

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.024

# 可穿戴柔性水凝胶传感器的研究进展

周金利, 王晨晓, 郑俊杰, 王赛娅, 樊蒙召, 李云飞, 杨朝然, 邢瀚元, 曹骏晨

(中原工学院智能纺织与织物电子学院, 郑州 450007)

**摘要:** 穿戴柔性水凝胶传感器作为新型智能传感器, 因在健康监测、环境感知和运动跟踪等领域的广泛应用潜力, 受到越来越多的关注。水凝胶材料因具有优异的生物相容性、柔韧性、透气性和高水合特性, 成为柔性电子设备的理想选择。首先介绍了水凝胶的交联机制和传感原理, 其次分析了天然水凝胶、合成水凝胶、杂化水凝胶在可穿戴柔性传感器中的应用特点并简述了水凝胶传感器的制备方法, 包括3D打印技术、自组装技术、微纳米加工技术、自由基聚合法、逐步聚合法、微波辅助法、溶剂蒸发法和气相沉积法, 这些方法进一步拓宽了柔性水凝胶传感器的应用范围。最后, 总结了可穿戴柔性水凝胶传感器在运动与健康、电子皮肤、人机交互领域的应用。

**关键词:** 可穿戴设备; 柔性水凝胶; 传感器; 传感机理; 应用拓展

**中图分类号:** TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0167-06

## Research progress of wearable flexible hydrogel sensors

ZHOU Jinli, WANG Chenxiao, ZHENG Junjie, WANG Saiya, FAN Mengzhao, LI Yunfei, YANG Chaoran,

XING Hanyuan, CAO Junchen

(College of Intelligent Textile and Fabric Electronics, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract :** Flexible wearable hydrogel sensors, as a new type of intelligent sensor, have gained increasing attention due to their broad potential applications in health monitoring, environmental sensing, and motion tracking. Hydrogel materials, characterized by excellent biocompatibility, flexibility, breathability, and high hydration properties, are considered an ideal choice for flexible electronics. The crosslinking mechanisms and sensing principles of hydrogels was first introduced, and then the application characteristics of bio-based natural hydrogels, synthetic conductive hydrogels, and hybrid hydrogels in wearable flexible sensors were analyzed. The preparation methods of hydrogel sensors were also briefly discussed, including 3D printing technology, self-assembly technology, micro-nano processing technology, radical polymerization, stepwise polymerization, microwave-assisted methods, solvent evaporation methods, and vapor deposition methods. These innovative techniques further expand the manufacturing processes and application scope of flexible hydrogel sensors. Finally, the applications of wearable flexible hydrogel sensors in fields such as motion and health, electronic skin, and human-machine interaction were summarized.

**Keywords :** wearable devices ; flexible hydrogel ; sensor ; sensing principle ; broadened application

随着智能可穿戴设备的发展, 柔性传感器在健康监测、运动追踪和环境感知等领域的应用前景日益广泛。传统刚性传感器难以适应人体复杂的形态和多样的运动形式, 导致舒适度差且传感性能受限<sup>[1-2]</sup>。因此, 开发具有柔性、可拉伸和高集成度的传感器成为研究热点。水凝胶因其优异的力学性能、生物相容性及可调节的电学性质, 成为可穿戴柔性传感器的重要材料之一<sup>[3]</sup>。水凝胶是具有三维交联网络结

构的聚合物, 能够吸水膨胀并保持良好力学性能, 其柔性和高水含量赋予其接近生物组织的特性, 使其在可穿戴设备中具有显著优势<sup>[4]</sup>。水凝胶能够在多种物理和化学刺激下发生可逆变化, 成为柔性传感器、皮肤监测和人机交互系统的重要材料<sup>[5]</sup>。随着材料科学、纳米技术和微电子技术的进步, 水凝胶传感器在性能和应用上得到了显著提升。推动了其在运动与健康、电子皮肤、人机交互等领域的应用。笔者

**基金项目:** 河南省科技攻关项目(252102230012, 252102211104), 中原工学院自然科学基金项目(K2025YB017), 河南省功能性纺织材料重点实验室开放课题基金项目(HNFZ2024014), 中原工学院研究生科研创新计划项目(YKY2024ZK02)

**通信作者:** 周金利, 副教授, 博士, 主要从事智能可穿戴方面的研究

**收稿日期:** 2025-02-17

**引用格式:** 周金利, 王晨晓, 郑俊杰, 等. 可穿戴柔性水凝胶传感器的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 167-172.

ZHOU Jinli, WANG Chenxiao, ZHENG Junjie, et al. Research progress of wearable flexible hydrogel sensors[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 167-172.

