup>[154]</sup>。当热电水凝胶传感器的一端受到外部热源加热,而另一端保持较低温度时,水凝胶内部的离子受到温度梯度的驱动发生定向迁移<sup>[155]</sup>。由于正离子(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}^+$ )和负离子(如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )的质量和扩散速率不同,在高温端和低温端分布不均衡,在水凝胶两端形成稳定的内建电场。该电场阻止了离子进一步扩散,使体系最终达到稳态,并在两端建立可测量的电势差<sup>[156]</sup>。电势差大小由材料的塞贝克系数及温度梯度决定,为优化传感器性能,研究人员通常在水凝胶中掺杂低维纳米材料,如氧化石墨烯(GO)、碳纳米管(CNT)、MXene等,以降低热扩散速率,同时提高离子迁移的选择性<sup>[157]</sup>。此外,水凝胶的粘附性、柔性和可拉伸性使其能够紧密贴合人体或其他曲面,当水凝胶两端的电势差建立后,可以通过外部电极进行测量,进而实现温度检测。若传感器被贴附在皮肤表面,可以感知人体局部温度的微小变化,实现高灵敏度的温度监测<sup>[153]</sup>。如 Wang 等<sup>[120]</sup>基于热电水凝胶构建的电子皮肤,具有双模式温度和应变传感能力,选择了  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$  氧化还原对,基于热电流效应,通过氧化还原对在电极界面的氧化还原反应产生热电压,从而形成持续电流回路,实现热能到电能的转化(如图 3(d))。由于其无需外部电源供电,热电水凝胶传感器在长时间连续监测、生物医学传感以及智能柔性电子领域展现出广泛的应用前景。

### 3.4 光电水凝胶传感器

光电效应是指某些材料在受到光照时,内部的电子会吸收光子能量,当吸收的能量大于材料的逸出功时,处于材料表面或近表面区域、且吸收能量后有合适动量方向等条件的电子会逸出材料表面,成为光电子<sup>[158]</sup>。光电效应的本质来源于材料的光吸收特性,尤其是具有光电导性的半导体材料。在光照作用下,材料吸收一定频率的光子能量后,电子从价带跃迁到导带,产生自由电子和空穴对,这些自由载流子在外部电场的作用下能够产生电流或电压。光电效应分为外光电效应和内光电效应,其中外光电效应是指光照射到材料表面时,光子能够将表面或近表面区域的电子激发,克服材料的逸出功,使电子从材料表面逸出,形成光电子。内光电效应则是指光照射到材料时,光子被材料内部的电子吸收,导致电子从价带跃迁到导带,形成自由电子和空穴对,这些自由载流子在材料内部的导电路径上移动,产生电流或电压,但电子不会从材料表面逸出<sup>[159]</sup>。基于光电效应以及与感光材料的结合,可以构筑出用以自供电的感光水凝胶。如图将二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米片作为阳极,铜-铟锡氧化物(ITO)为导电膜与水凝胶结合,当光照射到 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 时,产生电子空穴对,水凝胶作为电子转移的介质,而ITO导电膜则负责传导电子,形成完整的电路回路(图3(e))<sup>[160]</sup>。

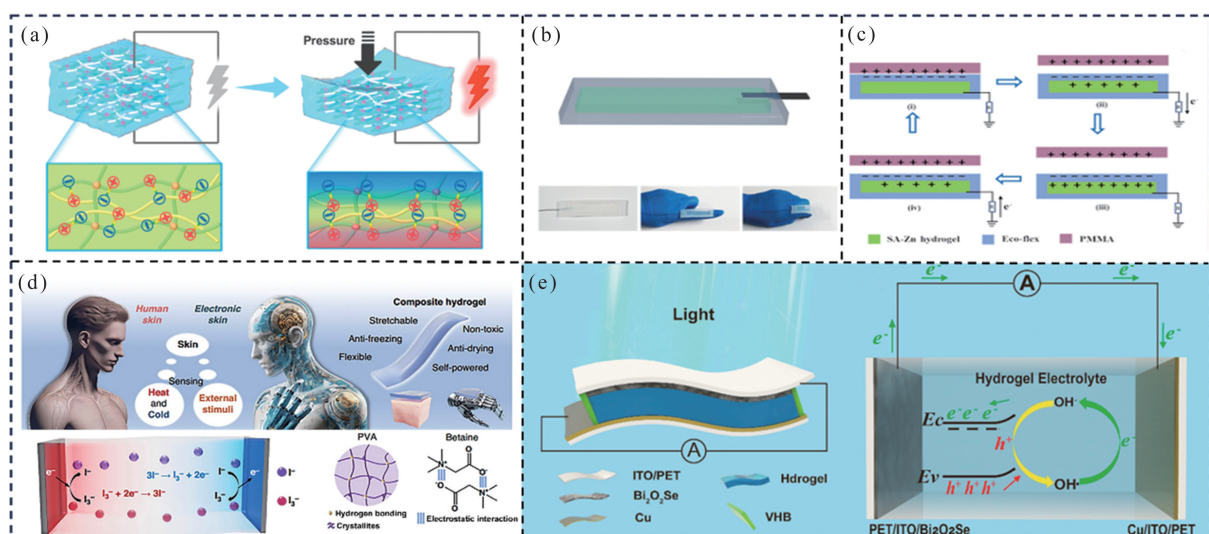


图3 (a) 基于压电效应的水凝胶工作机理示意图<sup>[128]</sup>; (b) SA-Zn水凝胶 TENG示意图<sup>[9]</sup>; (c) SH-TENG的能量收集机制<sup>[9]</sup>; (d) 用于自供电温度和应变传感的类皮肤的热电水凝胶贴片的工作原理示意图<sup>[120]</sup>; (e) 光电探测器结构示意图及光电转换系统的机理<sup>[160]</sup>

Fig.3 (a) Schematic of the working mechanism of hydrogels based on the piezoelectric effect<sup>[128]</sup>; (b) schematic of the SA-Zn hydrogel TENG<sup>[9]</sup>; (c) energy harvesting mechanism of SH-TENG<sup>[9]</sup>; (d) schematic illustration of the working principle of skin-like thermoelectric hydrogel patches for self-powered temperature and strain sensing<sup>[120]</sup>; (e) schematic diagram of photodetector structure and mechanism of photoelectric conversion system<sup>[160]</sup>

光电水凝胶传感器是一种结合了水凝胶材料的物理特性和光电效应的传感器,能够对外界光照以及环境变化(如温度、湿度、pH值等)产生敏感反应,并通过光电效应转化为电信号。在光电水凝胶传感器中,光电效应由嵌入水凝胶的光电材料(如半导体材料、金属纳米颗粒等)引发水凝胶本身作为离子导电基质,无法直接产生光电效应,而是通过包裹的光电材料实现光-电转换<sup>[161]</sup>。当传感器受到光照作用时,光电材料吸收光子能量,电子从价带跃迁至导带,产生自由电子和空穴对。这些自由载流子在外部电场的作用下定向移动,形成电流或电压信号,作为传感器输出的电信号。同时,水凝胶本身的吸水性或失水性使得其形态发生变化,影响内部结构和光电材料的电子传导路径<sup>[162]</sup>。生成的自由电子和空穴在外部电场的作用下发生定向运动,移动到电极形成电流或电压。光照条件对光电水凝胶传感器性能具有决定作用。光照强度决定光电水凝胶传感器光生载流子数量,通常光强越大,自由电子与空穴对越多,光电信号越强。但光强过强,易引发光饱和或水凝胶光损伤,反倒降低传感器性能<sup>[163-164]</sup>;光波长决定了光子能量的匹配度,不同波长的光对应不同的光子能量,只有当光的波长与光电水凝胶材料的吸收光谱相匹配时,才能有效地被材料所吸收,产生光电效应。除此之外,一些常见因素也会对光电水凝胶产生影响。如水凝胶的物理变化会影响传感器内的电场分布,进而调节自由载流子的运动,影响电信号<sup>[165-166]</sup>。水凝胶对外界环境的响应也会影响传感器工作,如温度、湿度、pH值等变化会导致水凝胶吸水性、膨胀或收缩程度改变,进而影响传感器电学性质。传

传感器的电信号输出取决于水凝胶和光电材料的相互作用以及外部环境的变化。光照条件、环境湿度、温度等因素的变化都会导致水凝胶和光电材料的响应不同,从而在输出端形成相应的电流或电压信号。这些信号可以通过放大器、数据采集系统等进行处理和分析,以实现对照强度、湿度、温度等因素的实时监测。光电水凝胶传感器在生物医学、环境监测、智能家居等领域具有广泛的应用前景<sup>[167]</sup>。通过优化水凝胶和光电材料的性能,这类传感器能够精确监测光照变化,为智能系统提供实时数据支持<sup>[11]</sup>。

### 3.5 生物电水凝胶传感器

生物电自供电水凝胶传感器是一种结合了生物电化学反应或物理能量转换机制与水凝胶材料的传感器,它能够通过生物分子(如酶、微生物等)催化的氧化还原反应,直接将化学能或环境能量转化为电能,从而实现自供电<sup>[168]</sup>。生物电化学反应涉及生物分子(例如酶或微生物)与底物之间的化学反应过程。在此过程中,生物分子作为催化剂,能够加速底物的氧化还原反应,并释放出电子<sup>[169]</sup>。生成的电子通过水凝胶中的导电材料被传导,最终被转移到传感器的电极上。通过对电极电势或电流的监测,能够获得反应过程中所产生的电信号。这些电信号与反应物的浓度或反应速率直接相关。因此,传感器能够实时检测并量化反应物的变化。这使得基于生物电化学反应的自供电水凝胶传感器成为一种在生物医学、环境监测等领域具有广泛应用前景的技术<sup>[170]</sup>。

