

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.025

# 基于离子导电的水凝胶构筑及其传感性能研究进展

何玮頔,周颖,徐定红,宋季岭,伍宏明,郭建兵

(贵州省材料产业技术研究院,贵阳 550014)

**摘要:** 从高强度水凝胶基体的构建、离子导电水凝胶的类型与优势、离子导电水凝胶传感器不同类型信号的传感性能等方面系统地阐述并总结了近年来各类离子导电水凝胶的构筑及其传感性能的研究进展,介绍了基于离子导电的高性能水凝胶的网络结构、导电相、溶液相与其力学性能、电性能和传感性能间的关系,重点阐述了离子导电水凝胶传感器在应力应变传感、温度传感和湿度传感方面的应用情况,并对离子导电水凝胶在柔性传感器件领域的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 离子导电水凝胶;柔性传感器件;应力应变传感;温度传感;湿度传感

**中图分类号:** TQ427.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0181-05

## Research progress in construction and sensing properties of hydrogels based on ionic conductivity

HE Weidi, ZHOU Ying, XU Dinghong, SONG Jiling, WU Hongming, GUO Jianbing

(Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China)

**Abstract :** From the aspects of the construction of high strength hydrogel matrix, the types and advantages of ionic conductive hydrogels, and the sensing performances of different types of signals of ionic conductive hydrogel sensors, the research progress in construction of various ionic conductive hydrogels and their sensing properties in recent years were systematically described and summarized. The relationship between the network structure, conductive phase, solution phase and its mechanical properties, electrical properties and sensing properties of high-performance hydrogels based on ionic conductivity was introduced. The application situations of ionic conductive hydrogel sensors in stress-strain sensing, temperature sensing and humidity sensing were emphasized. The development trend of the ionic conductive hydrogels in the field of flexible sensor was also prospected.

**Keywords :** ionic conductive hydrogel ; flexible sensor ; stress-strain sensing ; temperature sensing ; humidity sensing

随着电子技术的发展和智能化时代的来临,越来越多的电子器件和设备向着小型化、柔性化和可穿戴的方向发展,柔性传感器在可穿戴设备、人机界面、电子皮肤等领域具备广泛的应用前景并在各领域受到更为广泛的关注和研究<sup>[1-4]</sup>。近年来研究的柔性可穿戴传感器逐渐克服了传统的刚性电子传感器硬脆的缺点,具备了优异的灵活性、高延展能力、高灵敏度、小体积和高生物相容性等优势。常用的构建柔性传感器的手段是将导电的填料或网络整合进柔性基体中,借助填料的导电网络随着基体发生的形变而引起的导电性能的变化,从而使外部信号能够转化为电信号的输出变化<sup>[5-7]</sup>。聚合物基水凝胶是一类受生物启发的仿生功能材料,由交联的亲水聚合物网络包含大量水分子组成,其物理化学性质、网络结构层次、力学性能和生物相容性与天然组

织近似,是制备柔性传感器件的理想材料之一<sup>[8]</sup>。通过调控水凝胶基体聚合物和溶液相的种类、组分、反应条件等,能够赋予水凝胶多功能特性,再通过向水凝胶中引入各种导电填料、导电基体网络和自由离子赋予水凝胶优良的电性能,使水凝胶能够胜任组织工程、生物传感、柔性器件和电子皮肤等方面的应用<sup>[9-13]</sup>。

在实际运用中,柔性传感器通常需要在承受大量的周期性载荷或者其他信号的反复作用下能保持稳定可靠的响应性能和回复性,也需要具有较高的强度来维持稳定以延长服役寿命。近年来研究者们将不同的导电机理与水凝胶强韧化的理念相结合,研发制备了一系列具备高强度、高耐久性、自修复自愈合及高黏附性等特性的导电水凝胶,有力地推动了水凝胶柔性器件的多样化发展<sup>[14]</sup>。

**基金项目:** 贵州省科技计划项目(黔科合同基础-ZK[2023]一般 159,黔科合同基础-ZK[2023]一般 160)

**通信作者:** 郭建兵,博士,研究员,硕士生/博士生导师,研究方向为高性能复合材料研究及应用

**收稿日期:** 2025-01-10

**引用格式:** 何玮頔,周颖,徐定红,等. 基于离子导电的水凝胶构筑及其传感性能研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 181-185.

HE Weidi, ZHOU Ying, XU Dinghong, et al. Research progress in construction and sensing properties of hydrogels based on ionic conductivity[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 181-185.