综述了近年来可穿戴柔性水凝胶传感器的研究进展,重点介绍了水凝胶传感器设计、材料选择与制备、实际应用及面临的挑战,最后展望了水凝胶传感器的未来发展趋势,旨在为相关领域的研究者提供有价值的参考和启示。

## 1 柔性水凝胶传感器的基本原理

### 1.1 水凝胶的形成机制

水凝胶是一种能在水中形成三维网状结构的材料,通常依靠高分子聚合物的交联或物理作用来吸水膨胀并保持水分。交联方式分为静态共价键和动态共价键两种。静态共价键稳定但自修复能力差;动态共价键通过可逆交联形成,在外界刺激下能断裂并重新连接,具有较好的自修复能力<sup>[6-7]</sup>。水凝胶性能还可通过非共价键(如静电作用、氢键、离子键)增强,金属离子和非金属离子之间的离子键能提高其韧性,氢键有助于形成三维网络,其他非共价键如疏水作用也能增强自修复性和韧性<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 水凝胶的传感原理

水凝胶传感器利用水凝胶对外界刺激的响应特性,在物理、化学和光学等方面实现感应<sup>[10]</sup>。水凝胶可以通过体积响应原理来感知环境变化,其核心在于水合作用,例如pH传感器中的电离性基团会随着周围环境pH值的波动,促使水凝胶发生膨胀或收缩,进而实现对酸碱度的监测<sup>[11]</sup>。温度响应原理基于水凝胶在特定温度下的相变,导致膨胀或收缩<sup>[12]</sup>。光响应原理通过光能变化改变水凝胶的结构或颜色来实现光响应,广泛应用于光传感<sup>[13-14]</sup>。电化学传感原理则通过水凝胶与电解质的相互作用,监测溶液中的离子浓度、pH值等变化<sup>[15]</sup>。机械响应原理则通过水凝胶的弹性或刚度变化响应外界机械刺激,应用于应变传感<sup>[16]</sup>。水凝胶作为传感器材料,具有高灵敏度、高稳定性、可重复性、体积小、重量轻等优点,易于实现智能监测与控制。

## 2 材料选择与制备技术

### 2.1 水凝胶材料分类

近年来,随着科学技术的不断发展,水凝胶传感器的设计与应用变得越来越多样化。水凝胶材料可以根据其聚合物来源分为天然水凝胶、合成水凝胶和杂化水凝胶。

#### 2.1.1 天然水凝胶

天然水凝胶是由天然或可再生资源提取的材料制成的水凝胶,具有良好的生物相容性、生物可降解性和环保特性<sup>[17]</sup>。其常见原材料包括天然高分子,如明胶、海藻酸盐、壳聚糖和胶原蛋白等<sup>[18]</sup>,这些材料能够通过水合作用形成凝胶状结构,展现出较高的生物相容性和良好的生物降解性。此外,植物来源的水凝胶,如木质纤维素和天然多糖,也具备较好的力学强度和可调节的生物可降解性<sup>[19]</sup>。如Bas等<sup>[20]</sup>通过氧化纳米纤维素氧化工艺,从两种市售木材(软木和硬木)中成功制备了纤维素纳米原纤维水凝胶。其中,软木纳米原纤维水凝胶网络展现出最佳的力学性能,且体外毒理学评估显示其对细胞无害,为伤口敷料的制备提供了一种简单而有效的加工路线。除此之外,Yang等<sup>[21]</sup>开发的天然多酚/Fe<sup>3+</sup>纳米

