

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.10.009

聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶在柔性压阻传感器领域中的应用

冀彦秀¹, 宋振兴^{2*}, 韦会鸽¹, 李拓¹

(1. 天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学 理学院, 天津 300457)

摘要: 柔性压阻传感器具有制备工艺简单、响应速度快、易于集成和低成本等优点, 在医疗监测设备、智能机器人及可穿戴电子设备等领域备受关注。聚丙烯酰胺基导电水凝胶兼具柔韧性和导电性, 使其在制备压阻传感器方面极具优势。为满足其在柔性压阻传感器领域的应用, 往往通过设计复杂网络或引入特定分子结构赋予其相应功能。本文主要介绍利用聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶制备柔性压阻传感器的研究进展, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 水凝胶; 柔性压阻; 传感器; 健康监测

中图分类号: TQ427.26

文献标识码: A

Application of polyacrylamide-based composite conductive hydrogel in the field of flexible piezoresistive sensors

Ji Yanxiu¹, Song Zhenxing^{2*}, Wei Huige¹, Li Tuo¹

(1. School of Chemical Engineering and Materials, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Flexible piezoresistive sensors have the advantages of simple preparation process, fast response, easy integration and low cost, and have attracted much attention in the fields of medical monitoring equipment, intelligent robots and wearable electronic devices. Polyacrylamide-based conductive hydrogels are both flexible and conductive, making them extremely advantageous in the preparation of piezoresistive sensors. In order to meet its practical application in the field of flexible piezoresistive sensors, it is often given corresponding functions by designing complex networks or introducing specific molecular structures. The research progress of flexible piezoresistive sensors using polyacrylamide-based composite conductive hydrogels was mainly introduced in this paper, and its development trend was prospected.

Keywords: hydrogel; flexible piezoresistive; sensor; health monitoring

随着信息技术的快速发展, 柔性传感器以其良好的柔韧性、延展性、可自由弯曲甚至折叠等优点, 在远程健康监测、身体运动跟踪、电子皮肤、人机界

面和软体机器人技术中显示出巨大的潜力^[1-8]。柔性传感器根据工作原理的不同可分为: 柔性压阻式传感器^[9-12]、柔性电容式传感器^[13-17]。柔性压阻传感

收稿日期: 2023-04-18

修回日期: 2023-05-24

作者简介: 冀彦秀(2000—), 女, 本科生, email: 1403359904@qq.com

*通信作者: 宋振兴, email: szxtju@126.com

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202210057033)

器具有制备工艺简单、响应速度快、易于集成和低成本等优点,因此备受研究者的关注,尤其在与电容式和压电式传感器相比较时更加突出。在新材料研究方面,水凝胶材料因其良好的柔韧性能而备受研究者的青睐,已经成为柔性压阻传感器中的重要材料之一。其中聚丙烯酰胺(Polyacrylamide PAM)水凝胶由于制备简单、易于改性及实现功能化而得到广泛的研究和发展。

1 聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶

聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶是以聚丙烯酰胺为基体,通过添加其他副体、交联物质以及导电材料制备而成。聚丙烯酰胺水凝胶是一种由丙烯酰胺(Acrylamide, AM)单体自由基聚合而成的水溶性高分子聚合物,其交联网络结构中含有大量的酰胺键,易形成氢键和进行化学改性;同时聚合物链之间的网络空间可以为各种功能分子提供位点,易实现功能化;并且形成聚合物之后的聚丙烯酰胺毒性较低,因此在生物医学^[18-19]、生物电子^[20-22]等领域有良好的应用前景。

然而聚丙烯酰胺水凝胶共价交联结构单一,缺乏能量耗散机制,且聚合物网络松散,交联密度低,在外力作用下易发生断裂,并且采用自由基聚合的方式无法控制交联点的分布,导致力学性能的下降。为了改善水凝胶的力学性能,研究者们开发出了双网络(DN)结构水凝胶、纳米复合(NC)水凝胶、滑环(SR)水凝胶等结构,这些水凝胶具有出色的力学性能。同时,研究者们通过引入导电材料如碳材料^[23-27]、金属纳米材料^[28-29]、导电聚合物^[30-33]或在聚合物网络中加入盐、酸或离子液体等方式,赋予水凝胶高的电子/离子导电率。Li T等^[34]制备了海藻酸钠增强聚丙烯酰胺/黄原胶双网络离子水凝胶(PAM/XG/SA-Mⁿ⁺/LiCl,其中Mⁿ⁺代表Fe³⁺、Cu²⁺或Zn²⁺),PAM作为一个灵活的亲水骨架,XG作为一个有韧性的第二网络,金属离子Mⁿ⁺刺激大分子SA形成强交联点,并与—NH₂、—COO⁻等官能团相互作用形成双网络结构,显著地提高了水凝胶的机械强度,其断裂抗拉强度可达0.7 MPa,断裂张力可达1800%。Mⁿ⁺离子的存在赋予了水凝胶高的电导率,其拉伸敏感性GF高达4.7。