## 4 应用

自供电水凝胶传感器因其柔韧贴合、高灵敏及能量自给的特点,在健康监测、动态识别、信息收集及环境检测等领域展现出巨大潜力。

### 4.1 健康医疗

随着现代社会生活节奏加快、人口老龄化加剧以及生活水平提高,健康监测正朝着常态化、智能化和个性化方向快速发展。传统刚性电子器件存在的舒适性差、外接电源依赖以及生物相容性不足等问题,严重制约了其在长期动态监测中的应用。基于材料创新与能量转换技术的自供电水凝胶传感器,为实现舒适化、无源化智能健康监测提供了革命性解决方案。

#### 4.1.1 生理信号监测

自供电水凝胶传感器通过分子结构设计与功能改进,成功突破了传统导电水凝胶力学-电学性能难以兼容的技术瓶颈。借助摩擦纳米发电机(TENG)和压电纳米发电机(PENG),塞贝克效应等能量收集技术,可将人体活动产生的机械能、热能等转化为电能,实现从生物信号到电信号的转换<sup>[9-10,12]</sup>。这种自供能特性结合水凝胶的柔韧性和生物相容性,使得开发高信噪比、高灵敏度、宽检测域、可长期佩戴的生理监测设备成为可能。这些传感器不仅能监测关节弯曲、肘部摆动、手指敲击、走路步态等运动,还能稳定监测呼吸、脉搏、震颤、吞咽等微小信号,使得持续和精准的生理状态实时监测成为可能<sup>[4,7,13]</sup>。呼吸是生命体征和多种疾病的重要判断指标,对呼吸模式的持续监测对疾病早期发现和诊断至关重要。研究团队通过双溶剂(乙二醇/水)和双网络结构,开发出适配鼻腔植入的热电离子超细水凝胶纤维(直径 500  $\mu\text{m}$ )传感器。该器件兼具柔韧性与生物相容性,结合  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  氧化还原对,将鼻腔内外温度梯度转化为电信号。传感器灵敏度高( $8.17 \mu\text{A}\cdot\text{K}^{-1}$ ),响应快(190 ms)且具有显著的耐低温性( $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 保持良好的拉伸性能)和耐脱水性(连续使用 14 天后仍保留 90% 以上的水分),成功实现睡眠呼吸的居家连续监测(图 4(a))<sup>[1]</sup>。相较于传统多导睡眠图(PSG)设备,该传感器便携舒适,且鼻腔内稳定的环境可避免外界因素的干扰,为呼吸系统疾病的早期筛查与个性化家庭医疗提供了新范式。

此外,在近期研究中,Peng 等<sup>[171]</sup>将构建的具有微/纳米分级缠结网络的水凝胶应用于摩擦电-应变传感生物电子器件,实现了生理信号记录和自供电传感功能,其传感信号响应速度快(36 ms),在 4 000 次的循环碰撞时也能稳定供电。而 Li 等<sup>[172]</sup>开发了一种可涂抹、快速成胶且高粘附性的导电水凝胶,该水凝胶受明胶温度相转变特性启发,能在与皮肤接触的短短 15 s 内迅速成胶,有效解决了传统水凝胶在毛发覆盖区域难以稳固附着的问题,避免了因等待成胶引发的不适。其通过独特的流体-凝胶相转变特性,可渗透头皮毛发形成共形界面,实现长时间稳定的电生理信号采集,在协助实现家庭便捷健康监测方面极具潜力。

综上,鼻腔植入的热离子超细水凝胶纤维传感器结构轻盈、灵敏耐用;而具有微/纳米分级缠结网络的水凝胶则为摩擦电-应变传感器的快速响应和稳定供电赋能;可涂抹导电水凝胶解决了毛发区域的电信号采集的稳定性问题。因此,水凝胶赋能自供电传感器在粘附性、透气性、生物相容性、信号监测时长与质量等不同维度地实现了突破与提升,推动自供电水凝胶传感器在生理信号监测领域不断发展,为未来个性化医疗、健康监测等提供更多可能的技术路径。

#### 4.1.2 病理特征识别

舒适轻巧的自供电水凝胶传感器能全天候监测疾病表征,为疾病早期诊断提供可靠数据支撑,推动无创化、智能化诊疗发展。针对心血管疾病监测需求,Xi等<sup>[2]</sup>开发的房颤监测腕带(AFPW)能通过PENG捕获桡动脉脉搏波特征,水凝胶包裹层优异的动态粘附特性增强了传感器的信号接收和稳定性。在神经系统疾病监测方面,Kim团队基于海洋生物材料制备的可拉伸、自修复导电水凝胶因其良好的生物相容性(全部基于海洋生物材料:邻苯二酚、壳聚糖和硅藻)和优异自修复性(水凝胶被切割后能瞬间发生物理粘合,经过4h重新粘合,拉伸率从158%增加到185%)被用作TENG的电极,传感器的M形结构设计显著提升对低频震颤的灵敏度,成功检测PD患者手部震颤幅度与频率特征(图4(b))<sup>[3]</sup>。而Bai等<sup>[173]</sup>开发出的集成光电双信号传感功能的导电结构彩色水凝胶(CSCH)贴片,可通过电阻变化实时监测心脏机械生理信号,正常心跳时, $\Delta R/R_0$ 呈现0~5.1%的周期性波动,还能通过色彩变化直观定位梗死区域,正常心肌收缩时颜色在绿-蓝绿色切换,梗死部位则保持红黄色,为心肌梗死治疗提供了兼具高灵敏诊断与高效修复功能的新型生物电子医学策略。在根据运动状态监测病理方面,Wang等<sup>[174]</sup>开发出基于氧化石墨烯-聚丙烯酰胺复合水凝胶的自供电应变传感器可收集人体运动机械能并将其转化为电能。该复合水凝胶(质量分数为0.02%)的TENG输出功率高达26 MW,基于该水凝胶设计的智能鞋垫,配合Python开发的PC接口,利用人工神经网络算法对正常人生活步态和病理步态(如帕金森病、偏瘫等相关步态)的识别精度分别高达99.5%和98.2%。综合来看,这些自供电水凝胶传感器凭借独特的材料设计(如动态粘附的水凝胶包裹层、可拉伸自修复的导电水凝胶等)和结构创新(如M形结构),在病理监测领域展现出无创、灵敏、精准和智能化的特性。此外,传感器的轻量化和便捷性使得传感数据朝着海量、多通道、多模态方向发展,机器学习技术被用于协助进行传感数据分析,显著提升了数据处理和信号识别的效率(机器学习算法对房颤、PD震颤以及正常和病理步态诊断准确率均在90%以上),为智能化的家庭医疗诊断和治疗模式提供有价值的参考。

#### 4.1.3 人机交互医疗

融合机器学习、深度学习及其他解码技术的自供电水凝胶传感系统,正在重塑健康医疗的交互模式。集成深度学习技术的自供电水凝胶传感网络(单个传感器信噪比23.1 Db,灵敏度 $0.28 \text{ V} \cdot (\text{kPa})^{-1}$ ,响应时间50 ms)不仅能精准感知和识别婴儿的运动模式(准确率达到100%),还能通过定制的APP程序向监护人发送实时警告和一键互动<sup>[5]</sup>。自供电水凝胶传感器采集的康复训练数据经解码传输后,可通过机器界面与患者智能互动,辅助医生远程指导,还可用于机器人的运动控制,显著改善了康复体验<sup>[8-9,175]</sup>。用于盲文识别的自供电水凝胶传感器可以精准捕捉盲文信号,在解码技术的辅助下可精准识别盲文并转化输出为语音信息,有效辅助残疾人盲文学习和与外界进行信息沟通<sup>[176]</sup>。在辅助患者康复训练方面,基于牛血清蛋白水凝胶和丝素蛋白薄膜基于生物材料,具有良好的生物相容性,能与人体贴合长期使用。基于此材料构建的单电极摩擦纳米发电机开发出的智能人机交互系统,可以实现对机械手的连续实时控制,有望应用于瘫痪患者康复训练、远程机械操作及残疾人手语翻译等领域<sup>[64]</sup>。除了直接接触式的自供电水凝胶,Ding等<sup>[177]</sup>开发的非接触式自供电水凝胶,凭借对微量湿度的高灵敏度感知,能根据人体手指靠近过程中不同距离下释放的水汽导致的电流差异识别手指位置和动作。基于此水凝胶构建的 $2 \times 2$ 湿度传感器阵列能够进行复杂手势识别,并结合无线通信技术将呼吸、皮肤湿度等生理信号转化为电信号传输至终端,实现远程健康监测与反馈。

上述自供电水凝胶传感系统通过接触与非接触两种路径实现医疗人机交互:接触式依托生物相容性材料实现手势操控、康复辅助等,且材料具有良好的贴合性与耐用性;非接触式借助湿度传感完成手势识别与远程监测,协助构建更加安全性的非接触式监测。便捷的自供电模式融合智能算法与无线技术,可覆盖多样化的医疗场景,推动健康医疗向智能、便捷、安全升级。这些突破性进展标志着自供电水凝胶传感器正在推动实现舒适、廉价、精准的个性化家庭医疗。随着材料合成、器件集成和数据分析技术的持续进步,未来有望构建覆盖“信号感知-精准预测-智能干预”全链条的个性化健康管理系统。

## 4.2 动态模式识别与信息安全

传统模式识别和信息安全技术虽然已经取得阶段性成果,但仍然存在柔韧性差、灵活性和生物相容性不足等缺陷。自供电水凝胶传感器通过其本征柔性结构,优异的生物相容性及自维持供能机制,为突破上述技术瓶颈提供了创新解决方案。依托机器学习算法支撑,该技术已成功用于人机交互、智能安防、身份识别等关键领域,显著推动了可穿戴电子设备与人机交互系统的迭代升级。