笔者在高性能多重网络结构水凝胶的设计、传感性能及人体参数监控方面开展了一系列研究工作,通过物理/共价复合交联手段构建了高强度的多重网络水凝胶,在离子导电的条件下对水凝胶进行溶液相的调控,组装为传感器,研究了该传感器的多种信号传感性能并实现了人体运动、皮肤温度及呼吸的远程实时监测。笔者结合目前的研究工作,系统地总结并分析了基于离子导电的高性能水凝胶传感器件的研究情况,介绍了近年来水凝胶传感器在基体构筑、导电性能调节、多信号传感及多功能化等方面的研究思路与进展,阐述了多种水凝胶复合材料和传感性能整合的发展方向并总结了基于离子导电水凝胶的发展前景。

### 1 高强度水凝胶基体的设计与构筑

能够用于制备传感器的水凝胶基体需要具有较高的力学性能,而传统的单网络水凝胶由于其交联形式单一、网络层次少而使得溶胀率过高,达到溶胀平衡后单网络水凝胶呈现出溶液的特性而使得其缺乏能量耗散,在低载荷作用下易失效,力学性能差<sup>[15]</sup>。近年来学者们设计了一系列的增强方法用于提升传统水凝胶材料的强度,从作为奠定基础的“双网络”结构出发,以增强高分子链间的相互联系为思路来提高水凝胶材料的应力传递和能量耗散,引入了聚合物分子链破坏<sup>[16]</sup>、穿插可逆交联网络<sup>[17]</sup>、分子链构象的转化<sup>[18]</sup>、宏观增强相的失效断裂<sup>[19]</sup>等微观至宏观尺度上的能量耗散机制。根据网络构筑类型和方式,高强度双网络水凝胶主要分为下述几种。

#### 1.1 经典的共价交联双网络

Gong等<sup>[17]</sup>在2003年首次报道了不同于传统的单网络水凝胶的双网络水凝胶,这是将两种不同的具有非对称结构的高分子网络相互贯穿组成的复合凝胶结构,为后续水凝胶的强韧化策略奠定了理论基础。通过两层不同性质的聚合物网络的缠结互穿,在受到外力作用时,其中的刚性网络先发生断裂以耗散大量能量作为“牺牲”键来保护柔性网络,再通过柔性网络大分子链的拉伸进一步分散和传递内应力,使水凝胶网络的完整性和稳定性得到有效提高。共价交联双网络在水凝胶强韧化上取得了极为显著的成果,所制备的水凝胶力学性能远远超过传统单网络结构,但也存在局限性:以共价交联形式构筑的作为“牺牲”键的刚性网络通常在受到极大载荷或形变下由于其不可逆性会发生难恢复的断裂现象,使得水凝胶整体在加载后出现软化现象并在拉伸时出现细颈现象,即类似橡胶材料的拉伸曲线和强度依赖于加载历史的最大载荷。即便水凝胶初始力学性能优异,这种不可逆性和较差的循环性也不利于其在柔性电子器件方面的运用。

#### 1.2 纯物理交联网络

为了改善双网络水凝胶在加载-卸载循环中的可重复性,设法构筑可逆的物理交联网络是有效的手段,包含了氢键作用<sup>[20]</sup>、离子相互作用<sup>[21]</sup>、疏水缔合作用<sup>[22]</sup>、静电相互作用<sup>[23]</sup>、金属配位作用<sup>[24]</sup>等机理。虽然构建的单个物理交联点强度不够理想,但是均有着优异的可逆性和回复能力。在受到外界载荷作用,交联发生断裂后,这类物理交联点能在