点可高效催化乙烯基单体自凝胶化,Fe含量仅为0.13 μg/mL时即可形成水凝胶。该水凝胶具备优异的力学性能、黏合性、紫外线屏蔽性和导电性,适用于可穿戴传感器监测人体运动。天然水凝胶通常缺乏传感性,因为其主要由非导电有机大分子构成。然而,通过特定的化学修饰或复合材料的设计,天然水凝胶可以被赋予导电性。

#### 2.1.2 合成水凝胶

合成水凝胶通过化学合成方法制备,常见材料包括聚丙烯酰胺(PAM)、聚乙烯醇(PVA)和聚乙二醇(PEG)。与天然水凝胶相比,合成水凝胶的高度可调性使其能够针对不同需求进行个性化设计<sup>[22]</sup>。例如,Zhao等<sup>[23]</sup>开发的丝素蛋白修饰水凝胶在力学性能、附着力和自修复性能上显著提升,能够适应更广泛的应力和温度范围的响应。Alipour等<sup>[24]</sup>开发的pH敏感壳聚糖接枝水凝胶可高效递送亲水性药物并具有电化学响应。合成水凝胶在柔性电子、传感器、人工器官和智能药物释放系统中展现出巨大应用潜力。

#### 2.1.3 杂化水凝胶

杂化水凝胶将纳米颗粒、聚合物和生物分子等与传统水凝胶结合,提升了其力学性能、响应性、药物释放能力和生物功能性<sup>[25-26]</sup>。它保留了传统水凝胶的高吸水性、生物相容性和可降解性,并在智能材料领域展现出巨大潜力。例如,Han等<sup>[27]</sup>开发的木质素-银杂化水凝胶具有出色的可压缩性和信号响应稳定性,Lin等<sup>[28]</sup>设计的杂化水凝胶提升了蛋白质检测灵敏度。尽管其优势显著,但仍面临生物安全性评估、规模化生产和成本控制等挑战。

### 2.2 制备技术

水凝胶的制备方法主要有3D打印技术、自组装技术、微纳米加工技术、自由基聚合法、逐步聚合法、微波辅助法、溶剂蒸发法、气相沉积法等,这些方法各有优缺点,不同的应用场景可能需要选择不同的制备技术。

#### 2.2.1 3D打印技术

3D打印技术,尤其是立体光固化、熔融沉积建模和喷墨3D打印,在水凝胶制备中的应用日益受到关注<sup>[29]</sup>。通过逐层沉积或光固化水凝胶材料,这些技术能够精确控制水凝胶的形态、尺寸及空间结构,尤其在个性化医学应用中,如药物输送系统和人工组织等,具有显著优势<sup>[30]</sup>,Zhou等<sup>[31]</sup>使用3D打印制备三响应纳米复合水凝胶微针,对pH、温度和葡萄糖水平表现出三重敏感性,可用于可控药物输送。需要注意的是,打印材料必须具有足够的流动性和可固化性,同时在打印过程中保持水凝胶的生物相容性和结构稳定性。

#### 2.2.2 自组装技术

自组装技术是指通过分子或纳米尺度的相互作用(如静电力、氢键、范德华力等),使得分子或纳米颗粒在特定条件下自发地排列成有序结构,形成水凝胶网络<sup>[32]</sup>。通过调整分子的设计,能够制备具有特定功能的水凝胶。如将微米级藻酸盐纤维封装在即时自组装肽水凝胶中,短肽可以在弱酸环境中于基于微流体的藻酸盐微纤维外部实现自组装,该材料

有良好的抗菌性可用于伤口愈合<sup>[33]</sup>。

### 2.2.3 微纳米加工技术

微纳米加工技术能够在微米或纳米尺度上修饰水凝胶的结构,从而改善其力学性能、表面性质或生物活性。常见技术包括微接触印刷、纳米压印和微注塑等<sup>[34]</sup>。这些技术能够在微观和纳米尺度上设计水凝胶的结构,提高其功能化特性。如利用藻酸盐凝胶抑制细胞黏附,通过光刻和湿蚀刻在玻璃板上形成藻酸盐薄膜微图案,然后沿着这些微图案产生细胞图案。此方法能够精确地图案化水凝胶材料,以促进或抑制细胞粘附,从而实现任意几何形状 of 细胞微图案<sup>[35]</sup>。

