引用格式：黄炜婷，陈煜. 霍夫迈斯特效应在水凝胶柔性传感器领域的研究进展[J]. 材料工程，2026，54(6)：1-12.
HUANG Weiting，CHEN Yu. Research progress in Hoffmeister effect for hydrogel flexible sensors[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：1-12.

霍夫迈斯特效应在水凝胶柔性传感器领域的研究进展

黄炜婷，陈　煜*
（北京理工大学 材料学院，北京 100081）

摘要：水凝胶作为一种具有高含水量、优异生物相容性和可调节力学性能的柔性材料，已成为构建高性能柔性传感器的理想选择。霍夫迈斯特效应能够在不进行复杂化学修饰的前提下，通过不同的离子作用机制改变水凝胶分子链的聚集状态，可以实现水凝胶力学性能与导电性能的协同优化，从而满足复杂环境下的高灵敏度检测需求。此外，霍夫迈斯特效应还为开发环境稳定性的水凝胶传感器提供了新的研究方向。因此，基于霍夫迈斯特效应的水凝胶柔性传感器在智能电子设备领域展现出巨大的应用潜力。本文综述了霍夫迈斯特效应调节水凝胶的机制，并总结了霍夫迈斯特效应对水凝胶力学性能、导电性能、环境稳定性和生物相容性等性能的调控作用，以及基于霍夫迈斯特效应的水凝胶柔性传感器的应用。最后指出霍夫迈斯特效应调控的水凝胶柔性传感器未来的重点研究方向，旨在为水凝胶柔性应变传感器的进一步发展提供理论基础和实践指导。

关键词：霍夫迈斯特效应；水凝胶；柔性传感器；运动监测
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000194　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000194
中图分类号：TB381　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0001-12

Research progress in Hoffmeister effect for hydrogel flexible sensors

HUANG Weiting，CHEN Yu*
（School of Materials Science and Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China）

Abstract：Hydrogel is a flexible material with a high water content，excellent biocompatibility，and adjustable mechanical properties，making it an ideal choice for constructing high-performance，flexible sensors. The Hofmeister effect can alter the aggregation state of hydrogel molecular chains through various ionic action mechanisms without the need for complex chemical modifications. This enables synergistic optimization of hydrogel mechanical properties and electrical conductivity，thereby meeting the need for high-sensitivity detection in complex environments. Furthermore，the Hofmeister effect opens up a novel research avenue for the development of environmentally stable hydrogel sensors. Consequently，hydrogel flexible sensors based on the Hofmeister effect demonstrate significant potential for application in the field of smart electronic devices. This review offers a comprehensive review of the mechanisms by which the Hofmeister effect regulates hydrogels，summarizing its impact on the regulation of their mechanical properties，electrical conductivity，environmental stability，and biocompatibility. Additionally，it explores the applications of hydrogel flexible sensors based on the Hofmeister effect. It is concluded that the development of hydrogel flexible sensors modulated by the Hofmeister effect is a pivotal research direction for the future，aiming to provide a theoretical foundation and practical guidance for the further advancement of hydrogel flexible strain sensors.

Key words：Hoffmeister effect；hydrogel；flexible sensor；motion monitoring

作为柔性电子设备的核心组件，柔性传感器能够有效克服传统刚性传感器在贴合人体皮肤和适应复杂环境的局限性[1-3]，在可穿戴设备[4-7]、电子皮肤[8-11]和软机器人[12-15]等领域展现出巨大的应用潜力。水凝胶因具有高含水量、优异生物相容性和柔韧的力学性能的特性，成为构建高性能柔性传感器的理想选择[16-19]。然而，尽管水凝胶在柔性传感器领域具有显著优势，其实际应用仍面临诸多挑战。传统水凝胶的力学性能不足、导电性能较低、抗冻性差、保水性有限等问题严重限制了其在复杂环境中的使用[20-22]。为了克服这些缺陷，研究人员提出了多种功能化策略。双交联网络是增强水凝胶力学性能的有效方法之一，例如，Zhang 等[23]通过将化学交联的聚丙烯酰胺(PAM)与物理交联的羧甲基壳聚糖接枝聚苯胺/银网络(CMCS-g-PANI/Ag)相结合，制备出具有优异力学性能和导电性的双网络水凝胶。此外，引入金属离子、纳米材料和导电聚合物等导电材料也是提升水凝胶性能的常用策略：Xu 等[24]向全物理交联网络水凝胶中引入 Fe^{3+}；Qin 等[25]采用疏水性碳纳米管(CNTs)改性聚丙烯酰胺(HAPAAm)水凝胶；Han 等[26]将聚多巴胺(PDA)掺杂的聚吡咯(PPy)纳米纤维引入聚丙烯酰胺(PAM)体系，从而提升水凝胶的力学性能和导电性能。这些方法虽然能有效提升水凝胶的性能，但普遍存在工艺复杂、成本高昂或环境适应性不足等局限性。

近年来，研究者们将蛋白质领域发现的霍夫迈斯特效应引入水凝胶材料的设计中，为其性能优化提供了一种简单且高效的策略。霍夫迈斯特效应通过改变离子的种类和浓度，调节水凝胶分子链的聚集状态，从而显著提升其力学性能[27-29]。例如，盐析离子则能够增强其硬度和稳定性[30]，而盐溶离子可以诱导水凝胶形成更柔软且敏感的结构[31]。这种基于离子调控的方法操作简便、成本低廉，不仅避免了复杂的化学修饰，而且能够提升水凝胶的环境适应性和稳定性[32]。当前，基于霍夫迈斯特效应的水凝胶柔性传感器已成为国际学术研究的热点之一。

霍夫迈斯特效应通过精确调控离子种类和浓度，可以实现水凝胶力学性能与导电性能的协同优化，从而满足复杂环境下的高灵敏度检测需求。此外，霍夫迈斯特效应还为开发具有环境稳定性的水凝胶传感器提供了新的研究方向。未来，随着对霍夫迈斯特效应机制的深入研究，水凝胶柔性传感器有望在可穿戴设备、智能医疗和软机器人等领域实现更广泛的应用，推动柔性电子技术的进一步发展。本文将系统地介绍霍夫迈斯特效应用于水凝胶柔性传感器的研究进展，并从霍夫迈斯特效应调节水凝胶的作用机制、性能及柔性传感器的应用等方面展开综述(图 1)。

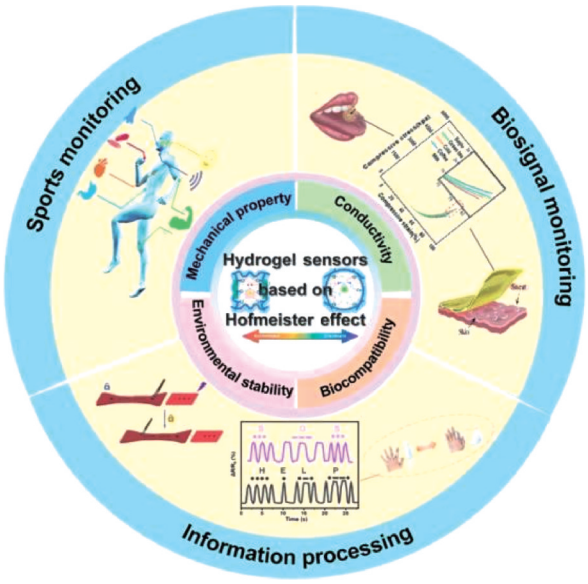


图 1 霍夫迈斯特效应调控的水凝胶柔性传感器的性能及应用

Fig.1 Properties and applications of hydrogel flexible sensors modulated by the Hoffmeister effect