2 柔性压阻传感器

柔性压阻传感器通常是将导电材料掺入柔性弹性体中制备而成,其中导电材料是柔性压阻式传感器的关键。常用的柔性弹性体基体主要有:聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[35]、天然橡胶和热塑性聚氨酯(PU)^[36]等。常用的导电材料有:碳材料如炭黑^[23]、碳纳米管^[24]和石墨烯^[25-27]等、金属纳米材料如银纳米线^[28]和银纳米颗粒^[29]等、导电聚合物如聚3,4-亚乙基二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐^[30-31]、聚吡咯^[32]和聚苯胺^[33]等以及混合微/纳米材料^[37]。

2.1 工作原理

柔性压阻传感器是通过记录应变/压力和电阻变化的关系实现传感。导电材料的电阻可以表示为:

$$R = \frac{\rho \times L}{S}$$

式中: ρ 是电阻率; L 为材料的长度; S 为材料的横截面积。即在应变或压力作用下,当传感器的结构发生变化时,导电材料的长度和横截面积随之变化,电导率或电阻率相应地发生改变,进而引起传感器的电阻变化。因此柔性压阻传感器可以分为应变式与压力式两类,但是它们所依据的基本原理都是一致的,衡量其传感性能的指标也较为类似。水凝胶应力应变传感器及其应用示意图如图1所示^[35]。



图1 水凝胶应力应变传感器及其应用^[35]

Fig.1 Hydrogel stress-strain sensor and its application^[35]

目前压阻传感器的传感机理主要有隧道效应^[38]、导电材料断开机制^[39]和裂纹扩展机制三类。但是压阻传感器的传感行为通常不是由单一机制控制的,而是由多种机制协同配合而成。并且不同压阻传感器的具体传感机理主要取决于所选择的聚合物的种类和导电网络的内部结构。

2.2 性能参数

柔性压阻传感器的性能参数主要包括灵敏度、

检测范围、循环稳定性、迟滞性、响应时间等。

灵敏度是指电阻的相对变化随外加压力/应变变化曲线的斜率,反映了传感器响应信号的快慢。柔性压阻传感器通常是通过计算应变系数 GF 来评价导电水凝胶的敏感性。传感器电阻的相对变化为:

$$\Delta R - R_0 = \frac{R - R_0}{R_0}$$

式中: R_0 和 R 分别为样品的初始电阻和实时电阻。

柔性压阻传感器的 GF 定义为:

$$GF = \frac{\Delta R - R_0}{\varepsilon}$$

式中: ε 为施加在水凝胶上的应变或压力。

检测范围是指传感器可以精确检测物理量的最大值和最小值,是用于判断传感器的测量是否有效的重要参数之一。不同的应用领域需要不同的检测范围,在监测心率、脉搏等领域,检测范围偏小,但在仿生电子皮肤、人机交互等领域,需要较大的检测范围。

循环稳定性指柔性传感器在长期的应变加载和回复的过程中,对于给定的周期性外部刺激可以保持相同电阻变化率的能力。由于在长期循环的过程中,弹性体基板会产生蠕变、疲劳和迟滞等现象,使得导电材料与弹性体脱离开来。所以随着循环次数的增多,柔性传感器的电阻会有轻微的增加。一般为了测试传感器的稳定性,需要对器件进行连续的加载-卸载测试循环,循环次数越多代表循环稳定性越好。

迟滞是指柔性传感器在应力加载和回复的过程中,在相同的拉伸状态下电阻变化率并不能完全重复的现象。这是因为聚合物的黏弹性特性以及聚合物与导电纳米材料之间的相互作用力不够,柔性传感器在应力加载和恢复时不能完全同步。尤其是在拉伸形变较大的情况下,迟滞现象尤为显著。

