

·综述·

水凝胶在生物传感设备中的研究进展

张慧敏 孙玉莹 张 浩* 刘金慧* 刘 凯* 华 静

(青岛科技大学高分子科学与工程学院 青岛 266042)

摘要: 随着柔性电子技术的快速发展,具有便携、轻质、高贴合性的生物传感设备在健康监测、人机交互等领域受到广泛关注。然而,传统电子器件与生物组织之间存在明显的力学失配,且生物相容性不足,限制了其在实际生理环境中的稳定应用。水凝胶因兼具高水含量、可调力学性能和优异的生物相容性,为突破上述瓶颈提供了重要的材料基础,其中导电水凝胶已成为柔性生物传感器件的核心材料体系。本文系统总结了这类水凝胶在生物传感器件中的研究进展,介绍了电子导电与离子导电水凝胶的结构设计与功能化策略,及其在运动检测、医疗诊断和电子皮肤中的典型应用。最后,针对现阶段材料稳定性、复杂生理环境中的信号可靠性及规模化制备等方面存在的问题,对该领域的未来发展方向进行了分析与展望。

关键词: 水凝胶; 生物传感; 柔性电子器件; 导电水凝胶

Research Progress on Hydrogel-based Biosensing Devices

ZHANG Hui-min, SUN Yu-ying, ZHANG Hao*, LIU Jin-hui*, LIU Kai*, HUA Jing

(School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042)

Abstract: Flexible biosensing devices have attracted considerable interest in health monitoring and human-machine interaction because of their portability, lightweight design, and skin-conformable nature. However, the mechanical mismatch and biocompatibility limitations of conventional electronic materials remain critical barriers to their stable operation in physiological environments. Hydrogels, which combine high water content, tunable mechanical properties, and excellent biocompatibility, offer a promising material platform for addressing these challenges. Conductive hydrogels have emerged as a representative material system for flexible biosensing devices. This review summarizes recent advances in hydrogel-based flexible biosensing devices, covering the structural design and functionalization strategies of electronically and ionically conductive hydrogels and their applications in motion detection, medical diagnostics, and electronic skin applications. Finally, we identify the current challenges related to long-term material stability, signal reliability in complex biological environments, and scalable fabrication, and outline promising directions for future research.

Keywords: Hydrogels; Biosensing; Flexible electronic devices; Conductive hydrogels

引用: 张慧敏, 孙玉莹, 张浩, 刘金慧, 刘凯, 华静. 水凝胶在生物传感设备中的研究进展. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.092

Citation: Zhang, H. M.; Sun, Y. Y.; Zhang, H.; Liu, J. H.; Liu, K.; Hua, J. Research progress on hydrogel-based biosensing devices. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.092

青岛科技大学高分子研究专辑; 2026-02-27 收稿, 2026-04-23 录用

* 通信联系人: 张浩, E-mail: zhanghao3766@qust.edu.cn; 刘金慧, E-mail: liujinhui7@163.com; 刘凯, E-mail: liukai@qust.edu.cn
doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.092

近年来,随着科学技术的蓬勃发展,生物电子设备受到越来越多的关注。便携、轻质及良好的生物相容性是未来生物电子设备区别于传统刚性生物电子设备的关键特征。以生物传感器为代表的生物电子技术,为直接、高效地采集心电图、血糖、体温、血压及甲状腺激素等多种生物信号,了解人体健康状况提供了颇具前景的解决方案^[1]。然而,传统电子器件所用材料与生物组织之间存在明显的力学失配与生物学差异,限制了其与皮肤或组织的长期稳定贴合。研究人员发现,采用柔性材料作为生物电子器件基材可以有效解决这一问题。这类材料通常具有模量低、质量轻、生物相容性好、可弯曲拉伸等优势,且易于便携化与低成本制备^[2]。此外,柔性设备为实现高度功能集成提供了更大空间,从而能够兼容更多附加功能(如无线传输模块、控制与数据采集仪器、内置电源单元等)。目前,柔性生物传感器已广泛应用于健康监测与人机交互等领域^[3]。

早期的柔性电子器件由柔性基底聚合物及其上的柔性金属电路构成,该电路通常采用铜、金、银或液态金属等不同金属材料制备。金属虽然具有高导电性,但其固有刚性使其在反复形变条件下易发生开裂或分层,严重限制了其在柔性器件中的稳定应用。为此,研究者转而通过将金属纳米颗粒/纳米线^[4]、金属氧化物^[5]或导电聚合物^[6]涂覆于非活性弹性基体上来制备柔性生物电子器件。与由金属电路构成的传统电子器件相比,此类含有导电填料的弹性体具备一定的可拉伸性,与生物组织的力学适配性有所改善,更适用于生物组织环境^[7]。然而,这些器件在实际应用中仍然面临灵敏度低、生物相容性差及检测范围有限等问题,难以满足复杂生理环境下的使用要求。

水凝胶是一种含有大量亲水基团的高分子链通过物理或化学交联形成的三维网络材料,能够吸收并保持大量水分而不溶解,具有良好的保湿性能、优异的韧性和弹性、卓越的生物相容性,并且其力学性能便于在合成过程中加以调控。上述特点使基于水凝胶的柔性电子器件在生物相容性方面具有显著优势,在生物传感领域展现出较大的应用潜力^[8]。导电水凝胶是其中研究最为活跃的一类,其网络结构、电化学性能、力学性质及生物功能均可在较宽范围内进行调节^[9]。通过改变导电填料、掺杂剂、交联方式或水合状态等方式,

水凝胶能够获得独特的性能与多样的功能。目前,基于导电水凝胶的生物柔性传感器已取得明显进展,该类传感器可直接贴附于皮肤,实时监测人体的各种运动及细微生理信号^[10]。

本综述围绕基于水凝胶的柔性电子器件在生物传感中的应用展开介绍,主要从结构设计、功能化策略及典型应用的角度加以梳理,并在文末就当前面临的主要挑战与未来发展方向进行了讨论。

1 导电水凝胶

导电水凝胶以三维交联含水聚合物网络为基础,能够容纳大量水分,电学与力学性能均可在合成阶段通过调整配方加以调控。就其组成而言,导电水凝胶由本征导电材料与聚合物网络两部分构成,导电材料的种类与含量直接决定了水凝胶的导电性能^[11]。本章节将详细介绍近年来导电水凝胶在结构与性能调控方面的突出优势及其在生物传感方面的具体应用。

1.1 导电水凝胶的结构设计

依据导电机理的不同,导电水凝胶主要分为2类:电子导电水凝胶(electronically conductive hydrogels, ECHs)与离子导电水凝胶(ionically conductive hydrogels, ICHs)。电子导电水凝胶的导电性源于电子传输,而离子导电水凝胶则依赖于离子迁移^[12]。

1.1.1 电子导电水凝胶

通过向水凝胶网络中引入不同类型的电子导电材料,可获得性能优异的电子导电水凝胶(ECHs)。在这一体系中,传统的聚合物提供网络骨架支撑,导电材料则提供良好导电性能。水凝胶的导电性与导电材料的浓度紧密相关。当导电材料浓度较低时,水凝胶导电性较差,电子传输主要依赖隧道效应。一旦导电材料浓度达到渗流阈值,导电网络形成,水凝胶即获得良好的导电性^[13,14]。除了具有导电性外,ECHs还兼具优异的力学性能、高灵敏度及快速的响应能力^[15]。目前常用的电子导电材料主要包括金属基材料、碳基材料及导电聚合物。

(1)金属基导电材料。金属基导电材料主要包括金、铜、银等金属纳米线或纳米颗粒等。金属纳米材料因其优异的比表面能、高导电性以及良好的磁性与催化性能,被广泛用于导电水凝胶

的制备。Qiu等^[16]将聚(*N*-丙烯酰甘胺酰胺)和银纳米颗粒采用一种简单的一锅聚合和还原技术,制备得到坚固、耐用、抗膨胀且高导电的水凝胶(PNAGA/Ag NPs),如图1所示。该水凝胶可作为温度、压力和应变传感器,用于水下感测和通信。

Chen等^[17]设计了一种将液态金属填充于定向排列的镍纳米线之间空隙中的双网络水凝胶复合材料。这种互穿结构能够在填料含量较低的情况下形成高效导电通路,从而同时实现高导电性(1.11×10^4 S/m)与优异的力学柔顺性(杨氏模量 89 kPa, 韧性 721 kJ/m^3)。