1 霍夫迈斯特效应调节水凝胶的作用机制

1888 年，弗朗茨·霍夫迈斯特(Franz Hofmeister)建立了具有重要科学意义的霍夫迈斯特系列[33]，即在盐溶液中，不同的盐离子对蛋清蛋白或其他胶体具有不同的沉淀能力，这种效应被称为霍夫迈斯特效应、溶致效应或离子特异性效应[34]。他通过系统研究建立了霍夫迈斯特离子序列(图 2(a))，根据盐对蛋白质在水溶液中溶解度的影响能力排序，与水有着强烈相互作用的离子称为盐析离子，与水相互作用较弱的离子称为盐溶离子[35]。阴离子的典型顺序为：$CO_3^{2-}>SO_4^{2-}>S_2O_3^{2-}>H_2PO_4^->F^->Cl^->Br^->NO_3^->I^->ClO_4^->SCN^-$。其中，$Cl^-$左侧的阴离子(如 CO_3^{2-}、SO_4^{2-})为盐析离子，能够稳定水结构并引发盐析效应；而 Cl^-右侧的阴离子(如 I^-、ClO_4^-)为盐溶离子，倾向于破坏水结构并促进盐溶效应。阳离子的霍夫迈斯特效应顺序为 $N(CH_3)_4^+>NH_4^+>Cs^+>Rb^+>Na^+>Li^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>Zn^{2+}>Ba^{2+}$。$Na^+$左边的弱水合阳离子产生盐析效应，倾向于稳定蛋白质，而右边的二价阳离子会产生盐溶效应并促进蛋白质解析。

霍夫迈斯特效应对水凝胶微观结构的调控主要通过离子与聚合物链、水分子之间复杂的相互作用实

现。Cremer团队[36]从分子角度提出了三重作用机制(图2(b)),Wu等[37]则利用三重作用机制解释了霍夫迈斯特序列离子对水凝胶中聚合物链的调控过程(图2(c)):首先,极化效应是指强水合离子能够极化水合水分子,从而破坏聚合物链与其水合水分子之间的氢键稳定性。这种效应常见于盐析离子,它们通过破坏水合层导致聚合物链脱水并聚集,最终形成小孔结构,使水分子从聚合物链间排出,同时促进羟基间氢键的形成,引发聚合物链的结晶或聚集。其次,表面张力效应是指强水合离子通过增加聚合物链周围空腔的表面张力,干扰聚合物的疏水水合作用,这种效应进一步加剧了离子的盐析作用,导致聚合物链的塌陷和水凝胶结构的致密化。最后,直接结合效应是指弱水合离子与聚合物链上部分带电的位点直接结合,为聚合物链引入额外的电荷,从而增加其溶解度。盐析离子主要通过极化效应和表面张力效应促进聚合物链的聚集和结晶,而盐溶离子则通过直接结合效应增加聚合物的溶解度。

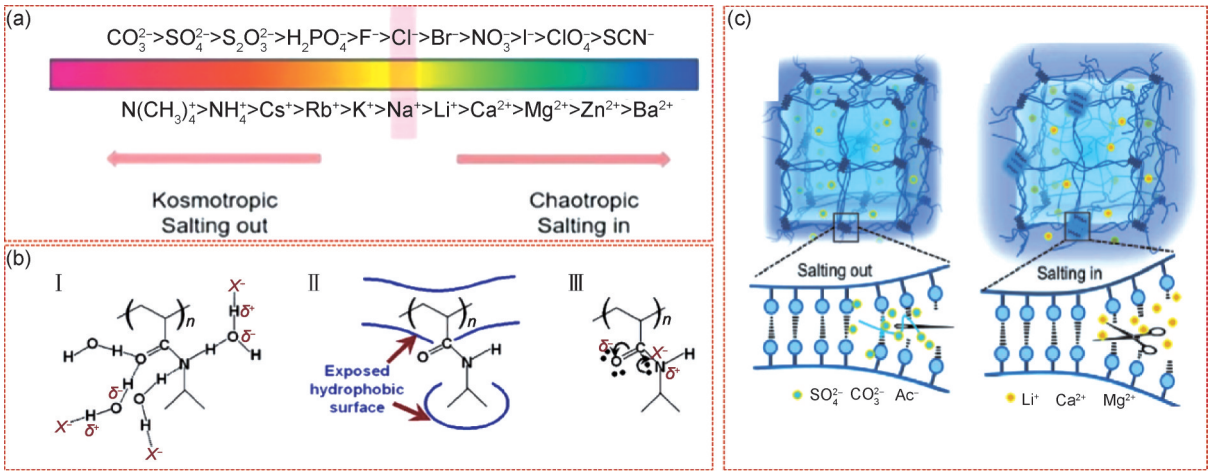


图2　霍夫迈斯特效应调控水凝胶的机制

(a)霍夫迈斯特序列离子[34];(b)三重作用机制[36];(c)盐析、盐溶作用对水凝胶结构的调控[37]

Fig.2　Mechanism of Hoffmeister effect regulating hydrogels

(a)Hoffmeister sequence ions[34];(b)triple mechanism of action[36];(c)regulation of hydrogel structure by salt precipitation and salt solubilization effects[37]

2　霍夫迈斯特效应调节水凝胶的性能

理想的柔性传感器应当稳定、长期地响应环境变化并输出电信号,同时用于制备柔性传感器的水凝胶材料应当具有良好的力学性能、导电性能、环境稳定性和生物相容性等特点[38-40]。霍夫迈斯特效应能够通过离子作用机制调节分子链的聚集行为,改变水凝胶的微观结构,实现对水凝胶力学性能、导电性能的动态调节,从而满足复杂环境下对材料的高灵敏度检测需求。然而,在实际应用中,高含水量的水凝胶在溶液环境中的溶胀以及在低温环境下的冻结和失水现象,都极大地局限了水凝胶传感器的应用[41]。霍夫迈斯特效应能够提升水凝胶的抗溶胀性、保水性和抗冻性,为开发具有环境稳定性的水凝胶柔性传感器提供了一种有效策略。

2.1　力学性能

水凝胶的力学性能的精确调控一直是扩展其在柔性传感器领域的关键挑战。霍夫迈斯特效应能够在不改变材料化学组成的前提下,通过调节离子种类和浓度,实现对水凝胶力学性能的动态调控,从而满足柔性传感器对力学性能的多样化需求[42-43]。

霍夫迈斯特效应能够有效调节水凝胶的强度和韧性,既能实现高强度、高韧性水凝胶材料的构建,也能够拓宽水凝胶力学性能的可变范围。Ren等[44]制备了一种由聚乙烯醇(PVA)、聚甲基丙烯酸磺基甜菜碱(PSBMA)和硫酸(H_2SO_4)组成的齐聚物双网络水凝胶。H_2SO_4和PSBMA的霍夫迈斯特效应促使PVA链形成大量纳米晶域,这些晶域是主要的物理交联点,可提供有效的能量耗散,极大增强了聚合物链的力学性能。PVA/PSBMA-H_2SO_4水凝胶的拉伸强度高达2.01 MPa,明显高于PVA-PSBMA水凝胶(0.18 MPa)。PVA/PSBMA-H_2SO_4水凝胶的杨氏模量为127.3 kPa,韧性为4.61 MJ·m^{-3},而PVA/PSBMA水凝胶仅为13.5 kPa和0.18 MJ·m^{-3}。该研究基于这种高韧性的材料开发了一种应变传感器,用于监测海洋动物模型的水下运动。Wu等[37]利用霍夫迈斯特效应调节PVA

分子链的聚集状态。在不同离子的作用下，PVA水凝胶的各种力学性能在宽范围内连续可逆地原位调节：拉伸强度从50 kPa到15 MPa，韧性从0.0167 MJ·m^{-3}到150 MJ·m^{-3}，伸长率从300%到2100%，模量从24 kPa到2500 kPa。这一策略使PVA水凝胶具有高力学性能和广泛的动态可调性，扩展其从生物医学到可穿戴电子的应用范围。

除了强度和韧性，抗疲劳性对水凝胶柔性传感器同样重要，它决定了水凝胶在反复形变下的长期稳定性和可靠性。研究显示，霍夫迈斯特效应在提升水凝胶抗疲劳性能方面也有显著作用。Wu等[45]采用溶剂交换和霍夫迈斯特效应协同调节的方法，制备了一种力学可调的PVA_x/GC/CR_y（其中x是PVA含量（质量分数/%，下同）；CR是氯化钠溶液；y是NaCl的含量）水凝胶。研究显示，未经霍夫迈斯特效应调控的PVA_{15}/GC/CR_0和PVA_{20}/G/CR_0水凝胶的疲劳阈值分别为49.03 J·m^{-2}和365.1 J·m^{-2}，经过霍夫迈斯特效应调控后，PVA_{15}/GC/CR_3和PVA_{20}/GC/CR_3水凝胶的疲劳阈值分别增至285.2 J·m^{-2}和389.9 J·m^{-2}。对于有裂纹的PVA_{25}/GC/CR_3水凝胶，在临界应变为40%时，它也能承受超过30000次的拉伸测试，而没有明显的裂纹生长。该水凝胶抗疲劳性的提升主要归功于霍夫迈斯特效应对聚合物网络结构和构象的调整，使水凝胶的链缠结和结晶畴密度提升，为其拉伸过程受到的外力提供了大量能量耗散的位点，从而能够显著钝化疲劳裂纹并抑制裂纹的扩展。