3 聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶在柔性压阻传感器领域的应用

当前,基于聚丙烯酰胺制备而成的导电水凝胶多种多样,但其在柔性压阻传感器领域的应用主要集中在人工电子皮肤、人机交互界面及健康监测。

3.1 人工电子皮肤

人工电子皮肤是一种仿照人体皮肤制造的科技产品,能够模拟人体感知体感信号的过程。该技术

的仿生受体信号接收部分能够模拟人体感受外界刺激后向大脑传递信号的生物过程,将外界刺激转化为电信号传输各种体表刺激。通过这种模拟过程,人工电子皮肤能够感知和检测多种物理量,如温度、压力、湿度等。当缺乏触觉的患者使用该传感器,能够具有与正常人相同的感知能力。水凝胶与人体皮肤具有良好的相容性,可以很好地附着在人体皮肤表面,并且水凝胶的力学性能与人体的生物力学性能相似。因此,基于水凝胶的应变/压力传感器拥有类似于人体皮肤的功能,可以识别不同的物体、感知来自不同方向的力及其大小,实现了多种人体皮肤的功能。这种传感器在智能医疗、机器人等领域有着广阔的应用前景,有望为人类带来更多的便利和创新。

Cao Q L 等^[40]在 PAm/SA 中加入镓(Ga)制备出类皮肤仿生复合水凝胶。以 Ga 为中心的交联点使水凝胶具有类似皮肤的弹性模量(30 kPa)、高韧性(2.25 MJ·m⁻³)、良好的导电性(1.9 S·m⁻¹)、超长抗拉强度(1400 %)和优异的抗疲劳性能,并且透明度没有发生变化。此外,由其构建的柔性传感装置对应变(GF=4.08 kPa⁻¹)和压力(GF=0.455 kPa⁻¹)均具有较高的灵敏度。SA/PA m/Ga 水凝胶可穿戴柔性传感器是一种能够监测各种人体运动的传感器,包括手指和膝盖的弯曲、吞咽运动,甚至在手写和语言识别方面表现出色。在大数据的帮助下,SA/PA m/Ga 水凝胶传感器在语言康复和语言障碍人群中具有广阔的前景。“触动”脑神经的电子皮肤工作原理示意图如图 2 所示^[41]。

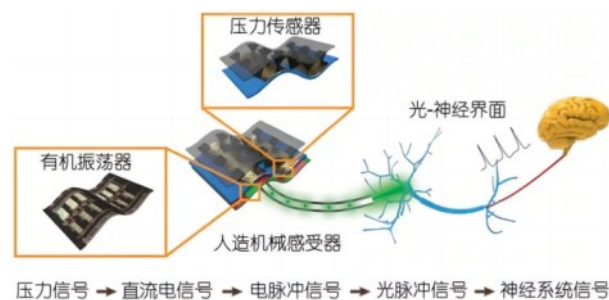


图 2 “触动”脑神经的电子皮肤工作原理示意图^[41]

Fig.2 Schematic diagram of the working principle of electronic skin that "touches" cranial nerves^[41]

3.2 人机交互

便携、柔性的人机交互器件在物联网、智能机器人等领域发挥着重要作用,用户可以通过这些器件

与系统进行信息交换或发送指令。柔性传感器具有优异的柔韧性和延展性,可以贴合在人体和机器人皮肤等弯曲和动态的表面上,实时监测生理和环境的变化,可以提高交互的准确性和交互过程中的用户体验。这使得柔性传感器可以实现对人体和机器人运动状态的实时监测和识别,为人机交互提供了更加便捷、自然的方式。因此,柔性传感器在人机交互、机器人控制等领域有着广泛的应用前景,为人们带来更加智能、高效的交互体验。离子导电水凝胶材料借鉴了生命体通过离子定向迁移传递生理电信号的启示,因此被广泛应用于设计制作柔性可拉伸电子器件。这种材料具有优异的导电性能和柔性可塑性,可以在拉伸和弯曲的情况下保持稳定的电性能。离子导电水凝胶材料的应用为柔性电子器件的研究和制造提供了新的思路和技术支持,拓展了柔性电子器件的应用范围,为人类带来更多的便利和创新。然而水凝胶中的水在低温环境下会结冰,导致材料变脆,离子电导率下降,制约了其适用温度的范围。如何设计耐低温柔性导电凝胶,并在此基础上制作具有广泛应用前景的智能人机交互器件仍是一个挑战。

徐孟达等^[42]通过构筑共价键-离子键共交联的复合聚丙烯酰胺网络,制备了一种弹性、抗冻、导电的水凝胶(C-I水凝胶)并成功搭建了用于人机交互的水凝胶应用模型,实现了关节运动对机械的操控,如图3所示。作者将这种多功能水凝胶用于可穿戴电子皮肤领域,基于凝胶体系内自由移动的离子对外界刺激(如应变、温度、切割或弯曲)的响应性,建立水凝胶电阻信号与肢体运动的对应关系,通过Arduino平台将电阻信号转换为数字信号,进一步利用编程语言将数字信号转化为运动指令,从而控制舵机的运动,实现聚丙烯酰胺水凝胶在人机交互领域的高灵敏调控。