(2)碳基导电材料。碳基导电材料(如活性炭、碳纳米管、多孔碳、碳纤维及石墨烯等)具有高导电性、良好稳定性及低成本等优势。同时,

它还具有优异的机械性能,这使得导电水凝胶在保持高导电性的同时实现了机械强度与柔韧性的平衡^[18,19]。石墨烯和碳纳米管因其独特的共轭结构和巨大的比表面积,为在聚合物网络中构建高效的三维导电通路提供了可能,并能显著提升复合材料的机械性能。Ren等^[20]将羧基碳纳米管(CNT)层以夹层结构整合到阳离子水凝胶(P(AM-co-DMDAAC), PAD)表面,如图2所示,然后进行脱水致密化处理,既提高了水凝胶的导电性,同时又保持了其可拉伸性。Shu等^[21]通过在 ZnCl_2 配位网络中,对纤维素链与氧化石墨烯(GO)进行分子工程设计,开发出一种双离子-电子导电水凝胶。优化后的杂化水凝胶表现出极高的导电率(25.51 S/m)和超低界面阻抗,同时实现了高导电

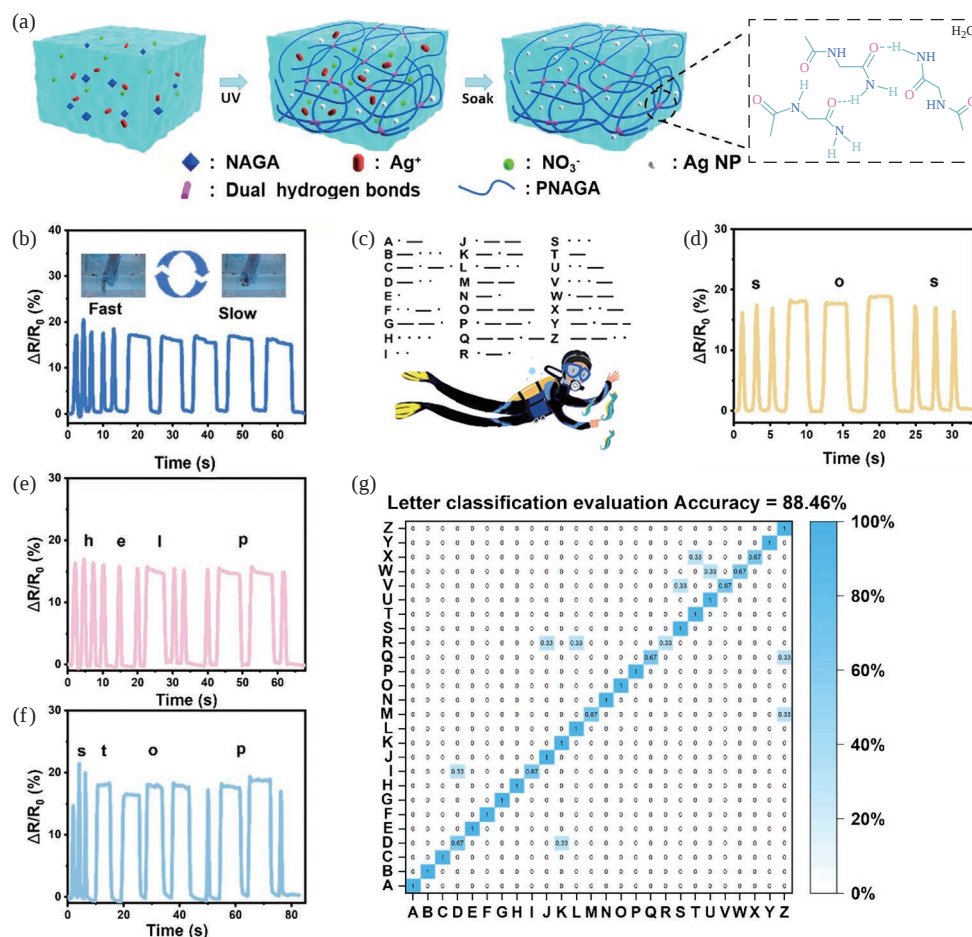


图1 (a) PNAGA/Ag NPs水凝胶网络的制备过程及结构示意图;(b)水凝胶传感器在水下手指弯曲动作的实时相对电阻的变化;(c)相关摩斯电码的含义;(d~f)单词(“SOS”“HELP”与“STOP”)对应的信号曲线;(g) 26个英文字母的分类混淆矩阵^[16] (2025 Elsevier 版权许可)

Figure 1 (a) Schematic diagram depicting the fabrication process and network architecture of the PNAGA/Ag NPs hydrogel; (b) Real-time relative resistance changes of the hydrogel sensor during underwater finger bending motions; (c) Corresponding meanings of the Morse code; (d~f) Signal curves corresponding to the words “SOS”, “HELP” and “STOP”; (g) Classification confusion matrix for the 26 English letters (Reprinted with permission from Ref. [16]; Copyright (2025) Elsevier)

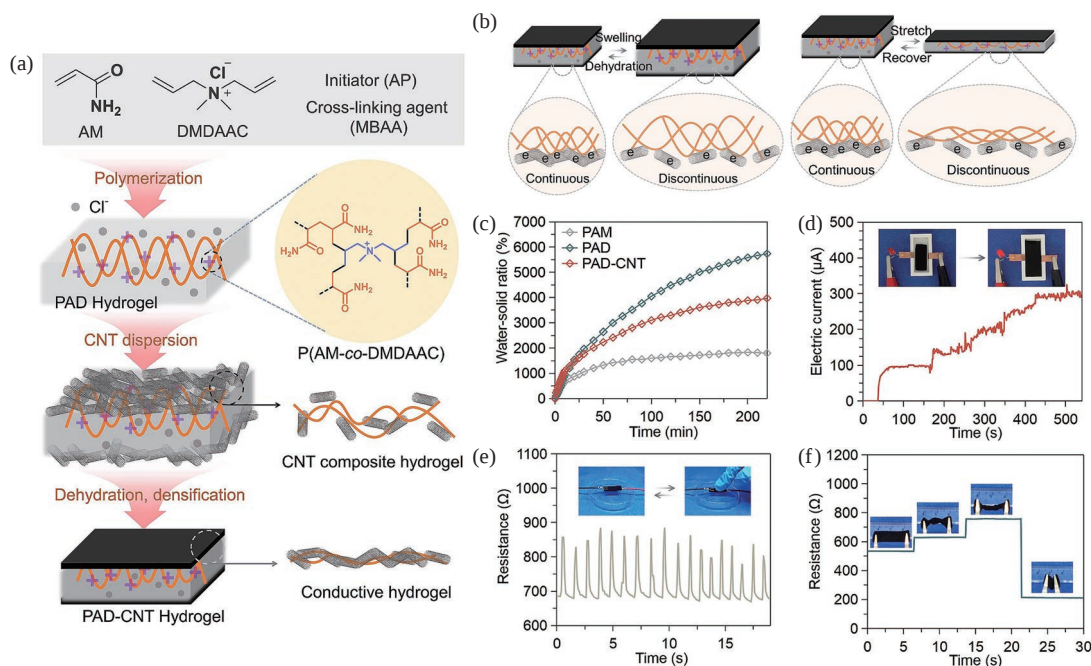


图2 (a) PAD-CNT水凝胶网络的制备过程及相互作用机制;(b) PAD-CNT水凝胶溶胀及拉伸示意图;(c)不同水凝胶的水固比对照图;(d) PAD-CNT水凝胶溶胀后开关响应情况;(e) PAD-CNT水凝胶在周期性压缩过程中的电阻变化;(f) PAD-CNT水凝胶在不同扭转程度下的电阻变化^[20] (2024 Elsevier 版权许可)

Figure 2 (a) Preparation process and interaction mechanism of PAD-CNT hydrogel network; (b) Schematic diagram of swelling and stretching of PAD-CNT hydrogel; (c) Comparison of water-to-solid ratios among different hydrogels; (d) Swelling-responsive switch of the PAD-CNT hydrogel; (e) Resistance variations of the PAD-CNT hydrogel during cyclic compression; (f) Resistance changes of the PAD-CNT hydrogel under different degrees of torsion. (Reprinted with permission from Ref.[20]; Copyright (2024) Elsevier)