### 4.2.1 动态模式识别

在动态模式识别方面,自供电水凝胶传感器可用于多种动态模式的识别和分析。通过将水凝胶传感器集成到可穿戴设备中,可以实时监测人体运动产生的压力、形变等信号,从而识别不同的手势或步态模式(图 4(c))<sup>[178]</sup>。日常生活中危险驾驶行为是导致交通事故的重要原因。针对传统驾驶行为监测系统存在的误报率高、续航时间短等缺陷,Luo 等<sup>[179]</sup>开发了一种智能颈环,该颈环由多个可拉伸摩擦电传感器构成,用于监测和收集颈部数据,其优异的耐疲劳性和长期可靠性(传感器在 16 000 次拉伸循环后,输出电压的幅值几乎不变)能满足可穿戴设备长期使用的需求。机器学习算法辅助数据分析判断驾驶员的健康与疲劳状态并给出预警,为驾驶安全保驾护航。传统表皮传感器存在拉伸性低等问题,而柔性水凝胶传感器具有出色的柔韧性和可拉伸性,能够轻松弯曲、扭曲和变形而不影响其性能,可与不规则形状的物体表面或人体皮肤等紧密贴合,精准捕捉复杂曲面和动态环境的传感信号。通过对产生的电信号的处理,实现了手语实时解析以及笔迹和物体识别,为无障碍沟通和人机交互开辟了新范式<sup>[10,20,180-181]</sup>。在手势识别方面,Liu 等<sup>[182]</sup>基于甘油-羟乙基纤维素水凝胶构建了具备增强机械耐久性与快速自修复能力的摩擦纳米发电机。该水凝胶拉伸性超 400%,20 min 内自修复能力可达 90%,在 3 600 次循环后电输出性能依旧稳定,配合随机森林算法和降维技术,对手势的识别准确率超 95%。

相比早期研究,上述成果在材料性能上通过新化学物质或工艺优化,提升了水凝胶的机械强度、自修复性等,适应更复杂场景;算法上结合更先进机器学习,提高识别准确率,应用从简单手势、步态等人体动态活动识别拓展到疾病诊断、智能交通等多元领域,为实际应用注入新活力,前景广阔。

### 4.2.2 信息安全

在数字化背景下,信息安全已成为关键挑战。涉及个人隐私保护、企业数据安全、社会公共安全等多个领域。传统的认证系统在精度和能量依赖方面的缺陷已经无法满足智能时代对安全性能的要求。自供电水凝胶传感器作为一种新的智能传感技术兼具水凝胶的高柔性、自粘性、导电性、灵敏性和自供电特性,其轻量化设计可以实现与接触面的无缝贴合。通过多通道部署策略,该技术能同步捕获形貌、温度、压力等多模态特征,为信息安全提供高质量的数据源。当水凝胶与不同材料、不同用户接触时,由于材料界面与环境界面之间的温度差异引发的热电效应,可自主生成特征电信号,实现无需外接电源的持续运行。结合机器学习算法对水凝胶产生的电信号进行分析处理,通过对大量不同用户、不同材料的电信号数据进行训练,算法可以学习到“电信号特征”,从而实现对用户身份和材料类型的准确识别。基于此原理开发的自供电材料识别环,能够实时对接触的材料进行感知和识别<sup>[183]</sup>。同时将热电凝胶集成于智能锁,突破了传统密码验证的安全瓶颈,其对生理特征检测的特性可有效抵御仿冒攻击(识别准确率的平均值高达 97.5%),为智能安全提供了创新解决方案<sup>[184]</sup>。

在签名识别和生物认证方面,基于聚乙烯醇、淀粉、聚多巴胺修饰的埃洛石纳米管的双网络热电偶凝胶电子皮肤,可以在无外接电源情况下协同压阻传感与热电转换,将压力实时转变为电信号,且灵敏度高( $GF > 4.9$ )、响应迅速( $< 0.3$  s)。结合深度学习算法,研究人员将其贴于不同用户的手臂用于书写识别和身份认证,并利用深度学习算法辅助数据分析,识别准确率达 92.97%,为信息安全认证提供了新思路<sup>[185]</sup>。而 Zhou<sup>[186]</sup>等设计的具备导电性能的高拉伸镧系发光自供电水凝胶能将应变传感与光致发光相结合,开创了全新的信息加密方法。该水凝胶呈现出荧光颜色调节、pH 响应及荧光猝灭等光致发光特性,特别是利用不同稀土配位水凝胶的不同荧光颜色,能够高效且有针对性的进行信息加密。此外,Sun 等<sup>[187]</sup>提出一种具有独立可调结构和荧光颜色的双模自供电水凝胶,可用于多级信息加密。丙烯酰胺和 N,N'-二甲基丙烯酰胺聚合形成三维水凝胶网络,产生可通过观察角度、交联密度和含水量调节的响应性结构色。荧光单体作为络合位点与镧系离子配位实现多色荧光,其颜色可通过镧系离子比例调控,且结构色与荧光色相互独立,因此具有强大的信息存储与编码能力,故该双模水凝胶在信息加密和防伪领域潜力巨大。

以上研究在材料性能上通过创新复合与工艺,显著提升水凝胶的机械、热稳定、导电及发光性能,适应更复杂环境;在信息加密与身份识别上,融合深度学习、多模式光学等技术,提高防护精度与复杂性,应用从单一识别拓展到加密、防伪等领域,为信息安全的完善赋能。

### 4.3 环境监测

环境监测对于生态保护、人类健康以及可持续发展有重要意义。传统环境监测传感器依赖外部电源,在偏远地区或复杂环境下的使用具有一定的局限性。自供电水凝胶传感器凭借其能量自主性、结构柔韧性和生物相容性等优势,能够适应复杂多变的环境监测需求,为环境监测技术革新提供突破性解决方案。

#### 4.3.1 农业环境监测

在全球人口增长和气候变化双重压力下,农业生产的稳定性面临着巨大的挑战。精准预警的智能农业已成为保障粮食安全和可持续农业生产的关键路径。温湿度是农作物生长的关键参数,传统的温湿度监测方法主要依赖刚性传感器,它质地坚硬、缺乏柔韧性,难以随植物生长发生弯曲变形。这类传感器不仅可能损伤植物组织,并且其能耗较高,电池续航能力差,难以满足野外农业环境的工作需要。此外,单参数检测特性也难以满足现代农业对多维度环境数据的需求,无法提供不同参数的关联信息,限制了对农业生产的科学指导。自供电水凝胶传感器集自主供能,生物相容及多参数检测功能于一身,可以实时感知环境变化并传输至农业管理系统,为生产决策提供数据保障。自供电水凝胶传感器可以安装在植物叶片、土壤中,凭借其柔韧性完美贴合在植物叶片和土壤颗粒的不规则表面,不受环境影响持续稳定的收集数据。此外还具备可生物降解性,在完成监测使命后逐渐被微生物分解,实现了农业检测的绿色环保,契合可持续发展的农业模式。其工作原理在于环境温湿度变化会引发水凝胶导电性与物理化学性质的改变,进而产生可检测的电信号变化。经过信号放大、处理和传输,实现对环境参数的实时监测<sup>[188-190]</sup>。基于实时数据,农户可精准调控温室通风和灌溉系统,优化农作生长微环境。植物生理状态的精准监测对智能农业发展同样至关重要,Guo<sup>[191]</sup>等研发的多功能水凝胶创新性整合摩擦电、热电、压电效应,能将环境机械能、热能、压力等多模态能量转化为电能,在极端农业环境(如干旱、洪涝)中展现出卓越的供能稳定性。该装置利用光辐射对水凝胶阻抗的影响监测光照强度,通过水凝胶与叶片内部之间的水分交换引起的电学性能改变监测叶片含水量,借助不同风速下水凝胶与电极分离时的频率响应量化风速参数,为构建植物生长状态评估体系提供关键参数支持(图4(d))。农药残留问题一直亟待解决,Yan等<sup>[192]</sup>通过在双网络水凝胶中嵌入金纳米簇@类沸石咪唑骨架复合材料设计出的活性水凝胶圆片,不仅可用于植物健康传感器,还可以对农作物农药残留进行现场定量检测,具有更高的灵敏度和便捷性,能更及时准确地反映农作物上农药降解情况。为解决农业环境中的有害气体监测难题,Wu等<sup>[193]</sup>开发了一种基于气体自发反应的电化学自供能水凝胶基气体传感器,该传感器对有害气体NO<sub>2</sub>具有超高的敏感度(1.92%/10<sup>-9</sup>)、线性度(R<sup>2</sup>=0.999)以及极低的理论检测限(0.1×10<sup>-9</sup>),并且能在零度以下低温以及高湿度的环境中正常运作,为农业设施内的空气质量监测提供了新的有力工具。

综上,近年来自供电水凝胶传感器赋能的农业监测,既能覆盖温湿度、植物生理信息等基础参数,又可辅助进行微气候及污染物监测。呈现出从单一功能到多功能集成、从宏观环境感知到微观生理与安全预警的延伸趋势,推动农业环境监测向精准化、绿色化、智能化发展,为可持续农业提供关键支撑。多效应能量转化技术提升极端环境适应性,复合材料强化检测性能,而生物相容性与可降解性则契合了农业绿色发展的理念。