3.3 健康监测

可持续、实时进行健康监测的可穿戴柔性传感器对实现医疗保健、精准治疗、疾病康复等至关重要。将柔性传感器贴敷在人体不同位置如喉咙、胸部、手腕、手指、手臂、脊柱、脚,可以监测相应的生理信号和运动信号:例如手腕脉搏、咳嗽、吞咽和呼吸、手指弯曲不同角度,腰椎脊柱姿势和行走状态等。通过柔性传感器的实时监测,可以警示早期的一些健康风险,为术后康复实践及临床治疗提供了重要信息。例如足压监测,可将阵列多传感器置于柔性鞋垫内,用于计步及实时监测足底压力,用于跑步姿势矫正。也可以监测年长病患的走路模式,判断多发性硬化症的迹象。

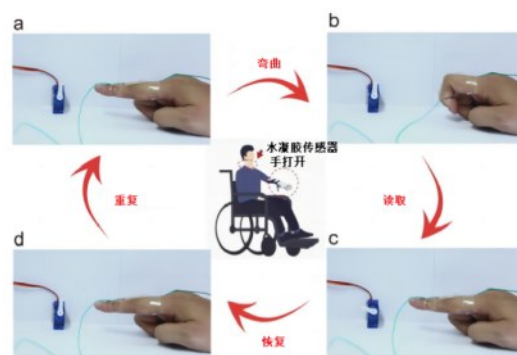


图3 C-I水凝胶用于舵机控制^[42]

Fig.3 C-I hydrogel for servo control^[42]

Xue G F等^[43]合成了一种具有皮肤特性的聚丙烯酰胺/明胶/MXene双网络水凝胶(PGMH),并受皮肤中Merkel细胞静态力特性的启发,设计了一种低压力检测限(0.508 Pa)、高灵敏度(14.117 kPa⁻¹)的仿生类皮肤压力传感器(SLPS),实现了高灵敏度的电阻-电容双响应。并通过模拟皮肤中Merkel细胞的分区,实现了基于SLPS的多路传感阵列,成功应用于可穿戴健康监测领域,包括运动监测、ECG检测、不同表皮的脉搏检测和足底健康监测,如图4所示。

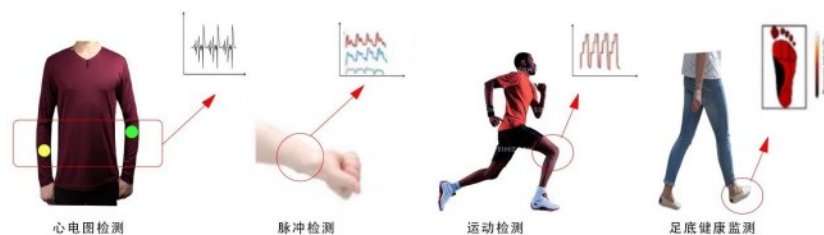


图4 类皮肤传感器在可穿戴健康监测领域的应用

Fig.4 Application of skin sensors in wearable health monitoring

4 结论与展望

柔性压阻传感器作为一种新型柔性电子器件,能够对物体表面作用力进行有效的感知,并能够在各种不规则物体表面贴附,在应用于医疗健康、机器人和生物力学等方面后发挥着重要作用。聚丙烯酰胺基复合导电水凝胶作为一种柔韧性能良好的软物质材料,已经被广泛应用于柔性压阻传感器的制备中。未来,随着柔性传感器的应用场景不断拓展,聚丙烯酰胺水凝胶在柔性传感器领域的应用前景将会更加广阔。同时,结合新的制备技术和功能化单体的引入,聚丙烯酰胺水凝胶将会成为柔性传感器中的重要材料之一,为实际应用提供更加可靠和高效的解决方案。