性与优异的机械性能。

(3) 导电聚合物。导电聚合物是一类主链具有 π -共轭结构的高分子材料,其交替排列的单双键使电子能够沿聚合物链离域传输,从而表现出导电性。相较于其他导电材料,导电聚合物具有电导率可调、柔韧性与生物相容性良好等优势。典型的导电聚合物有聚苯胺、聚吡咯、聚噻吩等。Han等^[22]通过在聚合物网络中原位形成聚多巴胺(PDA)掺杂的聚吡咯(PPy)纳米纤丝,得到了一种透明、导电、可拉伸且自黏附的水凝胶。其中,原位形成的PDA-PPy纳米纤丝赋予水凝胶自黏附性且具有良好的亲水性,与亲水聚合物相充分融合并交织成纳米网状结构,从而构建完整的导电路径,同时允许可见光透过以实现透明性。Zhao等^[23]设计了一种聚吡咯(PPy)修饰的纤维素纳米晶体(CNC)亲水复合物(CNC-PPy),并在紫外线和过硫酸铵(APS)的诱导下,得到具有多交联网络结构的离子-电子双导电水凝胶,其具有优异的机械性能(拉伸强度达 (370 ± 17) kPa,断裂伸长率达 $(702 \pm 18)\%$ 、导电性 (0.45 S/m) 和应变敏感性(应变系数 $\text{GF}=1.43$)。

综合而言,电子导电水凝胶(ECHs)具有高电导率、可拉伸性、高灵敏度、宽应变范围等优势,是未来柔性电子领域的重要发展方向。

1.1.2 离子导电水凝胶

除了电子传导外,通过自由离子迁移实现的离子传导也是一种普遍且重要的电信号传导方式。离子导电水凝胶(ICHs)的聚合物网络中存在大量自由带电离子,这些自由离子的不断定向移动使水凝胶产生导电性。与电子导电水凝胶不同,离子导电水凝胶通常具有更高的透明度,这种独特优势使其成为柔性生物电子学领域的热门选择^[13,24]。

通常用于制备ICHs的材料主要有3类:金属盐类(如 $\text{FeCl}_3/\text{FeNO}_3$ 、 NaCl 、 KCl 、 LiCl 、 AlCl_3 、 TbCl_3 、 CaCO_3);酸类(如 H_3PO_4 、 HCl 、 H_2SO_4);以及离子液体(如1-乙基-3-甲基咪唑醋酸盐)。最常用的方法是将金属盐离子溶解于水凝胶中,获得具有优异导电性能的ICHs。Wen等^[25]通过将单宁酸修饰的羟基磷灰石纳米线、聚乙烯醇分子链、乙二醇与金属离子有机结合,成功制备出一种兼具传感、紫外线过滤、水分保持及抗冻性能的透明

高离子导电水凝胶 TA@HAP NWS-PVA(EG/W), 如图 3(a) 所示。该水凝胶的高离子导电性使其具备拉伸应变、压力与温度传感能力。特别是, 基于该水凝胶的应变传感器在人体的不同部位表现出宽应变范围(350%)内的高灵敏度(应变系数 $GF=2.84$)、高线性度($R^2=0.99003$)、快速响应(约 50 ms)及优异的循环稳定性(图 3(b)~3(e))。这种兼具生物相容性与多功能特性的导电水凝胶为新型离子皮肤器件的设计提供了新思路。Pan 等^[26]采用冻融循环法, 以聚乙烯醇(PVA)为基体材料、单宁酸(TA)为黏附增强材料、氯化锂(LiCl)为导电介质, 成功制备出具有综合性能的离子导电水凝胶(PVA-TA-0.5/LiCl-1), 实现了黏附强度(在猪皮组织上达 2.32 kPa)与导电性(0.64 S/m)的最佳平衡, 同时具备良好的拉伸强度(0.1 MPa)与优异的生物相容性。Miao 等^[27]通过熔融盐水合物一步法设计并制备了一种新型离子导电纤维素水凝胶, 具备可控的力学性能、高离子电导率及优异的抗冻性。更重要的是, 基于其金属盐组分特性,

该水凝胶在宽工作温度范围($-80\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)内展现出长期稳定的保水能力(90 天后仍保持 75.6%)与离子电导率(90 天后保持 85%)。依托这些优势, 该水凝胶在人体运动检测与运动方向识别方面表现出优异的机电性能, 在柔性电子器件领域显示出广阔应用前景。

除上述金属盐与酸类路线外, 用离子液体为水凝胶提供导电性也是制备离子导电水凝胶的一条有效途径。Lei 等^[28]从分子相互作用角度出发, 设计了一类两性离子水凝胶, 成功整合了超拉伸性(应变 $>10000\%$)、高强度(约 300 kPa)、室温自愈合性(12 h 内)、3D 可打印性、显著刺激响应性、生物相容性与抗菌活性等多种功能。Li 等^[29]通过绿色物理交联法, 将离子液体与氧化石墨烯整合到马铃薯淀粉/聚乙烯醇骨架中, 制备了一种多功能水凝胶。丰富的氢键与静电相互作用赋予该水凝胶优异的拉伸性(657.5%)、强度(0.64 MPa)、高导电性(1.98 S/m)及良好的抗冻性能($<-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。该工作为开发可持续、多功能的生物聚合物水凝

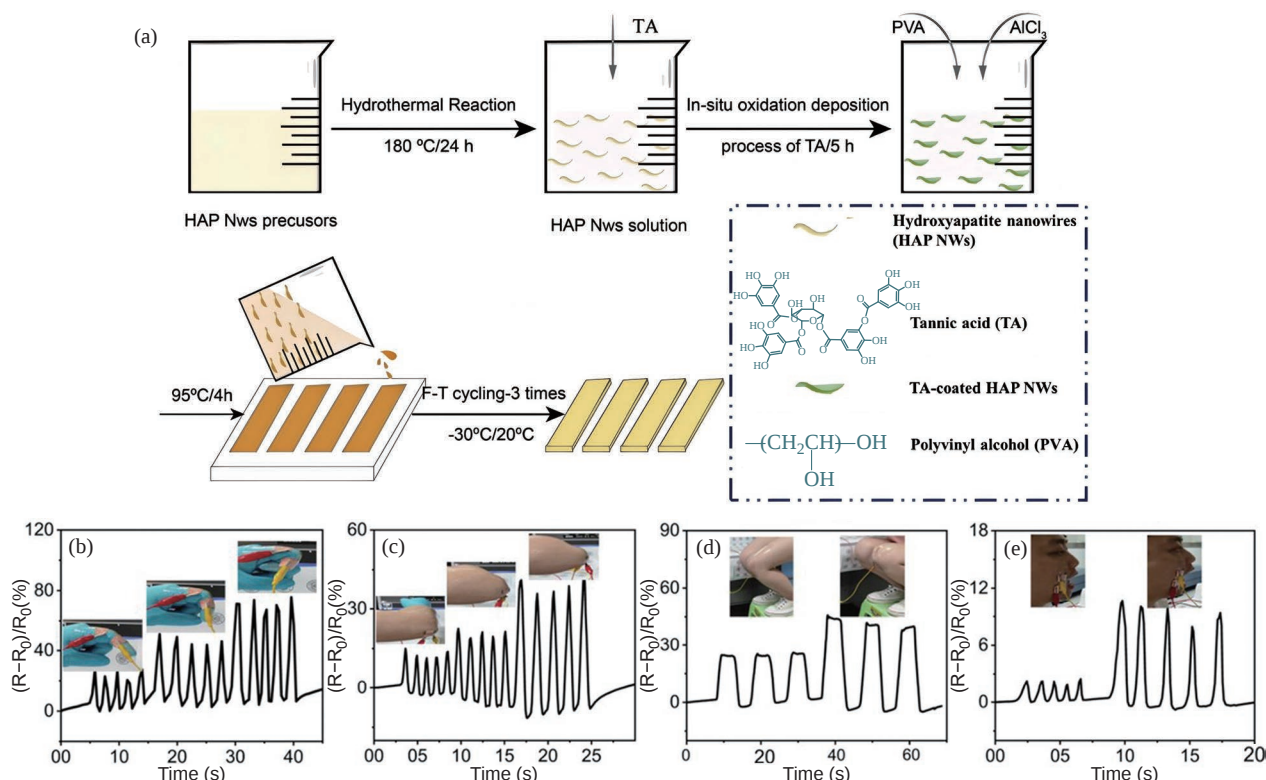


图 3 (a) TA@HAP NWS-PVA(EG/W)水凝胶网络的制备过程; 基于TA@HAP NWS-PVA (EG/W)水凝胶的人体不同部位拉伸应变传感功能演示: (b)手指关节; (c)肘部; (d)膝盖; (e)嘴巴^[25] (2020 Wiley 版权许可)

