

专题: 柔性电子与智能可穿戴

# 聚乙烯醇基导电水凝胶性能优化及体征监测应用研究进展\*

崔小静<sup>1) #</sup> 卢昌昌<sup>2) #</sup> 杨皓鑫<sup>2) #</sup> 翟鸿鹏<sup>2) #</sup> 杨心茹<sup>3)</sup>  
陈慧敏<sup>2)</sup> 郭爱心<sup>1) †</sup> 张虎林<sup>3) ‡</sup>

1) (山西师范大学计算机科学与人工智能学院, 太原 030031)

2) (山西师范大学物理与电子工程学院, 太原 030031)

3) (太原理工大学集成电路学院, 太原 030024)

(2025年12月31日收到; 2026年2月11日收到修改稿)

随着智能医疗与可穿戴传感技术发展, 聚乙烯醇 (PVA) 基导电水凝胶凭借其优异柔性、离子导电性与生物相容性, 成为人体体征监测核心功能材料. 本文系统综述了其研究进展, 梳理了物理交联与化学交联两大类制备方法, 总结了力学、导电、自愈合及抗冻性能的协同优化策略; 重点阐述了 PVA 基导电水凝胶的传感机理, 介绍了范特霍夫渗透压公式、泊松-玻尔兹曼方程等多物理场耦合建模与量化表征方法. 此外, 进一步综述了该类水凝胶在关节活动、肌肉收缩、脉搏、吞咽、呼吸及心电等多场景体征监测中的应用成果. 最后, 分析了当前在构效关系、多场耦合建模、长期稳定性及工程化集成等方面的挑战, 展望了在机理研究、性能优化与产业化落地的发展方向, 为 PVA 基导电水凝胶在柔性可穿戴传感领域的理论研究与深化应用提供理论参考.

**关键词:** 柔性传感器, 聚乙烯醇基导电水凝胶, 离子压电, 体征监测**DOI:** 10.7498/aps.75.20251804**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251804

## 1 引言

随着智能医疗、健康监测与人机交互技术的快速发展, 可穿戴传感技术凭借实时、无创、便携的核心优势, 在医疗健康、体育训练、人机交互等领域的应用潜力持续释放, 已成为精准获取人体生理与运动数据的关键技术手段. 该技术的核心在于实现体征信号的精准捕捉与高效转换, 而传感功能材料的性能突破是推动其从实验室研究走向工程化应用的核心关键. 聚乙烯醇 (PVA) 基导电水凝胶

作为一类新型柔性导电材料, 融合了优良的离子导电性、优异的生物相容性、可调控的机械性能及良好的贴肤性, 完美契合可穿戴传感器对材料的综合需求, 已成为柔性传感材料领域的研究热点.

PVA 是一类兼具水溶性、生物相容性与可降解性的合成高分子材料, 其分子链富含大量羟基官能团, 可通过分子间与分子内氢键作用构建稳定的物理交联网络, 赋予材料优异的成膜性、柔韧性及力学稳定性, 因此被广泛用作水凝胶制备的基体材料. 如图 1 所示, PVA 导电水凝胶的制备以物理交联 (如冻融循环<sup>[1,2]</sup>、氢键作用<sup>[3,4]</sup>、盐析协同<sup>[5,6]</sup>) 与

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52475600, 12304453) 和山西省回国留学人员科研项目 (批准号: 2023-105) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: guoaxin@mail.ustc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhanghulin@tyut.edu.cn

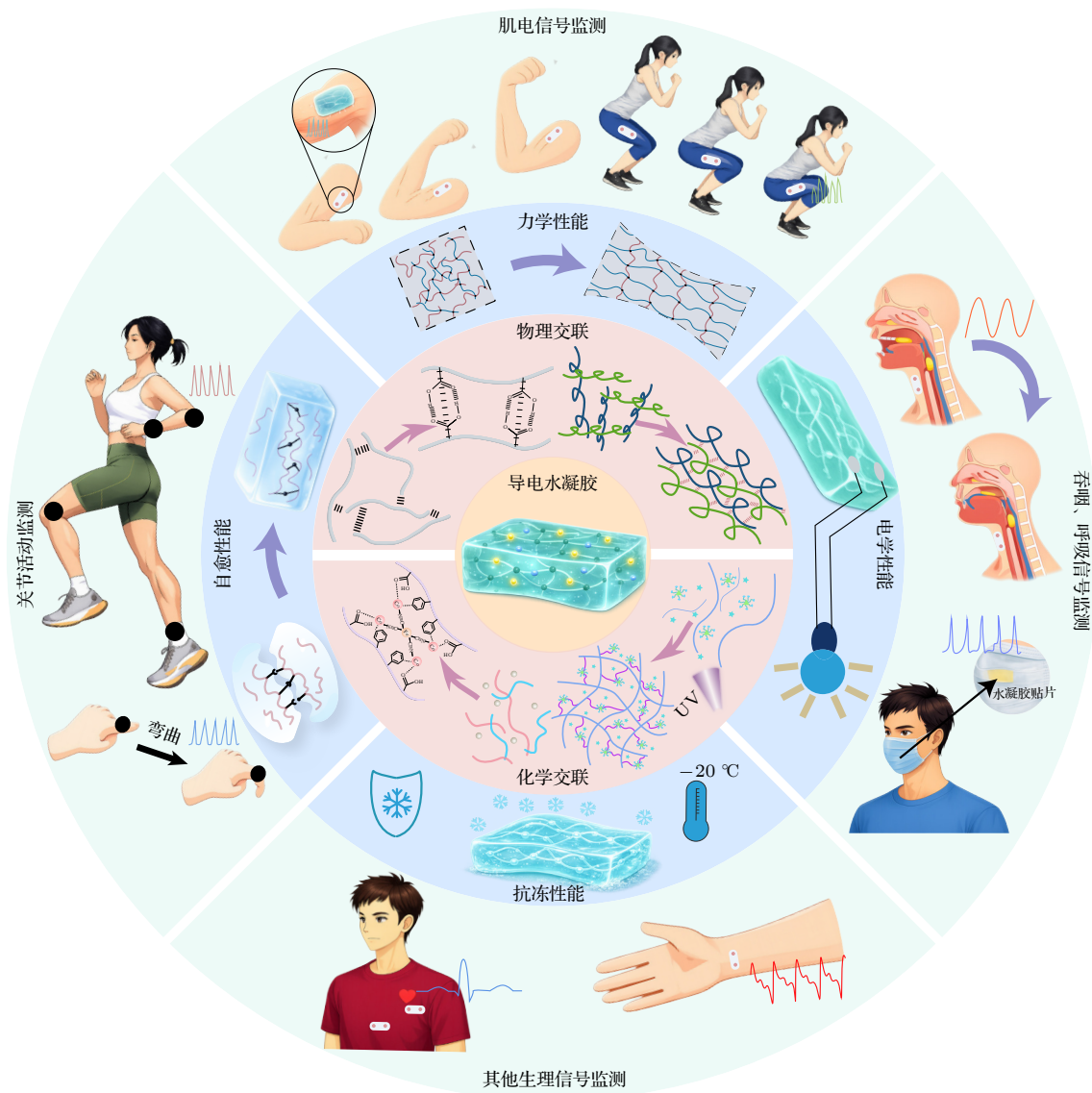


图 1 聚乙烯醇基导电水凝胶: 制备、性能及体征监测应用

Fig. 1. A review of PVA-based conductive hydrogels: Preparation, properties and application in human detection.

化学交联 (如醛类交联<sup>[7,8]</sup>、金属离子配位交联<sup>[9]</sup>) 为核心策略, 通过 PVA 三维网络与导电物质 (液态金属、离子盐、碳纳米材料等) 的协同耦合实现功能优化. 经性能改性后, 该类水凝胶可兼具高拉伸韧性、自修复能力与皮肤匹配的力学柔度<sup>[10]</sup>; 以及高电导率与快速响应特性, 可满足高灵敏度体征监测的需求<sup>[11]</sup>. 此外, 其高含水量的结构特征与优异的生物相容性, 能有效减少监测过程中的运动伪影与皮肤刺激, 为实现人体体征的长时无创监测奠定了重要基础.

本文旨在系统综述近年来 PVA 基导电水凝胶在人体体征监测领域的研究进展, 重点围绕物理/化学交联的制备技术体系、力学-电学性能的协同优化机制展开深入分析, 同时详细阐述其在关节活

动、肌肉收缩、脉搏搏动、吞咽呼吸等体征监测场景的应用研究成果. 本文通过梳理该领域的权威文献与实验数据, 总结 PVA 基导电水凝胶在制备、改性与应用方面的技术突破, 剖析当前研究面临的核心问题与挑战, 为相关研究人员开展高性能 PVA 基导电水凝胶的设计与开发提供参考, 并进一步展望其在智能化可穿戴设备、临床康复监测、个性化健康管理等领域的未来发展方向与工程化应用前景.

## 2 PVA 基导电水凝胶交联方法

PVA 基导电水凝胶的制备方法大致分为物理交联和化学交联两大类.

## 2.1 物理交联

物理交联借助分子间非共价相互作用(如结晶作用、氢键缔合、疏水聚集等)构建 PVA 基水凝胶的三维网络结构,该路径无需添加化学交联剂,具备生物相容性优良、制备条件温和等核心优势.依据非共价相互作用的类型差异,将其划分为冻融循环、氢键诱导交联、盐析交联及其他创新型物理交联策略四大类.

### 2.1.1 循环冻融

循环冻融是制备 PVA 基水凝胶的传统物理交联手段,其核心机理是通过反复的冻结-解冻循环

过程,诱导 PVA 分子链发生聚集与结晶<sup>[12,13]</sup>.在冻结阶段,体系中的溶剂水分子会结晶析出,此过程会挤压 PVA 分子链向局部区域富集并紧密排布,进而形成结晶微区;当体系解冻后,这些结晶微区不会消失,而是作为物理交联位点留存,经多次冻融循环后,结晶微区的数量与稳定性进一步提升,最终构建出致密的三维交联网络(图 2(a)).

### 2.1.2 氢键诱导交联

与冻融循环不同,氢键诱导交联的核心机理是基于分子间多重氢键的协同缔合作用. PVA 分子链上富含的羟基(—OH)兼具氢键供体与受体双重属性,可与单宁酸、 $\alpha$ -胍磷酸盐( $\alpha$ -ZrP)纳米片

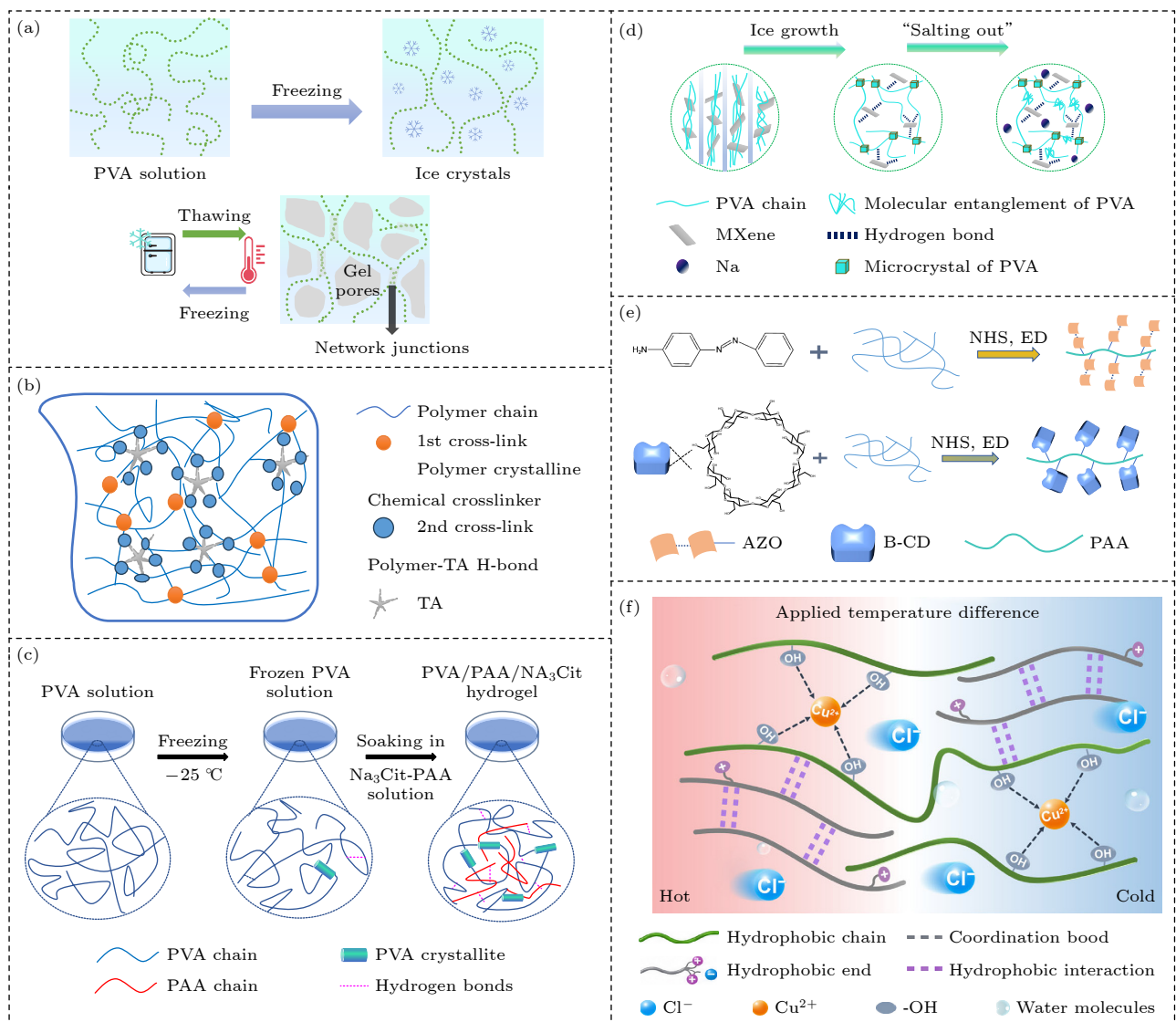


图 2 几种物理交联方法示意图 (a) 冻融循环<sup>[12]</sup>; (b) 氢键诱导交联<sup>[14]</sup>; (c) 盐析<sup>[16]</sup>; (d) 填充相复合交联<sup>[18]</sup>; (e) 主客体作用<sup>[19]</sup>; (f) 多元组分协同交联<sup>[20]</sup>

Fig. 2. Schematic diagrams of several physical cross-linking methods: (a) Freeze-thaw cycle<sup>[12]</sup>; (b) hydrogen bond-induced crosslinking<sup>[14]</sup>; (c) salting out<sup>[16]</sup>; (d) filler-phase cross-linking<sup>[18]</sup>; (e) host-guest interaction<sup>[19]</sup>; (f) multicomponent synergistic cross-linking<sup>[20]</sup>.