一段时间内重新连接,进而表现出一定程度的自我修复性能。已有研究表明,提高水凝胶中物理交联点的密度并合理调控其分布能够有效提高水凝胶力学性能并使构筑的物理交联网络在某些条件下不亚于共价交联结构:如Wang等<sup>[25]</sup>制备了一种可极限拉伸的水凝胶材料,先由两亲性嵌段共聚物聚醚F127二丙烯酸酯来提供柔性的胶束交联点,再将聚丙烯酸(PAA)与聚苯胺(PANI)通过该交联点利用植酸进行掺杂交联,最后将所构建的网络通过链物理缠结、氢键等进一步强化,制备出了一种高拉伸率的PAA/PANI水凝胶,该水凝胶断裂伸长率超过了1100%。由于不同类型的物理交联点均能在受到外力载荷作用破坏后于一定时间内回复,因而能够通过交联密度的调控以适应水凝胶不同种类和尺寸范围的加工方法,尤其是在制备水凝胶薄膜或细线方面,纯物理交联水凝胶具备独特的易加工特性。然而在实际运用中,对水凝胶基体强度有高需求的情况下利用物理交联构筑的网络稳定性依然低于很多共价交联网络基体,且在加工过程中存在精确调控物理交联水凝胶的交联密度及其分布较为困难和繁琐的问题。

#### 1.3 物理-共价复合交联网络

为了同时维持多重网络水凝胶的强韧性和自我修复能力,并提高其疲劳性能和重复循环性能,有研究者将多种可逆非共价物理交联网络引入共价交联网络中来构筑物理-共价复合交联的双(多)网络水凝胶,试图将可逆的物理交联作为可“牺牲”的第一网络,而作为骨架的共价交联则是第二网络。这类复合交联水凝胶的优良力学性能主要归因于不同交联方式的协同作用:较弱的物理交联点在水凝胶受外力变形时可作为“牺牲”键先被破坏并进行部分能量耗散,而共价交联的第二网络则作为水凝胶的骨架体系以控制住体系的溶胀率并维持住复合水凝胶的完整性,同时未断裂的情况下进行剩余的能量耗散,这种复合交联的构筑方式显著改善了水凝胶在一定应变范围内的强韧度、抗疲劳性能和可逆性。如Ding等<sup>[26]</sup>和Chen等<sup>[27]</sup>均在不同聚丙烯酰胺/聚丙烯酸共聚物[P(AAm-co-AAc)]的双网络水凝胶基础上,引入三价铁离子作为螯合剂以构建离子键的物理交联来提高大分子链间的相互作用,再通过控制羧酸基团的比例来实现对水凝胶力学性能的调控,进一步改善了复合水凝胶的综合力学性能。笔者也通过原位共价交联的聚丙烯酰胺网络中引入可逆的聚乙烯醇网络和羧化壳聚糖网络制备了一系列二/三重网络复合交联水凝胶<sup>[28]</sup>,所形成的能量耗散梯度显著改善了水凝胶的力学性能,使拉伸率和拉伸强度分别达到511%和2.108 MPa,并在室温下维持了水凝胶良好的可逆性和回复性。

### 2 离子导电水凝胶的优势与类型

根据水凝胶中导电载流子的类型,导电水凝胶通常分为电子导电和离子导电两大类。其中电子导电水凝胶主要是通过在水凝胶内部引入纳米级的导电填料(如纳米金属颗粒/线材<sup>[29]</sup>、纳米碳材料<sup>[30]</sup>)或构建导电聚合物网络<sup>[31]</sup>以利用自由电子赋予水凝胶导电性能。虽然这种导电性能赋予方

