北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

溴化锌/纤维素协同增强的抗冻导电聚乙烯醇水凝胶及其柔性传感应用

仇东旭 孙少妮 王鹏飞 孙丽丽

Construction of zinc bromide/cellulose-reinforced high-performance antifreezing conductive poly(vinyl alcohol) hydrogels for flexible sensing applications

Qiu Dongxu, Sun Shaoni, Wang Pengfei, Sun Lili

引用本文:
仇东旭, 孙少妮, 王鹏飞, 孙丽丽. 溴化锌/纤维素协同增强的抗冻导电聚乙烯醇水凝胶及其柔性传感应用[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260057
Qiu Dongxu, Sun Shaoni, Wang Pengfei, Sun Lili. Construction of zinc bromide/cellulose–reinforced high–performance antifreezing conductive poly(vinyl alcohol) hydrogels for flexible sensing applications[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260057

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260057

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

具有多刺激响应行为和自修复能力的纤维素纳米晶增强聚乙烯醇水凝胶
Cellulose nanocrystal reinforced polyvinyl alcohol hydrogels with multi–stimulus responsive behavior and self–healing properties
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 152–161. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250104

木质素磺酸钠@单宁酸水凝胶的制备及其性能
Preparation and its properties of sodium lignosulfonate@tannic acid hydrogel
北京林业大学学报, 2022, 44(5): 142–149. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210411

纤维素电纺纳米纤维柔性表皮电极制备与性能
Preparation and property of cellulose electrospun nanofibers–based flexible epidermal electrodes
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240161

深共晶溶剂（DES）预处理协同聚乙烯醇（PVA）浸渍处理增强增韧竹材
Deep eutectic solvent (DES) pretreatment combined with polyvinyl alcohol (PVA) impregnation to enhance and toughen bamboo
北京林业大学学报, 2025, 47(8): 162–172. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250146

低共熔溶剂预处理麦草制备含木质素纳米纤维素和薄膜
Fabrication of lignin containing nanocellulose and films from wheat straw pretreated by deep eutectic solvent
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 141–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240260

基于纤维素骨架的毛竹热处理材力学性能研究
Research on mechanical properties of *Phyllostachys edulis* heat treatment materials based on cellulose skeleton
北京林业大学学报, 2023, 45(7): 130–138. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230079

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260057

溴化锌/纤维素协同增强的抗冻导电聚乙烯醇水凝胶及其柔性传感应用

仇东旭 孙少妮 王鹏飞 孙丽丽
（林木资源高效生产全国重点实验室，林木生物质化学北京市重点实验室，北京林业大学材料科学与技术学院，北京 100083）

摘要:【目的】水凝胶的机械柔韧性与低温环境适应性对其在柔性传感器中的应用至关重要。然而，现有的聚乙烯醇（PVA）水凝胶在低温下易冻结失效，且其力学性能、导电性和环境稳定性难以协同提升，限制了其在复杂形变和极端环境条件下的实际应用。为此，本研究旨在开发一种兼具抗冻、高导电与优异力学性能的复合水凝胶，以满足柔性电子器件在多变环境中的使用需求。**【方法】**本研究以竹溶解浆纤维素（BDP）为原料，采用溴化锌（$ZnBr_2$）溶剂体系实现纤维素溶解，并构建刚性导电的 BDP/Zn^{2+}网络；进一步通过戊二醛（GA）化学交联与一次冻融相结合的方法，将上述网络引入聚乙烯醇（PVA/GA）柔性网络中，以制备具有优异综合性能的复合水凝胶（BZPG）。**【结果】**（1）BDP 与 Zn^{2+}的协同作用显著提升了水凝胶的力学性能：当 BDP/$ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液质量比为 1.5∶1，GA 添加量为 2.0% 时，所得 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的拉伸强度与断裂伸长率较纯 PVA 水凝胶（$H_{1.5}PG_{2.0}$）分别提高了 75.7% 和 330.2%。（2）$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 具备良好的导电性与抗冻性：在 –20 ℃ 条件下，其离子电导率仍保持在 5.1 S/m，且柔韧性良好，可自由弯折而不破裂。（3）$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 具有优异的长期稳定性与保水能力：室温放置 40 d 后，其质量损失率仅为 22.4%，显著低于对照组 $H_{1.5}PG_{2.0}$。（4）基于 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 组装的柔性应变传感器对外界刺激表现出灵敏而稳定的响应，并可实现对人体运动状态的可靠监测。**【结论】**通过构建 BDP/Zn^{2+} 刚性导电网络与 PVA/GA 柔性网络相结合的复合结构，成功制备出一种力学性能优异、导电性高、抗冻性好的生物质基复合水凝胶。该水凝胶原料可再生，制备简便，综合性能突出，在可穿戴柔性传感器等领域具有广阔的应用前景。

关键词：生物质基水凝胶；离子凝胶；抗冻水凝胶；离子导电；力学性能；溴化锌；柔性应变传感；可穿戴电子
中图分类号：TQ427.26；TQ352.79；TB383.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)10−0001−11
引文格式：仇东旭，孙少妮，王鹏飞，等. 溴化锌/纤维素协同增强的抗冻导电聚乙烯醇水凝胶及其柔性传感应用［J］. 北京林业大学学报，2026，48(10)：1−11. Qiu Dongxu, Sun Shaoni, Wang Pengfei, et al. Construction of zinc bromide/cellulose-reinforced high-performance antifreezing conductive poly(vinyl alcohol) hydrogels for flexible sensing applications［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 1−11.

Construction of zinc bromide/cellulose-reinforced high-performance antifreezing conductive poly(vinyl alcohol) hydrogels for flexible sensing applications

Qiu Dongxu Sun Shaoni Wang Pengfei Sun Lili
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Key Laboratory of Lignocellulosic Chemistry, School of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］The mechanical flexibility and low temperature adaptability of hydrogels are crucial for their application in flexible sensors. However, the existing poly(vinyl alcohol) (PVA) hydrogels are prone to freezing and failure at low temperatures, and it remains difficult to simultaneously improve their mechanical properties, conductivity, and environmental stability, which restrict their practical use under

收稿日期：2026−02−03 **修回日期：**2026−04−10
基金项目：国家自然科学基金项目（32571986）。
第一作者：仇东旭。主要研究方向：纤维素水凝胶。Email：15948477335@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学材料科学与技术学院。
责任作者：孙少妮，副教授。主要研究方向：生物质组分清洁分离及高值化利用。Email：sunshaoni@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址：https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

complex deformation and extreme environmental conditions. Therefore, this study aimed to develop a composite hydrogel with anti-freezing capability, high conductivity, and excellent mechanical performance to meet the requirements of flexible electronic devices in variable environments. [**Method**] In this study, bamboo dissolving pulp cellulose (BDP) was used as the raw material, and a zinc bromide ($ZnBr_2$) solvent system was employed to dissolve BDP and construct a rigid conductive BDP/Zn^{2+} network. This network was then incorporated into a flexible poly(vinyl alcohol) network (PVA/GA) through glutaraldehyde (GA) chemical crosslinking combined with one freeze-thaw, thereby preparing a composite hydrogel (BZPG) with excellent overall performance. [**Result**] (1) Synergistic effect of BDP and Zn^{2+} significantly enhanced the mechanical properties of the BZPG hydrogels. When the mass ratio of BDP/$ZnBr_2$ solution to PVA solution was 1.5∶1 and the GA content was 2.0 wt%, the tensile strength and elongation at break of the obtained $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ were increased by 75.7% and 330.2%, respectively, compared with the PVA hydrogel ($H_{1.5}PG_{2.0}$). (2) $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ exhibited excellent conductivity and freeze resistance. Under –20 ℃ conditions, its ionic conductivity remained as high as 5.1 S/m, while the hydrogel still maintained good flexibility and could be bent freely without fracture. (3) $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ demonstrated long-term stability and water retention. When stored at room temperature for 40 days, its mass loss rate was only 22.4%, which is significantly lower than that of the $H_{1.5}PG_{2.0}$ hydrogel. (4) The flexible strain sensors assembled from the $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ hydrogel showed sensitive and stable signal responses to external stimuli, enabling reliable monitoring of human motion. [**Conclusion**] A biomass-based composite hydrogel with high mechanical strength, high conductivity, and excellent freeze resistance was successfully developed by integrating a rigid BDP/Zn^{2+} conductive network with a flexible PVA/GA network. Owing to its simple fabrication process, renewable raw material, and outstanding comprehensive performance, this hydrogel showed great potential for application in wearable flexible sensors.