等添加剂分子中的羟基、羧基、氨基等活性基团形成特异性氢键作用<sup>[14,15]</sup> (图 2(b)). 虽然单一氢键属于弱相互作用, 但大量氢键位点的协同结合可构建稳定的三维网络结构; 同时, 氢键具有动态可逆特性, 在外力刺激或温度、pH 等环境参数变化时, 可发生断裂与重组, 进而赋予水凝胶自修复、环境响应性等特殊功能.

### 2.1.3 盐析交联

盐析交联则是通过高浓度盐离子 (硫酸钠、柠檬酸钠等) 的水合作用破坏 PVA 分子水合层, 促使分子链借助疏水作用与氢键聚集缠结形成三维网络 (图 2(c)), 该方法具备常温快速制备、工艺简单、成本低廉的显著优势, 但纯盐析形成的网络强度较弱, 且残留盐离子可能影响生物相容性, 因此常需通过脱盐处理或与其他方法联用优化性能<sup>[16,17]</sup>.

### 2.1.4 其他物理交联

除上述经典方法外, 其他创新型物理交联策略借助新型非共价相互作用, 通过复合组分引入或多元协同作用, 有效拓展了水凝胶的性能边界与应用场景 (图 2(d)–(f)): 一是填充相复合加固交联法, 引入新型填充相与加固组分, 依据界面相互作用原理, 填充相与 PVA 分子链通过氢键、范德瓦耳斯力形成界面结合, 结合加固组分协同调控水凝胶网络致密性与性能<sup>[18]</sup>; 二是接枝主客体识别交联法, 对 PVA 链进行功能性基团接枝修饰, 基于主客体包合原理, 利用接枝基团与改性组分的特异性识别推动分子链互锁, 构建稳定物理交联网络, 优化水凝胶力学、导电性能<sup>[19]</sup>; 三是多元组分协同交联法,

在 PVA 基体中引入多元组分, 依托非共价相互作用协同增强效应, 通过配位络合、 $\pi$ - $\pi$  堆积及疏水缔合协同作用, 强化分子链间结合力, 提升水凝胶网络机械强度与长期稳定性<sup>[20]</sup>.

以上几种常见物理交联方法的主要机理及优缺点对比可见表 1.

## 2.2 化学交联

化学交联是构建 PVA 基水凝胶三维网络的重要技术路径, 其核心原理是通过形成稳定的共价键或配位键实现聚合物链的交联互联. 相较于传统物理交联, 该方法制备的 PVA 水凝胶在力学强度、结构稳定性及抗溶胀性能上均展现出显著优势, 因而在生物医学、智能材料等领域具有广泛应用前景. 根据交联键的本质属性与形成机制的差异, 化学交联大致可分为六大类: 醛类交联、硼酸交联、金属离子配位交联、辐照交联、酶催化交联、点击化学交联.

### 2.2.1 醛类交联

醛类交联是 PVA 水凝胶制备中最为经典的化学交联技术, 其反应机制为交联剂分子中的醛基 ( $-\text{CHO}$ ) 与 PVA 聚合物链上的羟基 ( $-\text{OH}$ ) 等亲核基团发生缩合反应, 形成稳定的缩醛键, 进而构建三维交联网络 (图 3(a)). 该方法具有反应条件温和、交联效率高、适配聚合物范围广等特点, 通过调控反应参数可灵活构筑单网络或双网络水凝胶结构. 在实际应用中, 戊二醛 (GTA)、双醛淀粉 (CDS) 都是常用的醛类交联剂<sup>[21,22]</sup>.

表 1 几种物理交联方法对比  
Table 1. Comparison of several physical cross-linking methods.

交联方法	主要机理	优点	缺点	参考文献
循环冻融	反复冻融循环, 水分子结晶挤压 PVA 分子链形成结晶微区	无化学试剂, 生物相容性优异	耗时较长, 网络均匀性有限	生物医学领域
氢键诱导交联	PVA 羟基与添加剂活性基团形成多重协同氢键	常温交联, 工艺简便	单一氢键作用弱, 网络强度受添加剂影响大	常温制备、兼具响应性的水凝胶场景
盐析交联	高浓度盐离子破坏 PVA 水合层, 促使分子链通过疏水作用与氢键聚集缠结形成网络	常温快速制备, 工艺简单, 成本低廉	网络强度弱, 残留盐离子影响生物相容性	低成本、快速制备的简易水凝胶场景
填充相复合加固交联法	填充相与 PVA 通过氢键、范德瓦耳斯力结合, 协同加固组分调控网络结构与性能	可优化力学、导电性能, 拓展应用边界	需精准调控填充相分散性, 否则影响网络均匀性	高性能水凝胶相关场景
多元组分协同交联法	多元组分通过配位络合等非共价作用协同, 强化分子链结合力, 构建稳定网络	机械强度高、稳定性好, 性能可定制	组分搭配复杂, 需调控比例, 制备难度略高	对力学、稳定性要求高的水凝胶场景
接枝主客体识别交联法	PVA 接枝修饰后, 通过主客体识别推动分子链互锁, 构建稳定网络	结构可控, 可协同优化多重性能	需对 PVA 接枝修饰, 步骤较繁琐	高性能、多功能水凝胶场景

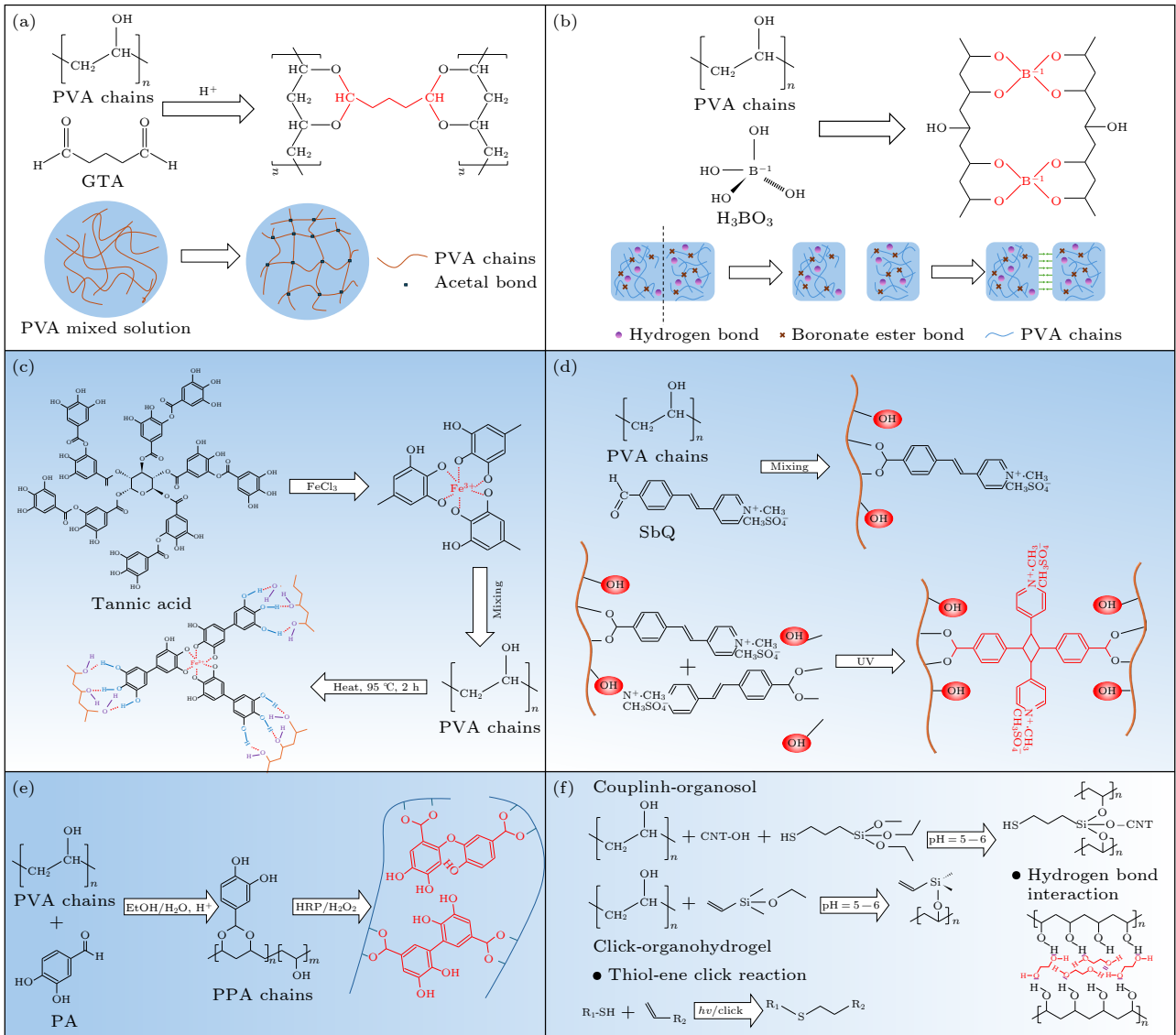


图 3 几种 PVA 水凝胶化学交联方法示意图 (a) 醛基交联<sup>[21]</sup>; (b) 硼酸交联<sup>[23]</sup>; (c) 金属离子配位交联<sup>[25]</sup>; (d) UV 照射交联<sup>[27]</sup>; (e) 酶催化交联<sup>[28]</sup>; (f) 点击化学交联<sup>[29]</sup>

Fig. 3. Schematic diagram of several chemical crosslinking methods for PVA hydrogels: (a) Aldehyde group crosslinking<sup>[21]</sup>; (b) borate crosslinking<sup>[23]</sup>; (c) metal ion coordination crosslinking<sup>[25]</sup>; (d) UV irradiation crosslinking<sup>[27]</sup>; (e) enzyme catalytic crosslinking<sup>[28]</sup>; (f) click chemistry crosslinking<sup>[29]</sup>.

### 2.2.2 硼酸交联

硼酸交联的核心作用机理为硼酸或硼酸盐分子中具有空轨道的硼原子, 与 PVA 聚合物链上的邻位二醇基团发生可逆络合反应, 邻位二醇的两个羟基氧原子以孤对电子与硼原子形成配位作用, 进而生成稳定的五元环硼酸酯键 (B—O—C); 多个硼酸/硼酸盐分子可作为分子间交联点, 桥接不同的线性 PVA 分子链, 使原本线性的 PVA 分子通过分子间的硼酸酯键相互缠结、连接, 最终构建起以动态硼酸酯键为交联核心的三维网状交联结构<sup>[23,24]</sup> (图 3(b)).

### 2.2.3 金属离子配位交联

金属离子配位交联的核心机理基于配位化学原理: 金属离子 (例如  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  等) 作为中心离子, 通过空轨道接受 PVA 链上官能团 (羧基、羟基、咪唑基等) 中氧、氮原子的孤对电子, 形成稳定配位键, 并作为物理-化学复合交联点桥接不同 PVA 分子链<sup>[25,26]</sup>. 多个交联点连接线性 PVA 链缠结形成三维交联网络 (图 3(c)). 该网络兼具物理交联的动态可逆性与化学交联的结构稳定性, 可显著提升水凝胶韧性与抗冲击性能.

### 2.2.4 辐照交联

辐照交联技术借助 $\gamma$ 射线、电子束或紫外光等辐照源释放的高能粒子或光子, 撞击 PVA 聚合物链使其分子键断裂, 激发产生大量活性自由基. 这些活性自由基通过自旋配对发生偶联反应, 形成稳定的共价交联键, 多个共价交联键相互连接, 将线性 PVA 分子链桥接缠结, 最终构建均匀的三维共价交联网络 (图 3(d)). 该过程无需添加额外化学交联剂, 可通过精准调控辐照剂量 (与自由基生成量正相关) 控制交联密度, 制备出纯度高、网络结构稳定的 PVA 水凝胶 [26,27].

### 2.2.5 酶催化交联

酶催化交联的核心机理是利用特异性酶 (如转谷氨酰胺酶、辣根过氧化物酶 HRP、酪氨酸酶等) 作为生物催化剂, 通过降低反应活化能, 定向识别 PVA 聚合物链上的特定官能团, 催化其发生选择性共价交联反应 [27,28]. 反应过程中, 酶的活性中心与 PVA 官能团特异性结合, 促使官能团之间形成稳定共价键, 这些共价键作为交联节点, 桥接不同线性 PVA 分子链, 缠结形成结构均匀的三维共价交联网络 (图 3(e)).

### 2.2.6 点击化学交联

点击化学交联基于高选择性、高效率的“点击反应” (如叠氮-炔环加成反应 (SPAAC)、巯基-烯反应 (thiol-ene)、Diels-Alder 反应等), 在温和反应条件下实现 PVA 聚合物链的精准交联, 形成稳定的共价键网络 [29] (图 3(f)). 该方法可实现交联点的均匀分布, 能够精准构筑多网络结构, 制备的水凝胶具有结构可控性强、性能稳定的特点. 以上几种化学交联方法的优缺点对比情况详见表 2.

## 3 PVA 基导电水凝胶性能优化

水凝胶具有三维网络结构, 水分子及溶解离子被网络束缚于孔隙与链段之间, 使材料兼具可变形特征与环境适应能力. 相较传统导电聚合物或高填料弹性体, 其优势在于结构与相互作用可设计: 通过调控交联方式与网络层级 (双/多网络、晶区与孔结构等) 实现强度、韧性与延展性的可调 [30-32]; 并引入氢键、硼酸酯/硼酸盐键、金属配位等动态可逆作用以增强耗能与可恢复性 [33-39]. 同时, 盐/离子液体及多元醇等组分工程可调控离子迁移与水分状态, 提升复杂工况下的稳定性. 因此, 导电水凝胶展现出卓越性能, 包括力学性能、导电性能、自愈合性能与抗冻性能.