2.2 导电性能

水凝胶材料的导电性直接决定了柔性传感器的灵敏度、响应速度和信号传输效率。霍夫迈斯特效应能够优化水凝胶中离子的迁移路径和分布，提高离子电导率，同时能够增强水凝胶导电网络的稳定性[46-48]。近期，已有许多研究利用霍夫迈斯特效应提升水凝胶柔性传感器的导电性能。Guo等[31]制备了一种PVA/明胶/羧化纤维素纳米纤维（CNF）/硼砂有机氢凝胶（PGCB-OHs），结合霍夫迈斯特效应开发了一种具备优异导电性、机械强度和多功能性的导电凝胶材料，可用于可穿戴传感器和人造皮肤中。该研究系统探究了霍夫迈斯特序列中的各种离子对PGCB-OHs水凝胶导电性能的影响，能够在一个宽范围内连续原位调控水凝胶的电导率。其中，阴离子对水凝胶的离子电导率的作用效果比阳离子更显著。在阴离子系列中，经各种阴离子对PGCB-OHs水凝胶导电性能的增强顺序为：$Cl^->Ac^->S_2O_3^{2-}>NO_3^->I^->CO_3^{2-}>SO_4^{2-}>Cit^{3-}$，PGCB-NaCl-OHs的电导率最高（1.60 S·m^{-1}），PGCB-Na_3Cit-OHs的电导率最低（0.08 S·m^{-1}）。在盐析过程中，霍夫迈斯特效应离子可以增加水凝胶结构中的电解质，从而增强其离子电导率。Qin等[49]通过动态席夫碱键合成明胶和氧化羧甲基纤维素钠双网络水凝胶（Gel-OCMC），然后利用硫酸铵（AMS）的霍夫迈斯特效应提高水凝胶的力学性能和导电性能，将该材料用于人体关节运动的检测。研究发现，浸泡在AMS溶液中的Gel-OCMC水凝胶的电导率分别为1.197 S·m^{-1}（15% AMS）、1.557 S·m^{-1}（20% AMS）、3.94 S·m^{-1}（25% AMS）、0.442 S·m^{-1}（30% AMS），与未浸泡AMS溶液（0.137 S·m^{-1}）的Gel-OCMC水凝胶相比，电导率显著提高。Du等[50]将羧化多壁碳纳米管和壳聚糖组装体（c-MWCNTs@CS）组装体分散到明胶和聚丙烯酰胺（PAM）的双网络水凝胶（PG）中，并加入适量的AMS溶液以诱导霍夫迈斯特效应，最终合成了一种具有高强度、高拉伸性、优异抗疲劳性和快速自恢复能力的纳米复合导电水凝胶（PGCN），在可穿戴传感器中显示出巨大的应用潜力。该研究测试发现，不同的凝胶中，PG水凝胶的电导率相对较低，约为0.0658 S·m^{-1}；在引入AMS溶液后，电导率随着盐浓度的升高而进一步增加，在2 mol·L^{-1}浓度下达到最大值5.0933 S·m^{-1}，大约是原始PG水凝胶的77倍。这是因为无机盐电解为水凝胶结构增加了导电途径，充分说明霍夫迈斯特效应能有效提升水凝的导电性能。

2.3 环境稳定性

水凝胶柔性传感器在实际应用中需要在复杂环境下保持稳定性能，因此对材料的抗冻性、抗脱水性和抗溶胀性等性能提出了严格要求[51-53]。研究表明，霍夫迈斯特效应能够通过调控水凝胶的聚合物网络和水合状态，为开发适应复杂环境的水凝胶柔性传感器提供了有效途径。

在低温环境下，水凝胶传感器需要具备抗冻性以确保传感器不发生冻结或性能衰减。Lu等[54]制备了多巴胺丙烯酰胺（DAA）和2-甲基丙烯酰氧乙基磷酰胆碱（MPC）复合水凝胶（PDM），并引入$Zn(ClO_4)_2$溶液，利用其霍夫迈斯特效应，开发了一种具有生物相容性、高离子电导率、抗冻结性能、抗脱水性能的柔性传感器。研究发现，含3～5 mol·L^{-1} $Zn(ClO_4)_2$的PDM水凝胶不会结冰，在－45 ℃仍能保持透明和柔韧，其中，含4 mol·L^{-1} $Zn(ClO_4)_2$的PDM水凝胶的离子电导率在－45 ℃的状态下仍保持1.87 S·m^{-1}的离子电导率。这是因为$Zn(ClO_4)_2$的霍夫迈斯特效应影响了水凝胶分子链中的MPC单元的齐聚物基团、DAA单元的羟基与水分子相互作用，阻碍冰晶的形成，从而使PDM/$Zn(ClO_4)_2$水凝胶具有优异的抗冻性

能。Quan等[55]在PVA和MXene存在下，通过2-丙烯酰胺基-2-甲基-1-丙磺酸（AMPS）和丙烯酸（AA）的原位自由基聚合，然后用LiCl溶液浸泡制得了一种具有抗冻性、抗脱水性和导电性的复合水凝胶（PMS），用于干燥和寒冷地区的电子皮肤应用。PMS水凝胶的凝固点原先为－21 ℃，用LiCl溶液浸渍后，水凝胶在－100～20 ℃之间没有明显的凝固点。这得益于LiCl的霍夫迈斯特效应，导致聚合物内部的水分子之间会形成水合壳结构，水分子之间的氢键减弱会降低水凝胶的凝固点，从而防止冰晶的生长，提高PMS水凝胶的抗冻性能。

在长期使用中，水凝胶需要具备抗脱水性防止失水变脆，丧失柔韧性和导电性。Quan等[55]基于聚合物双网络、霍夫迈斯特效应和静电作用的协同效应制备的PMS水凝胶具有出色的抗脱水性。随着相对湿度（RH）从80%降至30%，未经LiCl溶液处理的MXene水凝胶的质量急剧下降；经过LiCl溶液浸泡后的PMS水凝胶在30%相对湿度下仅损失部分水分，在50%相对湿度下，PMS水凝胶的质量保持率甚至超过100%，这是因为LiCl溶液的蒸气压与环境蒸气压达到了平衡。此外，PMS水凝胶还能在室温和50%相对湿度条件下稳定存放7天而不发生任何质量损失，这表明PMS水凝胶具有长期防干燥性能。

在溶液环境中，水凝胶需要具有抗溶胀性以防止过度膨胀而导致结构破坏。Zhang等[56]通过结合霍夫迈斯特效应和定向冷冻技术开发了一种分层、高强度、坚韧和抗溶胀的PVA/MXene水凝胶，表示为S-P_xM_y，其中x和y分别代表PVA溶液和MXene溶液的体积比。研究发现，S-P_3M_1水凝胶由于独特的分形结构和霍夫迈斯特效应产生的高密度交联，显示出抗溶胀性能。S-P_3M_1水凝胶在去离子水中浸泡1、3、5、7天后表现出几乎相同的力学性能，机械强度保持在0.65 MPa左右。S-P_3M_1水凝胶的溶胀率也在平衡后达到75%，此后保持不变，第7天的膨胀率为78%，这表明了该水凝胶具有出色的抗溶胀性能。此外，研究还测量了S-P_3M_1水凝胶溶胀前后的电阻率，溶胀后的电阻率仅增加了6%，说明水凝胶在溶胀后依然保持了良好的导电性。