Key words: biomass-based hydrogel; ionic gel; anti-freezing hydrogel; ionic conductivity; mechanical properties; zinc bromide; flexible strain sensing; wearable electronics

随着现代电子科技和柔性材料的快速发展，柔性传感器在医疗监测、智能机器人、人机交互等领域的应用潜力日益凸显[1−2]。为适应复杂多变的应用环境，这类器件需兼具优异的电化学性能、力学性能及环境稳定性。近年来，离子导电水凝胶因其良好的导电性、生物相容性及可变形性，已成为构建柔性应变传感器的理想材料[3]。然而，此类水凝胶在低温环境下易冻结、失水，导致其导电性与力学性能急剧衰退，严重限制了其在极端环境条件下的实际应用[3−4]。

为提升水凝胶的环境耐受性，向体系中引入乙二醇[5]、甘油[6]或二甲基亚砜[7]等有机溶剂是赋予其抗冻性的常用策略。有机溶剂的引入可替代部分水，并与水形成致密的氢键网络，从而有效抑制冰晶的形成与生长，同时减少水分蒸发。然而，有机溶剂作为非电解质，其大量引入会阻碍离子传输，不可避免地导致水凝胶的电导率下降。熔盐水合物（molten salt hydrates，MSHs）是一种具有类离子液体性质的高浓度电解质体系，在赋予水凝胶抗冻性的同时，保持高导电性方面展现出独特的优势。MSHs 能够通过强烈的离子–偶极相互作用破坏水分子原有的氢键网络，从而显著降低体系冰点。此外，MSHs 本身具有极强的吸湿性，能直接赋予水凝胶优异的保水性能。目前，多种 MSHs（如 $ZnCl_2·3H_2O$[8]、$ZnCl_2·3H_2O/CaCl_2$[9]、$ZnCl_2·3H_2O/AlCl_3$[10]和 $LiCl·3H_2O$[11]等）已被成功用于制备抗冻导电水凝胶，充分证实了 MSHs 在解决水凝胶低温失效问题上的巨大潜力。与上述氯盐体系相比，溴化锌（$ZnBr_2$）熔盐水合物具有更强的 Lewis 酸性和更高的离子极化能力，Zn^{2+}能够与高分子链上的羟基形成更稳定的配位作用，有助于构建更加致密的分子网络结构[12−13]。然而，仅依赖这类配位作用所形成的网络通常难以兼顾强度与韧性，导致现有基于 MSHs 体系制备的水凝胶存在力学性能不足的问题，限制了其在复杂形变场景下的应用[14]。因此，如何在保持水凝胶抗冻性和导电性的同时，提升其力学性能，仍是当前一个迫切需要解决的研究课题。

纤维素作为一种来源广泛、生物相容性良好的天然高分子材料，凭借其高长径比和高杨氏模量等特性，常被用于增强水凝胶的力学性能。基于此优势，研究者将纤维素/MSHs 进一步引入丙烯酸、丙烯酰胺、聚乙烯醇（polyvinyl alcohol，PVA）及海藻酸钠

等多种聚合物体系中，以构建兼具力学强度与导电性的高性能传感材料。田雅慧[15]采用纤维素作为聚丙烯酸水凝胶的增强剂，通过 $AlCl_3/ZnCl_2$ 溶剂体系溶解纤维素并与丙烯酸原位聚合，制备了聚丙烯酸/纤维素离子导电水凝胶；该水凝胶的压缩强度较纯聚丙烯酸水凝胶提升了 2 倍，印证了纤维素的增强效果。PVA 因其良好的生物相容性和成胶性，常被用作柔性导电水凝胶的基体材料[16]。因此，将纤维素/MSHs 均匀分散于 PVA 基体中，在保持 PVA 固有柔韧性的同时，通过自身的刚性骨架可以有效增强水凝胶的力学性能。

基于此，本文以 $ZnBr_2$ 熔盐水合物赋予体系抗冻与离子传导特性，以竹溶解浆纤维素（bamboo dissolving pulp cellulose，BDP）增强网络稳定性，并结合物理交联与化学交联的协同作用，构建纤维素/PVA 基双网络抗冻导电水凝胶。系统考察 $ZnBr_2$ 及 BDP 组成对材料力学性能、导电性能、抗冻性能及保水性能的影响，揭示其结构构筑与性能响应之间的内在联系。由该水凝胶组装柔性应变传感器，并验证其信号响应行为与人体运动监测能力，旨在为高性能抗冻导电水凝胶的设计提供理论依据，并为其在可穿戴电子器件领域的应用拓展提供参考。

1　材料与方法

1.1　材　料

竹溶解浆纤维素（94.90% α-纤维素，2.86% 半纤维素，0.69% 木质素；聚合度为 776 ± 20）购自四川宜宾造纸厂；$ZnBr_2$（纯度 99%）购自上海柏卡化学技术有限公司；PVA（聚合度 1 750 ± 50）购自爱为生物科技有限公司；戊二醛（glutaraldehyde，GA）购自北京伊诺凯科技有限公司。所有试剂均为分析级，使用时无需进一步纯化。

1.2　试样的制备

1.2.1　$BDP/ZnBr_2$ 溶液、PVA 溶液的制备

将无水 $ZnBr_2$ 与去离子水按摩尔比 1∶4 混合，在 80 ℃ 下加热搅拌 30 min，形成稳定的 $ZnBr_2 \cdot 4H_2O$ 溶液。随后向该溶液中加入 BDP，在相同温度下搅拌 30 min 至 BDP 完全溶解，最终制得浓度为 350 mg/mL 的 $BDP/ZnBr_2$ 溶液。

称取 7.0 g PVA 粉末加入到适量去离子水中，在 98 ℃ 下加热并持续搅拌，直至 PVA 完全溶解，最终制得质量分数 7.0% 的 PVA 溶液。

1.2.2　水凝胶的制备

将 $BDP/ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液分别按质量比 0.5∶1、1.0∶1、1.5∶1 和 2.0∶1 进行混合，滴加 0.1 mol/L 盐酸调节体系 pH 值至 3。室温下搅拌至混合均匀后，加入 5.0% 的交联剂 GA 溶液（添加量为 PVA 质量的 1.5% ~ 3.0%），继续搅拌以确保分散均匀。最后将溶液浇筑至模具中，于室温静置 12 h 后进行初步凝胶化，再经超低温冰箱进行一次冻融，最终获得复合水凝胶 BZPG。具体制备流程详见图 1。所制备的复合水凝胶命名为 BZ_xPG_y。其中 x 代表 $BDP/ZnBr_2$ 溶液相对于 PVA 溶液的质量比，y 代表 GA 相对于 PVA 的质量百分比。为探究 Zn^{2+}及 BDP 在体系中的作用，制备了不含 BDP 的对照样品 $Z_{1.5}PG_{2.0}$ 以及不含 Zn^{2+}和 BDP 的纯 PVA 水凝胶样品 $H_{1.5}PG_{2.0}$，其中 GA 的添加量均固定为 PVA 质量的 2.0%。

1.3　水凝胶结构及性能表征

1.3.1　化学结构

采用傅里叶变换红外光谱仪（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR；Nicolet iS50，美国赛默飞世尔科技有限公司）对水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 及 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的化学结构进行表征，扫描波数范围为 400 ~ 4 000 cm^{-1}。

1.3.2　热稳定性

利用热重分析仪（thermal gravimetric analyzer，TGA；DTG-60，日本岛津公司）评估水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 及 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的热降解行为。测试前，水凝胶样品经冷冻干燥以去除自由水，在 N_2 气氛下以 10 ℃ /min 的速度从 30 ℃ 加热至 800 ℃。

1.3.3　力学性能

采用万能试验机（UTM6503，深圳三思纵横科技股份有限公司）在室温下对水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 BZPG 的力学性能进行了测试。将样品制备为标准哑铃状（尺寸 30 mm × 4 mm × 4 mm），并在 20 mm/min 的拉伸速率下进行测试。杨氏模量通过应力−应变曲线在低应变区间（5% ~ 15%）的线性拟合斜率计算获得，其中各样品在 5% ~ 15% 区间的线性拟合决定系数均大于 0.98。韧性则定义为对拉伸应力−应变曲线下的积分面积。此外，为评估水凝胶的能量耗散能力与抗疲劳性能，对水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在 50 mm/min 的加载速率下进行了连续循环加载−卸载实验。其中，耗散能通过循环应力−应变曲线闭合环（滞后环）的面积计算，抗疲劳性则依据循环过程中的应力衰减程度进行评估。