### 3.1 力学性能优化

PVA 基导电水凝胶的力学性能主要受交联结构、组分组成及动态相互作用三大核心因素调控, 其中交联结构起决定性作用. 物理交联 (如循环冻融、氢键诱导) 可赋予材料柔韧性与可逆形变能力, 但网络松散导致力学强度和耐疲劳性不足; 化学交联 (如硼酸交联、辐射交联) 能形成稳定三维网络以提升拉伸强度与结构稳定性, 却易因交联密度失衡引发脆化或溶胀失控. 针对该力学问题, 通常采用“双网络构建+动态可逆作用引入”的优化策略: 双网络中刚性第一网络保障基本承载能力、柔性第二网络赋予良好形变能力, 动态键则通过受力断裂与应力释放后重组的过程耗散能量, 有效突破“高强度与高延展性难以兼顾”的核心矛盾 [30,31]; 同时, 精准调控交联参数可平衡交联密度与网络柔韧性, 构建多元复合体系能填补网络缺陷、增强界面结合

表 2 几种化学交联方法对比

Table 2. Comparison of several chemistry cross-linking methods.

交联方法	主要机理	优点	缺点	主要应用场景
醛类交联	醛类交联剂与PVA羟基发生缩合反应, 形成缩醛键	反应温和、效率高, 可灵活构筑单/双网络	常用戊二醛有细胞毒性, 生物相容性较差	可穿戴传感等(选用相容性交联剂)
硼酸交联	硼酸与PVA邻位二醇可逆络合, 形成硼酸酯键	制备简便, 兼具自修复、动态可逆性	网络稳定性受pH、离子强度影响大	智能传感、柔性电子等领域
金属离子配位交联	金属离子与PVA官能团形成配位键, 桥接分子链	网络兼具动态性与稳定性, 力学韧性、抗冲击性优异	易受环境离子强度干扰, 复杂环境中性能易衰减	柔性电子、智能材料等场景
辐照交联	辐照使PVA产生自由基, 自由基偶联形成共价键	无需化学交联剂, 纯度高、网络均匀	成本高、需严格控制辐照参数	生物医用等高纯度要求领域
酶催化交联	酶催化PVA特定官能团发生共价交联, 形成交联节点	反应特异性强、可精准调控, 生物相容性好	酶试剂成本高, 反应条件需适配酶活性	3D生物打印、组织工程支架等领域
点击化学交联	通过高选择性点击反应, 实现PVA精准交联	可精准构筑多网络, 结构可控、性能稳定	步骤繁琐, 试剂成本高, 限制大规模应用	高性能、结构可控的水凝胶场景

力, 结合多元溶剂改性可实现力学性能与导电性能的协同适配, 可进一步满足可穿戴监测的实际需求 [32-34].

相关研究实例印证了各优化策略的有效性, 例如 Chen 等 [30] 借助动态键协同耗散能量, 使水凝胶延伸率最高可达 1500%, 优化后应力从 20.10 kPa 提升至 28.14 kPa (图 4(a)); Chen 等 [31] 调控晶区分布, 实现了强度与延展性平衡, 材料最大应变可达 2625% (图 4(b)); Zhu 等 [32] 依托致密网络与层级孔结构, 使水凝胶获得 5000% 超高断裂伸长率

及 10.1 S/m 电导, 且在 -24 °C 下性能稳定, 为柔性应变传感器高性能化提供支撑 (图 4(c)).

### 3.2 导电性能优化

在柔性应变传感应用场景中, PVA 基导电水凝胶的核心设计导向并非单纯追求高初始电导值, 而是要在大形变循环、低温环境、水分流失等复杂扰动工况下, 维系离子迁移通道的结构稳定性, 进而实现电阻信号的可重复输出与低漂移特性. 针对这一核心目标, 其导电性能目前主要通过两个方

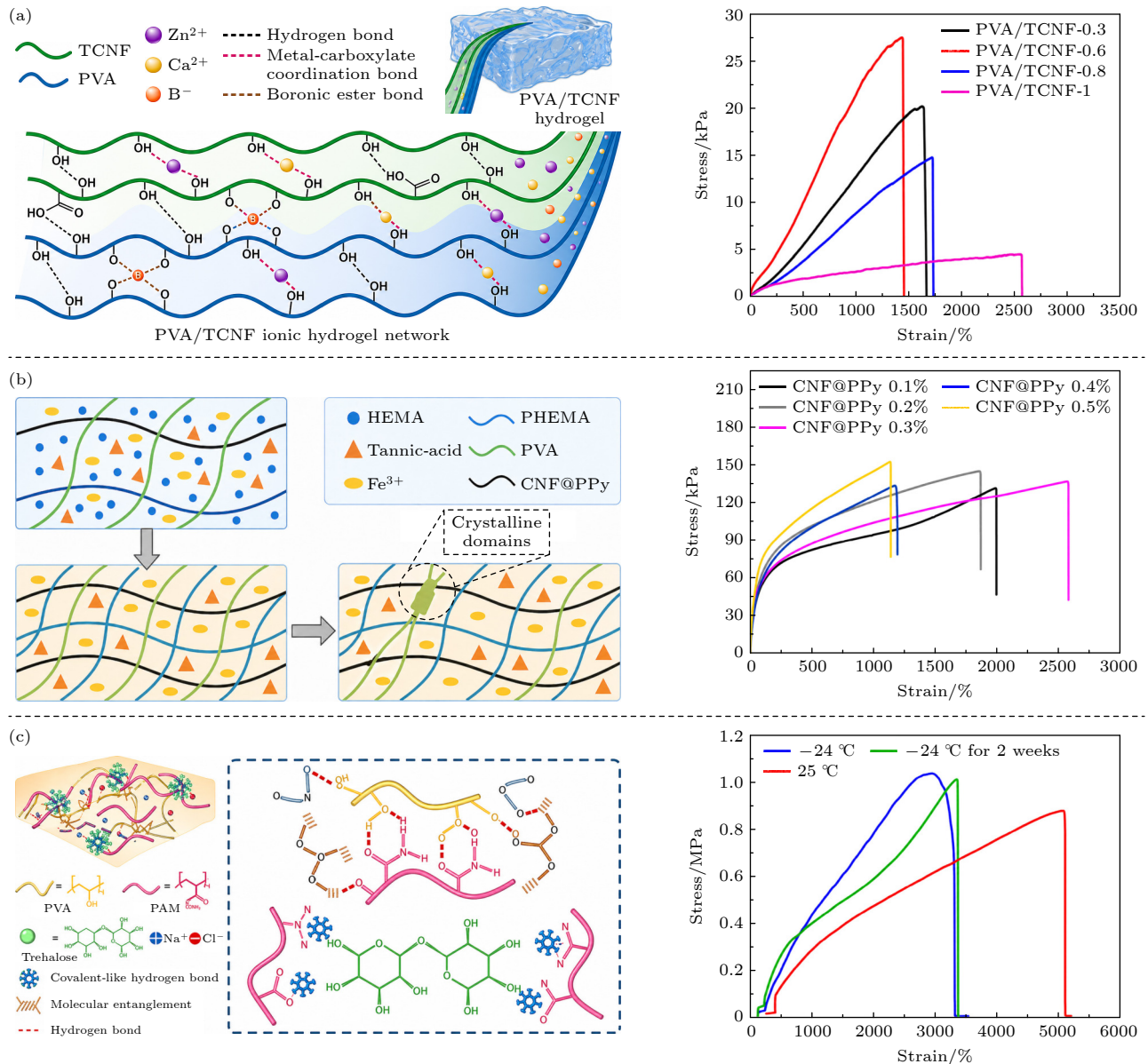


图 4 PVA 水凝胶力学性能优化示例 (a) PVA/TCNF 双网络水凝胶制备及其力学测试 [30]; (b) PVA-PHEMA 双网络水凝胶结构及力学测试 [31]; (c) N-OHG 水凝胶结构及其力学测试 [32]

Fig. 4. Examples of optimizing the mechanical properties of PVA hydrogels: (a) Preparation and mechanical testing of PVA/TCNF dual-network hydrogel [30]; (b) structure and mechanical testing of PVA-PHEMA dual-network hydrogel [31]; (c) the crosslinking mechanism and mechanical testing of N-OHG hydrogels [32].

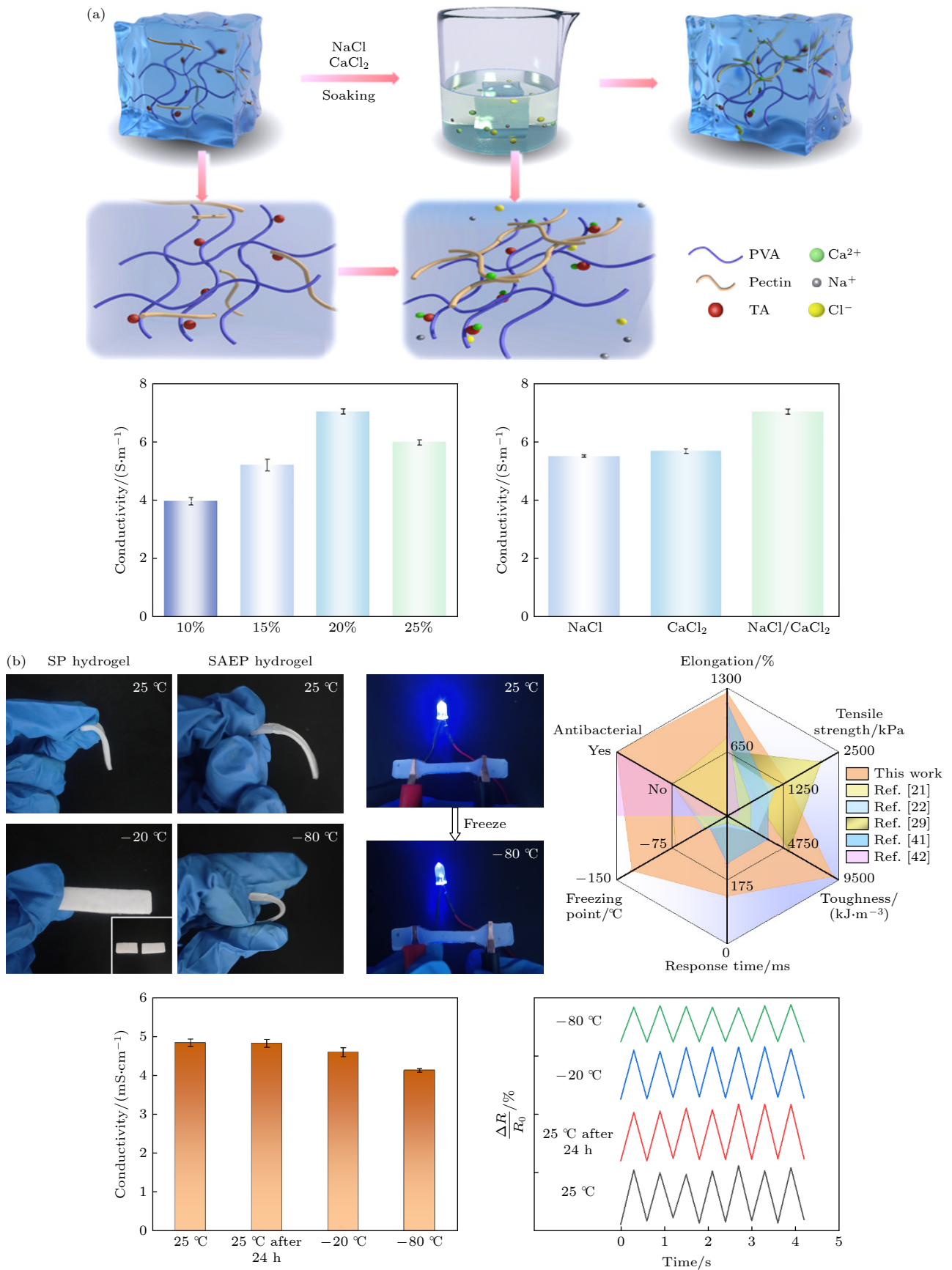


图 5 PVA 水凝胶的导电性优化示例 (a) 果胶/PVA/TA/CaCl<sub>2</sub>/NaCl 水凝胶及其导电性<sup>[35]</sup>; (b) SAEP 水凝胶低温导电性<sup>[36]</sup>  
 Fig. 5. Examples of conductivity optimization of PVA hydrogel: (a) Pectin/PVA/TA/CaCl<sub>2</sub>/NaCl hydrogel and its conductivity<sup>[35]</sup>; (b) low temperature conductivity of SAEP hydrogel<sup>[36]</sup>.

面来进行优化: 一是调控载流离子与溶剂体系. Liu 等 [35] 开发了果胶/PVA/TA(单宁酸)/CaCl<sub>2</sub>/NaCl 双网络凝胶, 研究了离子浓度对凝胶导电性能的影响, 结果表明, 导电性随着离子浓度的增大呈现先增大后减小的趋势 (图 5(a)). 因此, 可通过适当提升离子浓度增加载流子数量、降低迁移阻力; 改善溶剂化环境可削弱离子缔合及与凝胶骨架的吸附作用, 有效降低离子迁移能垒. 两者有效结合, 可显著提高凝胶的导电性能. 二是针对低温环境引入多元醇构建复合溶剂体系, 依托多元醇与水分子形成的致密氢键网络, 既能抑制低温下冰晶形成、维系溶剂相流动性, 又能提升保水能力、减少水分挥发, 避免离子迁移通道因环境扰动发生破损, 维持导电稳定性. Xu 等 [36] 采用淀粉/PVA 双网络与离子液体/乙二醇/水三元溶剂体系, 制备了具有良好的抗冻 (-128.9 °C) 和保湿性能 (20 天后仍保持重

量的 88.10%) 的 SAEP 水凝胶, 破解了低温、失水等难题 (图 5(b)).