式对水凝胶而言简单有效,却也存在相当的不足:一方面,水凝胶内部的导电填料在和水凝胶基体力学性能存在差异的情况下,当水凝胶受到大载荷作用及发生大形变时可能会出现不可逆的变形或断裂,例如相互桥接的纳米填料的不可逆分离或导电高分子网络的部分密度分布变化等,从而导致水凝胶导电性能、信号响应可逆性和回复性降低<sup>[32]</sup>;另一方面,电子导电水凝胶存在的一个弊端是其电信号主要通过填料或导电网络中的自由电子传递,虽然导电性能优异但与生物体内的离子迁移传递的电信号不同,不利于水凝胶在生物相容性方面的应用范围拓展<sup>[33]</sup>。

水凝胶内部大量孔隙填充了大量的水分或其他溶剂,也能够通过其中的自由离子定向传输来实现离子导电的特性。在电场的作用下,水凝胶内部离子的分布、运动速率和传输距离能够对水凝胶的导电性能产生较为显著的影响,因而可利用和调控这些参数针对环境条件的响应情形制备出不同类型的传感器件。这种方法的优势在于离子导电传递与生物体电信号传输高度一致,具有优异的生物相容性,而水凝胶本身也能作为损伤缓冲地带带来防止生物组织受到影响;其次水凝胶的基体性能设计与离子导电调控不仅能够制备出匹配生物组织性能的离子导电水凝胶,还能够根据实际应用需求更改其中的功能材料成分来满足多用途多功能器件的构筑与制备。目前常用于引入水凝胶中的离子导电体系主要有下述3种。

### 2.1 离子聚合物导电水凝胶

水凝胶内部的离子不仅来自水或溶剂相,也会来自基体的聚合物网络。比如多酸单体和丙烯酸等部分聚合物网络含有离子化的基团,可以在水解过程中提供自由离子。极化的聚两性离子分子链上同时具备阴阳离子电荷,为离子的传输构建了通路,因而能呈现出优良的电学性能,同时两性离子具备的强偶极性又赋予水凝胶黏附性能和自修复性能等多功能性。例如Lei等<sup>[34]</sup>通过将甲基丙烯酸和3-二甲基(甲基丙烯酰氧基乙基)丙烷磺酸铵共聚,制备了一种拉伸率超过10 000%的聚两性离子水凝胶,并以此为基础制备了同时具备温度响应和压力响应的电容型传感器,其压力传感灵敏度最高达到 $9 \text{ kPa}^{-1}$ 。Long等<sup>[35]</sup>制备了一种聚两性电解质水凝胶,其中同时包含了带正电的咪唑基离子单体与带负电的甲基丙烯酸3-磺丙基钾盐,其中的氢键作用和两性电解质基团的静电作用有效改善了水凝胶的力学性能,水凝胶拉伸强度达到 $1.3 \text{ MPa}$ ,且在室温下的离子电导率可达 $3 \text{ S/m}$ ,能组装为高柔韧可拉伸柔性器件。

### 2.2 离子液体导电水凝胶

离子液体,即室温熔融盐或有机离子液体,是由有机阳离子和无机阴离子(或有机阴离子)所组成的在室温或近室温条件下能够呈液体状态的盐类,并在水中具有不同程度的稳定性。由于无机阴离子与有机阳离子的多样性,故能通过改变两者组合比例进而设计出具备特殊功能的离子液体,且该类离子液体具有不易挥发、化学稳定、导电性优异等优势,在水凝胶中能够发挥离子导电的作用<sup>[36]</sup>。如Kim等<sup>[37]</sup>将1-

乙基-3-甲基咪唑鎓双(三氟甲基磺酰基)亚胺的离子液体引入甲基丙烯酸甲酯-丙烯酸丁酯共聚物(PMMA-r-PBA)中,以该离子液体为导电相制备了一种导电水凝胶材料,其拉伸率可达850%,拉伸电阻灵敏度系数达到2.73,且引入离子液体的水凝胶具备优异的耐久性能,放置于空气中10 d后依然能够保持稳定、溶剂不挥发。虽然具备诸多优势,但离子液体原料与加工成本较高且制备的过程中通常需要复杂的合成方法从而较难使其用于实际的大批量工业生产,且大部分离子液体对湿度较为敏感,易吸附空气中的水分子而影响其导电能力,需要额外的封装与材料包覆后才能正常使用,因而离子液体的应用范围受到一定限制<sup>[38]</sup>。