Figure 3 (a) Preparation procedure of the TA@HAP NWS-PVA (EG/W) hydrogel network; Demonstration of strain-sensing functionality based on the TA@HAP NWS-PVA (EG/W) hydrogel at various body locations, showing detection of (b) finger joints; (c) elbow; (d) knee; (e) mouth at various bending angles (Reprinted with permission from Ref. [25]; Copyright (2020) Wiley)

胶提供了可行路径,其在人体健康监测、运动追踪及软体机器人等领域具有广泛的应用前景。

总体而言,离子导电水凝胶(ICHs)因其线性响应度好、透明度高、与皮肤阻抗低等特性在柔性生物电子领域独具优势^[30],在离子皮肤、健康监测、软体机器人等器件的开发展现出光明应用前景。

1.2 导电水凝胶的性能调控

与单功能导电水凝胶相比,面向生物电子学应用的多功能导电水凝胶还需集成更为丰富的特性。为满足柔性生物电子器件在复杂生理环境中的长期稳定运行,此类材料不仅需具备可调节的机械性能以匹配生物组织,还需赋予其自修复能力以延长使用寿命。因此,研究者们致力于通过特殊设计,使导电水凝胶获得与柔性生物电子器件相匹配的多种功能。

1.2.1 机械性能

生物柔性传感器需要具备良好的柔韧性与机械性能。与传统的硬质材料相比,导电水凝胶可以通过不同策略获得具有可调节的机械性能及优异的拉伸性能等特性。构建双网络结构是使导电水凝胶获得良好力学性能的重要方法。在大多数情况下由交联的刚性聚合物所形成的第一网络通常作为牺牲骨架,提供较高力学强度;而由柔性聚合物所形成第二网络,赋予材料优异的拉伸性能。Liu等^[31]以羧甲基壳聚糖(CMCs)作为刚性网络、丙烯酸(AA)作为柔性网络,并加入碱性钙膨润土(ACBt)赋予导电性能,设计了一种双网络导电水凝胶,为材料提供了可调节的机械性能及卓越的自修复与抗菌能力。Li等^[32]采用原位聚合的方法,设计了一种基于聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)与聚乙烯醇(PVA)的双网络(DN)导电聚合物水凝胶。在双网络体系中,通过有效提升PEDOT:PSS含量并降低PVA含量,使前驱体水凝胶中PEDOT:PSS与PVA的质量比显著提高(至约1:1),最终得到了高电导率(约1000 S/m)与大拉伸性(约150%)相结合的双网络导电水凝胶。

为使水凝胶获得更加优异的机械性能,研究者们除了构建双网络外,通常还会将纳米材料引入水凝胶体系,设计制备纳米复合导电水凝胶。Shao等^[33]通过纳米纤维素网络(CNF)的共形包覆以及CNF、聚多巴胺(PDA)、铁离子与聚丙烯酰胺(PAM)之间的超分子相互作用制备得到一种导电水凝胶,展现出超越许多化学交联自黏附水凝胶的优异力学性能(拉伸强度约130 kPa,压缩强度约10 MPa),并兼具可靠降解性(水中30天可降解)与出色的自黏附特性。研究者们进一步将这种水凝胶组装成可穿戴自黏附表皮传感器,解决了传统的导电水凝胶表皮传感器难以降解,产生大量的废弃物问题,在人体活动监测、人工电子皮肤、个人健康诊断及可穿戴生物电子领域展现出广阔应用前景。

除此以外,Wang等^[34]通过引入 Zn^{2+} 交联的纤维素纳米纤维(CNFs)与原有聚乙烯醇(PVA)-聚丙烯酰胺(PAAm)双网络水凝胶产生氢键和金属-配体相互作用,形成一种独特的拓扑结构,协同增强了纳米导电水凝胶的力学性能,实现了4.98 MPa的最大拉伸强度和48 MJ/m³的韧性。Zhang等^[35]通过改进水凝胶制备工艺,即将聚乙烯醇(PVA)-羧甲基纤维素(CMC)双网络水凝胶经过限域干燥一再膨胀(CDR)及盐渍处理,使水凝胶获得具有各向异性的拓扑结构,实现机械性能的大范围调控。超支化聚合物具有三维空间分子构型、高度支化的主链和丰富的端基,为高分子材料的力学性能的提升提出新思路。同时,超支化拓扑的非缠结几何形状有助于增强柔性聚合物链的链段运动。Jiang等^[36]合成了羧基官能化和丙烯酸封端的超支化聚己内酯(PCL),并将其用作大分子交联剂,制备了超强、超韧性的离子水凝胶。

导电水凝胶机械性能的提升还可以通过引入能量耗散机制来实现。近年来,研究人员已经证明,构建仿生分层微结构可以得到不同的能量耗散机制,进而显著增强水凝胶的机械性能。Chen等^[37]通过蒸发诱导自组装制造具有分层微观结构(LMP)的MXene(2D过渡金属碳化物)/聚乙烯醇(PVA)复合导电水凝胶。多种能量耗散机制的共同作用显著提高了水凝胶的力学性能,达到了6.11 MPa的抗拉强度、20.57 MJ/m³的韧性和730.73%的断裂伸长率。此外,Zhang等^[38]通过超铺展和退火的协同策略,构建了一种具有致密均匀网络结构的PVA-PAA双网络水凝胶(A-DN),引入能量耗散机制,表现出卓越的机械性能(拉伸强度53.0 MPa、断裂应变1374%、韧性315.7 MJ/m³),且水下性能与空气中相当。

上述策略从网络结构、界面作用及能量耗散路径等多维度出发,实现了导电水凝胶力学性能的可调性与综合强化,为其在柔性生物传感领域中的稳定应用奠定了材料基础。

1.2.2 自修复性能

生物传感设备在使用过程中不可避免地会承受各种机械力的作用,如刮擦、磨损、撕裂和穿刺等。水凝胶在长期机械应力作用下,易出现机械迟滞与性能衰减的趋势现象,因此近期研究致力于赋予水凝胶自修复特性,以提升其耐久性、可靠性与使用寿命。同时,自修复特性还提升了设计的容错度,并促进与其他智能材料的集成,从而增强器件的适应性与可靠性。

研究者们发现可以利用离子相互作用,通过动态可逆的方式连接聚合物网络,实现水凝胶的自修复功能。Liao等^[39]将导电的MXene纳米片嵌入聚丙烯酰胺(PAM)和聚乙烯醇(PVA)组成的水凝胶聚合物网络中,并通过溶剂置换法开发出一种抗冻且导电的MXene复合有机水凝胶(MNOH)。由于聚乙烯醇羟基与四羟基硼酸根离子间的动态交联作用,以及乙二醇、PVA与MXene之间的超分子相互作用,MNOH展现出优异的自修复能力。Wang等^[40]提出一种由聚丙烯酰胺、二醛功能化聚乙二醇及导电炭黑组成的,兼具自修复与导电特性的新型互穿网络水凝胶。在优化组分配比后,所得水凝胶在切断并自修复后展现出力学与电学性能的可逆恢复能力。通过¹H NMR与FTIR光谱表征发现,动态共价键(席夫碱反应)与非共价相互作用(氢键)的协同效应,共同赋予凝胶自修复能力,为应用于柔性电子器件提供了可能。

1.2.3 其他性能调控

导电水凝胶具有优异的导电性能,并且可以通过结构设计、工艺优化等方法对水凝胶的机械性能、自愈性能等实现调控。然而,在实际应用中,通常要求水凝胶具备黏附性、透气性、生物相容性等多样化性质,以拓展材料的适用范围和应用场景。稳定的界面对水凝胶柔性电子器件来说至关重要,这就需要水凝胶与基底建立坚固的界面黏结,Yuk等^[41]受肌腱和软骨与骨骼的结合的启发,采用(3-三甲氧基硅基)丙基甲基丙烯酸酯(TMSPMA)作为硅烷偶联剂,通过共聚反应将其修饰到聚合物链上,随后水解得到硅醇