### 3.3 自愈合性能优化

针对 PVA 基导电水凝胶导电通路对裂纹敏感、传统体系易出现“结构愈合但电学难恢复”的问题, 研究人员通过精准设计体系结构与交联作用, 基于不同物理机理, 实现了凝胶自愈合性能的显著提升. Zhang 等 [37] 将 PVA/碳纳米管 (CNTs) 与 PVA/石墨烯进行复合, 构建了“岛-桥”型网络结构, 其中石墨烯相作为导电“岛”, CNT 相作为连接“桥”, 为导电路径快速重连提供空间结构支撑; 同时, 通过在 PVA 链之间引入动态硼酸酯键, 实现了室温下切割后接触即可自发重组的自愈合效果 (图 6(a)). Zhao 等 [38] 构建了 MXene/PEDOT: 水凝胶, 破解了低温、失水等难题 (图 5(b)).

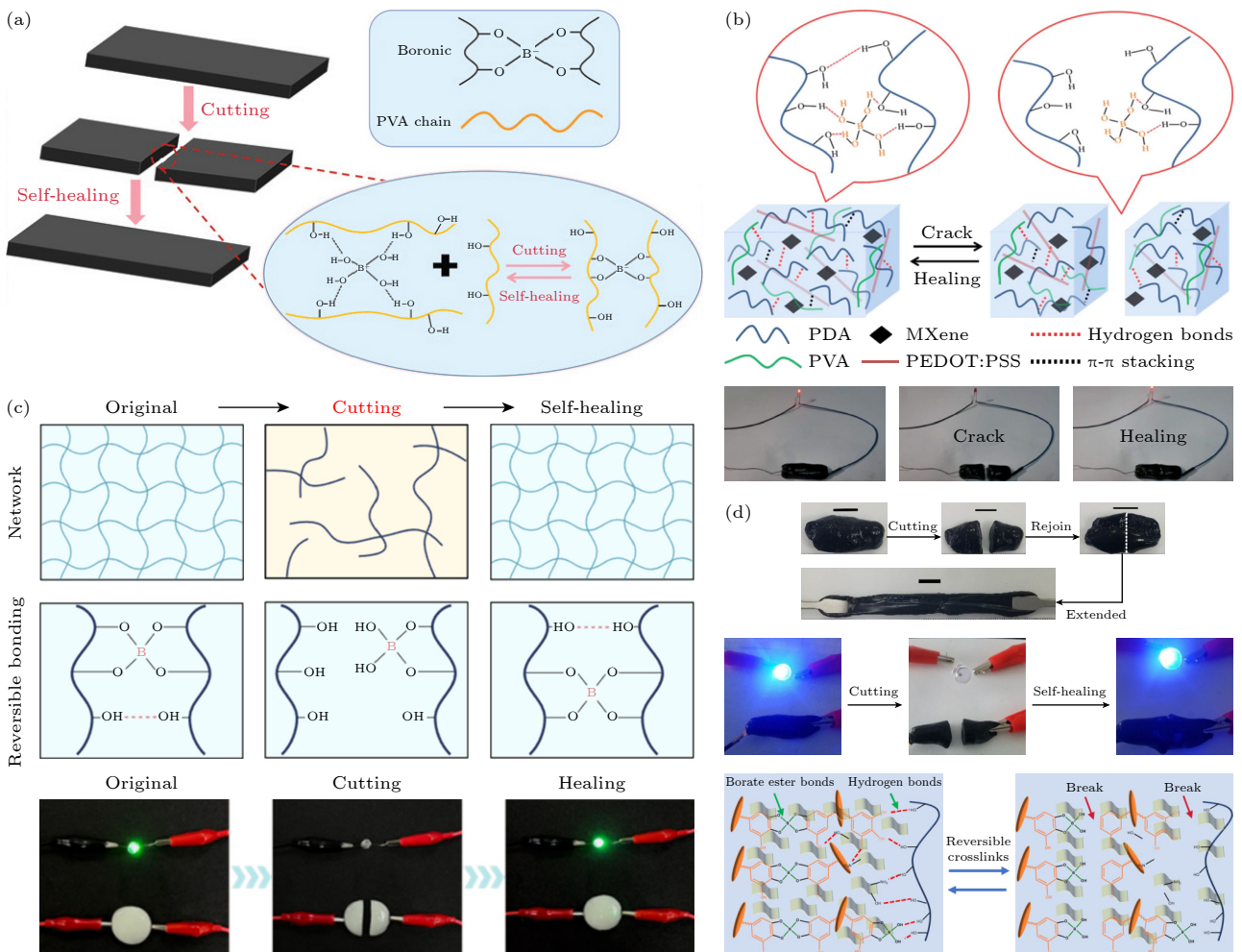


图 6 几种可自愈的 PVA 基水凝胶及其机理 (a) PVA/CNTs/石墨烯水凝胶自愈机理 [37]; (b) MXene/PEDOT:PSS/PVA/PDA 水凝胶自愈机理 [38]; (c) PBHT-N 水凝胶自愈机理 [39]; (d) PB-TA@CNC-pRGO4 水凝胶自愈机理 [40]

Fig. 6. Several self-healing PVA-based hydrogels and their mechanisms: (a) Self-healing mechanism of PVA/CNTs/graphene hydrogel [37]; (b) MXene/PEDOT:PSS/PVA/PDA hydrogel self-healing mechanism [38]; (c) PBHT-N hydrogel self-healing mechanism [39]; (d) PB-TA@CNC-pRGO4 hydrogel self-healing mechanism [40].

PSS/PVA/聚多巴胺 (PDA) 动态超分子交联体系, 具有快速自愈性能 (1.8 s 内完成修复), 其核心物理机理是: 聚合物链在损坏界面的局部扩散依赖网络中分子链的高流动性, 而该体系中大量解离的硼酸酯键和羟基具有极高的迁移率, 可在断裂界面快速找到对应基团, 从而实现水凝胶的快速自愈 (图 6(b)). Nam 等<sup>[39]</sup> 则通过在 PVA/硼砂网络中引入透明质酸 (HA) 与单宁酸 (TA), 借助 HA 与 TA 提供的多点氢键, 以及羟基、硼砂与 TA 之间形成的可逆动态硼酸酯键, 驱动了受损界面的快速黏合与网络重构, 实现了凝胶的快速自愈 (图 6(c)). Liu 等<sup>[40]</sup> 研究的 PB-TA@CNC-pRGO4 水凝胶, 其自愈过程依赖两种动态键的协同作用: 一是 TA@CNC 纳米杂化的可逆动态儿茶酚-硼酸盐键, 二是 TA@CNC, PVA, pRGO 与 PDA 分子之间的超分子相互作用, 两类可逆键协同发力, 保障了水凝胶受损后结构与电学性能的高效恢复 (图 6(d)).

### 3.4 抗冻性能优化

除上述性能外, 寒冷环境下的性能失效是 PVA 基导电水凝胶实现实际应用的另一核心瓶颈, 其原因可归纳为: 低温下, 水凝胶内部自由水发生相变结冰, 形成的冰晶会直接破坏 PVA 分子链间的氢键交联网络. 从力学层面看, 刚性冰晶会刺穿凝胶交联结构, 限制分子链段的迁移能力, 导致材料脆性显著增大、力学性能大幅下降; 从电学层面分析, 结冰后的自由水被固定于冰晶晶格中, 不仅堵塞离子传输通道, 还会显著增大离子迁移位阻, 最终引发传感器灵敏度漂移、信号失真, 严重时可导致器件彻底失效. 针对低温劣化瓶颈, PVA 基抗冻导电水凝胶的优化主要聚焦于两大核心路径.

一是采用溶剂体系调控策略, 通过优化溶剂组成降低自由水比例, 从而抑制冰晶生长, 同时维持离子迁移能力. 其中甘油、DMSO、乙二醇等均为常用抗冻溶剂, 它们可与水分子形成强氢键作用, 既能削弱自由水的结晶趋势, 又能优化离子溶剂化环境、降低离子迁移阻力, 实现抗冻性与导电性的协同提升<sup>[41-43]</sup>. 如 Li 等<sup>[41]</sup> 采用 DMSO/水混合溶剂组装 PVA-CNF- $Al^{3+}$  水凝胶, 该水凝胶可在  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  下保持柔韧, 工作温域扩展至  $-50\text{—}50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (图 7(a), (b)).

二是结构/组分增强策略, 通过引入多重氢

键、离子配位、纳米增强等作用, 构建稳定的交联网络以缓解冰晶应力, 同时阻碍冰晶生长. 具体而言, 多重氢键可通过可逆断裂与重组耗散冰晶产生的应力, 离子配位作用可作为额外交联点强化网络刚性, 纳米粒子则作为物理交联位点分散于凝胶体系中, 既能直接阻碍冰晶生长, 部分纳米粒子还可辅助离子传输, 最终实现低温下凝胶韧性、网络完整性与离子迁移能力的同步维持<sup>[42-44]</sup>. 如 Bao 等<sup>[42]</sup> 结合了两种抗冻策略, 构建了 PVA/SNFs/CN 复合水凝胶, 使凝胶在  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  下仍兼具柔韧与导电性 (图 7(c), (d)).

## 4 PVA 导电水凝胶在体征监测中的应用研究

PVA 导电水凝胶凭借高柔韧性、生物相容性与离子导电性的协同优势, 成为体征监测柔性传感器的核心敏感材料. 在体征监测场景中, PVA 导电水凝胶基传感器可紧密贴合皮肤表面, 实时捕捉关节屈伸、肌肉收缩、肢体摆动等动作产生的形变, 并将其转化为可检测的电信号变化; 例如, 贴附于手指、手腕、膝关节等部位的传感器, 能够精准识别手势动作、步态特征与运动幅度, 且具备耐汗液侵蚀、低皮肤刺激性、可重复使用等特点, 适配日常运动、康复训练、医疗评估等多场景需求.

### 4.1 主要工作机理及相关建模

#### 4.1.1 PVA 导电水凝胶传感机理

PVA 导电水凝胶凭借高柔韧性、生物相容性与离子导电性的协同优势, 成为体征监测柔性传感器的核心敏感材料, 其主要工作机理源于形变与电信号之间的可逆转换特性. PVA 导电水凝胶的导电机理以离子导电为主, 其内部通常掺杂  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  等无机离子或有机导电组分作为电荷载体, 这些电荷载体均匀分散于 PVA 水凝胶三维网络结构中, 构成连续且稳定的离子导电通路, 为电信号的传导与转换提供结构基础. 在体征监测场景中, PVA 导电水凝胶基传感器可紧密贴合皮肤表面, 当人体发生关节屈伸、肌肉收缩、肢体摆动等动作时, 水凝胶贴片会随皮肤同步发生拉伸、压缩或弯曲形变, 该机械形变会直接改变内部离子导电通路的结构空间结构与离子迁移特性, 进而将机械形变信号

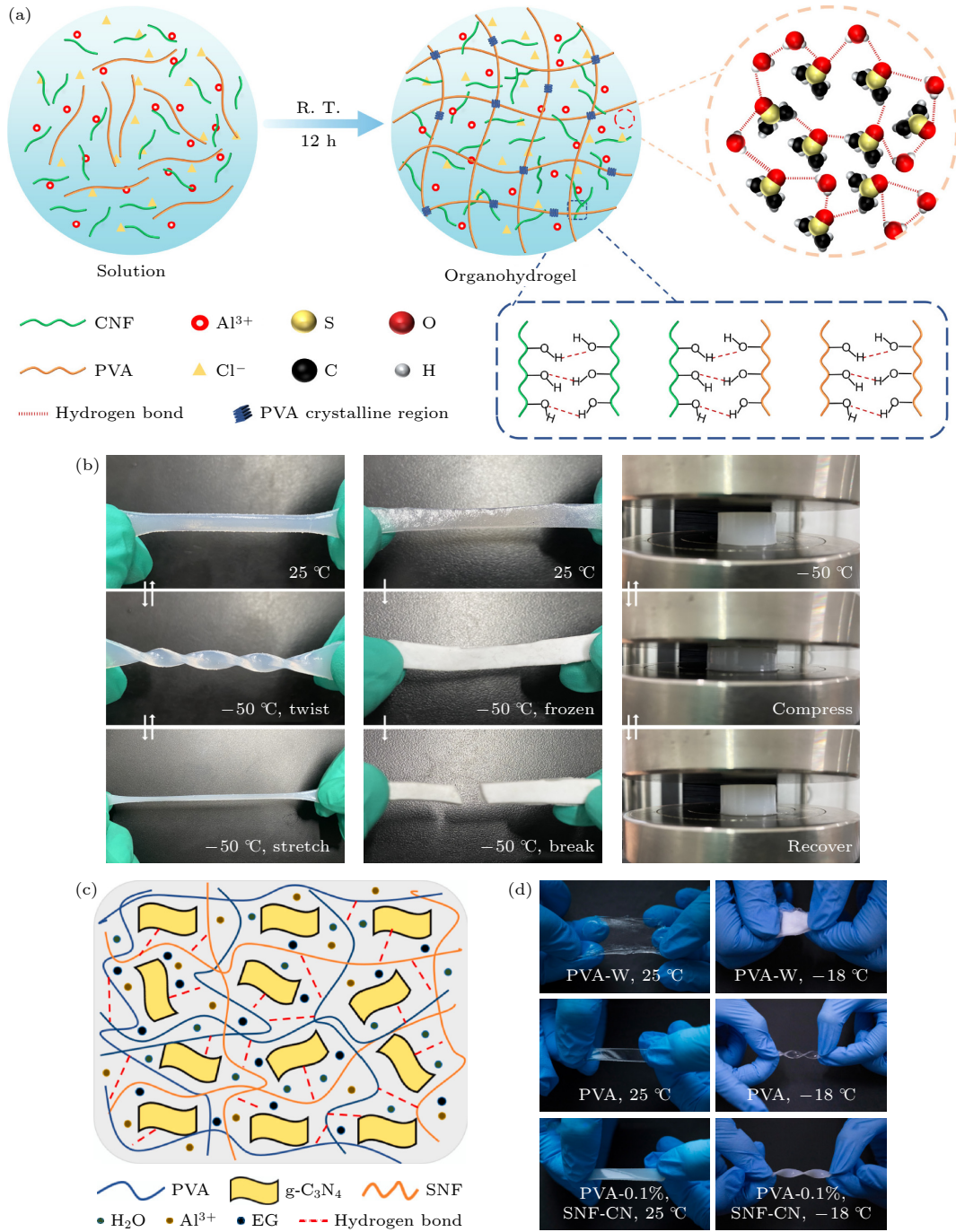


图 7 PVA 水凝胶抗冻性能优化示例 (a), (b) PVA-CNF-Al<sup>3+</sup>水凝胶及其抗冻性测试<sup>[41]</sup>; (c), (d) PVA/SNFs/CN 水凝胶及其抗冻性测试<sup>[42]</sup>

Fig. 7. Example of optimization of freeze resistance performance of PVA hydrogel: (a), (b) PVA-CNF-Al<sup>3+</sup> hydrogel and its freeze resistance test<sup>[41]</sup>; (c), (d) PVA/SNFs/CN hydrogel and its freeze resistance test<sup>[42]</sup>.