### 2.2.4 自由基聚合法

自由基聚合法是一种常用的水凝胶制备方法,通过引发剂生成自由基引发水溶性单体(如丙烯酸、PVA)的聚合,形成交联的聚合物网络。加入交联剂可增强水凝胶的结构稳定性和力学性能<sup>[36]</sup>。该方法操作简单、反应条件温和,适合常温下进行,且便于大规模生产,广泛应用于水凝胶药物载体、传感器和伤口敷料等领域。Zhu等<sup>[37]</sup>研究开发了一种新型催化表面聚合方法,通过催化触界面自由基聚合和氧化还原反应,制备了基于N-丙烯酰甘氨酸水凝胶的滑芯鞘光纤。

### 2.2.5 逐步聚合法

逐步聚合法是通过单体间的共价键逐步反应,逐渐形成聚合物网络的过程。该方法通常使用二官能团或多官能团单体,在适当条件下生成交联三维结构,适用于合成高分子水凝胶<sup>[38]</sup>。例如有研究团队通过逐步增强聚合物网络开发出坚固而坚韧的PVA水凝胶,实现了大分子链工程多尺度强化和增韧<sup>[39]</sup>。其优势在于能够调节交联密度,增加水凝胶的力学性能。

### 2.2.6 微波辅助法

微波辅助法利用微波加热促进水凝胶中单体的聚合反应,能够提高反应效率并缩短制备时间。通过微波辐射均匀加热反应体系,加速聚合过程,相比于传统热源具有更高的能量效率和更均匀的温度分布<sup>[40]</sup>。Zheng等<sup>[41]</sup>制备了一种基于铈的金属有机框架并用于微波治疗,通过将四(4-羧基苯基)卟啉掺入海藻酸盐基水凝胶中,利用其在脉冲微波照射下在盐水中产生活性实现抗菌效果,为抗菌复合水凝胶设计提供了新思路。

### 2.2.7 溶剂蒸发法

溶剂蒸发法通过将聚合物溶解于有机溶剂中,涂布于基底上,利用溶剂蒸发使聚合物形成水凝胶膜<sup>[42]</sup>。该方法简单、成本低且易于操作,广泛用于制备薄膜型水凝胶。

### 2.2.8 气相沉积法

气相沉积法通过将水凝胶前驱物蒸发成气相,并在基材表面通过化学反应形成交联结构,制备薄膜型水凝胶<sup>[43]</sup>。该方法适用于传感器、薄膜涂层等应用,能够生成具有均匀结构的水凝胶薄膜。

## 3 水凝胶柔性传感器的应用领域

### 3.1 运动与健康

水凝胶柔性传感器在健康监测和可穿戴设备中应用广泛,因其优异的水合性和柔性,能够舒适精准地监测生物信号、皮肤运动、脑电和心电,实时提供健康数据和预警,特别适合老年人和运动员。

对于生理信号监测方面,Li等<sup>[44]</sup>研究设计了一种基于PAM、明胶和海藻酸钠(SA)的温度触发黏附离子导电水凝胶,用于生物电信号监测。水凝胶表现出较低的电极-表皮阻抗,具有约25 dB的信噪比,能够高保真地记录生物电信号并准确识别运动。Zhao等<sup>[45]</sup>报道了一种基于聚2-丙烯酸-2-甲基丙磺酸-丙烯酸酯/细菌纤维素水凝胶的新型传感材料,具有优秀的力学性能,可以高效地监测人体运动,具备广泛的应变检测范围(0%~360%)和高灵敏度,除此之外,一种新型的基于MXene的导电水凝胶<sup>[46]</sup>,解决了MXene纳米片易氧化和与网络基质结合较弱的问题。通过将丝素蛋白改性后的MXene引入PAM网络中,显著提高了其稳定性,并促进了MXene与PAM链之间的非共价相互作用。结果表明,该水凝胶具有优异的性能,包括高拉伸性、高韧性、高电导率和自黏性,适合用于可靠的生物信号记录,尤其是微弱的电生理信号监测。