基团彼此缩合并与基底羟基缩合,从而将聚合物网络化学交联到目标基底上,大幅提高了材料与基底的黏附性。为使导电水凝胶在柔性可穿戴设备中具有更广泛的应用,Li等^[42]制备了由明胶(Gel)、羧化碳纳米管(C-MWCNT)、聚吡咯(PPy)和金纳米粒子(AuNP)组成的新型复合柔性导电有机水凝胶GCPP-Au。该水凝胶呈现出均匀的孔隙分布和高渗透性。平均孔径为103.8 μm ,水蒸汽透过率(WVT)和水蒸汽渗透率(WVP)分别为126.21 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $244.44\times10^{-7}\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,显著其提高了佩戴舒适度。在生物医药等领域,改善材料与组织的生物相容性是至关重要的,Lin等^[43]采用天然生物聚合物木质素磺酸盐(Lgs)作为聚吡咯(PPy)的分散剂和掺杂剂,制备了一种结合电刺激(ES)的导电水凝胶,在慢性伤口修复领域具有光明前景。体外测试表明,水凝胶表现出良好的生物相容性、黏附能力(7.97 ± 0.56 kPa)和止血能力,可以作为ES辅助慢性伤口修复的有效平台。

导电水凝胶的多功能化调控是面向生物电子学应用的关键,系统性地解决了柔性生物传感器在实际应用中面临的界面适配、长期稳定性、舒适性及生物安全性等关键问题,为其在健康监测、人机交互及医疗诊断等领域的实用化奠定了材料基础。

1.3 导电水凝胶在生物传感中的应用

导电水凝胶是一种具有柔韧性、延伸性、黏附性和生物相容性的多功能材料,因其能灵敏且迅速地捕捉到外部刺激或生物信号,并通过电阻或电容变化转化为可量化的电学响应,故在运动检测、医疗诊断、电子皮肤等领域得到广泛的应用^[44]。

1.3.1 运动检测传感器

在运动健康监测领域,水凝胶生物传感器展现出独特的应用优势。得益于其优异的柔韧性、拉伸性及与生物相容性,该类传感器可稳定附着于人体关节、肌肉等运动部位,实时捕捉肢体运动幅度、肌肉收缩力度、运动频率等关键运动参数,同时精准区分运动状态下的生理信号与干扰信号。Peng等^[45]通过在聚乙烯醇(PVA)水溶液中原位聚合,并在聚丙烯酸(PAA)溶液和甘油中分两段聚合,得到了具有良好的导电性($\sim 0.95\text{ S/m}$)和高机械强度($\sim 3.6\text{ MPa}$)的水凝胶,并且表现出

极佳的柔韧性,能很好地应对多重应变和低温($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)或长时间空气中(168 h)的细微人体运动。Zhao等^[46]开发了一种利用聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)包裹液态金属纳米颗粒(LMNPs)并嵌入聚乙烯醇(PVA)基体中得到的新型导电水凝胶 LMNP-PEDOT:PSS-PVA(LMPP),其制备过程如图4(a)所示,展现出增强的拉伸强度(0.08 MPa)、回弹性以及高导电性(4.85 S/m)。为验证这种水凝胶的检测与传感性

能,研究者们将LMPP水凝胶直接贴附于人体不同部位,通过相对电阻变化监测人体运动。当手指从 0° 逐步弯曲至 90° 并复原时,对应的相对电阻信号呈现阶梯式上升与下降,如图4(b)和4(c),类似地,在肘部、颈部、腕部及膝关节运动中也观察到LMPP水凝胶稳定且可重复的电学响应(图4f~4i),证明其在大幅运动监测中具有良好的传感性能。不仅如此,这种水凝胶也能精确记录由面部微小肌肉运动引发的振动响应,如图4(d)

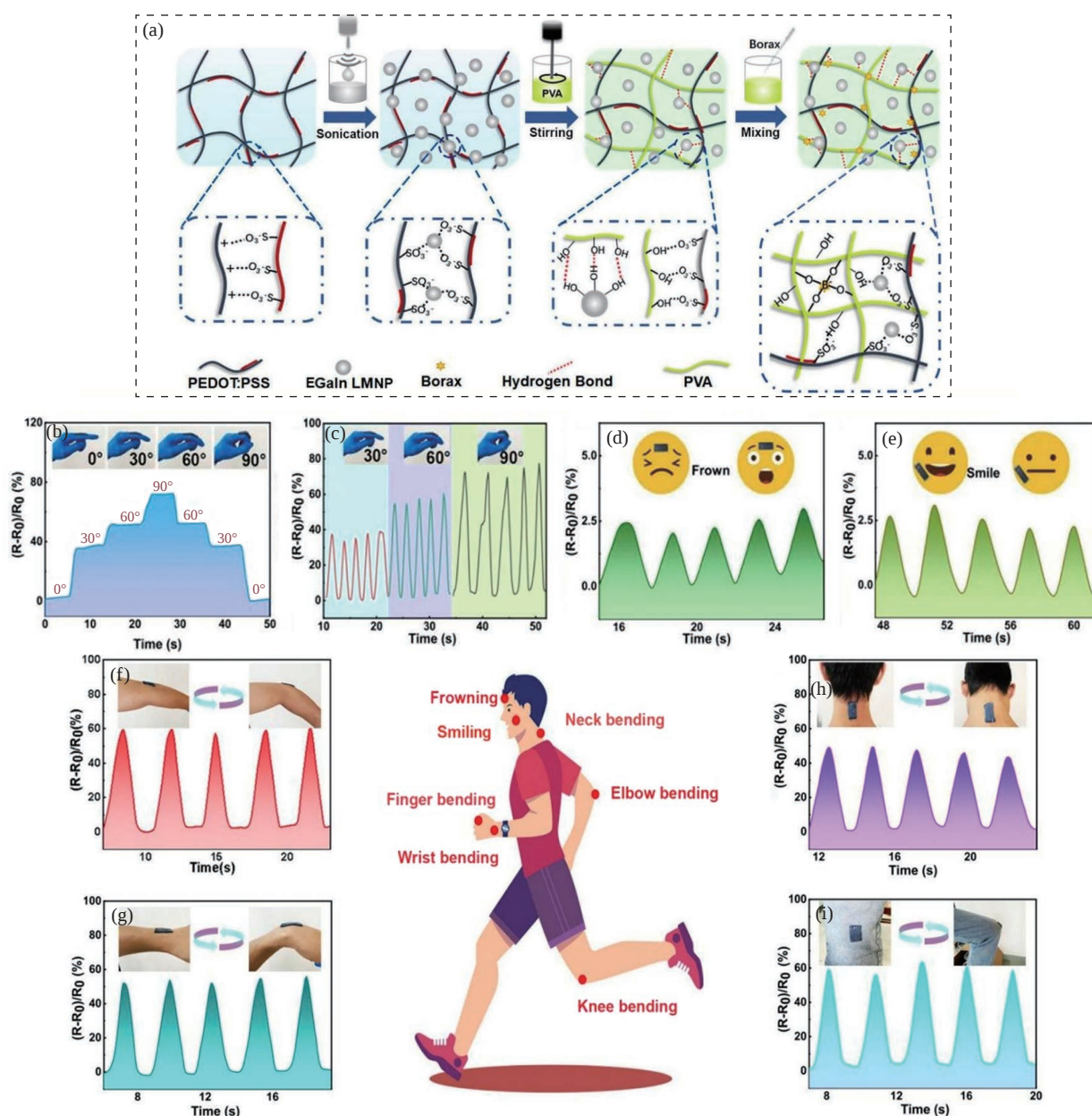


图4 (a) LMPP水凝胶网络制备过程; LMPP水凝胶在监测以下动作时的相对电阻变化: (b、c)手指弯曲; (d)皱眉; (e)微笑; (f)肘部弯曲; (g)手腕弯曲; (h)颈部弯曲; (i)膝盖弯曲^[46] (2024 Elsevier 版权许可)

Figure 4 (a) Synthesis procedure for constructing the LMPP hydrogel network; Monitoring of human motions via relative resistance changes of the LMPP hydrogel: (b, c) finger bending; (d) frowning; (e) smiling; (f) elbow bending; (g) wrist bending; (h) neck bending; (i) knee bending. (Reprinted with permission from Ref. [46]; Copyright (2024) Elsevier)