可逆转换为可精准检测的电信号变化<sup>[43-50]</sup>. 其工作机理如图 8 所示, 图中示例以 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 作为凝胶内导电离子, 当凝胶受到外力时, 凝胶网络变形, 导电离子会从受力点向两侧移动, 但由于 Na<sup>+</sup> 比 Cl<sup>-</sup> 体积小重量轻, 移动速度相对较快, 导致受力一侧的电势较低. 因此, 通过电势差的变化, 便能实现对凝胶受力情况的监测和分析.

#### 4.1.2 PVA 导电水凝胶多物理场耦合建模

PVA 导电水凝胶的多物理场耦合传感机理核心是围绕其导电机理 (离子导电、电子导电或离子-电子混合导电) 与外界多场刺激 (力学、化学、温度、电场等) 的协同作用展开, 本质是凝胶网络结构演变、电荷输运特性变化与多场刺激的耦合响应.

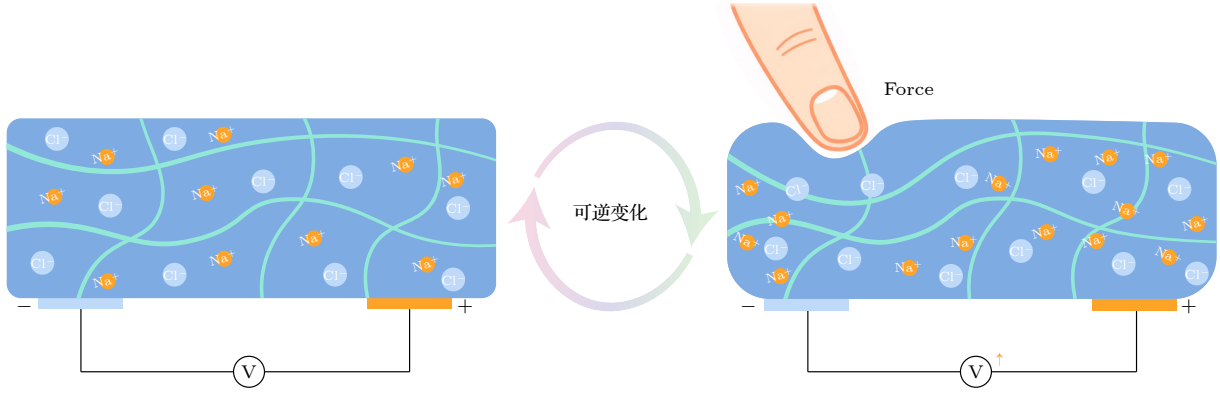


图 8 PVA 导电水凝胶传感机理

Fig. 8. Sensing mechanism of PVA conductive hydrogel.

离子型 PVA 导电水凝胶的导电机理主要依赖凝胶网络中自由离子 (如  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) 的迁移, 其离子迁移能力与凝胶溶胀度、离子浓度密切相关, 而溶胀度受化学刺激 (pH 值、离子浓度) 和力学刺激的调控, 遵循范特霍夫渗透压公式 [45,46]:

$$\Pi = iCRT, \quad (1)$$

其中,  $\Pi$  为渗透压,  $i$  为范特霍夫因子,  $C$  为溶质摩尔浓度,  $R$  为理想气体常数,  $T$  为绝对温度.

化学刺激通过改变内部渗透压引发凝胶溶胀或收缩, 进而改变离子迁移路径与浓度, 力学刺激则通过压缩或拉伸凝胶网络改变离子通道宽度, 二者协同通过压阻效应影响电导率, 此过程可通过灵敏度公式量化表征 [45,46]:

$$GF = (\Delta R/R_0)/\epsilon, \quad (2)$$

其中,  $GF$  为灵敏度,  $\Delta R/R_0$  为相对电阻变化,  $\epsilon$  为应变.

电子型 PVA 导电水凝胶则通过引入碳纳米管 (CNTs)、聚吡咯 (PPy) 等导电填料形成连续导电网络, 力学刺激导致导电网络接触点变化或网络断裂, 进而引发电阻突变, 其耦合机理聚焦于力学形变与电子传输效率的关联 [47].

温度场则通过 Arrhenius 型关系调控电荷传输效率与凝胶黏弹性, 形成热-力-电耦合响应 [48].

目前, PVA 导电水凝胶多物理场耦合传感建模研究主要基于不同耦合类型的物理机理, 结合数值方法与理论公式实现响应特性的定量预测. 在化-力-电耦合建模中, Luo 等 [49] 基于泊松-玻尔兹曼方程构建耦合模型, 量化多场协同传感机理, 方程如下:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho(r)/\epsilon, \quad (3)$$

其中,  $\varphi$  为电势,  $\rho(r)$  为电荷密度,  $\epsilon$  为介电常数. Kazimierska-Drobny 等 [45] 利用范特霍夫渗透压公式, 建立盐浓度与凝胶形变、电导率的关联模型. 在电子-力学与热-力-电耦合建模中, Gu 等 [47]、Shin 等 [46] 分别针对不同导电类型水凝胶, 建立了应变传感与多模态耦合模型; Liu 等 [48] 结合时温等效原理建立了温度干扰校正模型, 从而提升了传感精度.

整体而言, 目前相关建模均以 PVA 导电水凝胶本征导电机理与多场耦合过程为核心, 通过经典物理公式量化机理, 但复杂多场耦合建模缺乏统一框架、导电填料分散不均导致的建模误差等问题仍待解决 [50,51]. 施晶等 [50] 指出, 未来需整合耦合机理、优化模型参数, 为柔性电子、生物医学等领域应用提供理论支撑.

## 4.2 体征监测应用研究

### 4.2.1 关节活动监测

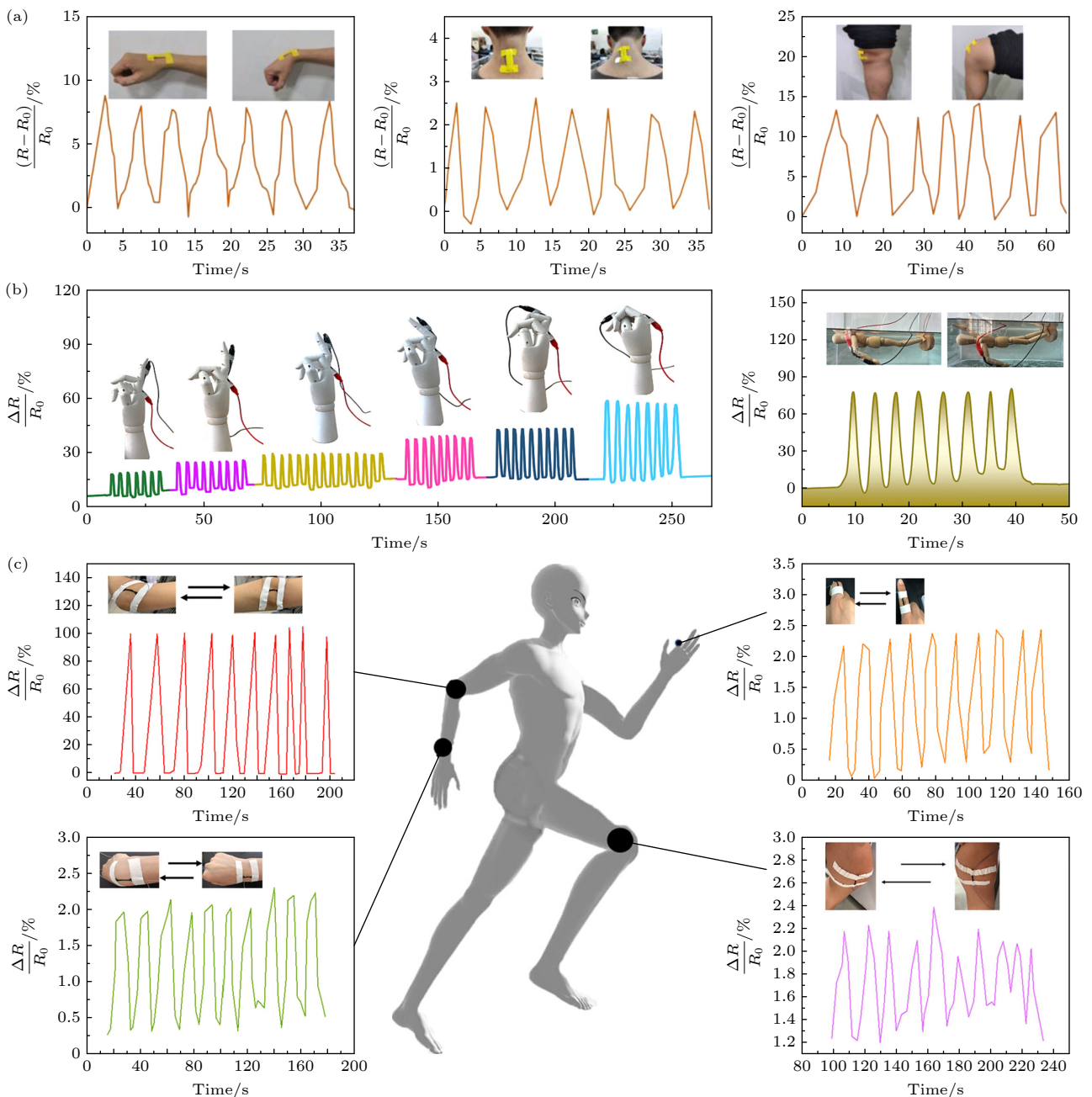
PVA 导电水凝胶凭借优异的形变响应灵敏度与电学稳定性, 是关节活动监测柔性传感元件的理想材料. 其可加工为超薄柔性贴片, 紧密贴合人体肘关节、膝关节等活动部位, 当关节发生屈伸、旋转等动作时, 水凝胶贴片随关节运动产生拉伸或压缩应力, 引发内部三维交联网络可逆形变, 进而实现机械信号向电信号的精准转换: 拉伸使交联网络间距增大, 离子迁移路径延长、阻力上升、浓度降低, 电阻呈线性上升; 压缩则使网络间距缩小, 离子迁移路径缩短、阻力减小、浓度升高, 电阻呈线性下降, 且电阻变化量与形变程度呈良好线性相关. 借助信号采集与分析系统, 可将电信号转化为关节活动角度、幅度、频率等量化参数, 实现实时精准监测 [43-46].

科研团队围绕凝胶传感器低温耐受性、力学性能、传感灵敏度三大核心需求,研发出了适配不同场景下关节监测的凝胶体系. Li 等<sup>[52,53]</sup>分别经  $MgCl_2$  与乙二醇协同改性、复合构建等方式,制备出兼具优异力学性能、 $-20\text{ }^\circ\text{C}$  低温稳定性,且部分具备高透光率的水凝胶,可精准实现关节细微动作及多部位关节的全面监测(图 9(a), (b)); Gong 等<sup>[54]</sup>设计的复合水凝胶突破了导电性与机械性能难以兼顾的技术瓶颈,能够精准捕捉关节与肌肉的联动运动信号(图 9(c)); Gao 等<sup>[55]</sup>构建的 M-PVA 水凝胶则具备超拉伸、超压缩特性及 $-50\text{ }^\circ\text{C}$  极端

低温耐受性,为高寒环境下的关节活动监测及相关智能可穿戴设备研发提供了关键技术支撑(见图 9(d)).