#### 4.3.2 海洋环境监测

作为全球生态系统的核心组成部分,海洋在气候调节、资源供给和维护生物多样性方面具有不可替代的作用,对海洋环境实施精准和持续的监测刻不容缓。当前海洋监测面临传统传感器的能源供应受限与海水腐蚀导致性能衰减的双重挑战。Wang等<sup>[194]</sup>将摩擦电纳米发电机(TENG)与水凝胶传感器协同集成,构建的新型自供电监测系统为此提供了创新解决方案。该系统通过摩擦起电与静电感应实现机械能到电能转化,同时利用水凝胶电极的离子通道特性实现电荷稳定传输。水凝胶层不仅为摩擦电荷提供静电屏蔽,还能有效防止纳米发电机脱水,确保系统在-10℃至20℃温度范围的海洋环境中稳定工作(水凝胶传感器连续运行21 d,质量与电导率无显著变化)。在近岸污染监测应用中,该系统实时监测空气中二氧化硫气体浓度、海洋温湿度等关键参数,为污染预警与海洋生态环境保护提供实时数据支持(图4(e))。此外,自供电水凝胶还可用于监测海洋生物行为,Ren等<sup>[195]</sup>合成一种双网络自供电水凝胶,并基于此开发出用于潜在海洋动

物运动监测的海洋应变传感器。该水凝胶在纯水和海水中浸泡一个月后,强度和韧性几乎无变化,且近乎完全不溶胀,还具备良好的离子导电性能,响应速度达 160 ms,抗水流干扰能力突出,可对龙虾、海龟等多种海洋生物模型的运动进行有效监测,进而反映海洋环境状况。上述研究从能量供给、材料耐用性、监测维度拓展完善了技术体系,为自供电水凝胶在海洋监测中的应用提供了多元路径。

自供电水凝胶传感器凭借其自驱动能量转换技术和卓越的传感性能,在环境监测领域展现出了巨大的应用潜力。未来,自供电水凝胶传感器将朝着高性能、智能化和多领域应用的方向不断发展,为环境监测技术的进步和生态环境保护提供强有力的技术支撑,在推动全球可持续发展进程中发挥愈发重要的作用。

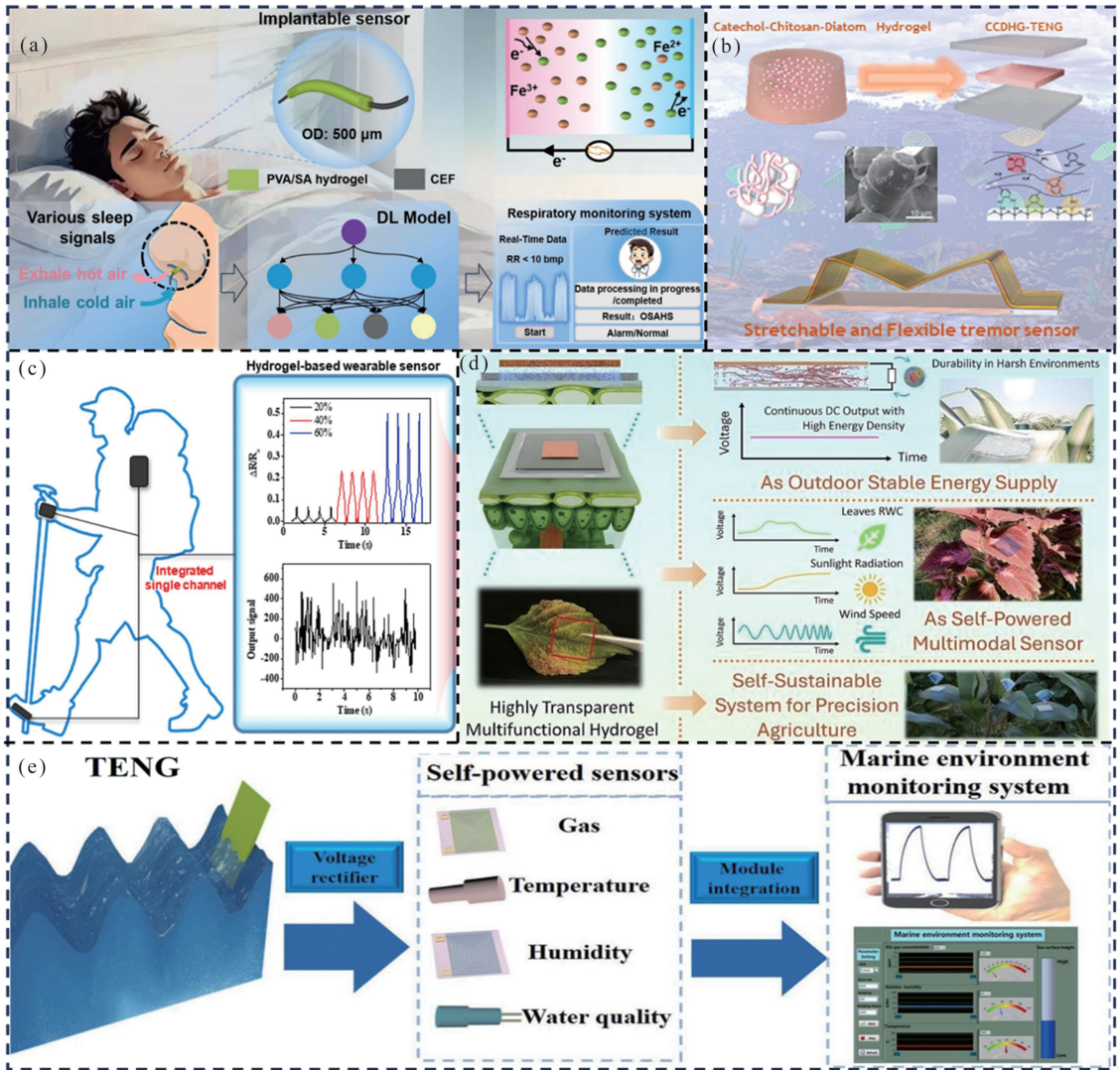


图 4 (a) 热电离子水凝胶用于呼吸监测<sup>[1]</sup>; (b) M形自供电震颤传感器示意图<sup>[3]</sup>; (c) 人体运动信息监测<sup>[178]</sup>; (d) 多功能水凝胶对光照强度、叶片含水量、风速的监测<sup>[191]</sup>; (e) 海洋环境状态监测<sup>[194]</sup>

Fig.4 (a) Thermionic hydrogel for respiratory monitoring<sup>[1]</sup>; (b) schematic of M-shaped self-powered tremor sensor<sup>[3]</sup>; (c) monitoring of human motion information<sup>[178]</sup>; (d) multifunctional hydrogel monitoring light intensity, water content of leaf, and wind speed<sup>[191]</sup>; (e) monitoring of marine environmental conditions<sup>[194]</sup>

## 5 总结与展望

自供电水凝胶传感器具有能量自给、灵敏精准、舒适便携、环境友好等优势,并且通过结构设计、功能改进优化了自供电水凝胶的性能,因此被广泛应用于可穿戴设备、工业机器人、信息识别、环境感知等领域,推动了柔性电子器件的技术变革。然而,自供电水凝胶传感器的研究尚处于早期阶段,但仍面临许多技术问题和重大挑战。

首先,自供电水凝胶机械性能、导电性能、可回收性等性能兼容性需要进一步改进和提升。其次,水凝胶

由于物理属性限制,使用寿命和循环使用的长期稳定性比较受限,对极端环境的适应性仍有待提升。第三,自供电器件的能量输出效率和稳定性仍有待改善。第四,材料批量制备方面存在挑战,例如,一部分高性能水凝胶多依赖“一锅法”或静电自组装等工艺合成,难以适配连续化生产线。第五,自供电水凝胶传感设备的可持续性仍面临较大瓶颈,不可回收组分会造成重金属污染;物理交联水凝胶可进行热重塑,但重塑后性能损失较大;生物基水凝胶虽可进行生物降解,但存在降解速率与传感寿命不匹配的问题。此外,落地应用的安全与监管体系方面也存在重大挑战,化学成分渗出以及长期接触的安全性监测数据缺乏,存在生物相容性风险;认证体系尚不完善,自供电水凝胶传感设备尚未完成全套的医疗场景、可穿戴设备应用的认证;缺乏数据传输加密协议规范,无法保障隐私安全,监测数据无线传输过程中存在数据泄露的隐患。

未来,基于天然生物材料的生态友好型水凝胶因其可降解、可回收利用的特点将成为研究热点。混合能源收集技术将打破单一能量收集依赖,成为提升能源转换效率和自供电器件稳定性的未来解决方案。自供电传感器将不再局限于单一的传感功能,通过分层网络设计、引入功能填料、硬件集成等手段有望实现集湿度、温度、压力、应变等多参数同步监测的多模态复合传感系统,多模态传感数据会在在复杂环境中充分发挥互补优势。机器学习、深度学习等智能算法驱动的数据分析手段的融入能极大提升预测的精度和鲁棒性,构建智能决策与反馈系统。物联网传输和加密协议的完善不仅有助于实现打破时空限制的全天候实时监测、预测体系,也将进一步提升数据安全,实现隐私保护。进一步研发延长自供电水凝胶使用寿命的结构设计方案和保持器件使用环境稳定性的封装技术,提升设备的稳定性和耐久性。器件老化、材料寿命的稳定性评估模型的进一步完善以及3D打印、集成化制造等生产工艺将成为协助实现高通量制造的有效方案。生态友好型自供电水凝胶传感器在混合能源收集、多模态传感集成及智能算法驱动决策领域的创新能突破单一能源、功能的限制,推动可持续材料与能源交叉领域的理论创新。产业化制造和评估标准的完善能推动安全高效的绿色能源产业商业化落地,为推动实现全天候、高精度传感网络提供新范式,助力构建生态环保的智能化多模态传感体系。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Y, WANG H, KHAN S A, et al. Deep-learning-assisted thermogalvanic hydrogel fiber sensor for self-powered in-nostril respiratory monitoring[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 678:143-149.
- [2] XI Y, CHENG S J, CHAO S Y, et al. Piezoelectric wearable atrial fibrillation prediction wristband enabled by machine learning and hydrogel affinity[J]. *Nano Research*, 2023, 16(9):11674-11681.
- [3] KIM J N, LEE J, LEE H, et al. Stretchable and self-healable catechol-chitosan-diatom hydrogel for triboelectric generator and self-powered tremor sensor targeting at Parkinson disease[J]. *Nano Energy*, 2021, 82:105705.
- [4] YANG Q N, YU M L, ZHANG H Y, et al. Triboelectric nanogenerator based on well-dispersed and oxide-free liquid metal-doped conductive hydrogel as self-powered wearable sensor for respiratory and thyroid cartilage signal monitoring[J]. *Nano Energy*, 2025, 134:110530.
- [5] GUO R, FANG Y S, WANG Z S, et al. Deep learning assisted body area triboelectric hydrogel sensor network for infant care[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(35):2204803.
- [6] CUI X J, UNIVERSITY S N, et al. Thermoelectric gel enabling self-powered facial perception for expression recognition and health monitoring[J]. *ACS Sensors*, 2025, 10(1):537-544.
- [7] ZOU J J, MA Y N, LIU C X, et al. Self-powered sensor based on compressible ionic gel electrolyte for simultaneous determination of temperature and pressure[J]. *InfoMat*, 2024, 6(7):e12545.
- [8] DONG W T, SHENG K Q, HUANG B, et al. Stretchable self-powered TENG sensor array for human-robot interaction based on conductive ionic gels and LSTM neural network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(22):37962-37969.
- [9] SHENG F F, YI J, SHEN S, et al. Self-powered smart arm training band sensor based on extremely stretchable hydrogel conductors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(37):44868-44877.
- [10] YANG H, LI N, YANG K, et al. Coupling thermogalvanic and piezoresistive effects in a robust hydrogel for Deep-Learning-Assisted Self-Powered sign language and object recognition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488:150816.
- [11] ZHANG Y, TAO Y L, WANG K Q, et al. Two kinds of polyaniline fiber photo sensor with interdigital electrode and flexible hydrogel[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(26):50628.
- [12] WANG Y Q, CHEN P C, DING Y, et al. Multifunctional nano-conductive hydrogels with high mechanical strength,