1.3.4　离子电导率

采用电化学阻抗谱（electrochemical impedance spectroscopy，EIS）法在电化学工作站（CHI660E，上海辰华仪器有限公司）上测试水凝胶的离子电导率[17]。测试时，将水凝胶置于两片不锈钢电极之间组装成对称电池，以保证良好的界面接触。离子电导率由式（1）计算。

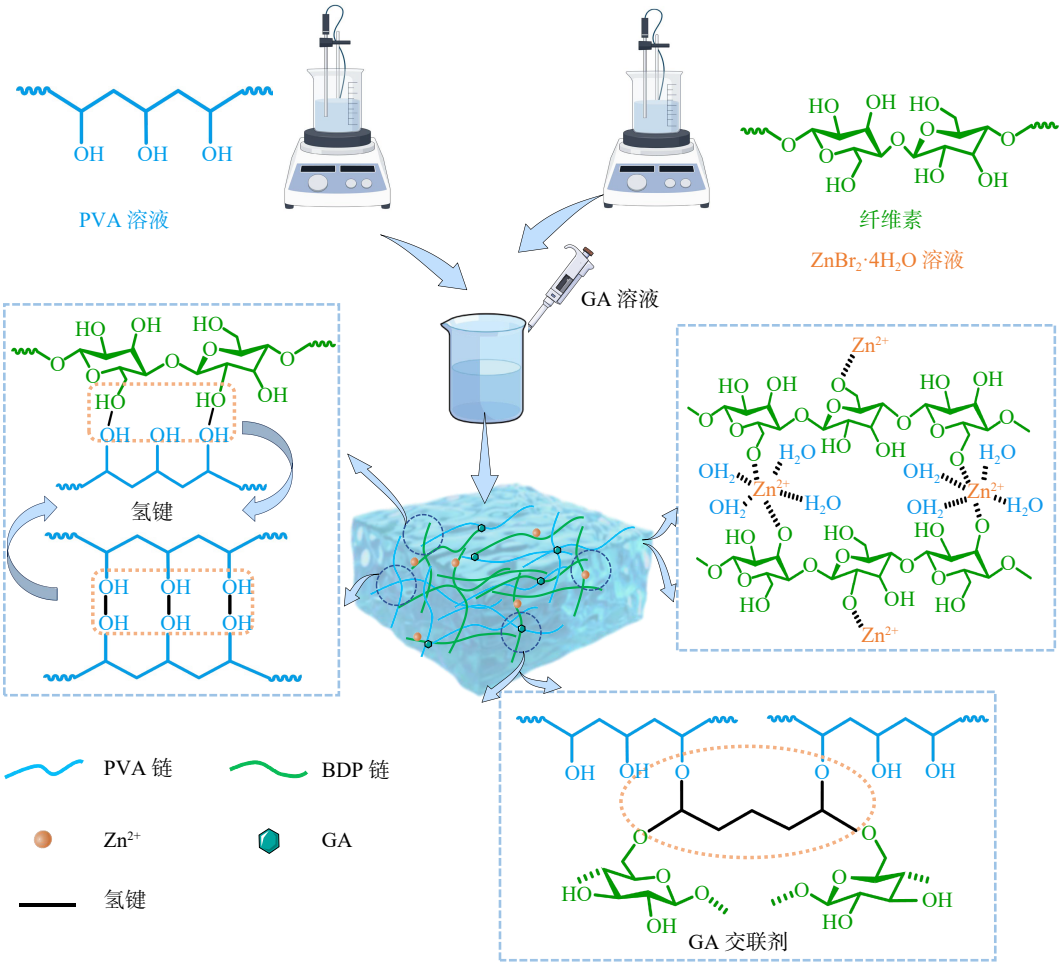


图 1 复合水凝胶 BZPG 的制备流程

Fig. 1 Preparation process of the hydrogels BZPG

$$\sigma = L/RA \tag{1}$$

式中：σ 表示离子电导率(S/m)，L 和 A 分别为水凝胶样品的厚度(m)和有效接触面积(m^2)，R 表示从 EIS 曲线与 x 轴的截距处提取的电阻(Ω)。

1.3.5 抗冻性

为评估水凝胶的抗冻性能，采用差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter，DSC；奥地利安东帕有限公司)对水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 进行测试，测试温度范围为−50～30 ℃。

1.3.6 保水性

为评估水凝胶在自然环境中的保水能力，将水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 置于室温条件下放置 40 d。在此期间，定期称量并记录其剩余质量。水凝胶的质量损失率由式(2)计算。

$$m_{LR} = (m_0 - m_t)/m_0 \times 100\% \tag{2}$$

式中：m_{LR} 为水凝胶的质量损失率，m_0 为样品初始质量(g)，m_t 为在放置 t 天后测得的质量(g)。

1.3.7 传感性能

利用电化学工作站记录了水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在拉伸形变过程中的电阻变化，以评估其动态响应行为。相对电阻变化率($\Delta R/R_0$)是表征传感性能的关键指标，灵敏度因子(G_F)为 $\Delta R/R_0$ 随应变(ε)的变化率[18]。

$$\Delta R/R_0 = (R - R_0)/R_0 \times 100\% \tag{3}$$

$$G_F = (\Delta R/R_0)/\varepsilon \tag{4}$$

式中：R_0 为水凝胶的初始电阻(Ω)，R 为发生形变之后的实时电阻(Ω)。

在实际应用测试中，将水凝胶组装成“铜电极–水凝胶–铜电极”三明治结构的柔性传感器，并贴附于志愿者的手指、手腕及膝盖等关节处。通过监测弯曲、伸展等动作产生的电阻响应信号，验证该传感器对不同幅度人体运动的实时监测能力。所有人体实验均符合伦理审查要求，且志愿者在测试前已充分知情并签署同意书。

2 结果与分析

2.1 BZPG 水凝胶的化学结构

如图 2a 所示，所有水凝胶在 1 257 cm^{-1} 和 1 083 cm^{-1} 出现的吸收峰分别归属于 C—O—C 和

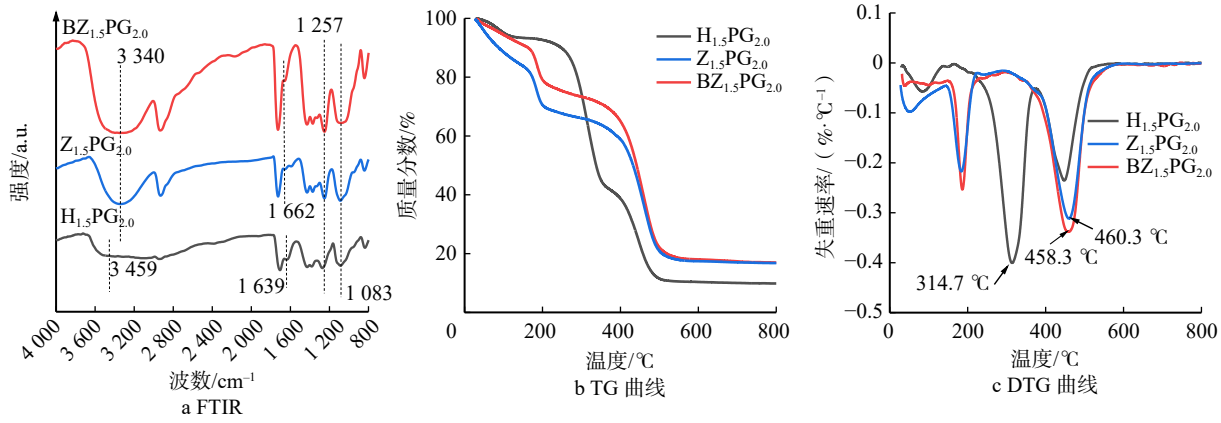


图 2　水凝胶的化学结构特征与热降解行为

Fig. 2　Chemical structural characteristics and thermal degradation behavior of hydrogels