### 2.3 自由离子导电水凝胶

在水凝胶的水(溶剂)相中直接引入溶解性的电解质盐类是制备离子导电水凝胶最简易而有效的方法,大量的自由金属离子不仅能够赋予水凝胶导电性,还能在一些情况下对水凝胶基体网络产生补强的效果,且这种自由离子导电的方式也与生物体内的离子导电方式最为接近。如Tian等<sup>[39]</sup>采用一锅法引入了氯化锂(LiCl)作为自由离子的导电相,在将LiCl引入聚丙烯酰胺和聚二甲基硅氧烷后,通过3D打印机构建了一种水凝胶-介电-弹性体系统,其在轴向拉伸和疲劳测试中表现出稳定性;笔者也采用一锅法将LiCl引入聚丙烯酰胺/聚乙烯醇/壳聚糖三重复合交联网络中赋予了该网络优良的导电性能<sup>[28]</sup>,所制备的水凝胶传感器在 $0\sim 6 \text{ kPa}$ 范围内具备 $5.134 \text{ kPa}^{-1}$ 的压阻传感灵敏度,能够用于实时监控多种人体活动。此外也有利用自由金属离子对水凝胶网络强化的同时赋予导电性能的报道,如Zhou等<sup>[40]</sup>将K-卡拉胶、丙烯酰胺、丙烯酸、聚醚F127二丙烯酸酯在 $\text{K}^+$ 的溶液中共聚,随后引入 $\text{Fe}^{3+}$ 与体系中的羧基络合,制备出一种三重物理交联的水凝胶,电导率达到 $1.15 \text{ S/m}$ ,将该水凝胶组装为压力传感器,其压阻灵敏度系数可达到 $0.33 \text{ kPa}^{-1}$ ,拉伸应变灵敏度系数达到2.8。

## 3 离子导电水凝胶传感器

不同于传统的刚性导电材料,导电水凝胶具有优异的柔韧性,且与同为柔性材料的导电弹性体相比还具备类似天然有机体组织的网络结构,能表现出与人体皮肤等器官接近的物理性质与生物特性,其极高的功能可调控性为制备与组装多种柔性传感器件打下了坚实的基础。其中基于离子导电的水凝胶由于其制备方式简易,网络构建与功能设计的思路非常灵活,因此在经过多功能改性后往往能胜任多种类型信号的传感应用。将导电水凝胶作为力学、气体、温度、湿度等传感器用于可穿戴设备、电子皮肤、人机界面和柔性器件等领域已有广泛的探索和研究<sup>[41-43]</sup>。以下将从不同信号传感类型对离子导电水凝胶传感器的发展应用情况进行介绍。

### 3.1 电阻式应力应变传感

力学信号(应力应变)传感是柔性传感器件最基本泛用的功能,其中离子导电水凝胶电阻式应力应变传感的原理为:当水凝胶基体受到外界载荷作用发生一定程度的形变时,水凝胶孔隙尺寸或密度会随之发生变化,使得其中载流

子的传输路径和距离发生变化,进而产生电导率或整体电阻的变化。如Xia等<sup>[44]</sup>通过物理交联制备了一种基于杂化乳液粒子的聚丙烯酰胺/十二烷基磺酸钠水凝胶,以锂离子(Li<sup>+</sup>)作为离子导电相赋予水凝胶优良的导电性能及应变敏感行为,组装为可穿戴传感器能够监控多种人体活动,在0%~2 000%的拉伸应变范围内灵敏度系数可达5.44。Zhang等<sup>[45]</sup>制备了一种原位自由基聚合的聚乙烯醇/丙烯酰胺-丙烯酸钠共聚体系的离子导电水凝胶,电导率达到25 mS/cm,在0%~400%应变范围内的应变响应时间为360 ms,其线性拉伸电阻-应变灵敏度系数达到4.75。