2.4　生物相容性

随着水凝胶柔性传感器在生物医学领域应用的深入，当前的研究对其生物相容性提出了更加严格的要求，需要材料能够与生物组织良好兼容，避免引发炎症或排斥反应[57]。研究表明，霍夫迈斯特效应能够优化水凝胶的化学结构、溶胀行为等特性，提高材料的生物相容性。Zhao等[58]通过霍夫迈斯特效应增强明胶/氧化葡聚糖（Gel/O-Dex）水凝胶的力学性能和生物相容性，以加速伤口愈合。研究表明，霍夫迈斯特效应并没有改变聚合物链的化学结构，而只是诱导了凝胶分子链之间的α-螺旋结构、疏水相互作用区和螺旋交界区等物理交联域。与未经处理的水凝胶相比，NaH_2PO_4的霍夫迈斯特效应调节后的水凝胶通过物理交联减少了醛基，从而改善了水凝胶的生物相容性。Gel/O-Dex水凝胶组的细胞增殖率略低于用20% NaH_2PO_4溶液处理的Gel/O-Dex水凝胶组，这表明霍夫迈斯特效应改善了水凝胶的细胞相容性。此外，分别在7、14、21天观察和评估了水凝胶对伤口愈合的影响。对伤口闭合率的定量分析显示，霍夫迈斯特组在所有时间点的伤口闭合率都是最高的。这表明通过NaH_2PO_4的霍夫迈斯特效应增强了Gel/O-Dex水凝胶在体内的促进伤口愈合能力。

3　霍夫迈斯特效应在水凝胶柔性传感器的应用

通过霍夫迈斯特效应调整水凝胶分子链聚集状态及微观结构，可以获得具有良好力学性能、导电性能、环境响应性能、生物相容性等多种性能的智能复合水凝胶，在柔性传感器领域具有巨大潜力。基于霍夫迈斯特效应调控的水凝胶柔性传感器已广泛应用于人体运动监测[43,59-61]、生理状态监测[62-63]、信息加密及传输[64-66]等应用场景。其中，基于水凝胶柔性材料的可穿戴传感器已被证明可以监测人体和动物的各种运动，评估其运动能力和健康情况，并辅助诊断相关疾病[47]。生理状态监测主要关注用户的生理活动，它旨在通过记录汗液、味觉等生理指标来评估用户的健康状况，这些指标对健康管理、疾病预防和疾病控制具有重要意义[5]。此外，由于具有优异的刺激响应性和导电性，水凝胶柔性传感器可以结合不同的原理作为信息加密、传输的途径[62]。

3.1　运动监测

随着社会健康问题的日益突出，人们愈加关注自身健康状况，可穿戴健康监测设备的市场需求不断扩大，其中，监测人体运动至关重要，尤其是在确定运动康复患者的康复进展时[67-68]。人体运动分析涉及实时监测和记录人体动力学。水凝胶柔性传感器由具有良好拉伸性和柔韧性的材料制成，这些特征使其可以与人体紧密贴合而不会受到干扰，减少了对佩戴者日常活动的限制[42,69-70]。高灵敏度的水凝胶传感器可以监测一系列人体运动，成为疾病诊断治疗、康复监测的重要材料。Guo等[31]结合霍夫迈斯特效应的PGCB-OHs水凝胶，可作为一种可穿戴传感器用于实

时监测人体的各种生理运动，如图 3(a)所示，基于 PGCB-OHs 的传感器可以实时准确地重复检测手指关节、腕关节、肘关节和膝关节的弯曲运动。此外，传感器还能检测微笑和皱眉等面部表情以及吞咽和发音等喉部肌肉活动。在不同的面部表情或喉部肌肉活动中，电阻信号都会出现明显的变化，从而实现对人体细微动作的准确识别。Guo 等[63]基于柠檬酸钠(Na_3Cit)的霍夫迈斯特效应，结合定向冷冻制备了一种由 PVA 和还原型氧化石墨烯(rGO)组成的高强度传感器(PVA-Na_3Cit-GO)。该研究利用人体踝关节模型设计了一个模拟日常行走的装置，将 PVA-Na_3Cit-GO 传感器固定在关节上，通过上下运动承受拉伸或压缩。PVA-Na_3Cit-GO 传感器能够监测踝关节的运动幅度并且可以估算出承受的轴承应力，具有良好的灵敏性和重复性。此外，将 PVA-Na_3Cit-GO 传感器直接缝合到新西兰白兔的跟腱上，用于监测兔子跟腱的生理应变，也具有良好的灵敏度和稳定性。该传感器有潜力用于跟腱疾病的体内体外监测并辅助治疗诊断(图 3(b))。

除了人体运动，柔性水凝胶传感器也可以检测动物运动情况，基于抗溶胀性能的水下环境的柔性传感器也受到了广泛的关注。Ren 等[44]制备了 PVA/PSBMA/H_2SO_4 双网络水凝胶，利用 H_2SO_4 的霍夫迈斯特效应获得优异的力学性能和抗溶胀性，可作为一种海水应变传感器用于监测海洋动物模型的水下运动。如图 3(c)所示，该研究将处于平衡状态的海洋应变传感器安装在鲨鱼的尾巴上、龙虾的足关节、海龟的前肢、魔鬼鱼的胸鳍和马蹄蟹的剑尾上，以监测这些模型的运动。测试显示，龙虾的爬行、海龟的滑行、魔鬼鱼的游泳、马蹄蟹的翻转和鲨鱼的游泳依赖于足关节的弯曲和伸展、前肢的上下摆动、胸鳍的上下拍打、剑尾的站立(向上和向下)和尾巴的左右摆动，这些运动可以引起水凝胶应变传感器的可逆变形，从而转换为电信号，由智能设备收集。此外，通过分析海洋动物的运动波形、信号强度和信号周期，能够实时评估并长期监测海洋动物的运动能力。

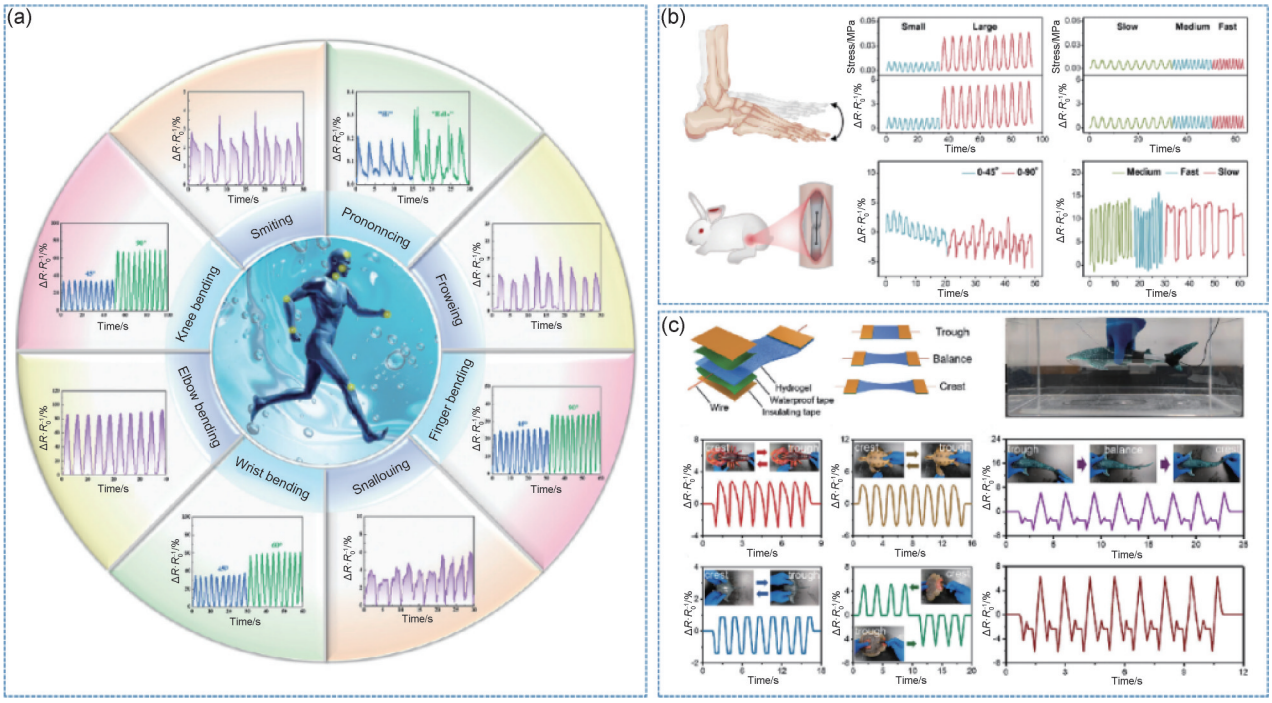


图 3 霍夫迈斯特效应调控的水凝胶柔性传感器用于运动监测

(a)PGCB-OHs 可穿戴传感器监测人体的各种生理运动[31]；(b)PVA-Na_3Cit-GO 传感器监测人体及兔子跟腱运动[63]；(c)PVA/PSBMA/H_2SO_4 传感器的结构及对各类海洋生物运动监测作用[44]