C—O 键的伸缩振动，这些特征证实了缩醛键的形成，印证了醛基与 PVA 之间的交联反应[19]。在 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 中，1 639 cm^{-1} 处的吸收峰和 3 459 cm^{-1} 处的宽峰分别对应于结合水 O—H 的弯曲振动和伸缩振动[20]。相比之下，引入 Zn^{2+}的水凝胶 $Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的 O—H 弯曲振动峰由 1 639 cm^{-1} 偏移至 1 662 cm^{-1}，而 O—H 伸缩振动峰由 3 459 cm^{-1} 明显向低波数方向偏移至 3 340 cm^{-1}，表明体系中羟基及结合水的作用环境发生变化，且 Zn^{2+}与羟基存在配位作用[21]。此外，与 $Z_{1.5}PG_{2.0}$ 相比，$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 中 C—O—C 和 C—O 伸缩振动峰强度增加且略宽，表明 BDP 羟基与 GA 醛基之间发生了缩醛反应[19, 22]，同时 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的 O—H 伸缩振动峰强度增加且略宽，说明 BDP 与 PVA 之间形成了额外的氢键网络。

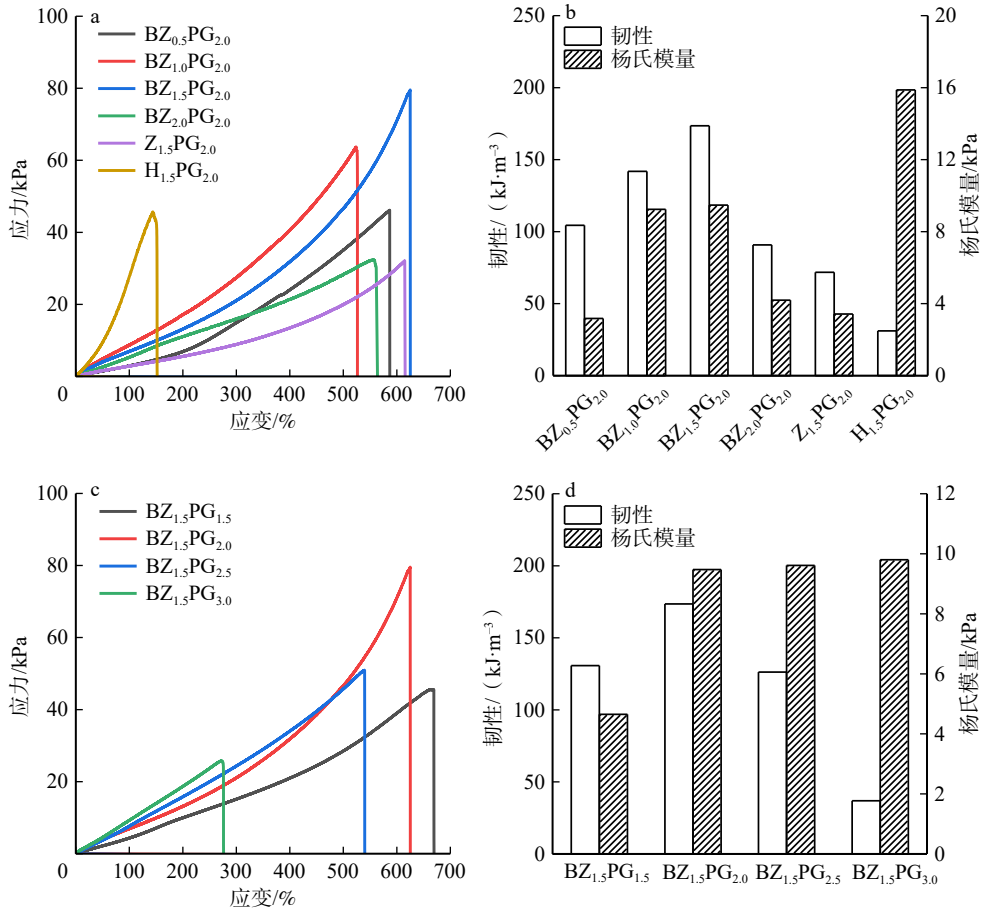
2.2　BZPG 水凝胶的热降解行为

如图 2b，c 所示，$H_{1.5}PG_{2.0}$ 的最大热分解速率温度（T_{max}）为 314.7 ℃，在 800 ℃ 时的残碳率仅为 9.8%，这主要归因于 PVA 与 GA 构建的化学交联网络较松散所致。相比之下，引入 Zn^{2+}后的 $Z_{1.5}PG_{2.0}$ 展示出更高的残碳率（17.0%）和 T_{max}（458.3 ℃），显著优于 $H_{1.5}PG_{2.0}$。进一步引入 BDP 后，$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的 T_{max} 提高至 460.3 ℃。这主要是因为体系中引入的 Zn^{2+}与纤维素链上的羟基形成了稳定的配位交联网络，有效限制了聚合物分子链在高温下的热运动[23]。此外，纤维素分子中的羟基亦可与 GA 发生缩醛反应，进一步提高体系的交联密度。同时纤维素作为高结晶度的天然高分子，其固有的刚性骨架也有助于提升水凝胶的整体热稳定性。

2.3　BZPG 水凝胶的力学性能

柔性应变传感器需具备良好的力学性能，以满足在实际传感中的形变需求[24]。如图 3a，b 所示，随着 BDP/$ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液质量比的增加，水凝胶的拉伸强度、韧性和杨氏模量均呈现出先增加后降低的趋势。具体而言，当质量比由 0.5∶1（$BZ_{0.5}PG_{2.0}$）提高到 1.5∶1（$BZ_{1.5}PG_{2.0}$）时，水凝胶的拉伸强度由 46.2 kPa 提升到 79.6 kPa，韧性由 104.4 kJ/m^3 提升到 173.5 kJ/m^3，杨氏模量由 3.2 kPa 提升到 9.5 kPa。这种增强效果可能是由于适量纤维素的引入促进了其与 PVA 之间氢键连接和与 GA 的缩醛键连接，从而提升了水凝胶力学性能。然而，当质量比进一步提高至 2.0∶1（$BZ_{2.0}PG_{2.0}$）时，水凝胶的拉伸强度、韧性和杨氏模量分别下降至 32.3 kPa、90.8 kJ/m^3 和 4.2 kPa，这可能是由于过高的纤维素含量导致水凝胶在基体中分散不均，破坏了水凝胶网络均一性，导致力学性能下降。

进一步探究了 GA 添加量对 $BZ_{1.5}PG_y$ 水凝胶力学性能的影响。如图 3c，d 所示，当 GA 添加量从 1.5%（$BZ_{1.5}PG_{1.5}$）增至 2.0%（$BZ_{1.5}PG_{2.0}$）时，水凝胶的拉伸强度和韧性均达到峰值，分别为 79.6 kPa 和 173.5 kJ/m^3。然而，当 GA 添加量增加至 3.0%（$BZ_{1.5}PG_{3.0}$）时，水凝胶的拉伸强度和韧性分别下降至 25.4 kPa 和 36.9 kJ/m^3，这是因为 GA 添加量的增加会提高水凝胶的交联密度，进而限制了纤维素与 PVA 分子链的运动。此外，水凝胶的杨氏模量随 GA 添加量的增加呈持续上升趋势。当 GA 添加量从 1.5%（$BZ_{1.5}PG_{1.5}$）增至 3.0%（$BZ_{1.5}PG_{3.0}$）时，水凝胶的杨氏模量由 4.7 kPa 增加到 9.8 kPa，这是由于体系中羟基和 GA 间交联密度的提升增强了水凝胶网络的刚性。随后，验证了不同组分对水凝胶力学性能的影响（图 3a）。结果表明，当未添加 Zn^{2+}和 BDP 时，制备得到的 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶的力学性能较差，其拉伸强度和断裂伸长率分别为 45.3 kPa 和 145.1%。相比之下，引入 Zn^{2+}和 BDP 的 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶的拉伸强度和断裂伸长率分别提升至 79.6 kPa 和 624.3%，相较于 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 分别提升了 75.7% 和 330.2%。这种增强效果主要归因于 Zn^{2+}与体系中



a 和 b 分别为水凝胶 $BZ_xPG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 的拉伸应力–应变曲线及其对应的韧性和杨氏模量值；c 和 d 分别为水凝胶 $BZ_{1.5}PG_y$ 的拉伸应力–应变曲线及其对应的韧性和杨氏模量值。