水凝胶传感器可广泛应用于步态分析、运动监测等领域。对于老年人或运动员,Dong等<sup>[47]</sup>提出了一种新型柔性步态检测传感器,通过冷冻法制备了具有单轴取向多孔结构的聚苯胺@ (聚丙烯酸-聚乙二醇)三元网络水凝胶。该水凝胶具备优异的压缩性能、良好的导电性和卓越的耐用性,能够快速响应并灵敏地检测压力变化。组装成柔性传感器后,可有效识别肩部、膝部和足底的运动状态,帮助区分不同步态。Deng等<sup>[48]</sup>设计了一种基于聚乙烯醇/聚对苯二甲酸-1,3,4-噻二唑/氯化锂水凝胶的摩擦纳米发电机(PPL-TENG),实现了高功率密度、稳定的电力输出和快速充电,同时能自供电并监测篮球运动中的关节和步态特征,为智能可穿戴运动设备的发展提供了新动力。

水凝胶传感器因其高灵敏度和舒适性,已成为与皮肤接触的非侵入性脑电图和心电图检测的理想选择。Ding等<sup>[49]</sup>通过疏水接枝改性聚乙烯醇水凝胶,制备了一种具有优异力学性能、生物相容性和水下黏附性的水凝胶,并用于水下心电监测电极。该电极具备低拉伸弹性模量和高水下黏附强度,能够有效检测和传输生理电信号。值得一提的是,Xia等开发了<sup>[50]</sup>一种基于PVA,SA纤维和胶原蛋白的离子导电水凝胶,能够同时采集人体运动和电生理信号。水凝胶通过SA纤维和胶原蛋白的协同作用,展现出类皮肤的低模量、高韧性和抗疲劳性,提升了佩戴舒适性和运动检测能力。此外,该水凝胶可作为表皮电极,收集重要生理信息。Hu等<sup>[51]</sup>将藻酸盐水凝胶与氧化锡锡导体结合,制备了一种非细胞毒性的球形电极,具有低阻抗、高亲水性、良好的导电性及适应变形的能力,能够适应不同头皮形状,推动了脑电图设备和

抑郁症研究的发展。传统的微电极阵列仅限于测量二维电生理活动,为了解决该问题,Martinelli等<sup>[52]</sup>介绍了一种新型花形微电极阵列(e-Flower),能够通过添加细胞培养基包裹亚毫米级脑球体,捕捉三维电生理活动。e-Flower利用聚丙烯酸水凝胶的膨胀特性,适应3D组织形态,并与标准电生理记录系统兼容,无须额外设备或溶剂。

### 3.2 电子皮肤

水凝胶传感器是电子皮肤技术的核心,能模仿人类皮肤感知温度、压力、触觉和湿度等信息,并实时反馈给系统。如Tian等<sup>[53]</sup>开发了一种基于热水凝胶的被动多模式电子皮肤,用于实时健康评估。该电子皮肤由PVA/低酰基结冷胶组成,具有抗干燥、抗冻性能和高灵敏度,并能在不到10 min内快速自愈。通过协同耦合传感与传导,能够主动感知体温、脉搏率和汗液含量等多模态生理信号,无须外部电源或解耦。Ran等<sup>[54]</sup>通过将橙皮和铜基金属有机骨架引入到PVA/透明质酸基质水凝胶中制备了一种灵活、天然且可持续生产的电子皮肤。该水凝胶能在温和条件下形成,且通过分子间相互作用增强了力学性能和自修复能力。该电子皮肤具有高断裂伸长率、高导电性和抗菌性能,但皮肤表面形成的汗液会导致电极与皮肤的黏附性低,针对这个问题,Zhang等<sup>[55]</sup>开发了一种基于纤维素-纳米原纤维/聚丙烯酸的水凝胶,通过紧密的氢键网络提高了其黏附性能。通过利用出汗产生的水合氢离子改变水凝胶的氢键结构,降低pH值,从而增强了黏合性,特别是在皮肤上,界面韧性、剪切强度和拉伸强度分别提高了9.7倍、8.6倍和10.4倍。当作为自供电电子皮肤使用时,该水凝胶电极能够在出汗皮肤上保持良好贴合,并可靠地收集运动中的电生理信号。