#### 4.2.2 肌肉活动检测

除关节活动监测外, PVA 导电水凝胶凭借优异的生物相容性、高弹性及离子导电特性,成为肌肉活动监测柔性传感元件的理想选择,在人体肌肉活动监测中应用价值突出. 当肌肉收缩或舒张时,会对表面贴合的水凝胶传感器产生周期性机械应力,促使水凝胶内部三维交联网络发生可逆伸缩形变,进而改变网络内掺杂离子的迁移路径、阻力及



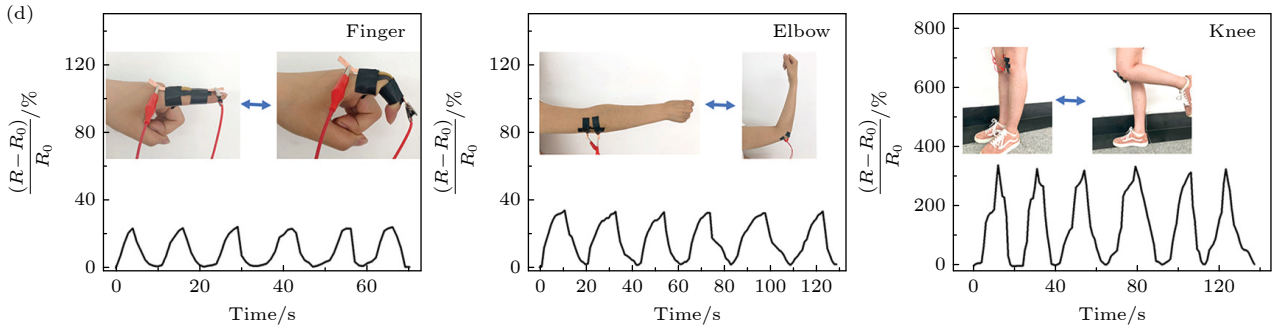


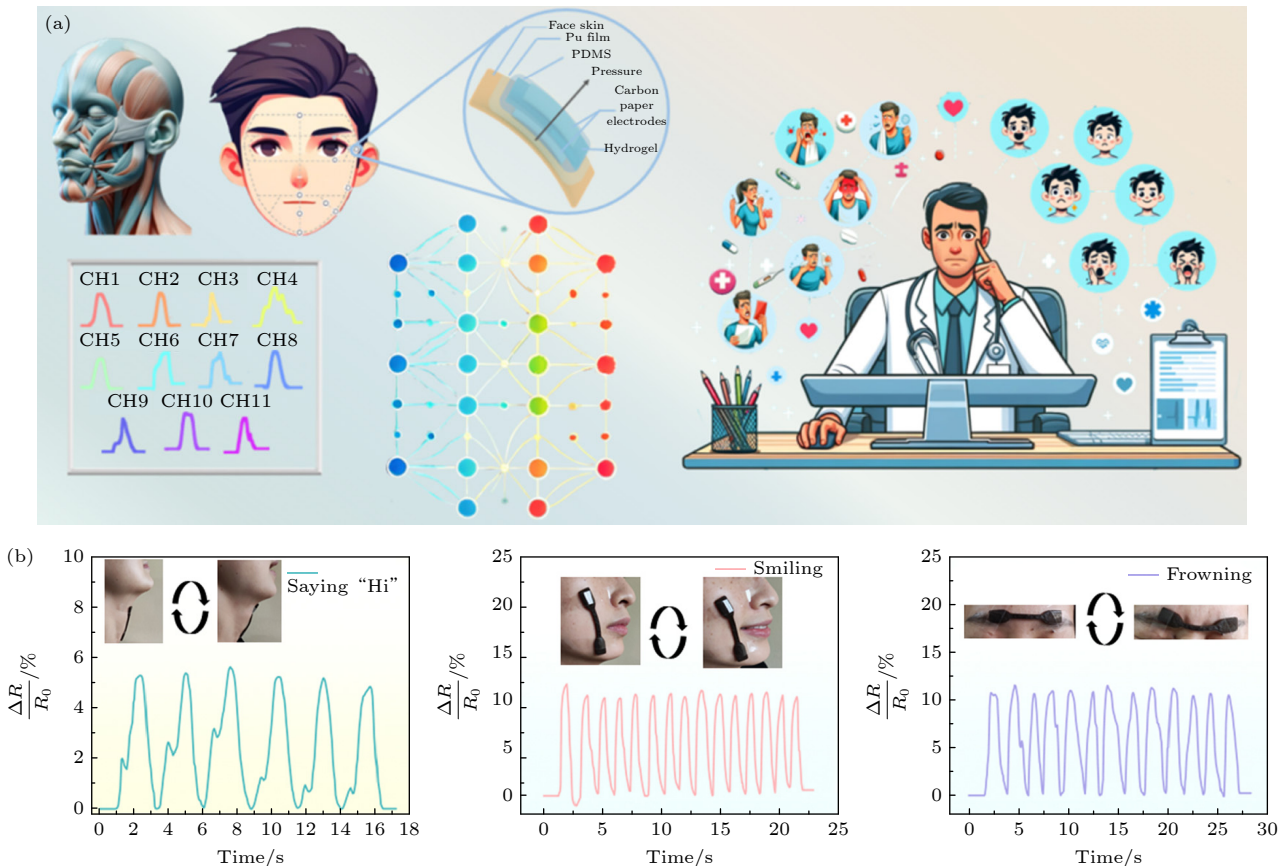
图 9 PVA 基导电水凝胶用于人体关节活动监测 (a) PVA/EG 导电水凝胶关节活动监测<sup>[52]</sup>; (b) PDCATL 复合有机水凝胶关节活动监测<sup>[53]</sup>; (c) M-PVA 水凝胶关节活动监测<sup>[54]</sup>; (d) PVA/P(AA-co-AM)/PDA@CNTs 水凝胶关节活动监测<sup>[55]</sup>

Fig. 9. PVA-based conductive hydrogel for human joint activity monitoring: (a) PVA/EG conductive hydrogel for joint activity monitoring<sup>[52]</sup>; (b) PDCATL composite organic hydrogel for joint activity monitoring<sup>[53]</sup>; (c) M-PVA hydrogel for joint activity monitoring<sup>[54]</sup>; (d) PVA/P(AA-co-AM)/PDA@CNTs hydrogel for joint activity monitoring<sup>[55]</sup>.

浓度分布, 导致离子迁移效率规律性变化; 这种变化可依据欧姆定律或电容变化规律, 转化为可精准采集的电阻/电容信号波动, 经信号解调与算法分析, 即可量化获取肌肉活动的强度、频率及持续时间等关键参数<sup>[56-61]</sup>.

已有多项代表性研究验证并拓展了 PVA 导电水凝胶在肌肉活动监测中的应用价值, 如 Cui 等<sup>[56]</sup>将 PVA 与结冷胶、甘油复合并结合热电离子对, 构建的自供电热凝胶贴片可通过温变-形变双重

响应协同捕捉信号, 实现面部肌肉活动的精准监测 (图 10(a)); He 等<sup>[57]</sup>研发的多功能导电有机水凝胶具备宽温域适应性与快速响应恢复能力, 可稳定监测肌肉活动信号并作为生物电极采集肌电图 (图 10(b)); Zhuge 等<sup>[58]</sup>则通过 PVA 与丝纳米纤维、PEDOT:PSS 复合制备水凝胶, 并引入乙二醇实现抗冻改性, 制备的水凝胶织物兼具高机械强度与低温导电性 (图 10(c)), 为高性能肌肉监测传感器的研发提供了创新思路.



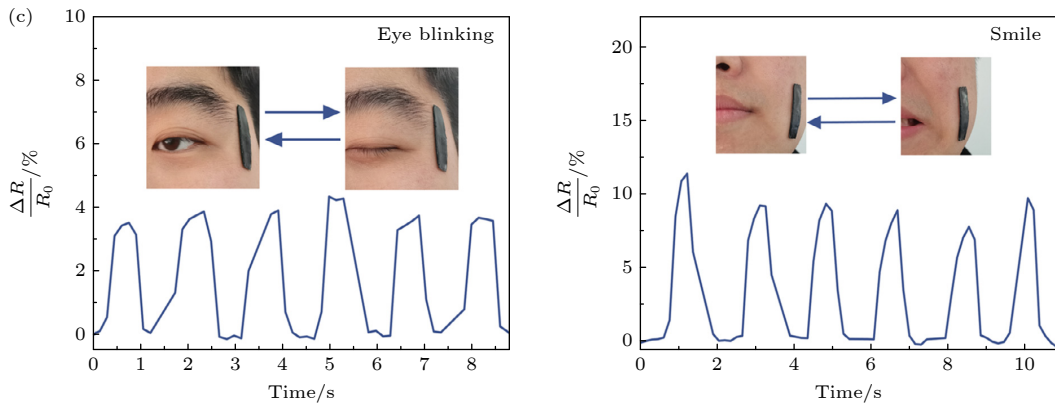


图 10 PVA 基导电水凝胶用于人体肌肉活动监测 (a) 面部肌肉活动监测及表情识别<sup>[56]</sup>; (b) 多位点肌肉活动监测<sup>[57]</sup>; (c) 面部活动监测<sup>[58]</sup>

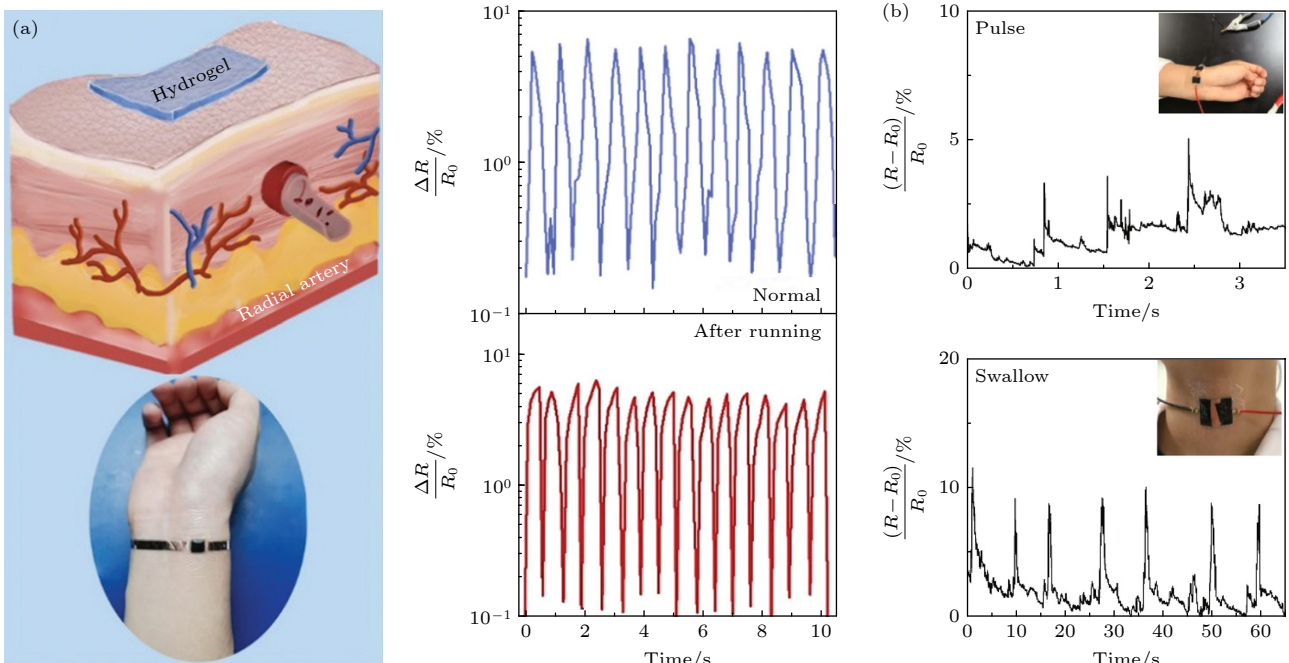
Fig. 10. PVA-based conductive hydrogel for human muscle activity monitoring: (a) Facial muscle activity monitoring and expression recognition<sup>[56]</sup>; (b) multi-site muscle activity monitoring<sup>[57]</sup>; (c) facial activity monitoring<sup>[58]</sup>.

#### 4.2.3 脉搏、吞咽、呼吸监测

PVA 导电水凝胶凭借其优异的柔韧性、生物相容性与灵敏的力-电响应特性, 不仅能稳定捕捉人体关节屈伸、肌肉收缩舒张等大幅度肢体活动产生的力学形变; 还可凭借其超高的应变灵敏度与快速的响应恢复能力, 敏锐感知脉搏跳动、吞咽动作、呼吸起伏等微小生理活动带来的细微力学刺激, 即便极其微弱的形变也能被实时捕捉并转化为清晰可辨的电信号输出, 从而为人体生理信号的全面、精细化监测提供可靠的柔性传感支撑<sup>[62-65]</sup>.

为此, 国内外科团队开展了系列突破性凝胶传感研究, Zhang 等<sup>[62]</sup> 利用动态氢键构建聚多

巴胺修饰还原石墨烯氧化物/PVA 复合水凝胶, 实现了全尺度人体运动的一体化精准监测 (图 11(a)); Pan 等<sup>[63]</sup> 创新性构筑毛发状可调微结构离子水凝胶膜, 达成宽压力区间的分级高灵敏度传感, 适用于脉搏波精准检测 (图 11(b)); Yan 等<sup>[64]</sup> 研发 PVA 增强的全木质水凝胶, 在实现全尺度运动监测的同时兼具自然可降解特性, 实现了材料的绿色化升级 (图 11(c)); Li 等<sup>[65]</sup> 通过构建双网络热敏水凝胶器件并调控溶剂体系, 赋予器件优异的低温耐久性与抗干燥能力, 实现了低温环境下的自供电呼吸监测, 为可穿戴医疗电子设备研发开辟了新方向 (图 11(d)).