图 3 水凝胶的力学性能

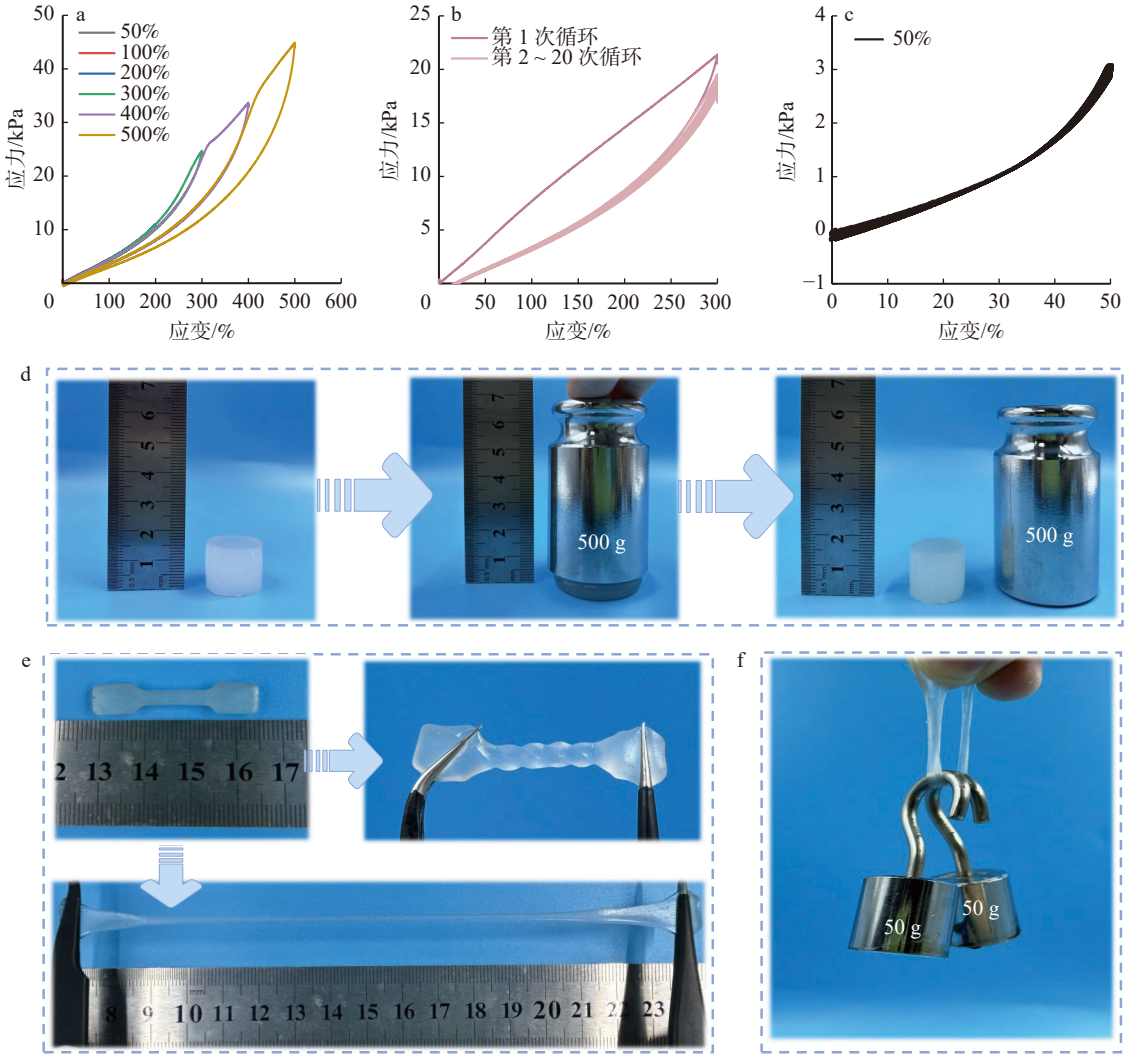
Fig. 3 Mechanical properties of hydrogels

羟基形成的配位作用，BDP 与 GA 的缩醛交联以及 BDP/Zn^{2+}刚性骨架与 PVA 网络间氢键的协同作用。综上所述，$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶在力学性能与延展性之间实现了良好平衡，因此被选作柔性应变传感器制备的理想基材。

如图 4a 所示，在 50% ~ 500% 拉伸应变范围内，水凝胶的应力–应变曲线均呈现出明显的滞后回线，且随着应变的增大，滞后环面积逐渐扩大，表明 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶能够有效耗散能量。抗疲劳性能是柔性传感器长期稳定工作的关键。如图 4b 所示，在 300% 的拉伸应变下进行 20 次连续的循环拉伸实验后，第一次循环后滞后环面积明显减少，这可能是由于第一次循环中复合水凝胶的内部网络连接发生破坏，导致动态氢键在循环之间没有足够的时间重新形成[25]。尽管如此，在随后的循环中，滞后环面积未出现明显的性能衰退，表明其优异的长期抗疲劳能力。在 50% 应变下的 50 次循环压缩测试中（图 4c），其滞后回线高度一致，进一步证实了该水凝胶网络具有良好的形状恢复能力。此外，$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶兼具良好的弹性与韧性，在承受大变形压缩后不发生破裂，且卸力后能瞬间恢复至初始形态（图 4d）。同时，该水凝胶具备优异的拉伸性（图 4e），可拉伸至原始长度的 5 倍而不断裂，并能轻松拉起 2 个 50 g 载荷而保持结构完整（图 4f）。因此，结合其良好的力学与承载性能，该水凝胶适用于柔性电子器件。

2.4 BZPG 水凝胶的导电性和抗冻性

水凝胶的离子电导率主要取决于体系中可自由迁移离子的浓度，且该浓度与 BDP/$ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液质量比的变化密切相关。如图 5a，b 所示，通过 EIS 探究了不同 BDP/$ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液质量比的离子电导率。结果表明，随着质量比的增加，水凝胶的离子电导率呈明显上升趋势。当质量比为 2.0∶1（$BZ_{2.0}PG_{2.0}$）时，最高可达 6.4 S/m，这是因为水凝胶体系中的 Zn^{2+}离子浓度提升，从而增强其离子电导率。此外，离子电导率也受水凝胶中的组分影响。未添加 Zn^{2+}和 BDP 所制备的 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶的离子电导率仅为 2.3 S/m，说明 PVA/GA 网络并不足以提供有效的离子通道。而在引入 Zn^{2+}后，$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 的离子电导率提升至 6.1 S/m，证实了金属离子对电导率起到了主要作用。值得注意的是，尽



a. 水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在不同应变下的循环拉伸测试；b. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在 300% 应变下的循环拉伸曲线；c. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在 50% 应变下的循环压缩曲线；d. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶在 500 g 重物作用下压缩和恢复的图片；e. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶的拉伸变形图片；f. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶拉起 2 个 50 g 重物的图片。

图 4　水凝胶的循环稳定性与承载性能

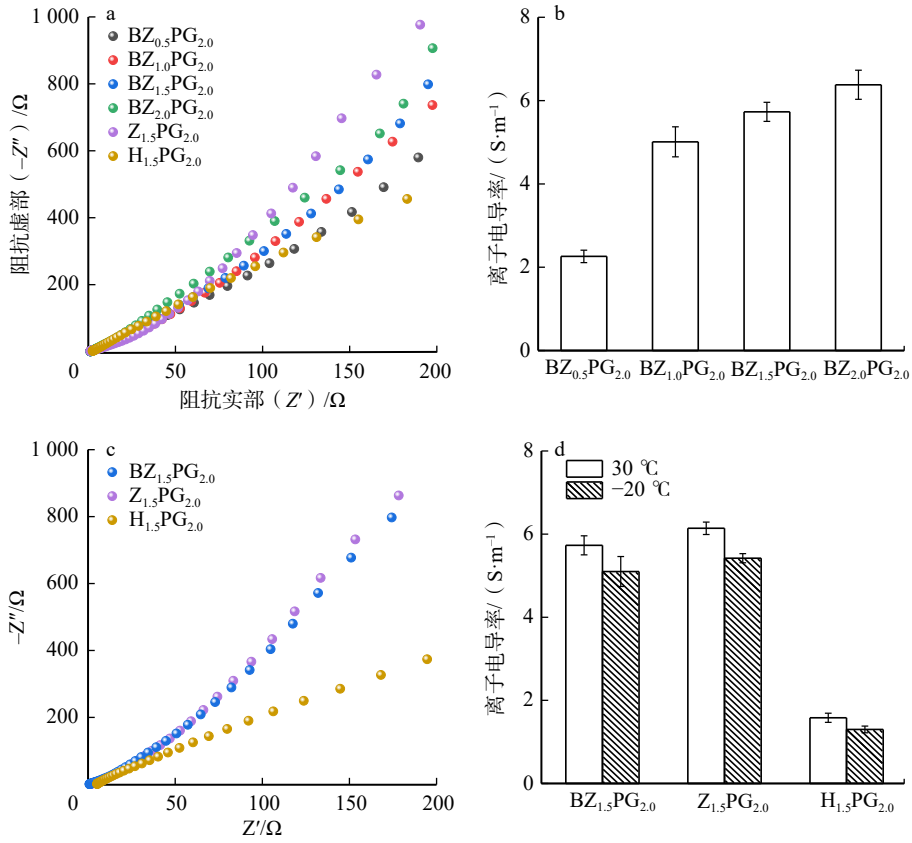
Fig. 4　Cyclic stability and load-bearing performance of the hydrogel