Fig.3 Hoffmeister effect-modulated hydrogel flexible sensors for motion monitoring

(a)PGCB-OHs wearable sensors for monitoring various physiological movements of the human body[31]; (b)PVA-Na_3Cit-GO sensors for monitoring human and rabbit Achilles tendon movements[63]; (c)structure of PVA/PSBMA/H_2SO_4 sensors and their effects on monitoring the movements of various marine organisms[44]

3.2 生物信号监测

生理状态监测作为健康监测的重要组成部分，正受到越来越多的关注。生理状态通常用于描述生物体内各种生命活动和功能的运行条件，是反映人类健

康状况的一种简单方式[71]。人们可以通过柔性水凝胶传感器监测汗液、味觉等各种生物信号来评估自己的生理状态，对健康管理、疾病防控具有重要意义。

汗液的主要成分是水，约占99%，此外还有少量含氮化合物（如氨基酸和尿素）以及金属或非金属离子。人体新陈代谢的产物经常与汗液一起通过汗腺排出体外。当人的生理状态失去平衡或生病时，汗液的某些成分也会发生相应的变化。因此，实时汗液监测是了解用户健康状况的有效方式[72]。目前已有许多水凝胶汗液传感器的报道。Shen等[73]开发了一种氨基三亚甲基膦酸（ATMP）辅助PVA的水凝胶柔性传感器（ATMP-PVA），利用不同盐溶液的霍夫迈斯特效应可调节水凝胶的弹性模量，水凝胶的电导率也随之改变。如图4(a)所示，该研究在此基础上建立了弹性灵敏度和电灵敏度的双参数模型，实现水凝胶传感器对汗液中的各种生物代谢信息（阳离子、阴离子、氨基酸、糖类和乳酸盐）的分辨，能够有效识别和监测真实汗液样本，有助于为疾病诊断或运动训练优化提供简便的指标。

味觉赋予人类对化学环境的感知，其主要感知物质包括甜、酸、咸、苦化学分子，它们与人体营养摄入和健康状态密切相关。霍夫迈斯特效应调节的水凝胶柔性传感器能够响应生物/化学信号并将其实时转换为电输出，对味觉方面的检测和临床治疗有重要意义[39]。Jiang团队[74]研究了各种化学助溶剂对ATMP-PVA水凝胶的霍夫迈斯特效应，利用该水凝胶制备的分层金字塔结构的柔性电子传感器具有高灵敏度和宽范围的压力响应特性。如图4(b)所示，化学信息可通过传感器的水凝胶界面转化为机械信号，并将生物/化学信号转换为电信号输出，从而分辨出15种不同的化学共溶剂，可以对各种阳离子、阴离子、氨基酸和糖类进行区分、分类和定量，可用作味觉传感器辅助医疗诊断。Xie等[75]采用聚乙烯醇-1-羟基乙烯二磷酸（PVA-HEDP）填充聚（苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯-丙烯酸）（P(St-MMA-AA)）基质制备PC水凝胶，并对PC水凝胶的霍夫迈斯特效应进行了深入研究，建立了对化学共溶剂弹性结构颜色的定量描述方法。受到霍夫迈斯特结构色的启发，该研究开发了一种新颖而

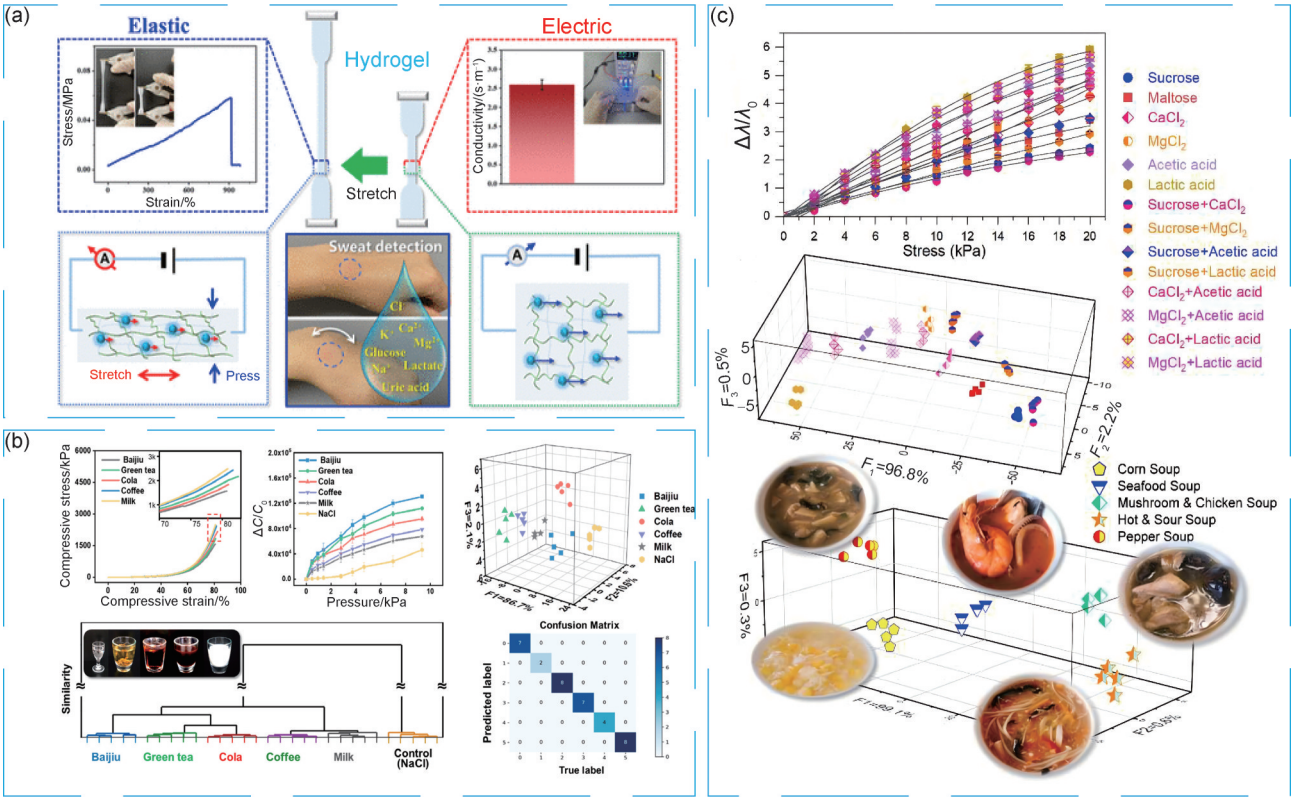


图4　霍夫迈斯特效应调控的水凝胶柔性传感器用于生物信号监测

（a）ATMP-PVA水凝胶柔性传感器用于汗液监测的机理示意图[73]；（b）ATMP-PVA水凝胶味觉传感器区分不同种类的饮料[74]；（c）PC水凝胶通过霍夫迈斯特结构色识别味道[75]

Fig.4　Hofmeister effect-modulated hydrogel flexible sensor for biosignal monitoring

(a)schematic of the mechanism of hydrogel flexible sensor for sweat monitoring[73]; (b)ATMP-PVA hydrogel taste sensor for distinguishing different kinds of beverage[74]; (c)PC hydrogel for recognizing flavors by Hoffmeister structural colors[75]