### 3.2 温度传感

人作为恒温动物,人体各个部位的温度分布被视作极为重要的生理参数,其变化与新陈代谢和健康状况息息相关。水凝胶作为柔性可穿戴器件的重要材料,其温度响应和传感性能也被深入地研究,水凝胶对温度的响应方式主要分为体积应变型和非体积应变的离子热响应型两种。

体积应变型水凝胶温度传感器主要基于Hirotsu等<sup>[46]</sup>率先发现的*N*-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)水凝胶热致相转变的理论基础。当温度高于临界溶解温度时,异丙基的疏水相互作用占主导地位,NIPAM水凝胶中分子链坍塌使水凝胶的孔隙变小,挤出网络中的水分使水凝胶体积减小,反之则膨胀,通过这种体积变化影响其内部的导电通路从而对温度产生响应。Tang等<sup>[47]</sup>以NIPAM为基体制备了一种体积、透光度和亲水性均具有温控性的智能水凝胶材料,这种水凝胶集成了NIPAM低临界溶解温度特性,当温度在临界溶液温度附近变化时,水凝胶能产生不同形状的宏观变形,采用不同的结构设计使水凝胶能够通过特定的温度响应形变以产生宏观温度指示作用。

体积应变型温敏水凝胶在临界温度附近的体积变化有可能对本身的应变或压力等其他信号的响应和传感产生额外干扰,也可能会影响可穿戴设备的布置与使用;而非体积应变的离子导电水凝胶则仅主要依靠网络内部离子的热运动随温度变化而产生电导率/电阻的变化来指示,具备更优异的灵敏度和通用性。比如Hou等<sup>[48]</sup>和An<sup>[49]</sup>等分别在聚丙烯酰胺为基体的复合网络中同时引入不同离子和电子导电相:前者在聚丙烯酰胺/海藻酸钠双网络中以NaCl为离子导电相辅以氧化石墨烯导电,制备了具备良好力学性能的纳米复合水凝胶,15~40℃范围内的温敏系数达到2.0%/℃;后者基于聚丙烯酰胺/聚丙烯酸网络引入Fe<sup>3+</sup>离子辅以多壁碳纳米管导电,制备了一种高热敏性双网络离子导电水凝胶,其温敏系数能随着拉伸应变(0%~200%)的变化从2.2%/℃增至9.4%/℃。笔者则在此基础上同时利用了自由离子的热响应原理和甘油的温度-黏度响应原理<sup>[50]</sup>,在聚丙烯酰胺/聚乙烯醇/壳聚糖的网络中调控溶液相中LiCl和甘油配比,使水凝胶能对温度-压力同时响应并实现分离信号监控,0~6 kPa范围内压阻灵敏度系数为4.165%/kPa,20~50℃范围内温敏系数可达2.04%/℃,将该水凝胶组装为传感器后在检测皮肤温度基线时还能监控多种人体活动。

### 3.3 湿度传感

水凝胶材料中的大量亲水基团(如羟基、酰胺基、羧基等)能够使其在特定的环境中吸收或释放出水分子,吸收水分子时,亲水基团与水分子结合而疏水基团则发生溶胀现象,从而使内部的水分通路(导电通路)发生变化,这些特性使得水凝胶中的含水量对环境湿度较为敏感,有组装为湿度传感器的潜力。相较于石墨烯、二硫化钼等传统固态湿度传感材料,离子导电水凝胶湿度传感器主要依靠水蒸发/吸附所引发的电导率变化进行湿度指示,并能利用水凝胶的灵活性检测如呼出气体及伤口附近的湿度水平等,以评估人体的生理状况<sup>[51]</sup>。如Wu等<sup>[52]</sup>采用溶剂交换法,在κ-卡拉胶/聚丙烯酰胺的双网络体系中分别引入甘油和乙二醇作为替换溶剂,并以氯化钾作为离子导电相,在赋予水凝胶湿度传感性能的同时改善了水凝胶的抗干抗冻性能,当离子水凝胶制备为薄膜状时,其湿度灵敏度相较原始块状提高了1 000倍以上,检测湿度范围达到了11%~98%。