管 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶中同样含有 Zn^{2+}离子，但其电导率（5.7 S/m）略低于 $Z_{1.5}PG_{2.0}$，这可能是因为纤维素与 PVA 在凝胶网络中形成了致密的氢键，增加了空间位阻，从而降低离子迁移率并导致电导率下降。

如图 5c，d 所示，在 –20 ℃ 的低温条件下，$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶仍表现出较高的离子电导率，分别为 5.4 和 5.1 S/m。这主要是因为 $ZnBr_2 \cdot 4H_2O$ 溶液在水凝胶网络中的冰点降低效应，有效抑制了水分子结晶，从而保证了离子迁移。图 6a 对比了水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在–20 ℃ 下的宏观状态，直观展示水凝胶的抗冻能力。由图可知，在 –20 ℃ 环境下冷藏 24 h 后，$H_{1.5}PG_{2.0}$ 完全冻结硬化，失去弹性并发生脆性断裂。而 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在相同条件下依然保持优异的柔韧性，可自由弯折、扭曲和拉伸而不发生断裂。DSC 测试结果（图 6b）进一步揭示其抗冻能力，水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 在–15.2 ℃ 表现出明显的结晶放热峰，表明其内部的自由水易于在低温下形成冰晶，导致材料硬化失效。相比之下，$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在测试温度范围内（–50 ～ 30 ℃）并未出现任何相变峰。这是因为 Zn^{2+}与水分子之间的离子–偶极相互作用破坏了水分子原有的氢键网络结构，同时纤维素与 PVA 网络中的丰富羟基与水分子形成了强氢键[26]，有效抑制了水分子运动并阻碍了冰晶格的成核与生长，从而赋予了水凝胶卓越的抗冻能力[27]。

2.5　BZPG 水凝胶的保水性

水凝胶的保水能力是决定其能否长期稳定工作的关键指标[28]。传统的水凝胶在室温条件下易因水分蒸发而发生脱水，限制了其在柔性电子和生物医用等领域的应用潜力[29]。如图 6c 所示，$H_{1.5}PG_{2.0}$ 仅 1 d 表现出严重的失水行为，质量损失率达 94.2%。相比之下，$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在相同环境条件下



a. 在 30 ℃ 下水凝胶 $BZ_xPG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 的 EIS 图；b. 在 30 ℃ 下水凝胶 $BZ_xPG_{2.0}$ 的离子电导率；c. 在 –20 ℃下水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 的 EIS 图；d. 在 30 和 –20 ℃ 下水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 的离子电导率。

图 5 水凝胶的导电性

Fig. 5 Conductivity of hydrogels

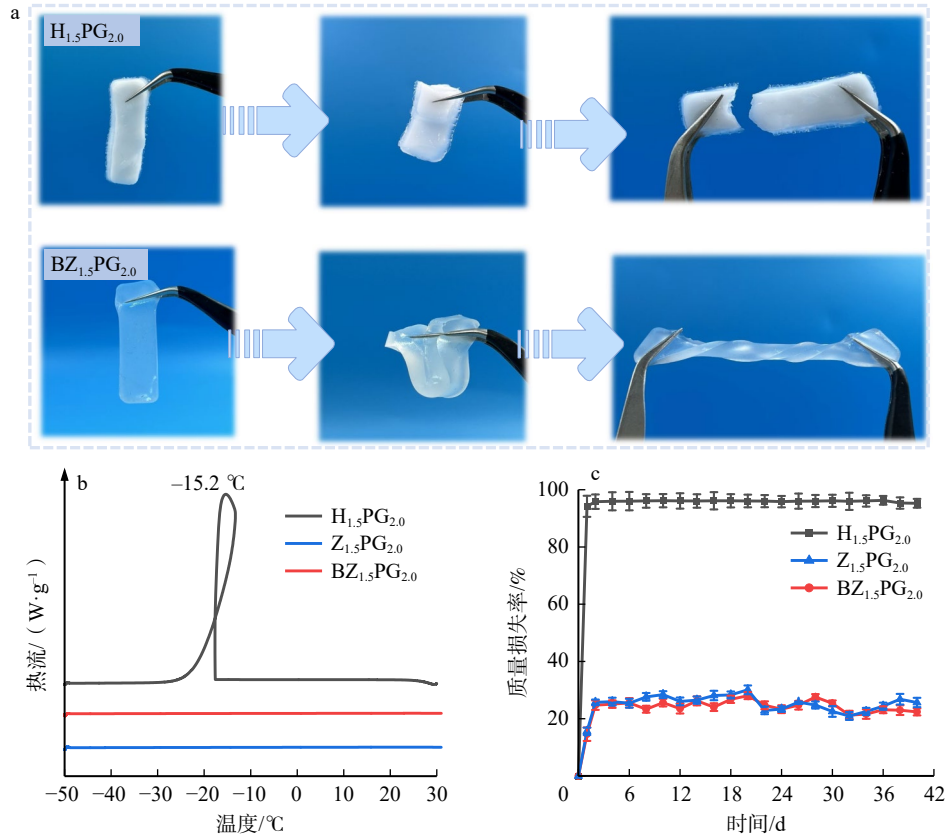
展现出优异的保水性能，1 d 内二者的质量损失率均为 15% 左右，而 40 d 后的质量损失率分别仅有 25.7% 和 22.4%，这与体系中 $ZnBr_2$ 的强吸湿性有关[30]。值得注意的是，$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶在长期放置过程中表现出轻微的质量波动，主要是因为当凝胶发生部分失水后，内部的 Zn^{2+}离子能自发从周围空气中捕获水分以补偿损失。

2.6 BZPG 水凝胶的传感性能

为了评估 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在柔性传感器领域的应用潜力，将其组装成电阻式应变传感器并测试其响应性能。该传感器的主要工作机制为：当水凝胶受到外力拉伸产生形变时，其内部导电网络发生几何尺寸改变及离子传输路径的重排，从而引起电阻的显著变化[31]。如图 7a 所示，传感器的相对电阻变化与施加应变之间呈现高度线性关系（$R^2 > 0.99$），其 G_F 值在 0% ~ 100%、100% ~ 200% 和 200% ~ 300% 的应变区间内分别为 1.6、2.5 和 3.3。进一步考察了传感器在不同形变条件下的实时响应能力（图 7b，c），无论是在低应变（10% ~ 40%）还是高应变（50% ~ 200%）的加载–卸载循环中，传感器均能输出稳定且无明显滞后的电阻信号。图 7d 显示电阻信号随应变梯度的增加（0%→30%→60%→90%）呈阶梯状上升，并在应变释放后（90%→60%→30%→0%）恢复至初始状态。同时，在每个恒定的应变保持阶段，电阻信号均保持平稳且无明显漂移。这些结果证实了该水凝胶基传感器具备出色的响应能力。此外，传感器对动态环境的适应性通过不同拉伸速率测试（50 ~ 200 mm/min）进行了验证。如图 7e 所示，电阻信号能够快速响应速率变化，且信号未受明显影响，表明其良好的动态响应性能。循环稳定性测试（图 7f）表明，在 100% 应变下经历 100 次连续拉伸–释放循环后，输出信号仍保持高度稳定，未出现明显的基线漂移或信号衰减，体现了 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶优异的耐久性。