电子皮肤可用于实时监测皮肤的微小运动变化,能够提供精准的健康数据和预警。Shan等<sup>[56]</sup>开发了一种双层仿生离子导电光电皮肤(BIPES),灵感源自变色龙皮肤,由二氧化硅光子晶体薄膜和柔性水凝胶复合而成。可同时感应电信号、光信号和温度变化,且温度监测不受应变干扰。这种材料可用于智能文胸,为女性在运动中提供健康监测和舒适保护。Zeng等<sup>[57]</sup>用天然多糖SA、丙烯酰胺单体和壳聚糖与聚吡咯复合成一种双网络导电水凝胶,在智能文胸中表现出良好的粘附力、柔韧性、弹性和灵敏度,能够准确监测皮肤的拉伸和组织的压缩变化。

除此之外,Yi等<sup>[58]</sup>研究了一种透明、柔软、坚固且具触觉感知的电子皮肤,采用波浪形超高分子量聚乙烯纤维增强的PAM水凝胶复合材料,模拟人类皮肤的J形应力应变行为。该电子皮肤不仅具备出色的应变传感性能和长期可靠性,还能监测人类活动并保持结构完整性,为透明、柔韧且强度高的电子皮肤设计提供新思路。尽管材料和加工技术有所进展,但功能水凝胶在软生物电子学中的简便图案化和整体集成仍面临重大挑战。对此,Shin等<sup>[59]</sup>设计了一种基于功能性水凝胶的电子皮肤贴片,采用光刻兼容的水凝胶材料,如聚丙烯酸-2-羟乙酯、银片水凝胶、聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚苯

乙烯磺酸水凝胶等,这些材料在含水量和拉伸弹性模量上与人体组织相似,有助于实现稳定的组织-装置界面。通过小鼠模型验证,该贴片可加速伤口愈合,促进成纤维细胞迁移和增殖,为临床组织接口应用提供了新机遇。

### 3.3 人机交互

近年来,水凝胶传感器在柔性、可拉伸和生物相容性方面取得显著进展,实现了人与机器之间的精确实时交互<sup>[60]</sup>。

水凝胶因其优良的力学性能、生物相容性和高灵敏度,广泛应用于人机交互(HMI)设备。然而,高含水量导致其在低温环境下容易冷冻失活。为解决这一问题,Fu等<sup>[61]</sup>开发了一种防冻水凝胶材料,具有抑制冰结晶和冰成核的功能。同时,他们还提出了一种新型抗冻水凝胶<sup>[62]</sup>,通过掺杂抗冻蛋白和氯化钠增强其抗冻性。该水凝胶具备透明度、良好的黏合性、高导电性、高灵敏度及对皮肤无刺激,可用于日常活动监测及基于手套的HMI系统,并支持长距离实时信息传输。随着物联网的发展,手势识别在手机交互中变得越来越重要。Li等<sup>[63]</sup>提出了一种创新的手势识别系统,将水凝胶应变传感器与机器学习相结合,促进手指康复训练。该系统使用的PSTG水凝胶由PAM,SA和单宁酸还原氧化石墨烯组成,具备高拉伸性和力学稳定性,其应变传感器具有高灵敏度、快速响应时间和高线性度,可有效监测关节运动和发音,并能准确识别九种手势,识别率达100%。该系统推动了可穿戴设备的发展,提高了康复训练效果,并拓展了其在医疗保健中的应用前景。此外,该团队还设计了一种基于导电水凝胶的可穿戴单手键盘,结合机器学习算法和水凝胶传感器。由PAM、羧甲基纤维素钠和还原氧化石墨烯组成,具备优良的应变和压力传感能力。通过卷积神经网络和自定义数据采集系统,开发出一款具有98.13%准确率的可穿戴键盘,增强了凝胶的灵敏度、弹性和耐用性。