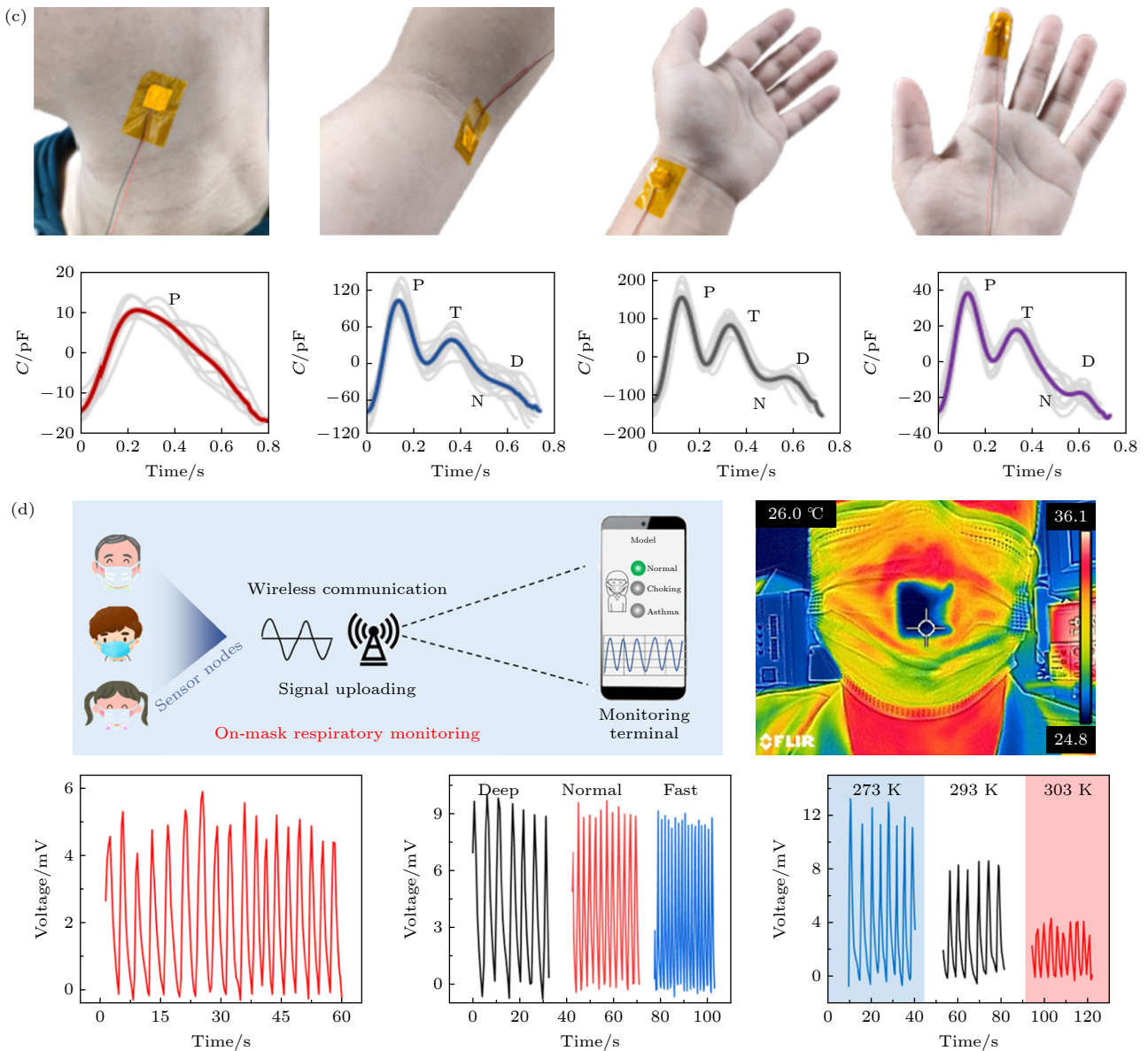


图 11 PVA 基导电水凝胶用于监测人体脉搏、吞咽及呼吸 (a) 手腕脉搏监测<sup>[62]</sup>; (b) 多位点脉搏波监测<sup>[63]</sup>; (c) 脉搏及吞咽监测<sup>[64]</sup>; (d) 呼吸监测<sup>[65]</sup>  
 Fig. 11. PVA-based conductive hydrogel for monitoring human pulse, swallowing and breathing: (a) Wrist pulse monitoring<sup>[62]</sup>; (b) multi-site pulse wave monitoring<sup>[63]</sup>; (c) pulse and swallowing monitoring<sup>[64]</sup>; (d) breathing monitoring<sup>[65]</sup>.

#### 4.2.4 其他人体活动监测

PVA 基导电水凝胶凭借柔韧性佳、导电性优良、灵敏度高的核心优势, 不仅能对关节、肌肉活动, 以及脉搏、呼吸等人体生理活动进行监测, 还可作为柔性电极用于心电 (ECG) 等电生理信号检测, 更能拓展至自供电运动监测、身份识别、笔画分析、握持姿势评估等多元化场景<sup>[66-72]</sup>: Sang 等<sup>[66]</sup> 构建了 PVA/明胶双网热电凝胶, 集成热电与压阻双效应并赋予材料抗干燥特性, 与智能笔结合并耦合深度学习后, 实现了汉字笔画识别、身份识别与

持笔姿势的精准评估 (图 12(a)); Yang 等<sup>[67]</sup> 通过 PVA-PDMS 凝胶与复合膜的协同设计制备光驱动柔性凝胶, 依托热电-光热性能耦合实现了自供电式的人体运动主动区分 (图 12(b)); 此外, Xu 等<sup>[68]</sup> 与 Liu 等<sup>[69]</sup> 则分别通过共溶剂调控、多组分复合构建功能水凝胶, 将其作为柔性生物电极用于心电监测, 兼具抗冻自修复、黏附可控、抗菌透气等特性, 可在不同生理状态下实现低伪影的电生理信号采集 (图 12(c)). 这些研究成果为智能可穿戴设备的创新研究和应用提供了关键技术支撑.

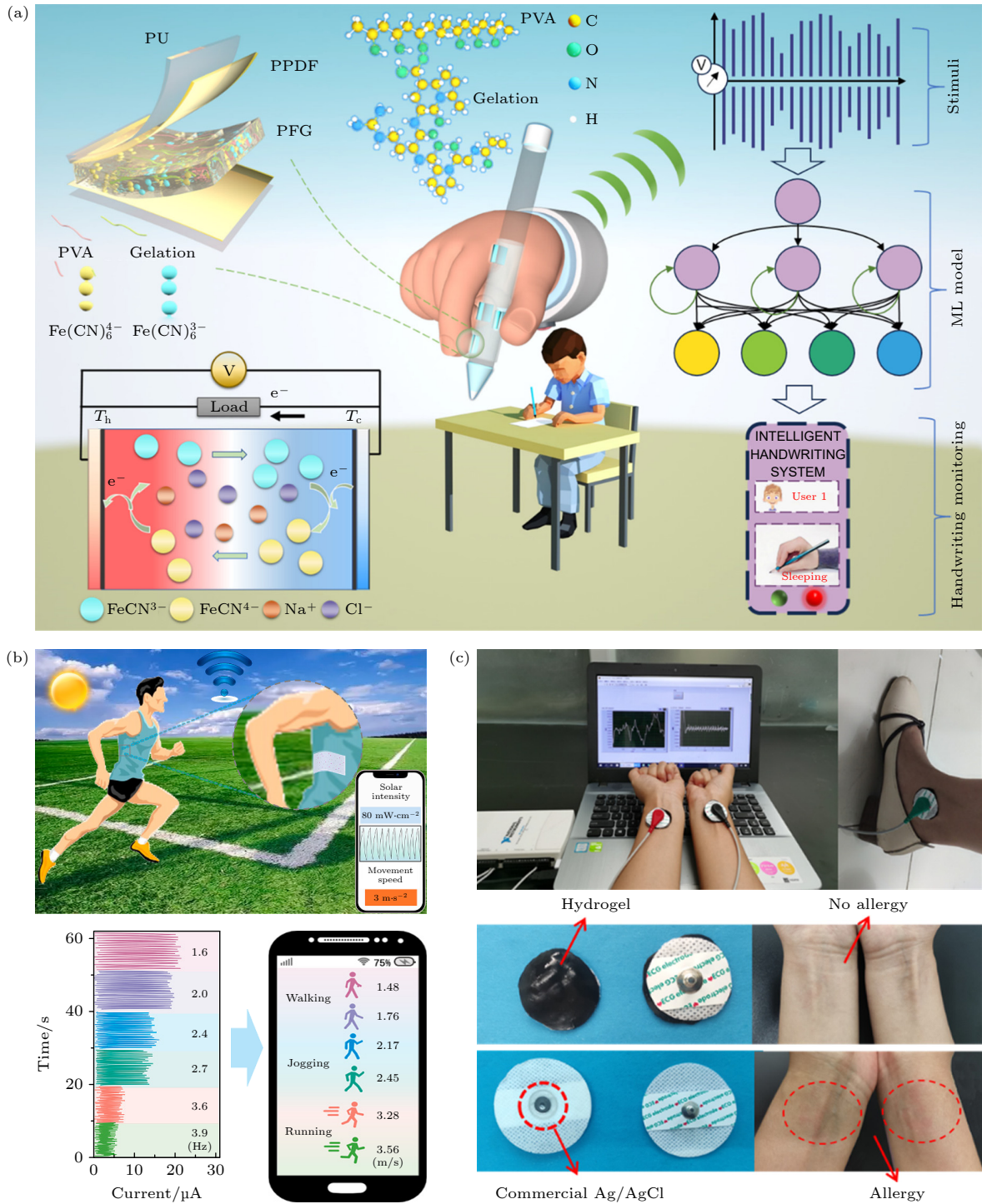


图 12 PVA 水凝胶其他体征监测应用 (a) 笔画识别及持笔姿势评估<sup>[66]</sup>; (b) 人体运动状态识别<sup>[67]</sup>; (c) 心电监测<sup>[68]</sup>

Fig. 12. Other human monitoring applications of PVA hydrogel: (a) Stroke recognition and pen-holding posture assessment<sup>[66]</sup>; (b) human motion state recognition<sup>[67]</sup>; (c) electrocardiogram monitoring<sup>[68]</sup>.

## 5 总结与展望

本综述系统梳理了 PVA 基导电水凝胶在人体体征监测领域的研究进展, 明晰了物理/化学交联制备技术、多维度性能优化机制及全场景人体活动

监测应用的核心脉络. 制备方面, 已形成多元化技术体系, 物理交联涵盖循环冻融、氢键诱导交联、盐析交联等方式, 化学交联则包括醛类交联、硼酸交联、辐射交联等路径, 且物理-化学交联的协同运用可有效提升材料网络结构稳定性; 性能优化围绕流体力学、导电、自愈合、抗冷冻四大关键维度展开, 通

过动态键调控、导电填料复合、多元溶剂引入等策略实现了材料综合性能的提升;应用层面已覆盖多体征监测场景,可精准捕捉关节活动、肌肉收缩、脉搏、呼吸、吞咽等体活动信号,形成了运动状态评估、健康预警等多元化应用布局。尽管基础研究取得显著突破,但该材料从实验室向工程化应用转化仍面临双重挑战:机理层面,交联结构与材料性能、信号响应的量化构效关系未明确,多性能协同调控机制缺乏统一解析,材料设计仍处于经验调控阶段;工程化与产业化层面,规模化制备工艺缺失、长期贴肤的生物安全性评估体系未建立、原料与制备成本偏高、性能测试无统一标准,且材料与柔性器件集成度低、信号解耦算法不成熟,成为产业化落地的关键瓶颈。

结合本团队在PVA基水凝胶制备与柔性传感研究中的实践经验,针对上述机理与产业化双重问题,PVA基导电水凝胶未来研究需从“结构-性能-信号响应”的物理本质出发,实现机理深化与工程化研发的协同推进,重点围绕以下三个方向开展具体且可落地的研究工作,为材料从实验室走向实际应用提供理论支撑与技术路径:

第一,深化交联结构的物理机制解析,为规模化工艺参数调控提供理论依据。针对循环冻融、硼酸交联等主流制备体系,依托原位表征手段,系统揭示结晶区尺寸分布、动态键形成/断裂等动力学过程对凝胶力学韧性、电学稳定性的调控规律;建立交联密度、动态键类型及含量等结构参数与凝胶力学、导电、抗冻等性能的定量构效模型,推动材料设计从经验调控向机制导向设计转变。

第二,实现多性能协同优化的机理统一,破解极端环境适应性与长期耐久性难题。从离子迁移通道连续性与动态键网络重构的核心问题出发,通过电化学阻抗谱、分子动力学模拟等手段,阐明氢键、硼酸酯键、离子键等不同相互作用力对电信号传输稳定性的贡献机制与比例关系;基于该机制构建多性能协同调控策略,避免单一性能优化对其他性能的牺牲。

第三,推进工程化研发与产业化落地,攻克产业化瓶颈:1)研发连续式冻融、挤出成型/3D打印原位交联等一体化工艺;2)结合贴肤使用场景制定分级测试标准,明确交联剂、导电填料等组分的安全添加阈值;3)选用国产化大宗原料,以生物质碳基材料替代高价导电填料,通过工艺简化、能耗

降低实现原料与工艺双端降本;4)明确力学、电学、服役性能测试方法与指标阈值,为质量管控提供依据;5)将水凝胶传感单元与柔性印刷电路、低功耗无线传输模块集成,开发多模态体征信号精准解耦算法,实现材料-器件-算法一体化集成。

## 参考文献

- [1] Dong X Y, Guo X, Liu Q Y, Zhao Y J, Qi H B, Zhai W 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2203610
- [2] Wiedemann Y, Schmitt T, Kim S, Dirnberger K, Ludwigs S, Lunter D J 2025 *Eur. J. Pharm. Biopharm.* **217** 114876
- [3] Liang X Y, Chen G D, Lin S T, Zhang J J, Wang L, Zhang P, Lan Y, Liu J 2022 *Adv. Mater.* **34** 2107106
- [4] Xiong L Q, Xin Q, Wang C H, Liang S Q, Lin J, Yao B D, Yang G Q 2025 *Sensor Actuat B-Chem.* **445** 138630
- [5] Qing X Y, Liu Z D, Alexandros K, Nikolaos B, Irene T, Pedro F 2024 *ACS Appl. Polym. Mater.* **6** 8105
- [6] Zhang Z T, Sang M, Li Z M, Pan Y C, Wu J P, Duan S L, Gong X L 2025 *Nat. Commun.* **16** 7683
- [7] Ashraf M A, Ahmad A, Ayat B, Ali S A, Ruba E K, Abdulrahman M A 2025 *Emergent. Mater.* **8** 2143
- [8] Wang Y H, Hsu C C, Hong S H, Ding J F, Je U S, Kang D Y, Luo S C, Tung S H, Liu C L 2025 *ACS Sustainable Chem. Eng.* **13** 4231
- [9] Sangita P, Sudhir K, Debabrata G, Pijush S, Suvendu N, Mahitosh M, Santanu C, Ahin R, Debabrata P, Rajat K D 2024 *ACS Appl. Polym. Mater.* **6** 7631
- [10] Wang Y Q, Chen P C, Ding Y, Zhu P H, Liu Y T, Wang C X, Gao C H 2024 *Adv. Funct. Mater.* **34** 2409081
- [11] Zhang D, Tang Y J, Gong X, Chang Y, Zheng J 2024 *SmartMat* **5** e1160
- [12] Hossein A, Reza E, Shehzaidd S M, Jaber N G, Emad I V, Hang T T 2022 *Eur. Polym. J.* **164** 110974
- [13] Lu J, Gu J F, Hu O D, Fu Y H, Ye D Z, Zhang X, Zheng Y, Hou L X, Liu H Y, Jiang X C 2021 *J. Mater. Chem. A* **9** 18406
- [14] Fan H L, Wang J H, Jin Z X 2018 *Macromolecules* **51** 1696
- [15] Liu X L, Qin J H, Wang J, Chen Y P, Miao J H, Zheng J P, Liu X F 2022 *J. Appl. Polym. Sci.* **139** e53076
- [16] Yao L, Xie W D, Wang H L 2025 *J. Polym. Sci.* **63** 4972
- [17] Zhou Y Y, Wang X, Lin X X, Wang Z M, Huang Z, Guo L Z, Xie H, Xu X, Dong F H 2024 *Int. J. Biol. Macromol.* **263** 130511
- [18] Zhang S P, Guo F M, Gao X, Yang M D, Huang X G, Zhang D, Li X J, Zhang Y J, Shang Y Y, Cao A Y 2024 *Adv. Sci.* **11** 2405880
- [19] Song Y, Ao Q, Jiang T H, Tong X L, Ding R, Li X G, Tang J 2024 *Chem. Eng. J.* **499** 156432
- [20] Yu W, Wei Y A, Gao D, Li G X, Yuan W J, Liu T, Xing C F, Meng C Z, Guo S J 2025 *Adv. Mater.* **37** e10199
- [21] Guo L, Ma W B, Wang Y, Song X Z, Ma J, Han X D, Tao X Y, Guo L T, Fan H L, Liu Z S, Zhu Y B, Wei X Y 2020 *J. Alloy. Compd.* **843** 155895
- [22] Zhao M, Yang H H, Ran C C, Chen N M, Liao Z Y, Hu B B, Ji H, Dong J, Sun J T 2025 *Prog. Org. Coat.* **208** 109487
- [23] Mei R W, Zhu H Y, Bai H Y, Dong W F 2025 *Colloid. Surface. A* **706** 135788
- [24] Xue H, Mi Z T, Shi L F, Yang X J, Chen R P, Luo X P, Guan Y 2023 *Mater. Today. Chem.* **33** 101696