- toughness and fatigue resistance as self-powered wearable sensors and deep learning-assisted recognition system[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(49):2409081.
- [13] ZHANG W, WANG P L, JI X X, et al. Ultrastretchable and adhesive MXene-based hydrogel for high-performance strain sensing and self-powered application[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 177:107957.
- [14] ZHAO Y Q, LI L W, ZHANG J W, et al. A high-accuracy facial expression recognition system combining triboelectric hydrogel sensors with deep learning[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(19):2418265.
- [15] HOU R N, XU L J, YU M L, et al. Piezoelectric-triboelectric hybrid nanogenerator based on tough, stretchable BaTiO<sub>3</sub> doped antibacterial hydrogel for self-powered sensors[J]. *Supramolecular Materials*, 2025, 4:100096.
- [16] SHI Y D, GUAN Y J, LIU M J, et al. Tough, antifreezing, and piezoelectric organohydrogel as a flexible wearable sensor for human-machine interaction[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(4):3720-3732.
- [17] HU Z R, LI J, WEI X T, et al. Enhancing strain-sensing properties of the conductive hydrogel by introducing PVDF-TrFE [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40):45853-45868.
- [18] WANG R, UNIVERSITY Q, KIM S H, et al. Bio-inspired hydrogen bonding cross-linking strategy for DIW-printed carbon-based conductive hydrogels in wearable self-powered sensing systems[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2025, 7(3):1217-1229.
- [19] ZOU J, JING X, LI S T, et al. MXene crosslinked hydrogels with low hysteresis conferred by sliding tangle island strategy [J]. *Small*, 2024, 20(35):2401622.
- [20] WANG H C, SHANG R Z, CHEN J W, et al. Flexible chitosan sensing hydrogel enabled by phytic acid coordination effect with high-conductivity and ultra-sensitivity for self-powered handwriting recognition and multimodal sensors[J]. *Nano Energy*, 2024, 128:109843.
- [21] CHAI X Y, TANG J H, LI Y Z, et al. Highly stretchable and stimulus-free self-healing hydrogels with multiple signal detection performance for self-powered wearable temperature sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(14):18262-18271.
- [22] LI J M, XU T, MA Z, et al. Self-healable and stretchable PAAc/XG/Bi<sub>2</sub>Se<sub>0.3</sub>Te<sub>2.7</sub> hybrid hydrogel thermoelectric materials [J]. *Energy & Environmental Materials*, 2024, 7(2):e12547.
- [23] LI R Z, LI D W, SUN J, et al. Pull-off dynamics of mushroom-shaped adhesive structures[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2024, 183:105519.
- [24] YIN J Y, JIA P X, REN Z Q, et al. Mechanically enhanced, environmentally stable, and bioinspired charge-gradient hydrogel membranes for efficient ion gradient power generation and linear self-powered sensing [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(24):2417944.
- [25] WICHTERLE O, LÍM D. Hydrophilic gels for biological use[J]. *Nature*, 1960, 185(4706):117-118.
- [26] ZHANG Q, WU M Y, HU X M, et al. A novel double-network, self-healing hydrogel based on hydrogen bonding and hydrophobic effect[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2020, 221(3):1900320.
- [27] AHMED E M. Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review[J]. *Journal of Advanced Research*, 2015, 6(2):105-121.
- [28] WANG R Y, XU T, YANG Y X, et al. Tough polyurethane hydrogels with a multiple hydrogen-bond interlocked bicontinuous phase structure prepared by in situ water-induced microphase separation[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(6):2412083.
- [29] LIU X J, GAO M, CHEN J Y, et al. Recent advances in stimuli-responsive shape-morphing hydrogels [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(39):2203323.
- [30] LU Y N, UNIVERSITY S Y, MO K, et al. High ion-conductive hydrogel: soft, elastic, with wide humidity tolerance and long-term stability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(44):60992-61003.
- [31] DRURY J L, MOONEY D J. Hydrogels for tissue engineering: scaffold design variables and applications[J]. *Biomaterials*, 2003, 24(24):4337-4351.
- [32] LIU X Y, HE X, YANG B, et al. Dual physically cross-linked hydrogels incorporating hydrophobic interactions with promising reparability and ultrahigh elongation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(3):2008187.
- [33] CUI W, ZHENG Y, ZHU R J, et al. Strong tough conductive hydrogels via the synergy of ion-induced cross-linking and salting-out[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(39):2204823.
- [34] IUDIN D, VAN STEENBERGEN M J, MASEREEUW R, et al. Shrinkable hydrogels through host-guest interactions: a robust approach to obtain tubular cell-laden scaffolds with small diameters [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025,

35(10):2416522.

- [35] WANG Y H, XIANG Y Q, HUANG Q, et al. High-strength ionic hydrogel constructed by metal-free physical crosslinking strategy for enhanced uranium extraction from seawater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479:147875.
- [36] LIN M H, DAI Y, XIA F, et al. Advances in non-covalent crosslinked polymer micelles for biomedical applications[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 119:111626.
- [37] YUE H G, WANG Y, LUO S C, et al. In situ continuous hydrogen-bonded engineering for intrinsically stretchable and healable high-mobility polymer semiconductors[J]. *Science Advances*, 2024, 10(40):eadq0171.
- [38] ZHAO J, CHEN R, CHENG D M, et al. Extremely ultrahigh stretchable starch-based hydrogels with continuous hydrogen bonding[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(8):2415530.
- [39] WU X K, LI M, LI H N, et al. Autonomous underwater self-healable adhesive elastomers enabled by dynamical hydrophobic phase-separated microdomains[J]. *Small*, 2024, 20(35):2311131.
- [40] HOU J B, JIANG Z C, XIAO Y Y, et al. Room temperature shape self-adjustable tough hydrogel based on multi-physical crosslinking[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499:156144.
- [41] 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.
- [42] WEI L X, YANG Y, QIU X Y, et al. Self-polymerized tough and high-entanglement zwitterionic functional hydrogels[J]. *Small*, 2024, 20(50):2405789.
- [43] WU F, REN Y S, LV W Y, et al. Generating dual structurally and functionally skin-mimicking hydrogels by crosslinking cell-membrane compartments[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:802.
- [44] LI H Z, PENG M Q, LI J Y, et al. SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> mediated click chemistry enables modular disulfide formation in diverse reaction media[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:8325.
- [45] LEI X X, ZOU C Y, HU J J, et al. Click-crosslinked in situ hydrogel improves the therapeutic effect in wound infections through antibacterial, antioxidant and anti-inflammatory activities[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 461:142092.
- [46] KIM S H, KIM K, KIM B S, et al. Fabrication of polyphenol-incorporated anti-inflammatory hydrogel via high-affinity enzymatic crosslinking for wet tissue adhesion[J]. *Biomaterials*, 2020, 242:119905.
- [47] LAN T, DONG Y B, SHI J J, et al. Advancing self-healing soy protein hydrogel with dynamic Schiff base and metal-ligand bonds for diabetic chronic wound recovery[J]. *Aggregate*, 2024, 5(6):e639.
- [48] BI B, MA M S, LV S Y, et al. In-situ forming thermosensitive hydroxypropyl chitin-based hydrogel crosslinked by Diels-Alder reaction for three dimensional cell culture[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 212:368-377.
- [49] ZHANG D, TANG Y J, HE X M, et al. Bilayer hydrogels by reactive-induced macrophase separation[J]. *ACS Macro Letters*, 2023, 12(5):598-604.
- [50] WU Y, BEI Y, LI W J, et al. Advanced multifunctional hydrogels for enhanced wound healing through ultra-fast selenol-SNAr chemistry[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(21):2400898.
- [51] LI J S, HU Z Q, ZHANG H W, et al. Poly [2] catenanes-based hydrogels prepared by hydroxyl-yne click chemistry[J]. *Supramolecular Materials*, 2024, 3:100076.
- [52] MILTON L A, DAVERN J W, HIPWOOD L, et al. Liver click dECM hydrogels for engineering hepatic microenvironments [J]. *Acta Biomaterialia*, 2024, 185:144-160.
- [53] LI P P, ZHONG Y B, WANG X, et al. Enzyme-regulated healable polymeric hydrogels[J]. *ACS Central Science*, 2020, 6(9):1507-1522.
- [54] KHATTAK S, ULLAH I, XIE H L, et al. Self-healing hydrogels as injectable implants; advances in translational wound healing[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, 509:215790.
- [55] PAN H Y, TONG M D, WANG X M, et al. Fully biobased high-strength and high-toughness double cross-linked cellulose hydrogel for flexible electrolytes[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(50):18231-18244.
- [56] HE C L, YIN M, ZHOU H, et al. Magnetic nanoactuator-protein fiber coated hydrogel dressing for well-balanced skin wound healing and tissue regeneration[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(1):1713-1731.
- [57] WANG T T, XU B B, YU T, et al. PVA/chitosan-based multifunctional hydrogels constructed through multi-bonding synergies and their application in flexible sensors[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 350:123034.
- [58] ZÖLLER K, TO D, BERNKOP-SCHNÜRCH A. Biomedical applications of functional hydrogels; innovative developments, relevant clinical trials and advanced products[J]. *Biomaterials*, 2025, 312:122718.
- [59] WEI F L, ZHAI Y, WANG T F, et al. Stem cell-homing biomimetic hydrogel promotes the repair of osteoporotic bone