和4(e)所示,这表明LMPP水凝胶在大幅运动与小幅动作监测方面均具备可靠的传感能力。

1.3.2 医疗诊断传感器

近年来,公众健康管理意识持续提升,对精准、实时的健康监测技术需求日益迫切,这也推动了生物传感器领域的快速发展。其中,水凝胶生物传感器凭借其良好的生物相容性、柔韧性及传感灵敏度,在生理信号实时监测领域展现出独特优势,可有效捕获脉搏、呼吸、心率等关键生理指标。通过对这类生理数据的精准采集、分析与解读,为疾病的早期筛查、预警及诊断提供可靠的量化依据,已成为医疗诊断领域的研究热点。

在电生理信号监测方面,Zheng等^[47]通过简易的一锅法合成了一种以明胶为基体的温敏性水凝胶(GGW-NH₄Cl)。研究者们利用眼动电图(EOG)、肌电图(EMG)、心电图(ECG)及脑电图(EEG)等对GGW-NH₄Cl水凝胶制备的生物电极进行监测可以发现,在EOG监测、EMG监测方面,使用水凝胶获得的电生理信号幅度、信号质量均优于商用导电膏。在EEG方面,该水凝胶能够穿透浓密头发并与头皮形成紧密贴合的接触,同时成功采集到了 α 节律,为应对多毛发头皮区域神经信号检测的固有复杂性提供了极具前景的解决方案。此外,通过对受试者在不同生活情景下进行ECG监测,可以发现,骑行期间平均心率升至135次/min,神经网络间隔标准差(SDNN)增加至38 ms;办公室工作时心率降低至82次/min,SDNN降至31 ms;适度行走使心率提升至103次/min,SDNN降低至55 ms。这些充分证实了该水凝胶可以准确、快速捕捉人体各种电生理信号,在运动医学与智能穿戴装备领域具有广阔的产业化应用潜力。

在伤口愈合监测方面,研究者们发现伤口愈合过程中会产生温度的变化,通过监测这种极具临床意义的生理信号,医生可以对伤口的愈合情况作出判断,便于下一步治疗方案的确定。Wei等^[48]通过一锅法共聚[2-(甲基丙烯酰氧基)乙基]二甲基-(3-磺酸丙基)氢氧化铵(SBMA)、N-[三(羟甲基)甲基]丙烯酰胺(THMA)与丙烯酰胺(AM),成功制备了一种可监测伤口愈合情况的复合水凝胶,为验证其监测功能,研究者们构建了基于该水凝胶的生物传感器,监测大鼠在肝脏受伤后的恢复情况。实验表明,这种传感器可以在(34.00±4.36) s

内实现大鼠肝脏止血,并且在伤口愈合过程的第3和第7天监测了伤口附近因出现炎症带来的温度变化,这证实了该水凝胶能促进并监测伤口愈合,为临床治疗与健康监测相结合提出新的解决方案。

1.3.3 电子皮肤

电子皮肤(e-skin)作为一类可柔性贴合于各类载体表面的电子器件,核心功能在于模拟人体皮肤的触觉感知特性,实现对多维度信号的捕获与转换^[49]。Chen等^[50]首次将甘油引入双网络结构,制备出富含氢键的水凝胶,并设计了一种整合了不同性质夹层结构的电子皮肤。其中,含有质量分数为50%甘油的PVA/PAMAA/甘油(PPG)水凝胶(PPG-A)作为黏附层,具有极高的黏附性(对猪皮的黏附强度可达56.9 N/m);氧化石墨烯/碳纳米管(GO/CNT)混合墨水,作为导电层,具有独特的裂纹传导机制;不含甘油的PVA/PAMAA/甘油(PPG)水凝胶(PPG-E)作为弹性层,具有良好的韧性、高回弹性及适中的弹性模量。通过FTIR光谱、剪切测试、恒应力循环测试等表征方法发现,这种夹层结构的电子皮肤,可以随皮肤形变而不脱落,具备高灵敏度(应变因子GF=20)、宽应变范围(0%~300%)及良好的耐久性与稳定性,为改进生物传感设备用于医疗监测提供了可行方案。Liu等^[51]开发了一种基于PAA-(Ade/Thy)/MXene的、具有光学与电学双重响应模式的可拉伸、强黏附且生物相容的结构色水凝胶皮肤。为研究PAA-(Ade/Thy)/MXene结构色水凝胶作为表皮传感器的应用潜力,研究者们将其集成至电容器装置中作为表皮传感器,并将其贴附于喉部以监测皮肤微小运动。实验证明,集成的电容传感器能准确记录参与者发生连续吞咽动作时产生的信号。表明其不仅能监测皮肤微小运动外,还能处理复杂的动态监测任务。

1.4 导电水凝胶的性能与应用对比

在导电水凝胶研究领域,目前已形成电子导电水凝胶(ECHs)与离子导电水凝胶(ICHs)两大主流分支,二者在导电机理上存在本质区别,为直观展示二者在不同应用场景下的性能差异,表1从导电机理、应变传感、电生理监测及电子皮肤等维度对2类材料进行了横向对比。由表可知,ECHs凭借电子传输机制,在高灵敏度、快速响应方面具有优势,更适用于高精度运动监测、机器人触觉系统等对响应速度要求较高的场景;而ICHs

表1 电子导电水凝胶与离子导电水凝胶在不同场景下的性能对比

Table 1 Performance comparison of electronically conductive hydrogels and ionically conductive hydrogels in different scenarios

对比维度	电子导电水凝胶	离子导电水凝胶
导电机理	电子作为主要载流子,通过连续电子传输通路导电;电导率通常为 $10^0\sim 10^3\text{ S/m}$ ^[13]	自由移动的离子作为载流子,通过离子在电场作用下的定向迁移实现导电;电导率通常为 $10^{-2}\sim 10^0\text{ S/m}$ ^[24]
应变传感	GF值高(通常>10,部分可达 10^2 以上),响应时间快(ms级),应变范围宽;但线性度较差、透明度低	GF值较低(通常1~5),线性响应好,透明、柔软、适合穿戴;但易脱水导致信号漂移 ^[44]
电生理监测	监测信号强、抗干扰能力强、适合高频信号,但界面阻抗高、需黏附层,不适用于长发区域 ^[20]	皮肤匹配阻抗低、信号保真度高、可喷涂于头皮,但长期使用易脱水、信号易衰减 ^[47]
电子皮肤	可多功能集成(传感、储能、驱动),响应快;但生物相容性、透气性和透湿性差 ^[49]	高透明(>90%)、良好生物相容性、柔软贴合、透气性好;但导电率低、信号响应慢、易受湿度影响 ^[25]

以离子迁移为导电基础,具备优异的透明性、低界面阻抗及良好的生物相容性,在生理信号检测、触摸面板、可喷涂电极等不同实际应用场景中展现出独特优势。并且2类材料并非相互替代,而是并行发展,在不同应用需求下发挥各自的互补性优势。

2 结论与展望

本综述系统总结了基于水凝胶的柔性电子器件在生物传感领域的最新研究进展,重点围绕导电水凝胶这一核心材料体系,全面梳理了其在结构设计、功能优化及实际应用中的关键突破,明确了其在生物传感设备中不可替代的核心价值。

此外,通过结构优化与功能设计,集成并提升材料的导电性能、机械性能、自修复性能等多重性能,突破了传统导电水凝胶材料仅能实现电荷传输的单一功能局限,大幅提高材料与生物组织的适配度,为高性能生物传感体系的构建提供了全新材料支撑与设计思路。

尽管上述研究已取得了显著进展,但水凝胶基柔性电子器件在走向实际应用的过程中仍面临若干挑战。首先,水凝胶材料在长期使用中容易出现脱水干燥、溶胀变形等问题,导致其电学性能与机械性能随时间下降。未来的研究应聚焦于如何提升水凝胶的环境稳定性。目前已有研究者在这一方向上进行了有益探索,例如,采用有机溶剂/水二元溶剂体系制备有机水凝胶,可有效抑制水分蒸发与低温冻结;此外,通过在水凝胶表面构建疏水涂层或引入保湿组分(如甘油、氯化锂等),也已被证明能够显著延长器件的使用寿命。未来可进一步发展自适应保水机制,使水凝胶能够根据环境湿度动态调节自身含水量。其次,现