- [25] Cheng M Q, Hu L, Xu G, Pan P P, Liu Q, Zhang Z Y, He Z P, Wang C X, Liu M, Chen L, Chen J D 2023 *Colloid. Surface. B* **227** 113354
- [26] Cao J L, Zhao X W, Ye L 2020 *Ind. Eng. Chem. Res.* **59** 10705
- [27] Bai H Y, Chen D W, Zhu H Y, Zhang S W, Wang W, Ma P M, Dong W F 2022 *Colloid. Surface. A* **648** 129205
- [28] Zhao H, Yu Y C, Liu J M, Yang W Z, Zhao Z J, Liu Y L, Guan F X, Yao M H 2025 *Int. J. Biol. Macromol.* **321** 146417
- [29] Feng W Q, Chen Y X, Jiang Y, Hu A C, Wang W, Yu D 2022 *Polymer* **262** 125464
- [30] Chen M Z, Quan Q, You Z P, Dong Y, Zhou X Y 2023 *Int. J. Biol. Macromol.* **253** 127396
- [31] Chen C, Wang J J, Xu Z Q, Chen N P, Wang F 2023 *Int. J. Biol. Macromol.* **247** 125595
- [32] Zhu Y, Li Q Q, Guo M J, Zhi X R, Xia Y F, Shi G L, Wang X 2024 *Nano Energy* **131** 110261
- [33] Zhou Y, Mi Y Y, Liu Y P, Luo X H, Chen N, Wang L L, Guo C, Lv W J, Peng B, Niu Y C, Xu Q 2023 *Appl. Mater. Today* **34** 101894
- [34] Guo R R, Yu D S, Huang Y F, Wang S, Fu C, Zhu S H, Yi J, Wang H Q, Lin Y H 2023 *Chin. Phys. B* **32** 088103
- [35] Liu Y Y, Liu R N, Liu H, Li D L, Fu S M, Jin K M, Cheng Y G, Fu Z W, Xing F, Tian Y 2024 *Int. J. Biol. Macromol.* **257** 128757
- [36] Xu Q Y, Hou M H, Wang L F, Zhang X P, Liu L F 2023 *Chem. Eng. J.* **477** 147065
- [37] Zhang Y, Ren E H, Li A, Cui C, Guo R H, Tang H, Xiao H Y, Zhou M, Qin W F, Wang X Y, Liu L 2021 *J. Mater. Chem. B* **9** 719
- [38] Zhao W H, Zhang D Z, Yang Y, Du C, Zhang B 2021 *J. Mater. Chem. A* **9** 22082
- [39] Nam J W, Moon C H, Kim D H, Kim M H, Park W H 2024 *Chem. Eng. J.* **498** 155748
- [40] Liu X Y, Ma Y J, Zhang X H, Huang J G 2021 *Colloid. Surface. A* **613** 126076
- [41] Li M, Chen D, Sun X, Xu Z S, Yang Y T, Song Y M, Jiang F 2022 *Carbohydr. Polym.* **284** 119199
- [42] Bao S X, Gao J T, Xu T F, Li N, Chen W X, Lu W Y 2021 *Chem. Eng. J.* **411** 128470
- [43] Zhang L, Hu O D, Zhang J, Hou L X, Ye D Z, Jiang X C, Xiao G 2022 *Cellulose* **29** 9323
- [44] Cui E Y, Liu P, Yu J Z, Li X Y, Gu Y X, Yu Y W, Chen C X, Wang S H, Zhu H J, Song R 2024 *J. Polym. Environ.* **32** 5344
- [45] Kazimierska-Drobny K, Kaczmarek M 2020 *Polimery* **65** 25
- [46] Shin S H, Lee W, Kim S M, Lee M, Koo J M, Hwang S Y, Oh D X, Park J 2019 *Chem. Eng. J.* **371** 452
- [47] Gu Z H, Ma R K, Chen X, Lin Z X, Yang Y 2025 *Adv. Compos. Hybrid. Mater.* **8** 214
- [48] Liu M C, Guo J Y, Hui C Y, Creton C, Narita T 2018 *J. Rheol.* **62** 991
- [49] Luo R, Li H, Lam K Y 2007 *Anal. Bioanal. Chem.* **389** 863
- [50] Shi J, An Q, Li G T 2023 *Sci. Sin. Chim.* **53** 1134 (in Chinese) [施晶, 安琪, 李广涛 2023 *中国科学: 化学* **53** 1134]
- [51] Kainz M P, Greiner A, Hinrichsen J, Kolb D, Comellas E, Steinmann P, Budday S, Terzano M, Holzapfel G A 2023 *Front. Bioeng. Biotech.* **11** 1143304
- [52] Li Z C, Yin F Q, He W W, Hang T Y, Li Z H, Zheng J J, Li X P, Jiang S H, Chen Y M 2023 *Int. J. Biol. Macromol.* **230** 123117
- [53] Li Z C, Liu P, Chen S W, Wang B Z, Liu S Y, Cui E Y, Li F H, Yu Y W, Pan W H 2024 *Int. J. Biol. Macromol.* **258** 129054
- [54] Gong Y, Hu Y C, Cheng Y Z, Liu Z X, Gu Y, Yin X F, Ding H X, Yang H, Kang M, Wei Y, Huang D 2022 *J. Mater. Sci.* **57** 12947
- [55] Gao Y F, Peng J B, Zhou M H, Yang Y Y, Wang X, Wang J F, Cao Y X, Wang W J, Wu D C 2020 *J. Mater. Chem. B* **8** 11010
- [56] Cui X J, Nie Y Y, Saeed A K, Bo X S, Li N, Yang X R, Wang D W, Cheng R B, Yuan Z Y, Zhang H L 2025 *ACS Sensors* **10** 537
- [57] He Z, Shen J L, Lan M H, Gu H B 2024 *J. Mater. Chem. B* **12** 6940
- [58] Zhuge C Y, Wang Y P, Qian Q, Li S Y, Lu W Y, Li N 2024 *J. Polym. Sci.* **62** 5434
- [59] Wu M D, Zhou S L, Ye A N, Wang M, Zhang X H, Yang C H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 108201 (in Chinese) [巫梦丹, 周胜林, 叶安娜, 王敏, 张晓华, 杨朝晖 2019 *物理学报* **68** 108201]
- [60] Zhu Q, Yuan X T, Zhu Y H, Zhang X H, Yang C H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 028201 (in Chinese) [朱畦, 袁协涛, 诸翊豪, 张晓华, 杨朝晖 2018 *物理学报* **67** 028201]
- [61] Zhang H, Zhang M Y, Li J B, Bai Y H, Tan X 2022 *React. Funct. Polym.* **178** 105361
- [62] Zhang H, Ren P G, Yang F, Chen J, Wang C X, Zhou Y, Fu J 2020 *J. Mater. Chem. B* **8** 10549
- [63] Pan L M, Han L Y, Liu H X, Zhao J J, Dong Y, Wang X H 2022 *Chem. Eng. J.* **450** 137929
- [64] Yan G H, He S M, Chen G F, Ma S, Zeng A Q, Chen B L, Yang S L, Tang X, Sun Y, Xu F, Lin L, Zeng X H 2022 *Nano-Micro Lett.* **14** 84
- [65] Li X B, Li J N, Wang T, Saeed A K, Yuan Z Y, Yin Y F, Zhang H L 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **14** 48743
- [66] Sang S B, Bai C H, Wang W X, Saeed A K, Wang Z S, Yang X R, Zhang Z Y, Zhang H L 2024 *Nano Energy* **123** 109366
- [67] Yang H, Saeed A K, Li N, Fang R, Huang Z Q, Zhang H L 2023 *Chem. Eng. J.* **473** 145247
- [68] Xu L J, Chen Y, Yu M L, Hou M J, Gong G, Tan H H, Li N, Xu J X 2023 *Nano Energy* **107** 108119
- [69] Liu W, Xie R J, Zhu J Y, Wu J S, Hui J F, Zheng X Y, Huo F W, Fan D D 2022 *Npj Flex. Electron.* **6** 68
- [70] Zheng Z J, Xu W J, Wang Y, Xiong W J, Xiong C H, You L J, Wang S Y 2024 *Mater. Today. Commun.* **38** 108465
- [71] Liu X R, Yang Y T, Song S S, Zhang R, Zhang C C, Yang S W, Liu Y, Song Y M 2024 *Int. J. Biol. Macromol.* **280** 135959
- [72] Zhou L X, Xin Q, Lin J, Liang S Q, Yang G Q 2023 *Appl. Mater. Today.* **34** 101907

SPECIAL TOPIC—Flexible electronics and smart wearables

# Research progress on performance optimization and biometric monitoring applications of polyvinyl alcohol-based conductive hydrogel\*

CUI Xiaojing<sup>1) #</sup> LU Changchang<sup>2) #</sup> YANG Haoxin<sup>2) #</sup> ZHAI Hongpeng<sup>2) #</sup>  
YANG Xinru<sup>3)</sup> CHEN Huimin<sup>2)</sup> GUO Aixin<sup>1) †</sup> ZHANG Hulin<sup>3) ‡</sup>

1) (*School of Computer Science and Artificial Intelligence, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China*)

2) (*School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China*)

3) (*College of Integrated Circuits, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

( Received 31 December 2025; revised manuscript received 11 February 2026 )

## Abstract

With the development of intelligent medical technology and wearable sensing technology, polyvinyl alcohol (PVA)-based conductive hydrogels have emerged as the core functional materials for human physiological sign monitoring due to their excellent flexibility, ionic conductivity, and biocompatibility. This article systematically reviewed the research progress of crosslinking preparation technology, core performance optimization strategy and physical sign monitoring application of the material. The mechanism, characteristics and application scenarios of physical and chemical cross-linking preparation systems were analyzed, and the key value of physical-chemical cross-linking collaborative application to improve the stability of material network structure was clarified. At the same time, the multi-dimensional optimization strategies for mechanics, electrical conductivity, self-healing and anti-freezing performance are sorted out, and the mechanism of action of double network construction, dynamic bond regulation, ion and solvent system optimization is clarified.

Relying on the physical characteristics of ion conduction to realize reversible conversion of force-electrical signals, the material can accurately capture large movements such as joint flexion and extension, muscle contraction, and subtle physiological signals such as pulse, swallowing, and breathing. It can also be extended to multiple physical sign monitoring scenarios such as voiceprint recognition to meet a variety of practical application requirements. In the modeling study, we have systematically summarized the core physical models and multiphysics modeling frameworks for ionic and nanocomposite hydrogels, clarifying the quantitative formulations and underlying physical mechanisms of each model.

**Keywords:** flexible sensor, polyvinyl alcohol-based conductive hydrogel, ion-piezoelectric, physical sign monitoring

DOI: [10.7498/aps.75.20251804](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251804)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251804](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251804)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52475600, 12304453) and the Research Program Supported by Shanxi Scholarship Council of China (Grant No. 2023-105).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [guoaixin@mail.ustc.edu.cn](mailto:guoaixin@mail.ustc.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhanghulin@tyut.edu.cn](mailto:zhanghulin@tyut.edu.cn)



## 聚乙烯醇基导电水凝胶性能优化及体征监测应用研究进展

崔小静 卢昌昌 杨皓鑫 翟鸿鹏 杨心茹 陈慧敏 郭爱心 张虎林

### Research progress on performance optimization and biometric monitoring applications of polyvinyl alcohol-based conductive hydrogel

CUI Xiaojing LU Changchang YANG Haoxin ZHAI Hongpeng YANG Xinru CHEN Huimin GUO Aixin ZHANG Hulin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100807 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251804

CSTR: 32037.14.aps.75.20251804

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251804>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

一种耐高温的柔性压电/热释电双功能传感器

A flexible piezoelectric/pyroelectric dual-function sensor with high temperature resistance

物理学报. 2024, 73(20): 206801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241006>

隧道磁阻传感器性能优化研究进展

Research progress of performance optimization of tunnel magnetoresistive sensors

物理学报. 2026, 75(6): 206801 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251597>

高温压电振动传感器及其压电材料研究进展

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials

物理学报. 2025, 74(2): 027702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240906>

基于PVDF-EtP纳米纤维膜的压电性能及其在压力传感器中的应用

Piezoelectric properties of PVDF-EtP nanofiber membrane and its application in pressure sensors

物理学报. 2025, 74(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241680>

PAN/MoS<sub>2</sub>柔性复合纳米纤维膜的压电传感特性

Piezoelectric sensing properties of PAN/MoS<sub>2</sub> flexible composite nanofiber film

物理学报. 2025, 74(7): 076801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241676>

压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能

Finite element prediction and device performance of piezoelectric fiber composite based smart sensor

物理学报. 2025, 74(5): 057701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241379>