## 4 结语与展望

(1)水凝胶作为一种智能材料,因其优异的生物相容性、柔性和高水合特性而具有巨大的应用潜力。在制备技术方面,常用方法包括3D打印、自组装、微纳米加工技术等。水凝胶柔性传感器的应用涵盖健康监测、电子皮肤、人机交互等领域,尤其适用于实时监测生理信号、环境参数和人体运动。随着技术不断进步,水凝胶传感器在智能医疗、运动健康和环境监控等领域的应用前景广阔。然而,在其开发过程中仍面临一些挑战,尤其是在力学性能、导电性、生物相容性和制备技术等方面。

(2)水凝胶具有高水合性和柔软性,但力学性能较差,如何在保持水合性的同时增强其强度是研究重点。导电水凝胶中的材料容易受环境影响,提升导电性能的稳定性仍需解决。此外,水凝胶在医学和环境中的生物相容性和降解性需优化以确保安全性。制备技术方面,面临材料调控、工艺控制和设备要求等挑战,3D打印需要适应性材料,自组装技术对分子设计要求高,微纳米加工则存在成本和操作复杂等瓶颈。

(3)未来研究将集中于开发兼具生物相容性和电性功能的多功能水凝胶。此外,自修复水凝胶将提升其长期稳定性和可靠性。随着纳米技术、3D打印和生物技术的发展,水凝胶的应用将更加广泛,推动科技创新和可持续发展。总体而言,水凝胶作为智能材料,具有巨大发展潜力,将在医学、电子和环保等领域发挥重要作用,成为推动科技进步和改善生活质量的关键材料。