- defects through osteogenic and angiogenic coupling[J]. *Science Advances*, 2024, 10(44):eadq6700.
- [60] ABDULLAEV S S, ALTHOMALI R H, ABDU MUSAD SALEH E, et al. Synthesis of novel antibacterial and biocompatible polymer nanocomposite based on polysaccharide gum hydrogels[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13:16800.
- [61] CAO X L, DENG Y H, XU Z Y, et al. A versatile natural gelatin-based hydrogel for emergency wound treatment through hemostasis, antibacterial, and anti-inflammation[J]. *Biofabrication*, 2025, 17(1):015017.
- [62] BARAKAT A, EHAGALI G A M, KAMOUN E A, et al. A novel chitosan-Schiff bases bearing a new quinoxaline moiety as an approach for potent antimicrobial agent: synthesis, characterization and in vitro assessments[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 352:123205.
- [63] LI X F, SHANG L L, LI D P, et al. High-strength, strong-adhesion, and antibacterial polyelectrolyte complex hydrogel films from natural polysaccharides[J]. *Polymer Testing*, 2022, 109:107547.
- [64] ZHANG Y F, WANG X Y, ZHU S H, et al. Serum albumin hydrogels designed by protein re-association for self-powered intelligent interactive systems[J]. *Energy Storage Materials*, 2024, 67:103266.
- [65] WANG W Y, GUO P S, LIU X, et al. Fully polymeric conductive hydrogels with low hysteresis and high toughness as multi-responsive and self-powered wearable sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(32):2316346.
- [66] HUANG H, CONG H T, LIN Z W, et al. Manipulation of conducting polymer hydrogels with different shapes and related multifunctionality[J]. *Small*, 2024, 20(25):2309575.
- [67] ZHANG Y, XIONG Y S, LI X S, et al. Oxidization and salting out synergistically induced highly elastic, conductive, and sensitive polyvinyl alcohol hydrogels[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(6):2415207.
- [68] RIJNS L, RUTTEN M G T A, BELLAN R, et al. Synthetic, multi-dynamic hydrogels by uniting stress-stiffening and supramolecular polymers[J]. *Science Advances*, 2024, 10(47):eadr3209.
- [69] SINGH N K, WANG Y X, WEN C, et al. High-affinity one-step aptamer selection using a non-fouling porous hydrogel[J]. *Nature Biotechnology*, 2023, 42(8):1224-1231.
- [70] LU Y, YUE Y Y, DING Q Q, et al. Environment-tolerant ionic hydrogel- elastomer hybrids with robust interfaces, high transparency, and biocompatibility for a mechanical-thermal multimode sensor[J]. *InfoMat*, 2023, 5(4):e12409.
- [71] WANG X F, LI X C, WANG B B, et al. Preparation of salt-induced ultra-stretchable nanocellulose composite hydrogel for self-powered sensors[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(1):157.
- [72] CHOI S W, GUAN W, CHUNG K. Basic principles of hydrogel-based tissue transformation technologies and their applications[J]. *Cell*, 2021, 184(16):4115-4136.
- [73] HAN Z L, LU Y C, QU S X. Design of fatigue-resistant hydrogels[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(21):2313498.
- [74] XU D, MENG X T, LIU S Y, et al. Dehydration regulates structural reorganization of dynamic hydrogels[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:6886.
- [75] ALLEN M E, HINDLEY J W, BAXANI D K, et al. Hydrogels as functional components in artificial cell systems[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2022, 6(8):562-578.
- [76] JIA P X, ZHANG Q X, REN Z Q, et al. Self-powered flexible battery pressure sensor based on gelatin[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479:147586.
- [77] ZHANG Y, PAN Y J, CHANG R H, et al. Advancing homogeneous networking principles for the development of fatigue-resistant, low-swelling and sprayable hydrogels for sealing wet, dynamic and concealed wounds *in vivo*[J]. *Bioactive Materials*, 2024, 34:150-163.
- [78] ZAKRZEWSKA A, ZARGARIAN S S, RINOLDI C, et al. Electrospun poly(vinyl alcohol)-based conductive semi-interpenetrating polymer network fibrous hydrogel: a toolbox for optimal cross-linking[J]. *ACS Materials Au*, 2023, 3(5):464-482.
- [79] HUA B Y, WEI H L, HU C W, et al. Preparation of pH/temperature-responsive semi-IPN hydrogels based on sodium alginate and humic acid as slow-release and water-retention fertilizers[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(5):4175-4198.
- [80] ZENOOZI S, MOHAMAD S G M, RAFIEE M. Synthesis and characterization of biocompatible semi-interpenetrating polymer networks based on polyurethane and cross-linked poly(acrylic acid)[J]. *European Polymer Journal*, 2020, 140:109974.
- [81] CHEN H Y, NIE L X, LI D P, et al. Robust, antifouling, and hydrophilic particle-based double-network hydrogel-PVDF interpenetrating microfiltration membrane[J]. *Nano Letters*, 2024, 24(50):16000-16007.
- [82] HAN S W, HU Y K, WEI J, et al. A semi-interpenetrating poly(ionic liquid) network-driven low hysteresis and transparent

- hydrogel as a self-powered multifunctional sensor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(32):2401607.
- [83] XUAN L Y, HOU Y Y, LIANG L, et al. Microgels for cell delivery in tissue engineering and regenerative medicine[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1):218.
- [84] YAO M M, WEI Z J, LI J J, et al. Microgel reinforced zwitterionic hydrogel coating for blood-contacting biomedical devices [J]. *Nature Communications*, 2022, 13:5339.
- [85] HUA M T, WU S W, MA Y F, et al. Strong tough hydrogels via the synergy of freeze-casting and salting out[J]. *Nature*, 2021, 590(7847):594-599.
- [86] WU S J, LIU Z, GONG C H, et al. Spider-silk-inspired strong and tough hydrogel fibers with anti-freezing and water retention properties[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:4441.
- [87] TANG Y L, WU B T, LI J, et al. Biomimetic structural hydrogels reinforced by gradient twisted plywood architectures[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(1):2411372.
- [88] ADLY N, WEIDLICH S, SEYOCK S, et al. Printed microelectrode arrays on soft materials: from PDMS to hydrogels[J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2018, 2:15.
- [89] ZHANG Y, WANG F F, YU Y T, et al. Multi-bioinspired hierarchical integrated hydrogel for passive fog harvesting and solar-driven seawater desalination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 466:143330.
- [90] ALSAID Y, WU S W, WU D, et al. Tunable sponge-like hierarchically porous hydrogels with simultaneously enhanced diffusivity and mechanical properties[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(20):2008235.
- [91] LIANG D C, TANG J B, SUN Q, et al. Achieving ultra-low latent heat of water evaporation in capillary water by regulating hydrophilic groups and pore structure of cellulose/chitosan gel[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 353:123302.
- [92] FENG W J, WANG Z K. Tailoring the swelling-shrinkable behavior of hydrogels for biomedical applications[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(28):2303326.
- [93] HUA J B, SU M R, SUN X D, et al. Hydrogel-based bioelectronics and their applications in health monitoring [J]. *Biosensors*, 2023, 13(7):696.
- [94] JIANG X Y, ZHOU X, DING K X, et al. Anti-swelling gel wearable sensor based on solvent exchange strategy for underwater communication[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(34):2400936.
- [95] HU W, MARTIN F, JEANTET R, et al. Micromechanical characterization of hydrogels undergoing swelling and dissolution at alkaline pH[J]. *Gels*, 2017, 3(4):44.
- [96] ZHANG Y T, LIN X Y, WANG Z M, et al. Multiple hydrogen bonds enable high strength and anti-swelling cellulose-based ionic conductive hydrogels for flexible sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 480:148318.
- [97] AN H, ZHANG M, HUANG Z, et al. Hydrophobic cross-linked chains regulate high wet tissue adhesion hydrogel with toughness, anti-hydration for dynamic tissue repair[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(8):2310164.
- [98] DOU X Y, WANG H F, YANG F, et al. One-step soaking strategy toward anti-swelling hydrogels with a stiff "armor" [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(9):2206242.
- [99] ZHANG Z Y, YAO A F, RAFFA P. Transparent, highly stretchable, self-healing, adhesive, freezing-tolerant, and swelling-resistant multifunctional hydrogels for underwater motion detection and information transmission [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(49):2407529.
- [100] YANG J W, ILLEPERUMA W, SUO Z G. Inelasticity increases the critical strain for the onset of creases on hydrogels[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 40:100966.
- [101] LEI T D, WANG Y H, FENG Y Y, et al. PNIPAAm-based temperature responsive ionic conductive hydrogels for flexible strain and temperature sensing[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 678:726-741.
- [102] LI X Y, GONG J P. Design principles for strong and tough hydrogels[J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9(6):380-398.
- [103] SUN D Q, GAO Y, ZHOU Y F, et al. Enhance fracture toughness and fatigue resistance of hydrogels by reversible alignment of nanofibers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(43):49389-49397.
- [104] ZHUANG Q N, MA Z J, GAO Y, et al. Liquid-metal-superlyophilic and conductivity-strain-enhancing scaffold for permeable superelastic conductors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(47):2105587.
- [105] ZHU R X, ZHU D D, ZHENG Z, et al. Tough double network hydrogels with rapid self-reinforcement and low hysteresis based on highly entangled networks[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:1344.
- [106] LI J, CHEE H L, CHONG Y T, et al. Hofmeister effect mediated strong PHEMA-gelatin hydrogel actuator [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20):23826-23838.
- [107] HAN Q Q, ZHANG C, GUO T M, et al. Hydrogel nanoarchitectonics of a flexible and self-adhesive electrode for long-term