有水凝胶传感器在复杂生物环境(如体液、组织界面)中的信号传输可靠性和抗干扰能力仍然不足,需要发展更加有效的界面工程和封装技术。比如,可通过设计仿生黏附结构,或开发兼具高透湿性、低模量与生物相容性的封装层材料,使传感器在多源干扰环境下仍能保持信号的保真度与长期稳定性。此外,大多数高性能导电水凝胶的制备工艺较为复杂,批量化制造与标准化加工的技术瓶颈尚未突破,距离产业化应用仍有较大距离。未来研究应向可规模化、工艺稳健的方向发展。一方面,可优先发展简便、快速、可重复的制备技术,简化合成流程,降低批次间差异。另一方面,推动水凝胶材料的模块化设计与标准化制备,为实现从实验室“试错”向工业化“精准制造”的转变奠定基础。

综合来看,水凝胶基柔性电子器件已成为生物传感领域的研究热点,其核心优势在于能够实现电学性能、机械性能与生物相容性的协同优化,有效破解传统刚性电子器件与生物组织界面不兼容的关键难题,推动生物传感设备向柔性化、可穿戴化、智能化、多功能化方向发展。未来,随着材料科学、微纳加工技术与生物医学工程的交叉融合不断深入,水凝胶基柔性生物传感器有望在临床医学、运动健康管理等领域实现更加广泛的应用。

参考文献

1 Economou, A.; Kokkinos, C.; Prodromidis, M. Flexible plastic, paper and textile lab-on-a chip platforms for electrochemical biosensing. *Lab Chip*, **2018**, 18(13), 1812–1830.

2 Yang, R. X.; Chen, X. Y.; Zheng, Y.; Chen, K. Q.; Zeng,

- W. S.; Wu, X. Recent advances in the 3D printing of electrically conductive hydrogels for flexible electronics. *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10(14), 5380–5399.
- 3 陈蕤, 常晓华, 韩媛媛, 赵桂艳, 朱雨田. 水凝胶基柔性应变传感材料设计及研究进展. *高分子通报*, **2025**, 38(8), 1193–1208.
- 4 Lou, Z.; Chen, S.; Wang, L. L.; Jiang, K.; Shen, G. Z. An ultra-sensitive and rapid response speed graphene pressure sensors for electronic skin and health monitoring. *Nano Energy*, **2016**, 23, 7–14.
- 5 Li, X. Y.; Liang, R. R.; Tao, J.; Peng, Z. C.; Xu, Q. M.; Han, X.; Wang, X. D.; Wang, C. F.; Zhu, J.; Pan, C. F.; Wang, Z. L. Flexible light emission diode arrays made of transferred Si microwires-ZnO nanofilm with piezophototronic effect enhanced lighting. *ACS Nano*, **2017**, 11(4), 3883–3889.
- 6 Oh, J. Y.; Kim, S.; Baik, H. K.; Jeong, U. Conducting polymer dough for deformable electronics. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(22), 4455–4461.
- 7 马冀, 李维政, 严锋. 高强韧水凝胶纤维研究进展. *高分子通报*, **2026**, 39(1), 153–177.
- 8 田增辉. 聚乙烯醇基导电水凝胶的制备及其在柔性传感器中的应用研究. 太原理工大学硕士学位论文, **2025**.
- 9 Yuk, H.; Lu, B. Y.; Zhao, X. H. Hydrogel bioelectronics. *Chem. Soc. Rev.*, **2019**, 48(6), 1642–1667.
- 10 Zhao, F.; Shi, Y.; Pan, L. J.; Yu, G. H. Multifunctional nanostructured conductive polymer gels: Synthesis, properties, and applications. *Acc. Chem. Res.*, **2017**, 50(7), 1734–1743.
- 11 Ji, C. X.; Wang, Y. T.; Qi, Q. R.; Li, Y. J.; Cao, L. Z. Electrically conductive hydrogels for flexible wearable devices: materials, design, and applications. *Adv. Mater. Technol.*, **2025**, 10(21), e01044.
- 12 Wang, Z. W.; Cong, Y.; Fu, J. Stretchable and tough conductive hydrogels for flexible pressure and strain sensors. *J. Mater. Chem. B*, **2020**, 8(16), 3437–3459.
- 13 Zhang, X. Y.; Chen, X.; Ye, Z. H.; Liu, W. T.; Liu, X. Y.; Wang, X. H. Conductive hydrogels for bioelectronics: molecular structures, design principles, and operation mechanisms. *J. Mater. Chem. C*, **2023**, 11(32), 10785–10808.
- 14 章炜, 夏欢, 陈鹏宇, 曹昕, 张涵凝, 谢谦, 易承杰, 徐刚. 电子导电水凝胶电极在柔性储能系统中的应用研究进展. *高分子学报*, **2024**, 55(3), 255–274.
- 15 Wu, M.; Chen, J. S.; Ma, Y. H.; Yan, B.; Pan, M. F.; Peng, Q. Y.; Wang, W. D.; Han, L. B.; Liu, J. F.; Zeng, H. B. Ultra elastic, stretchable, self-healing conductive hydrogels with tunable optical properties for highly sensitive soft electronic sensors. *J. Mater. Chem. A*, **2020**, 8(46), 24718–24733.
- 16 Chen, S. S.; Qiu, W. C.; Li, G. L.; Yang, W. J.; Chen, M.; Sun, G. X.; He, X.; Fu, J.; Xin, Y. Robust, durable and anti-swelling silver-nanoparticles-integrated hydrogel achieved by one-pot reduction and polymerization strategy for underwater sensing. *Eur. Polym. J.*, **2025**, 223, 113640.
- 17 Chen, Y. L.; Estevez, D.; Zhu, Z. H.; Wang, Y. F.; Mai, Y. W.; Qin, F. X. Multifunctional conductive hydrogel composites with nickel nanowires and liquid metal conductive highways. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(22), 29267–29281.
- 18 Ren, J.; Zhang, A. X.; Zhang, L.; Li, Y.; Yang, W. Electrically conductive and mechanically tough graphene nanocomposite hydrogels with self-oscillating performance. *Polym. Int.*, **2019**, 68(6), 1146–1154.
- 19 Xia, Q. S.; Zhang, Z. C.; Liu, Y. J.; Leng, J. S. Self-assembly of cross-linked carbon nanotube films for improvement on mechanical properties and conductivity. *Mater. Lett.*, **2018**, 231, 190–193.
- 20 Ren, J.; Wang, Y. B.; Liu, Z. H.; Liu, K.; Xiang, X. Balancing stretchability and conductivity: carbon nanotube layer-enhanced non-ionic conductive hydrogels with a sandwich structure. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 500, 156641.
- 21 Shu, L.; Zhang, X. F.; Liu, H.; Li, M. J.; Ma, J. L.; Yao, J. F. Dual-conductive hydrogels via graphene oxide-cellulose molecular engineering for high-performance bioelectronics. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(17), 11373–11384.
- 22 Han, L.; Yan, L. W.; Wang, M. H.; Wang, K. F.; Fang, L. M.; Zhou, J.; Fang, J.; Ren, F. Z.; Lu, X. Transparent, adhesive, and conductive hydrogel for soft bioelectronics based on light-transmitting polydopamine-doped polypyrrole nanofibrils. *Chem. Mater.*, **2018**, 30(16), 5561–5572.
- 23 Zhao, J.; Zhu, H. Y.; Bai, H. Y.; Dong, W. F. Tough ion-electron conductive hydrogels with multi-crosslinked network for strain sensors. *Polymer*, **2025**, 319, 128060.
- 24 王世运, 宋信莉, 蔡艳丽, 王群, 吴静澜, 高远. 离子导电水凝胶的制备及在生物医疗中的研究. *现代化工*, **2025**, 45(S2), 34–38.
- 25 Wen, J.; Tang, J.; Ning, H. M.; Hu, N.; Zhu, Y. Y.; Gong, Y. K.; Xu, C. H.; Zhao, Q. N.; Jiang, X. P.; Hu, X. L.; Lei, L.; Wu, D.; Huang, T. Multifunctional ionic skin with sensing, UV-filtering, water-retaining, and anti-freezing capabilities. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(21), 2011176.
- 26 Pan, X. Y.; Zhu, H. Y.; Qin, F. F.; Jing, M. X.; Wu, H.; Sun, Z. Z. Flexible strain sensor based on PVA/tannic acid/lithium chloride ionically conductive hydrogel with