### 参考文献

- [1] IQBAL M H, et al. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 2016, 109(10):372–380.
- [2] MINAOGLOU P, et al. A review on wearable product design and applications[J]. *Machines*, 2024, 12(1). DOI: 10.3390/machines12010062.
- [3] 曹文瑞,等.工程塑料应用,2018,46(3):151–155.  
CAO Wenrui, et al. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(3): 151–155.
- [4] BHUYAN M M, et al. *Gels*, 2024, 10(9): 548. DOI: 10.3390/gels10090548.
- [5] CHAMPEAU M, et al. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(31). DOI:10.1002/adfm.201910606.
- [6] ALDANA A A, et al. *Journal of Polymer Science*, 2021, 59(22): 2 832–2 843.
- [7] HAN Y Y, et al. *Gels*, 2022, 8(9). DOI:10.3390/gels8090577.
- [8] ZHAO X Y, et al. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(2): 324–333.
- [9] HUANG Y W, et al. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(37). DOI:10.1002/adfm.202103917.
- [10] DING N, et al. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021, 3(5):2 709–2 721.
- [11] TAMAYOL A, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2016, 5(6). DOI:10.1002/adhm.201670027.
- [12] ZHAO W Y, et al. *Advanced Science*, 2023, 10(28). DOI:10.1002/advs.202303338.
- [13] HUANG R, et al. *Sensors*, 2023, 23(9). DOI:10.3390/s23094560.
- [14] ZHANG Y, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(26). DOI:10.1002/app.50628.
- [15] GAO Y Y, et al. *Journal of Materials Chemistry B*, 2022, 10(30): 5 743–5 752.
- [16] ZHANG S Q, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(21). DOI:10.1002/adem.202400697.
- [17] 鲁手涛,等.工程塑料应用,2020,48(2):139–142, 146.  
LU Shoutao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(2): 139–142, 146.
- [18] GUL K, et al. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(14):3 817–3 832.
- [19] LI T S, et al. *Trends in Biotechnology*, 2024. DOI: 10.1016/j.tibtech.2024.09.010.
- [20] BAŞ Y, et al. *Biomacromolecules*, 2023, 24(12):5 605–5 619.
- [21] YANG P, et al. *Green Chemistry*, 2024, 26(6):3 329–3 337.
- [22] WANG Y T, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(43):58 100–58 120.
- [23] ZHAO L, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2021, 10(10). DOI: 10.1002/adhm.202101062.
- [24] ALIPOUR E, et al. *Journal of Materials Science:Materials in Electronics*, 2021, 32(20):24 812–24 824.
- [25] ZHONG Y J, et al. *Biomacromolecules*, 2020, 21(8):2 983–3 006.
- [26] GUO X, et al. *Journal of Polymer Science*, 2022, 60(18):2 635–2 662.
- [27] HAN X, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 176:78–86.
- [28] LIN Y S, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 713. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136506.
- [29] BAUR E, et al. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(9). DOI:10.1002/admt.202201763.
- [30] ZHANG L W, et al. *Small Science*, 2024, 4(8). DOI: 10.1002/smsc.202400097.
- [31] ZHOU X M, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 670:1–11.
- [32] MASHWEU A R, et al. *Molecules*, 2024, 29(23). DOI: 10.3390/molecules29235654.
- [33] CUI T Y, et al. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2020, 6(9):5 001–5 011.
- [34] LV S, et al. *Biofabrication*, 2020, 12(2). DOI:10.1088/1758-5090/ab57d8.
- [35] NAKASHIMA Y, et al. *Biofabrication*, 2016, 8(3). DOI: 10.1088/1758-5090/8/3/035006.
- [36] SIMIČ R, et al. *Soft Matter*, 2021, 17(26):6 394–6 403.
- [37] ZHU B, et al. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(18). DOI: 10.1002/adfm.202309795.
- [38] GAO Y S, et al. *Advanced Materials*, 2021, 33(25). DOI:10.1002/adma.202006362.
- [39] WU H D, et al. *Polymer*, 2024, 306. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127223.
- [40] PRŮŠA D, et al. *Gels*, 2024, 10(8). DOI:10.3390/gels10080543.
- [41] ZHENG Q Y, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2024, 13(31). DOI:10.1002/adhm.202402266.
- [42] HSU C L, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899. DOI:10.1016/j.jallcom.2021.163380.
- [43] GUO G, et al. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(2). DOI: 10.1002/adfm.202108548.
- [44] LI X L, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498. DOI: 10.1016/j.cej.2024.155195.
- [45] ZHAO T Y, et al. *Polymer*, 2024, 304. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127121.
- [46] LI N, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 483. DOI:

- 10.1016/j.cej.2024.149303.
- [47] DONG X, et al. *Soft Matter*, 2022, 18(48):9 231–9 241.
- [48] DENG L P, et al. *AIP Advances*, 2023, 13(7). DOI: 10.1063/5.0156169.
- [49] DING Y F, et al. *Polymer*, 2024, 308. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127369.
- [50] XIA S, et al. *Science China Materials*, 2023, 66(7):2 843–2 851.
- [51] HU M D, et al. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(46). DOI:10.1002/adfm.202407926.
- [52] MARTINELLI E, et al. *Science Advances*, 2024, 10(42). DOI: 10.1126/sciadv.adp8054.
- [53] TIAN C H, et al. *ACS Sensors*, 2024, 9(2):840–848.
- [54] RAN Z Q, et al. *Communications Materials*, 2024, 5. DOI: 10.1038/s43246-024-00540-1.
- [55] ZHANG L, et al. *Materials Horizons*, 2023, 10(6):2 271–2 280.
- [56] SHAN M Y, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2024, 13(11). DOI:10.1002/adhm.202303876.
- [57] ZENG Y, et al. *Polymer*, 2024, 313. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127720.
- [58] YI F L, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(27): 32 084–32 093.
- [59] SHIN Y, et al. *Biomaterials*, 2025, 314. DOI:10.1016/j.biomaterials.2024.122802.
- [60] FANG K C, et al. *Langmuir*, 2023, 39(48):16 975–16 985.
- [61] FU Z W, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481. DOI: 10.1016/j.cej.2024.148526.
- [62] FU Z W, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150775.
- [63] Li W, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(38): 45 106–45 115.
- [64] Li W, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 201:130–138.