简单的传感策略，通过调节PC水凝胶的弹性-光学灵敏度来分辨离子，并设计PC纳米矩阵味觉传感器。PC纳米矩阵可将霍夫迈斯特效应调控的力学变化转化为可见光变化，从而可以识别酸、甜、苦三种味觉物质以及不同口味的汤（图4(c)）。这种视觉可见的生物信息传感器有潜力应用于临床或健康监测辅助设备。

3.3 信息加密与传输

信息的加密、传输技术是当下数字化时代保障数据安全研究重点。水凝胶柔性传感器在现实生活中用作可穿戴电子设备时，除了检测电信号的变化外，也能通过自身的刺激响应实现光学或电学转化，并结合信号传输机制，实现信息加密、传输的功能[5,76-77]。Sun等[78]通过将预先拉伸的PVA/纤维素纳米晶体（CNC）水凝胶依次浸泡在Na_2SO_4、$CaCl_2$溶液和去离子水中，制备了一种具有CNC向列组织的多功能水凝胶。如图5(a)所示，不同溶液的霍夫迈斯特效应能够调节水凝胶的晶域、含水量和透射率，使得水凝胶的双折射可以通过干涉色观察到。此外，该研究通过局部溶剂置换的方法实现了不同的加密字符和图案：Na_2SO_4溶液通过盐析效应固定了预拉伸水凝胶的形状，从而保持了CNC的取向；$CaCl_2$溶液通过盐溶效应离解了氢键并减小了晶体尺寸，从而增加了水凝胶的透光率并实现了信息书写；当Ca^{2+}与水的交换再生出新的结晶区域，使水凝胶只能通过干涉色观察，从而实现信息加密。这些光学特性使水凝胶成为环境监测和防伪材料的理想候选材料。Zhou等[79]制备海藻酸钠（SA）/PVA离子导电水凝胶，然后分别引入具有不同氧化态的金属盐来调节聚合物网络的聚集状态，利用金属配位和特定阴离子诱导的霍夫迈斯特效应，使得水凝胶的力学和导电性能具有广泛的可调性。如图5(b)所示，该研究根据莫尔斯电码的规则，采用“·”和“—”的不同组合来表示各种数字和字母。当水凝胶直接黏附在参与者的手指上时，传感器的相对阻力会随着手指弯曲的时间和频率而实时变化，从而将手指的运动状态转换为莫尔斯电码。具体来说，短期手指弯曲会产生峰值，而长期弯曲会产生直线，分别对应“·”或“—”状态。因此，通过控制手指的弯曲动

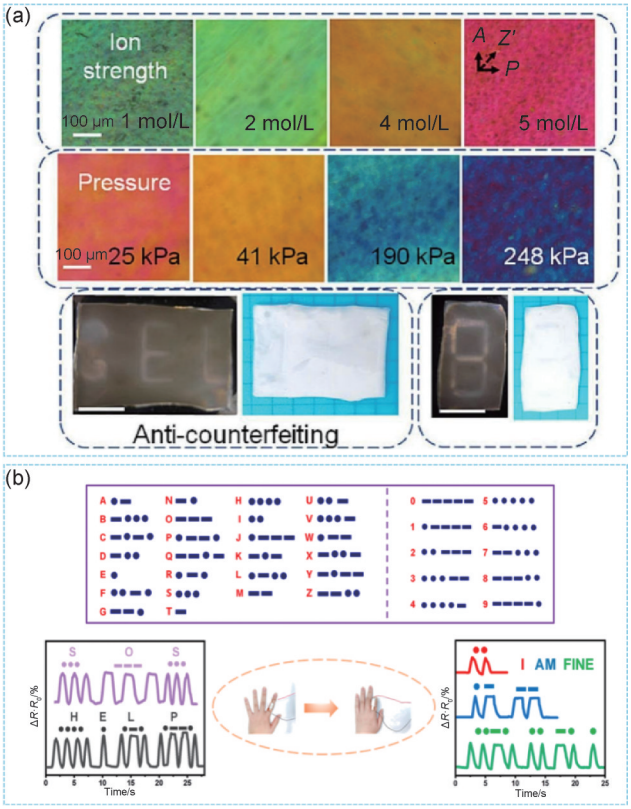


图5 霍夫迈斯特效应调节的水凝胶柔性传感器用于信息加密与传输

（a）霍夫迈斯特效应调控PVA/CNC水凝胶的结构色变化及信息书写、加密应用[78]；

（b）SA/PVA水凝胶传感器根据莫尔斯电码规则利用手指运动进行信息传输[79]

Fig.5 Hoffmeister effect modulated hydrogel flexible sensor for message encryption and transmission

(a)Hoffmeister effect modulated PVA/CNC hydrogel for structural color change and message writing and encryption applications[78];

(b)SA/PVA hydrogel sensor for message transmission using finger movement according to Morse code rules[79]

作，可以容易地传输“SOS”“Help”“I am fine”等信号。通过配备相关的解码器，可以实现进一步的特定位置信息传输，在个人遇到危险而无法直接寻求帮助的情况下，这种隐蔽的信息传输可以提供及时的帮助。

4　结束语

通过霍夫迈斯特效应对分子链聚集状态的调节，可以获得具有广泛可调的力学性能、良好的导电性能、环境稳定性、生物相容性等多种性能的水凝胶。这样的水凝胶材料在柔性传感器领域具有巨大的应用潜力。基于霍夫迈斯特效应的柔性传感器已广泛应用于运动检测、生物信号监测、信息加密与传输等场景。

尽管霍夫迈斯特效应在水凝胶柔性传感器的性能调控中潜力巨大，但仍面临以下关键挑战：(1)灵敏度和选择性不足：水凝胶的多机制传感特性导致其对特定刺激（如化学物质或生物分子）的灵敏度和选择性较差。(2)信号传输与处理问题：离子导电水凝胶因水分蒸发或流失导致体积收缩，离子通道闭合或传输速率降低，影响信号质量并增加处理难度。(3)生物相容性：植入式传感器需与生物组织具备良好的力学相容性和低免疫原性，目前仍存在优化空间。(4)性能与多功能集成的矛盾：提升电导率、响应速度等性能可能牺牲柔韧性和力学稳定性，离子的引入可能削弱界面黏附性能，而多功能集成可能引发信号干扰，增加合成复杂性和成本。

面对现有的挑战，未来可能的解决方案和研究方向包括：(1)结合3D打印与微流控技术：利用3D打印技术构建复杂结构水凝胶，用微流控技术精确调控其物化性质，提升灵敏度和响应速度。(2)优化结构设计：利用先进的仿真工具（有限元分析（FEA）和分子动力学（MD）、多物理场分析等）预测水凝胶在不同pH值、温度或机械压力下的膨胀和收缩行为，以及特定化学修饰对水凝胶性能的影响，减少实验试错。(3)提升生物相容性：针对皮肤、肌肉、心脏等不同组织环境，优化水凝胶的结构动态适配性和生物相容性。(4)多功能集成与协同效应：开发分层结构水凝胶，通过表面仿生黏附层与体相功能层的协同设计，在复杂环境下具有稳定界面黏附性能的同时，保持电化学、光学、磁性等多模态传感性能，以实现复杂环境下的多指标检测。

通过材料化学、生物医学与人工智能等多学科融合，基于霍夫迈斯特效应的水凝胶柔性传感器必将迎来更广阔的发展前景。

参考文献

[1] WANG Z W, WEI H, HUANG Y J, et al. Naturally sourced hydrogels: emerging fundamental materials for next-generation healthcare sensing[J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52(9): 2992-3034.

[2] LUO Y, ABIDIAN M R, AHN J H, et al. Technology roadmap for flexible sensors[J]. ACS Nano, 2023, 17(6): 5211-5295.

[3] GAO F P, LIU C X, ZHANG L C, et al. Wearable and flexible electrochemical sensors for sweat analysis: a review[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9: 1.

[4] CHEN H, ZHUO F L, ZHOU J, et al. Advances in graphene-based flexible and wearable strain sensors[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 464: 142576.

[5] LI J Y, DING Q L, WANG H, et al. Engineering smart composite hydrogels for wearable disease monitoring[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15(1): 105.