### 3.4 其他生理信号传感

水凝胶基可穿戴传感器作为新兴的生理信息收集平台,其在实时、无创伤连续监测个人生理信号与健康状况方面表现出了巨大潜力。除了上述的常规信号外,汗液、组织液和唾液等生物体液中富含多种与人体健康相关的生物化学标志物,如特定电解质、激素、生物蛋白和外源药物等。近年来基于电化学检测方法将人体体液的生物标志物离子浓度转化为电信号的研究引发了极大的关注,如Elsherif等<sup>[53]</sup>在苯硼酸功能化的葡萄糖选择性水凝胶膜上打印出周期为1.6 μm的微观结构,其与葡萄糖结合后体积膨胀从而改变光学周期常数,这类水凝胶微观结构的体积随着泪液中葡萄糖浓度变化而发生变化进而实现衍射单色光阶的变化。Zhu等<sup>[54]</sup>在聚两性离子羧基甜菜碱水凝胶中封装酚红作为pH指示,以葡萄糖氧化酶及辣根过氧化物酶作为葡萄糖比色指示,实现了对糖尿病溃疡伤口中的pH和葡萄糖浓度的同步监测。

## 4 结语与展望

离子导电水凝胶因为其具有更为优异的生物相容性、生物电性能以及易于调控的多功能化性能而受到研究人员的青睐,尤其是在复杂多变的应用环境中,利用简单有效的手段构建高强度、高稳定性以及能响应多种信号的多功能离子导电水凝胶传感器件具有巨大的应用价值和现实意义。近年来的报道中对于导电水凝胶传感器的研究多以添加导电填料或网络的电子导电为主,以离子导电为主的水凝胶传感仍需更加深入地研究。需要在精准构建水凝胶基体网络结构的基础上调控其中的离子导电通路分布,揭示网络结构与性能之间的关系,并深入探究水凝胶传感器在离子导电基础上的多种传感机理,为研究开发提供更有实用价值的水凝胶传感器件提供理论基础和方法根据。此外,柔性传感部件的单元集成化和多功能化是目前的大发展趋势,水凝胶的难加工性使其不利于制造多功能集成器件,因而研发新型先进的水凝胶加工制备方法,并整合多种传感性能来实现水凝胶的