2.7 BZPG 水凝胶在可穿戴传感中的应用

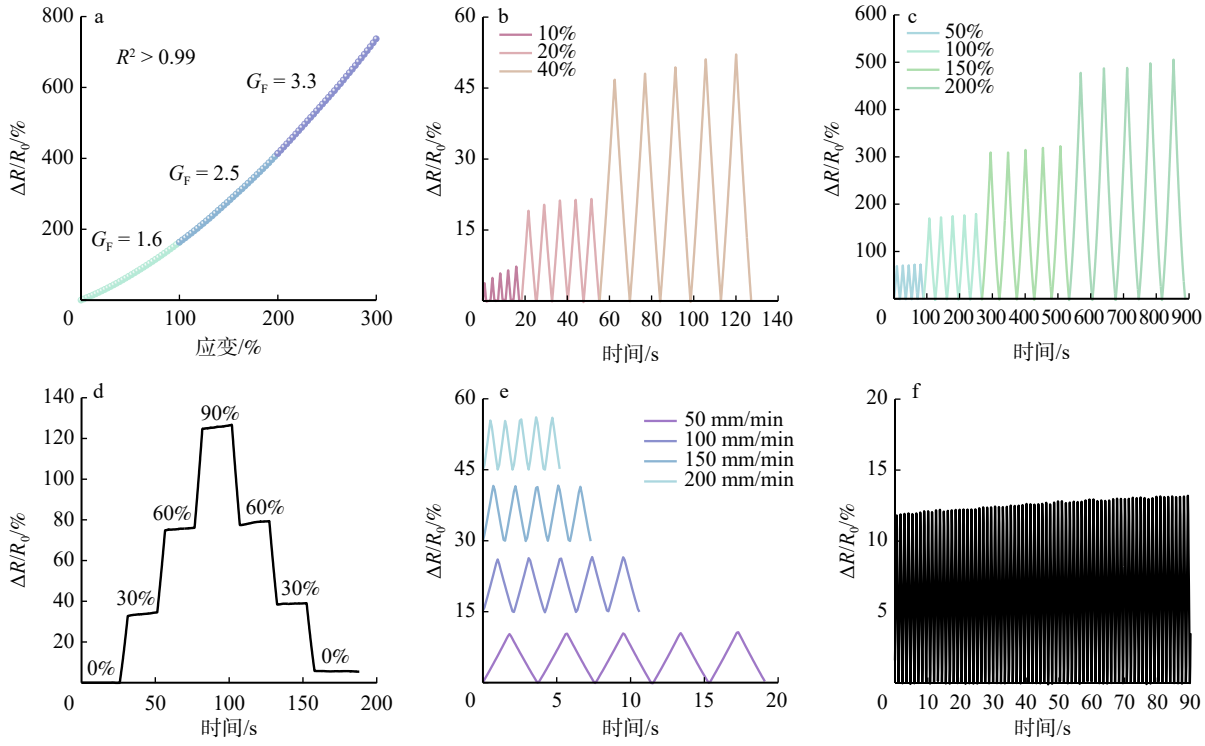
基于水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 优异的力学性能、离子电导率以及灵敏度，使其在可穿戴人体运动监测领域展现出巨大的应用潜力[32]。如图 8b ~ f 所示，将组装的传感器分别贴附于手腕、手指、手臂、膝盖及踝关节等人体关节部位后，可实现对肢体弯曲、伸展等动态生理活动的实时监测。测试结果表明，该传感器能够对不同幅度及频率的人体动作产生清晰的信号响应，体现出良好的响应能力。此外，传感器能够与皮肤表面紧密贴合，在反复机械变形或长时间佩



a. 水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在−20 ℃ 冷藏 24 h 后进行各种机械操作的照片；b. 水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的 DSC 曲线；c. 水凝胶 $H_{1.5}PG_{2.0}$、$Z_{1.5}PG_{2.0}$ 和 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的质量损失率。

图 6　水凝胶的抗冻性和保水性

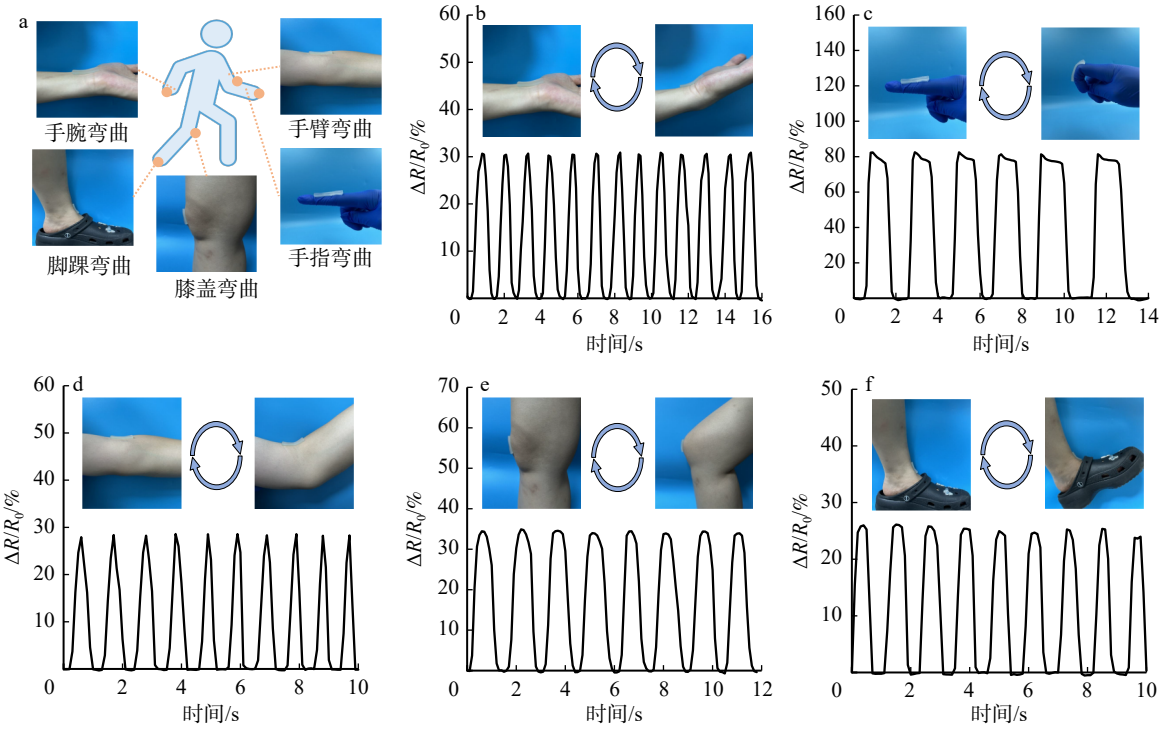
Fig. 6　Frost resistance and water retention of hydrogels



a. 水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 随应变的相对电阻变化；b、c 和 d 为 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$在不同小应变、大应变和梯度应变下的相对电阻变化；e. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在不同拉伸速率下的相对电阻变化；f. $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 在 100% 应变下在 100 个循环下的相对电阻响应。

图 7　水凝胶的传感性能

Fig. 7　Sensing performance of hydrogels



a. 可用于实时监测人体运动状态的传感器示意图；b、c、d、e 和 f 分别为手腕弯曲、手指弯曲、手臂弯曲、膝盖弯曲和脚踝弯曲的相对电阻变化曲线。

图 8 水凝胶在可穿戴传感领域的应用

Fig. 8 Wearable sensing applications of the hydrogel

戴下，其接触界面依然稳定，电学性能未见明显衰减。综上所述，基于 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶构建的柔性应变传感器在人体运动捕捉方面表现出较高的灵敏性与可靠性，在智能可穿戴设备领域展现出极高的应用价值。

3 结 论

本研究针对柔性导电水凝胶在可穿戴器件中常存在力学性能、导电性与环境稳定性难以兼顾的问题，通过在聚乙烯醇/戊二醛（PVA/GA）化学交联的柔性网络中引入纤维素组分 BDP，并利用其与 Zn^{2+} 配位作用构建刚性导电网络，制备了兼具可拉伸性、导电性和环境适应性的 BDP/PVA 复合水凝胶。本研究的具体结论有以下 3 点。