[6] WEI Z, LI Y X, GUO S Y, et al. A wearable electrochemical sensor utilizing multifunctional hydrogel for antifouling ascorbic acid quantification in sweat[J]. Analytica Chimica Acta, 2025, 1337: 343548.

[7] ZHANG J F, LI Z M, HAO Z X, et al. A highly sensitive hydrogel panel with touch-enhanced sensing property for handwriting performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 701: 134884.

[8] 张晟，曾俊彦，尚方方，等. 电子皮肤热点核心材料及其在生命健康领域中的应用研究进展[J]. 材料工程，2022，50(2)：23-37.
ZHANG S, ZENG J Y, SHANG F F, et al. Research progress in core materials of electronic skin and applications in field of life and health[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(2): 23-37.

[9] SHI X W, LEE A, YANG B, et al. A 3D cross-linked hierarchical hydrogel E-skin with sensing of touch position and pressure[J]. Carbon, 2024, 216: 118514.

[10] WANG J P, QI Y K, GUI Y H, et al. Ultrastretchable E-skin based on conductive hydrogel microfibers for wearable sensors[J]. Small, 2024, 20(9): 2470076.

[11] WANG W Y, YAO D J, WANG H, et al. A breathable, stretchable, and self-calibrated multimodal electronic skin based on hydrogel microstructures for wireless wearables[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(32): 2316339.

[12] SUN T M, FENG B, HUO J P, et al. Artificial intelligence meets flexible sensors: emerging smart flexible sensing systems driven by machine learning and artificial synapses[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 16(1): 14.

[13] DAI X Y, WU Y H, LIANG Q H, et al. Soft robotic-adapted multimodal sensors derived from entirely intrinsic self-healing and stretchable cross-linked networks[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(44): 2304415.

[14] LÓPEZ-DÍAZ A, DE LA MORENA J, BRAIC A, et al. Proprioception and control of a soft pneumatic actuator made of a self-healable hydrogel[J]. Soft Robotics, 2024, 11(5): 889-901.

[15] MA J, HAN Z J, LI M G, et al. Conductive hydrogels-based self-sensing soft robot state perception and trajectory tracking[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(2): 510-524.

[16] HU L X, CHEE P L, SUGIARTO S, et al. Hydrogel-based flexible electronics[J]. Advanced Materials, 2023, 35(14): 2205326.

[17] ZHOU P C, ZHANG Z M, MO F, et al. A review of functional hydrogels for flexible chemical sensors [J]. Advanced Sensor Research, 2024, 3(3): 2300021.

[18] ZHANG J, WANG Y N, WEI Q H, et al. Self-healing mechanism and conductivity of the hydrogel flexible sensors: a review [J]. Gels, 2021, 7(4): 216.

[19] 巫舒, 嵇俊, 苏浩源, 等. 壳聚糖导电水凝胶在功能性柔性应变传感器中的应用研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(8): 87-97.
WU S, JI J, SU H Y, et al. Research progress in application of chitosan conductive hydrogels for functional flexible strain sensors [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(8): 87-97.

[20] LING Q J, LIU W T, LIU J C, et al. Highly sensitive and robust polysaccharide-based composite hydrogel sensor integrated with underwater repeatable self-adhesion and rapid self-healing for human motion detection [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(21): 24741-24754.

[21] GE G, ZHANG Y Z, SHAO J J, et al. Stretchable, transparent, and self-patterned hydrogel-based pressure sensor for human motions detection[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(32): 1802576.

[22] SUN S, XU Y Z, MAIMAITIYIMING X. Tough polyvinyl alcohol-gelatin biological macromolecules ionic hydrogel temperature, humidity, stress and strain, sensors [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 125978.

[23] ZHANG H D, SHEN H, LAN J N, et al. Dual-network polyacrylamide/carboxymethyl chitosan-grafted-polyaniline conductive hydrogels for wearable strain sensors [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 295: 119848.

[24] XU J X, ZHANG H Y, GUO Z Y, et al. Fully physical cross-linked BSA-based conductive hydrogels with high strength and fast self-recovery for human motion and wireless electrocardiogram sensing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123195.

[25] QIN Z H, SUN X, YU Q Y, et al. Carbon nanotubes/hydrophobically associated hydrogels as ultrastretchable, highly sensitive, stable strain, and pressure sensors [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(4): 4944-4953.

[26] HAN L, YAN L W, WANG M H, et al. Transparent, adhesive, and conductive hydrogel for soft bioelectronics based on light-transmitting polydopamine-doped polypyrrole nanofibrils [J]. Chemistry of Materials, 2018, 30(16): 5561-5572.

[27] ZHAO W W, YAO C G, PAN L H, et al. Hofmeister effect induced advancement of the hydrogels by 3D printing[J]. Polymer, 2023, 282: 126151.

[28] LV B X, GUO Q Q, JI X X, et al. Hofmeister effect mediated conductivity of hydrogel electrolytes for high performance supercapacitor[J]. Batteries & Supercaps, 2024, 7(11): e202400245.

[29] LIN X, ZHANG X S, NIE Z P, et al. A highly aligned X-shaped hydrogel fiber *via* cooperative roles of amorphous and crystalline network mediated by Hofmeister effect [J]. Polymer, 2024, 292: 126538.

[30] SUN X, MAO Y M, YU Z Y, et al. A biomimetic "salting out: alignment: locking" tactic to design strong and tough hydrogel[J]. Advanced Materials, 2024, 36(25): 2400084.

[31] GUO R Y, BAO Y, ZHENG X, et al. Hofmeister effect assisted dual-dynamic-bond cross-linked organohydrogels with enhanced ionic conductivity and balanced mechanical properties for flexible sensors [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33 (12): 2213283.

[32] WEI J J, WANG Q G. Hofmeister effect-aided assembly of enhanced hydrogel supercapacitor with excellent interfacial contact and reliability[J]. Small Methods, 2019, 3(11): 1900558.

[33] HOFMEISTER F. Zur lehre von der wirkung der salze[J]. Archiv für Experimentelle Pathologie und Pharmakologie, 1888, 24(4): 247-260.

[34] WEI W C. Hofmeister effects shine in nanoscience[J]. Advanced Science, 2023, 10(22): 2302057.

[35] MARCUS Y. Effect of ions on the structure of water: structure making and breaking [J]. Chemical Reviews, 2009, 109(3): 1346-1370.

[36] ZHANG Y J, FURYK S, BERGBREITER D E, et al. Specific ion effects on the water solubility of macromolecules: PNIPAM and the hofmeister series [J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(41): 14505-14510.

[37] WU S W, HUA M T, ALSAID Y, et al. Poly(vinyl alcohol) hydrogels with broad-range tunable mechanical properties *via* the hofmeister effect[J]. Advanced Materials, 2021, 33(11): 2007829.

[38] DUTTA T, CHATURVEDI P, LLAMAS-GARRO I, et al. Smart materials for flexible electronics and devices: hydrogel[J]. RSC Advances, 2024, 14(19): 12984-13004.

[39] MA J Y, ZHONG J Q, SUN F Q, et al. Hydrogel sensors for biomedical electronics[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148317.

[40] SHI H D, DENG Y X, SHI Y. Cellulose-based stimuli-responsive anisotropic hydrogel for sensor applications [J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(13): 11524-11530.

[41] LU C Y, QIU J H, ZHAO W, et al. Low-temperature adaptive conductive hydrogel based on ice structuring proteins/$CaCl_2$ antifreeze system as wearable strain and temperature sensor[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 188: 534-541.

[42] 蔡雅倩, 张家怀, 刘方哲, 等. Hofmeister效应辅助的蛋白质基水凝胶应变传感器[J]. 高等学校化学学报, 2021, 42(8): 2609-2616.
CAI Y Q, ZHANG J H, LIU F Z, et al. Protein-based hydrogel assisted by hofmeister effect for strain sensor[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 42(8): 2609-2616.

[43] XU C, GUAN S Q, DONG X F, et al. Ultratough and freezing-tolerant PVA-PAA-PANI hybrid hydrogel for supercapacitors and flexible sensors[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(41): 14886-14894.

[44] REN J Y, CHEN G Q, YANG H L, et al. Super-tough, non-swelling zwitterionic hydrogel sensor based on the hofmeister effect for potential motion monitoring of marine animals [J]. Ad-

vanced Materials,2024,36(48):2412162.