- wireless electroencephalogram recording and high-accuracy sustained attention evaluation[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(12):2209606.
- [108] BAO S Y, WANG H Y, LIU B C, et al. Hydrogen-bonding-crosslinked polyzwitterionic hydrogels with extreme stretchability, ultralow hysteresis, self-adhesion, and antifreezing performance as flexible self-powered electronic devices[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2025, 31(1):15-28.
- [109] LI W Z, YANG X Y, LAI P X, et al. Bio-inspired adhesive hydrogel for biomedicine: principles and design strategies[J]. *Smart Medicine*, 2022, 1(1):e20220024.
- [110] HUANG G, TANG Z F, PENG S W, et al. Modification of hydrophobic hydrogels into a strongly adhesive and tough hydrogel by electrostatic interaction[J]. *Macromolecules*, 2022, 55(1):156-165.
- [111] CHEN T G, LIANG X. A flexible triboelectric nanogenerator based on PDA/MXene/NIPAM hydrogel for mechanical energy harvesting and basketball posture monitoring[J]. *AIP Advances*, 2024, 14(4):045105.
- [112] GAO Y, SONG J F, LI S M, et al. Hydrogel microphones for stealthy underwater listening[J]. *Nature Communications*, 2016, 7:12316.
- [113] KANOKPAKA P, CHANG Y H, CHANG C C, et al. Enabling glucose adaptive self-healing hydrogel based triboelectric biosensor for tracking a human perspiration[J]. *Nano Energy*, 2023, 112:108513.
- [114] WU Y, LI M Y, HE R Y, et al. Photosynthetic live microorganism-incorporated hydrogels promote diabetic wound healing via self-powering and oxygen production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485:149545.
- [115] BAI M, CHEN Y R, ZHU L Y, et al. Bioinspired adaptive lipid-integrated bilayer coating for enhancing dynamic water retention in hydrogel-based flexible sensors[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:10569.
- [116] LI Y, LIU S Y, ZHANG J J, et al. Elastic porous microspheres/extracellular matrix hydrogel injectable composites releasing dual bio-factors enable tissue regeneration[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:1377.
- [117] HE X N, ZHANG B, LIU Q J, et al. Highly conductive and stretchable nanostructured ionogels for 3D printing capacitive sensors with superior performance[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:6431.
- [118] LI M, GUAN Q W, LI C, et al. Self-powered hydrogel sensors[J]. *Device*, 2023, 1(1):100007.
- [119] XIAO Y N, LI Z H, XU B G. Flexible triboelectric nanogenerators based on hydrogel/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites for biomechanical energy harvesting and self-powered sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(11):13674-13684.
- [120] WANG Z S, LI N, YANG X R, et al. Thermogalvanic hydrogel-based e-skin for self-powered on-body dual-modal temperature and strain sensing[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10:55.
- [121] REDDY M S P, PUNEETHA P, SHIM J, et al. Mechanically induced flexible two-dimensional PdSe<sub>2</sub> sensors based on piezotronic effect[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1017:179014.
- [122] GÜNDOĞAN TÜRKER Ç, AKYÜZ F. Experimental analysis of pneumatic motion control application with piezo technology[J]. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 2022, 6(2):166-171.
- [123] DUERLOO K N, ONG M T, REED E J. Piezoelectricity in monolayers and bilayers of inorganic two-dimensional crystals [J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2013, 1556(1):910.
- [124] XIN J, ZHENG Y Q, SHI E W. Piezoelectricity of zinc-blende and wurtzite structure binary compounds[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(11):112902.
- [125] LI Z M, HUANG H S, ZHANG T L, et al. First-principles study of electric field effects on the structure, decomposition mechanism, and stability of crystalline lead styphnate[J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2014, 20(1):2072.
- [126] USHER T M, LEVIN I, DANIELS J E, et al. Electric-field-induced local and mesoscale structural changes in polycrystalline dielectrics and ferroelectrics[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:14678.
- [127] XIONG L Q, XIN Q, YANG G Q, et al. A PVDF-based organohydrogel for self-powered and anti-freezing sensor in electronic skin[J]. *Microchemical Journal*, 2025, 208:112580.
- [128] ZHANG C, JIANG Z P, SUN M D, et al. Nature-inspired helical piezoelectric hydrogels for energy harvesting and self-powered human-machine interfaces[J]. *Nano Energy*, 2025, 136:110755.
- [129] MAO Y W, LIN S T, ZHAO X H, et al. A large deformation viscoelastic model for double-network hydrogels[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 100:103-130.
- [130] SUN M, CHEN K, HU H M, et al. A novel self-powered SERS platform PVDF-HFP/BZT-BCT@PDA/Ag based on piezoelectricity for sensitive detection of food contaminants[J]. *Microchemical Journal*, 2024, 207:112225.
- [131] LI F, CAI X Q, LIU G K, et al. Piezoionic SnSe nanosheets-double network hydrogel for self-powered strain sensing and energy harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(32):2300701.

- [132] FANG Z, TIAN X, ZHENG F J, et al. Enhanced piezoelectric properties of  $\text{Sm}^{3+}$ -modified PMN-PT ceramics and their application in energy harvesting[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(6):7550-7556.
- [133] WANG F, QIU J J, GUAN S W, et al. An ultrasound-responsive hydrogel with piezoelectric-enhanced electrokinetic effect accelerates neurovascular regeneration for diabetic wound healing[J]. *Materials Today*, 2025, 84:48-64.
- [134] LI Y F, YANG R, MA B N, et al. High-performance flexible piezoelectric sensor using electrospun PVDF-BaTiO<sub>3</sub> nanofibers for human motion monitoring and recognition[J]. *Fibers and Polymers*, 2025, 26(1):137-143.
- [135] FU R M, ZHONG X X, XIAO C R, et al. A stretchable, biocompatible, and self-powered hydrogel multichannel wireless sensor system based on piezoelectric barium titanate nanoparticles for health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2023, 114:108617.
- [136] QIAO H M, ZHAO P, KWON O, et al. Mixed triboelectric and flexoelectric charge transfer at the nanoscale[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(20):2101793.
- [137] MUSA U G, CEZAN S D, BAYTEKIN B, et al. The charging events in contact-separation electrification[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:2472.
- [138] JARVID M, JOHANSSON A, ENGLUND V, et al. High electron affinity: a guiding criterion for voltage stabilizer design[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(14):7273-7286.
- [139] OPITZ A, WILKE A, AMSALEM P, et al. Organic heterojunctions: contact-induced molecular reorientation, interface states and charge re-distribution[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:21291.
- [140] ZHAO S X, PETER C G S, ADAMIAK K. Comparison of conduction and induction charging in liquid spraying[J]. *Journal of Electrostatics*, 2005, 63(6/7/8/9/10):871-876.
- [141] BURGO T A L, SILVA C A, BALESTRIN L B S, et al. Friction coefficient dependence on electrostatic tribocharging[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3:2384.
- [142] YUAN J X, ZOU X L, QIN Y, et al. Anti-freeze, anti-dehydrating and stretchable triboelectric materials enabled by covalent-like hydrogen bond interaction[J]. *Nano Energy*, 2024, 131:110215.
- [143] WEI X Y, ZHU G, WANG Z L. Surface-charge engineering for high-performance triboelectric nanogenerator based on identical electrification materials[J]. *Nano Energy*, 2014, 10:83-89.
- [144] YANG H M, LIU W L, XI Y, et al. Rolling friction contact-separation mode hybrid triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and self-powered multifunctional sensors[J]. *Nano Energy*, 2018, 47:539-546.
- [145] RAHMAN M T, RAHMAN M S, KUMAR H, et al. Metal-organic framework reinforced highly stretchable and durable conductive hydrogel-based triboelectric nanogenerator for biomotion sensing and wearable human-machine interfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(48):2303471.
- [146] ZHAO K, LV H R, MENG J K, et al. Triboelectrification-induced electricity in self-healing hydrogel for mechanical energy harvesting and ultra-sensitive pressure monitoring[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(22):18816-18825.
- [147] HOSHINO K, YAMAMOTO H, TAMAI R, et al. N-type nanocomposite films combining SWCNTs, Bi<sub>7</sub>e<sub>3</sub> nanoplates, and cationic surfactant for pn-junction thermoelectric generators with self-generated temperature gradient under uniform sunlight irradiation[J]. *Sensors*, 2024, 24(21):7060.
- [148] FAN L, SU X, ZHU H L, et al. Degradation of methylene blue by hot electrons transfer in SnSe[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, 10(11):2202207.
- [149] ARISAWA H, FUJIMOTO Y, KIKKAWA T, et al. Observation of nonlinear thermoelectric effect in MoGe/Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:6912.
- [150] MARTÍN-GONZÁLEZ M, CABALLERO-CALERO O. Thermoelectric generators as an alternative for reliable powering of wearable devices with wasted heat[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2022, 316:123543.
- [151] LEE H. The Thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers[J]. *Energy*, 2013, 56:61-69.
- [152] YANG K, BAI C H, LIU B Y, et al. Self-powered, non-toxic, recyclable thermogalvanic hydrogel sensor for temperature monitoring of edibles[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7):1327.
- [153] CHEN J H, ZHANG L, TU Y Y, et al. Wearable self-powered human motion sensors based on highly stretchable quasi-solid state hydrogel[J]. *Nano Energy*, 2021, 88:106272.
- [154] JIA M P, LUO L, ROLANDI M. Correlating ionic conductivity and microstructure in polyelectrolyte hydrogels for bioelectronic devices[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2022, 43(6):2100687.
- [155] HASAN S W, SAID S M, SABRI M F M, et al. High thermal gradient in thermo-electrochemical cells by insertion of a poly(vinylidene fluoride) membrane[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:29328.