（1）当 BDP/$ZnBr_2$ 溶液与 PVA 溶液的质量比为 1.5∶1，且 GA 添加量为 2.0% 时，所制备的水凝胶 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 表现出最优的力学性能，其拉伸强度和断裂伸长率分别为 79.6 kPa 和 624.3%，相较于 PVA 水凝胶（$H_{1.5}PG_{2.0}$）分别提升了 75.7% 和 330.2%。

（2）$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 表现出优异的导电性与抗冻性能，其在 30 ℃ 下的离子电导率达到 5.7 S/m；在–20 ℃ 的条件下，$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 的离子电导率仍可保持在 5.1 S/m，同时材料依然具有良好的柔韧性。

（3）$BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 具有良好的保水能力，在自然条件下放置 40 d 后，其质量损失率仅有 22.4%。基于 $BZ_{1.5}PG_{2.0}$ 水凝胶构建的柔性应变传感器可以对外界刺激表现出灵敏且稳定的信号响应，还可以实现对人体细微运动的监测，展现出其在可穿戴电子器件领域的良好应用前景。

本研究实现了复合水凝胶力学性能、导电性能与环境稳定性的协同调控，为开发适用于极端环境的高性能柔性电子器件提供了新的思路。然而，该材料在强度与延展性方面仍有提升空间，其长期稳定性及传导机制也仍需开展更深入的研究。后续工作可围绕体系组分优化、复杂环境适应性评价以及器件集成等方面展开，以进一步推动其在可穿戴电子领域中的实际应用。

参 考 文 献

[1] Liu Y, Liu Q, Zhong L, et al. Tough, antifreezing, and conductive double network zwitterionic-based hydrogel for flexible sensors [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139314.

[2] Du Z, Wang N, Du J. Recent progress in cellulose-based conductive hydrogels [J]. Polymers, 2025, 17(8): 1089.

[3] Han Y, Liu Y, Liu Y, et al. High-performance PVA-based hydrogels for ultra-sensitive and durable flexible sensors [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2025, 8(1): 154.

[4] Ge W, Cao S, Yang Y, et al. Nanocellulose/LiCl systems enable conductive and stretchable electrolyte hydrogels with tolerance to dehydration and extreme cold conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 408: 127306.

[5] Li Z, Yin F, He W, et al. Anti-freezing, recoverable and transparent conductive hydrogels co-reinforced by ethylene glycol

as flexible sensors for human motion monitoring [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123117.

[6] Chen Q, Xiao Y, Yang H Y, et al. Cellulose nanocrystals-strengthened, anti-drying, and anti-freezing hydrogels for human motion sensing and 3D printing [J]. Polymer, 2024, 296: 126837.

[7] Fan X, Wang L, Bai S, et al. A one-step polyvinyl alcohol/polyacrylamide/polyacrylic acid/dimethyl sulfoxide/$CaCl_2$ hybrid hydrogel enabling anti-fatigue, anti-freeze and anti-dehydration for wearable strain sensor [J]. European Polymer Journal, 2024, 221: 113573.

[8] Liu H, Zhang X F, Li M, et al. Attapulgite-reinforced cellulose hydrogels with high conductivity and antifreezing property for flexible sensors [J]. Langmuir, 2024, 40(40): 20986−20994.

[9] Shu L, Wang Z, Zhang X F, et al. Highly conductive and anti-freezing cellulose hydrogel for flexible sensors [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123425.

[10] Li X, Wang Y, Tian Y, et al. Biomimetic multiscale structure with hierarchically entangled topologies of cellulose-based hydrogel sensors for human-computer interaction [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122825.

[11] Miao H, Liu Y, Man Y, et al. High-efficiency and recyclable green molten salt hydrate solvent for cellulose hydrogels with high conductivity and freeze tolerance [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(24): 9225−9234.

[12] Liu J, Zhu Y, Ou M, et al. Preparation of a strong, tough and sensing cycle stable ionic conductive hydrogel fiber for strain sensor *via* introduction of syndiotactic polyvinyl alcohol [J]. Composites Communications, 2025, 53: 102208.

[13] Li X, Zhang L, Yan M, et al. Ternary synergy in $ZnBr_2/H_2O$ enables ambient cellulose dissolution and closed-loop hydrogel electrolytes for sustainable supercapacitors [J]. Energy Storage Materials, 2026, 84: 104852.

[14] Li X, Wang Y, Tian Y, et al. Aqueous $AlCl_3/ZnCl_2$ solution room-induced the self-growing strategy of expanded topological network for cellulose/polyacrylamide-based solid-state electrolytes [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 670: 311−322.

[15] 田雅慧. 基于 $AlCl_3/ZnCl_2$ 溶剂常温构建高性能纤维素基离子导电水凝胶 [D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
Tian Y H. Room-temperature construction of the high-performance cellulose-based, ionic conductive hydrogel via the $AlCl_3/ZnCl_2$ solvent[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.

[16] Zhang Z, Liu Y, Lin S, et al. Preparation and properties of glutaraldehyde crosslinked poly(vinyl alcohol) membrane with gradient structure [J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27(8): 228.

[17] Zhang Y, Xiong Y, Li X, et al. Oxidization and salting out synergistically induced highly elastic, conductive, and sensitive polyvinyl alcohol hydrogels [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(6): 2415207.

[18] Sun X, Qin Z, Ye L, et al. Carbon nanotubes reinforced hydrogel as flexible strain sensor with high stretchability and mechanically toughness [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 382: 122832.

[19] Mardiyati Y, Satriawan L, Shoimah S M, et al. Modification of crabgrass-based oil/water separation filter paper using polyvinyl alcohol/glutaraldehyde (PVA/GA) [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 713: 136530.

[20] Ding L, Chen L, Hu L, et al. Self-healing and acidochromic polyvinyl alcohol hydrogel reinforced by regenerated cellulose [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 255: 117331.

[21] Hu S, Huang Y, Liu X, et al. Mechanically robust and highly conductive bacterial cellulose hydrogels through synergy of directional freeze–thawing and salting-out for wearable sensors [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 156161.

[22] Hou T, Guo K, Wang Z, et al. Glutaraldehyde and polyvinyl alcohol crosslinked cellulose membranes for efficient methyl orange and Congo red removal [J]. Cellulose, 2019, 26(8): 5065−5074.

[23] Liu F, Jiang Z, He F, et al. Zn^{2+}-coordinated phase change hydrogels with enhanced mechanical properties and quadruple responsivity for sensing [J]. Polymer, 2026, 344: 129504.

[24] Luo J, Song T, Han T, et al. Multifunctional roles of TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils on the enhancement of mechanical and conductive properties of acrylic-based hydrogels for temperature response and human motion sensing [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152649.

[25] Sun S, Hao S, Liu Y, et al. Mechanically resilient, self-healing, and environmentally adaptable eutectogel-based triboelectric nanogenerators for all-weather energy harvesting and human–machine interaction [J]. ACS Nano, 2025, 19(1): 811−825.

[26] Gao J, Li X, Xu L, et al. Transparent multifunctional cellulose-based conductive hydrogel for wearable strain sensors and arrays [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 329: 121784.

[27] Yang Y, Zhu Y, Yang A, et al. Rapid fabricated *in-situ* polymerized lignin hydrogel sensor with highly adjustable mechanical properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129378.

[28] Nie Y, Yue D, Xiao W, et al. Anti-freezing and self-healing nanocomposite hydrogels based on poly(vinyl alcohol) for highly sensitive and durable flexible sensors [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 436: 135243.

[29] Zhang M, Chen T, Xu T, et al. Functionalities and properties of conductive hydrogel with nanocellulose integration [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 159872.

[30] Lv X, Zhang Q, Li Z, et al. Antifreezing, water retention, and high-stretch ionic conductive hydrogels for winter motion sensing [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(27): e57130.

[31] Sun D, Feng Y, Sun S, et al. Transparent, self-adhesive, conductive organohydrogels with fast gelation from lignin-based self-catalytic system for extreme environment-resistant triboelectric nanogenerators [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(28): 2201335.

[32] Li Y, Liu Y, Zuo F, et al. Anisotropic nanocomposite double network anti-freezing hydrogels with superior conductivity, high stretchability, and excellent resilience for wearable sensors [J]. Composites Communications, 2025, 59: 102566.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　许　凤）