[45] WU H D,WU Y C,YAN J,et al.Organogel assisted salting out for strong and anti-fatigue hydrogels as wearable strain sensors [J].Chemical Engineering Journal,2024,488:150963.

[46] LI Z,JIANG J,LUO J,et al.A robust and conductive hydrotalcite/nanocellulose/PVA hydrogel constructed based on the Hofmeister effect[J].International Journal of Biological Macromolecules,2025,298:139994.

[47] LONG Q J,ZHANG Y X,ZHANG Q,et al.Application of poly(dimethyl diallyl ammonium chloride)-reinforced multifunctional poly(vinyl alcohol)/polyaniline hydrogels as flexible sensor materials[J].Biochemical Engineering Journal,2023,193:108845.

[48] HAN Z,ZHANG Y J,YANG F,et al.Covalent crosslinking modulated nanocrystallization of PVA/poly(lithium acrylate) hydrogel with Hofmeister effect for simultaneously excellent mechanical performance and ionic conductivity[J].Chemical Engineering Journal,2025,507:160460.

[49] QIN X Z,ZHAO Z J,DENG J X,et al.Tough,conductive hydrogels based on gelatin and oxidized sodium carboxymethyl cellulose as flexible sensors[J].Carbohydrate Polymers,2024,335:121920.

[50] DU K,LIU G Q,ZOU Y X,et al.Nanocomposite multi-crosslinked hydrogels with high strength,high stretchability and high conductivity for multifunctional wearable sensors[J].ACS Applied Polymer Materials,2025,7(2):812-825.

[51] DU T,ZHU Z H,CHEN M W,et al.Functional hydrogel strain sensors for smart electronic devices:strategies and recent progress [J].ACS Applied Electronic Materials,2024:acsaelm.4c00156.

[52] NI Y M,ZANG X R,YANG Y,et al.Environmental stability stretchable organic hydrogel humidity sensor for respiratory monitoring with ultrahigh sensitivity[J].Advanced Functional Materials,2024,34(38):2402853.

[53] ZHANG T S,LI J G,ZU B Y,et al.Multi-hydration induced zwitterionic hydrogel with open environment stability for chemical sensing[J].Advanced Sensor Research,2023,2(5):2200061.

[54] LU Y F,ZHONG W B.A biocompatible,highly adhesive zwitterionic polymer hydrogel with high ionic conductivity,anti-freezing and moisturizing for wearable strain sensor[J].Chemical Engineering Journal,2024,490:151691.

[55] QUAN Q Y,ZHAO T Y,LUO Z,et al.Antifreezing,antidrying,and conductive hydrogels for electronic skin applications at ultralow temperatures[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2024:acsami.4c02182.

[56] ZHANG S P,GUO F M,GAO X,et al.High-strength,antiswelling directional layered PVA/MXene hydrogel for wearable devices and underwater sensing[J].Advanced Science,2024,11(39):2405880.

[57] ZHANG B Y,CAI X Z,LI J J,et al.Biocompatible and stable quasi-solid-state zinc-ion batteries for real-time responsive wireless wearable electronics[J].Energy & Environmental Science,2024,17(11):3878-3887.

[58] ZHAO B N,ZHANG Y Z,LI D D,et al.Hofmeister effect-enhanced gelatin/oxidized dextran hydrogels with improved mechanical properties and biocompatibility for wound healing[J].Acta Biomaterialia,2022,151:235-253.

[59] WANG L J,ZHANG Y B,SHEN H,et al.A facile method to fabricate multifunctional polyvinyl alcohol mineralized hydrogels with high strength and adaptable shape[J].Journal of Polymer Science,2023,61(22):2878-2891.

[60] GAO C X,ZHENG D Y,LONG B C,et al.Anti-swelling and adhesive γ-PGA/PVA/PEDOT:PSS/TA composite conductive hydrogels for underwater wearable sensors[J].European Polymer Journal,2023,201:112590.

[61] MA H H,DENG Y X,LIN Y B,et al.Strong and tough conductive silk fibroin/poly(vinyl alcohol) composite hydrogel by a salting-in and salting-out synergistic effect[J].Iranian Polymer Journal,2024,33(11):1527-1537.

[62] WU X,YANG X,WANG P,et al.Strain-temperature dual sensor based on deep learning strategy for human-computer interaction systems[J].ACS Sensors,2024,9(8):4216-4226.

[63] GUO Y,YAN T,GAO H,et al.High-strength fibrous sensors with an enhanced aggregate state for biomechanical monitoring of the Achilles tendon[J].Journal of Materials Chemistry B,2024,12(41):10605-10615.

[64] YANG M Y,TIAN X,HUA T.Transparent,stretchable,and adhesive conductive ionic hydrogel-based self-powered sensors for smart elderly care systems[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2023,15(9):11802-11811.

[65] ZHOU Q,HUANG C J,LU S X,et al.Skin-inspired polysaccharide-based hydrogels with tailored properties for information transmission application[J].International Journal of Biological Macromolecules,2025,306:141354.

[66] YU D S,YI J,ZHU S H,et al.Hofmeister effect-assisted facile one-pot fabrication of double network organohydrogels with exceptional multi-functions[J].Advanced Functional Materials,2024,34(21):2307566.

[67] YAO R Q,LIU X,YU H H,et al.Electronic skin based on natural biodegradable polymers for human motion monitoring[J].International Journal of Biological Macromolecules,2024,278:134694.

[68] HUANG H L,HAN L,FU X B,et al.Multiple stimuli responsive and identifiable zwitterionic ionic conductive hydrogel for bionic electronic skin[J].Advanced Electronic Materials,2020,6(7):2000239.

[69] LI S Y,GONG L H,WU X J,et al.Load-bearing columns inspired fabrication of ductile and mechanically enhanced BSA hydrogels[J].International Journal of Biological Macromolecules,2024,261:129910.

[70] WEI Z X,ZHOU H X,MENG Y Y,et al.A fully biobased tough hydrogel derived from guar gum and gelatin as a flexible sensor [J].New Journal of Chemistry,2024,48(30):13577-13588.

[71] JUNG G,LEE H,PARK H,et al.Temperature-tolerant flexible supercapacitor integrated with a strain sensor using an organohydrogel for wearable electronics[J].Chemical Engineering Journal,2022,450:138379.

[72] QIN Y,MO J L,LIU Y H,et al.Stretchable triboelectric self-powered sweat sensor fabricated from self-healing nanocellulose hydrogels[J].Advanced Functional Materials,2022,32(27):

2201846.
[73] SHEN B, PENG W J, SU B T, et al. Elastic-electric coefficient-sensitive hydrogel sensors toward sweat detection [J]. Analytical Chemistry, 2022, 94(3): 1910-1917.
[74] LI J, LI J L, TANG Y T, et al. Touchable gustation *via* a Hoffmeister gel iontronic sensor [J]. ACS Nano, 2023, 17(5): 5129-5139.
[75] XIE X Y, ZHENG S T, LIU Y Y, et al. Visual gustation *via* regulable elastic photonic crystals [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(11): 14133-14143.
[76] ZHOU B, YUAN W Z. Tunable thermoresponsive and stretchable hydrogel sensor based on hydroxypropyl cellulose for human motion/health detection, visual signal transmission and information encryption [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 343: 122497.
[77] HANG T Y, CHEN Y M, YIN F Q, et al. Highly stretchable polyvinyl alcohol composite conductive hydrogel sensors reinforced by cellulose nanofibrils and liquid metal for information transmission [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128855.
[78] SUN W, WANG J, HE M. Anisotropic cellulose nanocrystal composite hydrogel for multiple responses and information encryption [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 303: 120446.
[79] ZHOU Q, LU S X, HUANG C J, et al. Polyvinyl alcohol/sodium alginate hydrogels with tunable mechanical and conductive properties for flexible sensing applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283: 137822.

基金项目：北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L222036)
收稿日期：2025-04-14；**录用日期**：2025-05-25
通讯作者：陈煜(1979—)，男，教授，博士，研究方向为天然高分子材料，联系地址：北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学材料学院(100081)，E-mail：bityuchen@bit.edu.cn

(本文责编：齐　新)