- [ 156 ] ZHAO D, FABIANO S, BERGGREN M, et al. Ionic thermoelectric gating organic transistors[J]. *Nature Communications*, 2017, 8:14214.
- [ 157 ] CHEN L Z, LOU J, RONG X H, et al. Super-stretching and high-performance ionic thermoelectric hydrogels based on carboxylated bacterial cellulose coordination for self-powered sensors[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 321:121310.
- [ 158 ] PRAYOGI S, SILVIANA F, ZAINUDDIN Z. Scientific explanation of the photoelectric effect using common objects[J]. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 2023, 19(2):128-135.
- [ 159 ] ZHANG J J, SU X D, SHEN M R, et al. Enlarging photovoltaic effect: combination of classic photoelectric and ferroelectric photovoltaic effects[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3:2109.
- [ 160 ] LI J Z, WU M F, ZHANG H X, et al. Flexible self-powered photoelectrochemical photodetectors based on cellulose-based hydrogel electrolytes and Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se nanosheets[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(1):594-605.
- [ 161 ] BAI H Y, CHEN D W, ZHU H Y, et al. Photo-crosslinking ionic conductive PVA-SbQ/FeCl<sub>3</sub> hydrogel sensors[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648:129205.
- [ 162 ] LU P P, XU J Y, LIU S Y, et al. Facile synthesis of ultratough conductive gels with swelling and freezing resistance for flexible sensor applications[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15:7335.
- [ 163 ] LI X X, CHEN L, YUAN S L, et al. Stretchable luminescent perovskite-polymer hydrogels for visual-digital wearable strain sensor textiles[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(5):1671-1684.
- [ 164 ] LIU H D, DU C F, LIAO L L, et al. Approaching intrinsic dynamics of MXenes hybrid hydrogel for 3D printed multimodal intelligent devices with ultrahigh superelasticity and temperature sensitivity[J]. *Nature Communications*, 2022, 13:3420.
- [ 165 ] LI H, LUO R M, LAM K Y. Modeling of ionic transport in electric-stimulus-responsive hydrogels[J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 289(1/2):284-296.
- [ 166 ] XIONG M Y, SHENG Y H, DI Y S, et al. Power-free and self-cleaning solar light detector based on the temperature-sensitive structural color and photothermal effect[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(28):33566-33573.
- [ 167 ] QU Z X, WANG L Z, FANG S M, et al. Fluorescein-immobilized optical hydrogels: synthesis and its application for detection of Hg<sup>2+</sup>[J]. *Microchemical Journal*, 2019, 150:104198.
- [ 168 ] LI W W, WANG X Y, PEI K Y, et al. High power density and quick start-up of microbial fuel cell with 3D fold MXene Film@Nickel foam composite anode[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 632:236405.
- [ 169 ] THULASINATHAN B, EBENEZER J O, BORA A, et al. Bioelectricity generation and analysis of anode biofilm metabolites from septic tank wastewater in microbial fuel cells[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(12):17244-17258.
- [ 170 ] KAMANINA O A, KAMANIN S S, KHARKOVA A S, et al. Glucose biosensor based on screen-printed electrode modified with silicone Sol-gel conducting matrix containing carbon nanotubes[J]. *3 Biotech*, 2019, 9(7):290.
- [ 171 ] PENG W X, ZHAO J M, LI Q X, et al. A strong and tough ion-gel enabled by hierarchical meshing and ion hybridizations collaboration[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(5):2414682.
- [ 172 ] LI L Q, YE X Y, JI Z C, et al. Paintable, fast gelation, highly adhesive hydrogels for high-fidelity electrophysiological monitoring wirelessly[J]. *Small*, 2025, 21(8):2407996.
- [ 173 ] BAI L, LUO Q H, GAO Z S, et al. Bioinspired conductive structural color hydrogels: a theragnostic platform for spatiotemporal monitoring and repair of myocardial infarction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025:10548.
- [ 174 ] WANG Z Y, BU M M, XIU K H, et al. A flexible, stretchable and triboelectric smart sensor based on graphene oxide and polyacrylamide hydrogel for high precision gait recognition in Parkinsonian and hemiplegic patients[J]. *Nano Energy*, 2022, 104:107978.
- [ 175 ] YANG Z Y, WANG Q Z, YU H X, et al. Self-powered biomimetic pressure sensor based on Mn-Ag electrochemical reaction for monitoring rehabilitation training of athletes[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(25):2401515.
- [ 176 ] DAI X Y, HUANG L B, SUN Z H, et al. A phonic Braille recognition system based on a self-powered sensor with self-healing ability, temperature resistance, and stretchability[J]. *Materials Horizons*, 2022, 9(10):2603-2612.
- [ 177 ] DING Q L, WANG H, ZHOU Y B, et al. Self-powered switchable gas-humidity difunctional flexible chemosensors based on smart adaptable hydrogel[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(24):2502369.
- [ 178 ] LUU T T, LE H A T, RA Y, et al. Recovered graphene-hydrogel nanocomposites for multi-modal human motion recognition via optimized triboelectrification and machine learning[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 291:111997.
- [ 179 ] LUO F Y, CHEN B, RAN X, et al. Wearable and self-powered triboelectric sensors based on NaCl/PVA hydrogel for driver multidimensional information monitoring[J]. *Nano Energy*, 2023, 118:109035.

- [180] ZHU Y, LI Q Q, GUO M J, et al. Ultrastretchable freezing-tolerant organohydrogels for health monitoring and triboelectric nanogenerator-based gesture recognition[J]. *Nano Energy*, 2024, 131:110261.
- [181] LI K S, ZHANG D Z, ZHANG H, et al. Triboelectric nanogenerators based on super-stretchable conductive hydrogels with the assistance of deep-learning for handwriting recognition[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(27):32993-33002.
- [182] LIU L Q, LI J, OU-YANG W, et al. Ferromagnetic-assisted Maxwell's displacement current based on iron/polymer composite for improving the triboelectric nanogenerator output[J]. *Nano Energy*, 2022, 96:107139.
- [183] LI Y S, WANG W X, CUI X J, et al. Self-powered machine-learning-assisted material identification enabled by a thermogalvanic dual-network hydrogel with a high thermopower[J]. *Small*, 2025, 21(1):2405911.
- [184] MA X L, WANG W X, CUI X J, et al. Machine learning assisted self-powered identity recognition based on thermogalvanic hydrogel for intelligent security[J]. *Small*, 2024, 20(37):2402700.
- [185] LI N, WANG Z S, YANG X R, et al. Deep-learning-assisted thermogalvanic hydrogel E-skin for self-powered signature recognition and biometric authentication[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(18):2314419.
- [186] WANG F Y, YAO K D, CHEN C, et al. Lanthanide-coordinated multifunctional hydrogel for detecting human motion and encrypting information[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(24):2418373.
- [187] SUN Y, LE X X, SHANG H, et al. Dual-mode hydrogels with structural and fluorescent colors toward multistage secure information encryption[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(28):2401589.
- [188] HSU H H, ZHANG X Y, XU K G, et al. Self-powered and plant-wearable hydrogel as LED power supply and sensor for promoting and monitoring plant growth in smart farming[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 422:129499.
- [189] CHANG A, UY C, XIAO X, et al. Self-powered environmental monitoring via a triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2022, 98:107282.
- [190] LIU C L, JIANG L, OUYANG Y, et al. Thermal enhancement of gelatin hydrogels for a multimodal sensor and self-powered triboelectric nanogenerator at low temperatures[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(3):112.
- [191] GUO X G, WANG L W, JIN Z Y, et al. A multifunctional hydrogel with multimodal self-powered sensing capability and stable direct current output for outdoor plant monitoring systems[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 17(1):76.
- [192] YAN X, WANG T H, LI H X, et al. Flexible aggregation-induced emission-active hydrogel for on-site monitoring of pesticide degradation[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(11):18421-18429.
- [193] WU Z X, WANG H, DING Q L, et al. A self-powered, rechargeable, and wearable hydrogel patch for wireless gas detection with extraordinary performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(21):2300046.
- [194] WANG D Y, ZHANG D Z, TANG M C, et al. Ethylene chlorotrifluoroethylene/hydrogel-based liquid-solid triboelectric nanogenerator driven self-powered MXene-based sensor system for marine environmental monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022, 100:107509.
- [195] REN J Y, CHEN G Q, YANG H L, et al. Super-tough, non-swelling zwitterionic hydrogel sensor based on the Hofmeister effect for potential motion monitoring of marine animals[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(48):2412162.

(编辑:胡春燕)