- excellent sensing and good adhesive properties. *Sensors*, **2025**, 25(15), 4765.
- 27 Miao, H. Y.; Liu, Y. Y.; Zheng, C. Y.; Huang, X. J.; Song, Y. D.; Tong, L. L.; Dong, C. W.; Fu, X. B.; Huang, H. L.; Ge, M.; Liu, H. T.; Qian, Y. A flexible, antifreezing, and long-term stable cellulose ionic conductive hydrogel via one-step preparation for flexible electronic sensors. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 351, 122936.
 - 28 Lei, Z. Y.; Wu, P. Y. Zwitterionic skins with a wide scope of customizable functionalities. *ACS Nano*, **2018**, 12(12), 12860–12868.
 - 29 Li, X. T.; Zhang, S. Q.; Li, X. N.; Lu, L.; Cui, B.; Yuan, C.; Guo, L.; Yu, B.; Chai, Q. Q. Starch/polyvinyl alcohol with ionic liquid/graphene oxide enabled highly tough, conductive and freezing-resistance hydrogels for multimodal wearable sensors. *Carbohydr. Polym.*, **2023**, 320, 121262.
 - 30 Gong, Y.; Cheng, Y. Z.; Hu, Y. C. Preparation of polymer conductive hydrogel and its application in flexible wearable electronic devices. *Prog. Chem.*, **2022**, 34(3), 616–629.
 - 31 Liu, C. L.; Xu, Z. Y.; Chandrasekaran, S.; Liu, Y. P.; Wu, M. Y. Self-healing, antibacterial, and conductive double network hydrogel for strain sensors. *Carbohydr. Polym.*, **2023**, 303, 120468.
 - 32 Li, G.; Huang, K. X.; Deng, J.; Guo, M. X.; Cai, M. K.; Zhang, Y.; Guo, C. F. Highly conducting and stretchable double-network hydrogel for soft bioelectronics. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(15), 2200261.
 - 33 Shao, Z. A.; Hu, X. M.; Cheng, W. M.; Zhao, Y. Y.; Hou, J. Y.; Wu, M. Y.; Xue, D.; Wang, Y. H. Degradable self-adhesive epidermal sensors prepared from conductive nanocomposite hydrogel. *Nanoscale*, **2020**, 12(36), 18771–18781.
 - 34 Wang, Y. Q.; Chen, P. C.; Ding, Y.; Zhu, P. H.; Liu, Y. T.; Wang, C. X.; Gao, C. H. Multifunctional nano-conductive hydrogels with high mechanical strength, toughness and fatigue resistance as self-powered wearable sensors and deep learning-assisted recognition system. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(49), 2409081.
 - 35 Zhang, X. H.; Wang, Y. Q.; Wu, X. G.; Zhu, F. B.; Qin, Y. X.; Chen, W. Y.; Zheng, Q. A universal post-treatment strategy for biomimetic composite hydrogel with anisotropic topological structure and wide range of adjustable mechanical properties. *Biomater. Adv.*, **2022**, 133, 112654.
 - 36 Jiang, Y.; Zhan, D. Z.; Zhang, M.; Zhu, Y.; Zhong, H. Q.; Wu, Y. F.; Tan, Q. W.; Dong, X. H.; Zhang, D. H.; Hadjichristidis, N. Strong and ultra-tough ionic hydrogel based on hyperbranched macro-cross-linker: influence of topological structure on properties. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2023**, 62(42), e202310832.
 - 37 Chen, H. M.; Chen, X. Y.; Rong, C.; Ma, X. N.; Zhang, B. W.; Xuan, F. Z. Layered structured MXene/PVA conductive hydrogels with excellent mechanical properties for flexible strain and temperature sensing. *Small*, **2025**, 21(39), e06824.
 - 38 Zhang, Y.; Liu, L. X.; Yin, S. X.; Zhou, C.; Ding, Y.; Che, G. J.; Zhao, C. Q. Underwater high strength and tough polyvinyl alcohol-polyacrylic acid hydrogel. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(39), 2503023.
 - 39 Liao, H.; Guo, X. L.; Wan, P. B.; Yu, G. H. Conductive MXene nanocomposite organohydrogel for flexible, healable, low-temperature tolerant strain sensors. *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29(39), 1904507.
 - 40 Wang, H. J.; Chu, Y. Z.; Chen, C. K.; Liao, Y. S.; Yeh, M. Y. Preparation of conductive self-healing hydrogels via an interpenetrating polymer network method. *RSC Adv.*, **2021**, 11(12), 6620–6627.
 - 41 Yuk, H.; Zhang, T.; Lin, S. T.; Parada, G. A.; Zhao, X. H. Tough bonding of hydrogels to diverse non-porous surfaces. *Nat. Mater.*, **2016**, 15(2), 190–196.
 - 42 Li, M. X.; Cheng, J.; Hu, Y. Y.; You, L. J.; Xiong, C. H.; Wang, S. Y. Gelatin-based conductive hydrogel wearable sensor with breathability and adhesion. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(22), 15493–15506.
 - 43 Lin, J. H.; Chen, M. Y.; Zhao, W.; Zhang, S. Y.; Liu, J. L.; Zhou, Y.; Jiang, L.; Zhang, J. T. Lignin-mediated dual conductive hydrogels with high conductivity, antibacterial activity and biocompatibility for chronic wound repair. *Gels*, **2025**, 11(4), 283.
 - 44 刘海燕, 张雨萱, 陈钰倩, 曹峥, 王东, 吴盾, 成骏峰, 陶国良, 刘春林. 聚丙烯酰胺/聚乙烯醇基导电水凝胶的制备及传感应用. 功能高分子学报, **2026**, 39(2), 177–186.
 - 45 Peng, Y. J.; Pi, M. H.; Zhang, X. L.; Yan, B.; Li, Y. S.; Shi, L. Y.; Ran, R. High strength, antifreeze, and moisturizing conductive hydrogel for human-motion detection. *Polymer*, **2020**, 196, 122469.
 - 46 Zhao, K.; Zhao, Y. B.; Xu, J.; Qian, R.; Yu, Z. M.; Ye, C. Q. Stretchable, adhesive and self-healing conductive hydrogels based on PEDOT: PSS-stabilized liquid metals for human motion detection. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 494, 152971.
 - 47 Zheng, M. Q.; Li, L. Q.; Ye, X. Y.; Ji, Z. C.; Wang, Y. L.; Wang, Z. L.; Lin, S. H.; Wang, M. Z.; Yan, W. Q.; Yang, J. W.; Zhou, P. C.; Zhang, Y. J.; Niu, R. Z.; Haick, H.; Wang, Y. Skin-printable, anti-freezing, and recyclable ionic hydrogel bioelectrode for continuous electrophysiological monitoring. *Chem. Eng. J.*, **2025**,

- 512, 162451.
- 48 Wei, M.; Wang, H. H.; Chen, C. X.; Fei, G. Q.; Yang, D.; Li, K.; Wang, M. X.; Yang, X.; Li, N.; Song, L.; Yang, M. F.; Wang, Z. G. Conductive, adhesive, and biocompatible hydrogel sensor based on zwitterionic for effective wound healing and monitoring. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 506, 160235.
- 49 Yuan, Y. Q.; Zhang, Y. L.; Duan, H. Y.; Zhang, Y. T.; Lu, L. J.; Emel'yanov, A.; Pozdnyakov, A. S.; Zhu, P. C.; Mao, Y. C. Recent advances in conductive composite hydrogels for electronic skin applications. *Gels*, **2025**, 11(10), 822.
- 50 Chen, A. B.; Zhang, J. Y.; Zhu, J. D.; Yan, Z.; Wu, Q. R.; Han, S. J.; Huang, J. R.; Guan, L. H. Self-adhesive electronic skin for ultra-sensitive healthcare monitoring. *J. Mater. Chem. A*, **2023**, 11(10), 4977–4986.
- 51 Liu, C. Y.; Zhao, Q. Y.; Cao, Y. C.; Li, X. H.; Peng, K. X.; Fu, F. F. Bioinspired structural color hydrogel skin from nonclose-packed colloidal crystal arrays for epidermal sensing. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(11), 16658–16667.