仿生传感监测将是离子导电水凝胶传感器关注发展的重点。

### 参考文献

- [1] SA Cai, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(42). DOI: 10.1039/c9tc04696h.
- [2] KEUM K, et al. *Advanced Materials*, 2020, 32(51). DOI: 10.1002/adma.202002180.
- [3] QU Xinyu, et al. *Nano Research*, 2023, 16(7):10 348–10 357.
- [4] QIN Yafei, et al. *ACS Omega*, 2024, 9(14):16 851–16 859.
- [5] 郑静霞,等. *功能高分子学报*, 2022, 35(4):299–313.  
ZHENG Jingxia, et al. *Journal of Functional Polymers*, 2022, 35(4): 299–313.
- [6] 白忠薛,等. *精细化工*, 2023, 40(11):2 357–2 365.  
BAI Zhongxue, et al. *Fine Chemicals*, 2023, 40(11):2 357–2 365.
- [7] GUO Yuhan, et al. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(47). DOI:10.1002/adfm.202306820.
- [8] FAN Hailong, et al. *Macromolecules*, 2020, 53(8):2 769–2 782.
- [9] WANG Jie, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(1): 1 558–1 566.
- [10] STEWART J A, et al. *BMC Anesthesiology*, 2022, 22(1). DOI: 10.1186/s12871-022-01864-6.
- [11] SUNEETHA M, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426. DOI:10.1016/j.cej.2021.130847.
- [12] DENG Wangfang, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 279(Part 2). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135165.
- [13] PEI Xingjie, et al. *Journal of Polymer Science*, 2021, 59(13): 1 312–1 337.
- [14] 姜新园,等. *分析化学*, 2023, 51(9):1 381–1 390.  
JIANG Xinyuan, et al. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(9):1 381–1 390.
- [15] SUN J Y, et al. *Nature*, 2012, 489(7 414):133–136.
- [16] CHEN Qiang, et al. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(10): 1 598–1 607.
- [17] GONG Jianping, et al. *Advanced Materials*, 2003, 15(14): 1 155–1 158.
- [18] YAN Xuzhou, et al. *Advanced Materials*, 2012, 24(3):362–369.
- [19] HUANG Yiwan, et al. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(9). DOI:10.1002/adfm.201605350.
- [20] GAO Yang, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 375. DOI: 10.1016/j.cej.2019.121915.
- [21] YUE Lippei, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(18). DOI:10.1002/app.47379.
- [22] ALGI M P, et al. *European Polymer Journal*, 2014, 59:113–121.
- [23] HUANG Guang, et al. *Macromolecules*, 2022, 55(1):156–165.
- [24] LI Xuefeng, et al. *Polymer*, 2017, 121:55–63.
- [25] WANG Zhiwen, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(34):9 200–9 207.
- [26] DING Hongyao, et al. *Polymer*, 2019, 171:201–210.
- [27] CHEN Qiang, et al. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(16):5 710–5 720.
- [28] HE Weidi, et al. *Next Materials*, 2023, 1(3). DOI: 10.1016/j.nxmate.2023.100027.
- [29] JING Xin, et al. *Materials Letters*, 2019, 237:53–56.
- [30] SUN Xia, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122832.
- [31] CONG Jing, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(29):34 942–34 953.
- [32] LEE C J, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(6): 5 845–5 852.
- [33] JIANG Yuanwen, et al. *Nature Protocols*, 2019, 14(5): 1 339 – 1 376.
- [34] LEI Zhouyue, et al. *ACS Nano*, 2018, 12(12):12 860–12 868.
- [35] LONG Tangjie, et al. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(44). DOI:10.1002/adfm.201804416.
- [36] GAO Zijian, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(32): 11 119–11 127.
- [37] KIM Y M, et al. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(4). DOI:10.1002/adfm.201907290.
- [38] 付雪,等. *化工学报*, 2022, 73(5):1 883–1 893.  
FU Xue, et al. *CIESC Journal*, 2022, 73(5):1 883–1 893.
- [39] TIAN Kevin, et al. *Advanced Materials*, 2017, 29(10). DOI: 10.1002/adma.201604827.
- [40] ZHOU Linjie, et al. *Polymer*, 2020, 192. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122319.
- [41] QING Ying, et al. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(27). DOI:10.1002/adfm.202201846.
- [42] DENG Yajuan, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656(Part A). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130363.
- [43] 江文静,等. *复合材料学报*, 2023, 40(4):1 879–1 895.  
JIANG Wenjing, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(4):1 879–1 895.
- [44] XIA Shan, et al. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(22): 9 522 – 9 531.
- [45] ZHANG Jingfei, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(12). DOI:10.1002/mame.202100486.
- [46] HIROTSU S, et al. *The Journal of Chemical Physics*, 1987, 87(2): 1 392–1 395.
- [47] TANG Lin, et al. *Progress in Materials Science*, 2021, 115. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100702.
- [48] HOU Wenwen, et al. *Composites Communications*, 2021, 27. DOI:10.1016/j.coco.2021.100837.
- [49] AN Ran, et al. *Materials Science & Engineering: C*, 2020, 107. DOI:10.1016/j.msec.2019.110310.
- [50] HE Weidi, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 647:456–466.
- [51] LIM C, et al. *Science Advances*, 2021, 7(19). DOI:10.1126/sciadv.abd3716.
- [52] WU Jin, et al. *Materials Horizons*, 2019, 6(3):595–603.
- [53] ELSHERIF M, et al. *ACS Nano*, 2018, 12(6):5 452–5 462.
- [54] ZHU Yingnan, et al. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(6). DOI:10.1002/adfm.201905493.