参考文献

- [1] Ma X C, Qi Y, Niu Y, et al. Highly sensitive, ultra-reliable flexible piezoelectret sensor for non-contact sitting motion tracking and physiological signal monitoring[J]. *Nano Energy*, 2023, 111: 108424.
- [2] Li Z B, Zou L J, Chu C F, et al. Development of a carbon-based flexible strain sensor for diverse human motion monitoring[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2023, 220 (2): 2200617.
- [3] Hanna J, Tawk Y, Azar S, et al. Wearable flexible body matched electromagnetic sensors for personalized non-invasive glucose monitoring[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 14885.
- [4] Liang H, Zhang L B, Wu T, et al. Dual-mode flexible sensor based on PVDF/MXene nanosheet/reduced graphene oxide composites for electronic skin[J]. *Nanomaterials*, 2022, 13(1): 102.
- [5] Zhang S C, Xiao Y, Chen H M, et al. Flexible triboelectric tactile sensor based on a robust MXene/leather film for human-machine interaction[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2023, 15(10): 13802-13812.
- [6] Hao S, Li T C, Yang X M, et al. Ultra-stretchable, adhesive, fast self-healable, and three-dimensional printable photoluminescent ionic skin based on hybrid network ionogels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 14(1): 2029-2037.
- [7] Fan J S, Newell B, Garaia J, et al. Effect of additive manufacturing on β -phase poly(vinylidene fluoride)-based capacitive temperature sensors[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(11): 2200485.
- [8] Xia Q, Qin Y X, Zheng A B, et al. A Multifunctional bio-mimetic flexible sensor based novel artificial tactile neuron with perceptual memory[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(23): 2101068.
- [9] 权颖楠. 电阻式编织绳柔性应变传感器的制备及性能评价[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [10] Yuan H Y, Li Y, Qian Z H, et al. A piezoresistive sensor with high sensitivity and flexibility based on porous sponge[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(21): 3833.
- [11] 蔡川. 基于柔性压阻式传感器的脉搏监测装备与系统研究与开发[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2021.
- [12] 鲁元. 基于PDMS/SCF/CNT的柔性压阻式传感器的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [13] 朱皓哲. PDMS基柔性电容式传感器制备方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- [14] 陆云龙. 柔性电容式传感器的设计、制备和应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [15] Nie B, Geng J, Yao T, et al. Sensing arbitrary contact forces with a flexible porous dielectric elastomer[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(3): 962-971.
- [16] 徐云华. 基于PZT柔性压电传感器的混凝土动态冲击应力/应变健康监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [17] Dagdeviren C, Su Y, Joe P, et al. Conformable amplified lead zirconate titanate sensors with enhanced piezoelectric response for cutaneous pressure monitoring[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4496-4506.
- [18] Wang J, Lu C, Zhang K. Textile-based strain sensor for human motion detection[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2020, 3(1): 80-100.
- [19] Han G S, Su Y F, Nantung T, et al. Mechanism for using piezoelectric sensor to monitor strength gain process of cementitious materials with the temperature effect[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, 32(10): 1128-1139.
- [20] Lei H, Zhao J, Ma X, et al. Antibacterial dual network hydrogels for sensing and human health monitoring [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2021, 10(21): 2101089.
- [21] Huang G, Zhang Y, Ouyang J, et al. Application of carbon nanotube-matrix assistant native polyacrylamide gel electrophoresis to the separation of apolipoprotein A-I and complement C3[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 557(1-2): 137-145.
- [22] He M, Hou Y, Zhu C, et al. 3D-printing biodegradable PU/PAAM/Gel hydrogel scaffold with high flexibility and self-adaptability to irregular defects for nonload-bearing

- ing bone regeneration[J]. *Bioconjugate Chemistry*, 2021, 32(8): 1915-1925.
- [23] Bai Y Q, Lian Y, Ban C L, et al. Facile synthesis of temperature-resistant hydroxylated carbon black/polyacrylamide nanocomposite gel based on chemical crosslinking and its application in oilfield[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 329: 115578.
- [24] Li Y J, Yang D, Wu Z Y, et al. Self-adhesive, self-healing, biocompatible and conductive polyacrylamide nanocomposite hydrogels for reliable strain and pressure sensors[J]. *Nano Energy*, 2023, 109: 108324.
- [25] Yi Y, Yu X L, Bo W D, et al. Construction of three-dimensional carbon materials-based conductive bonding network in flexible supercapacitor electrodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 440: 141751.
- [26] 袁定坤, 褚维凡, 倪加惠. 亚铁氰化铜-聚丙烯酰胺/羧甲基纤维素/石墨烯复合水凝胶的制备及钼吸附性能[J]. *应用化学*, 2022, 39(11): 1746-1756.
- [27] 况培培, 张一静, 陈莹, 等. 木质素复合氧化石墨烯导电水凝胶制备及性能[J]. *林业工程学报*, 2022, 7(4): 93-99.
- [28] 丁晶晶, 刷芳, 刘春华, 等. 高强度银纳米线/聚丙烯酰胺复合水凝胶的制备及导电性能研究[J]. *高分子学报*, 2022, 53(8): 942-951.
- [29] Archana T, Pratik K, Roshni V, et al. Influence of nanofillers (Ag NPs and C. dots) on the controlled drug release profile of gelatin-grafted-polyacrylamide hydrogel: An in vitro study[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105922.
- [30] Li Y J, Yang D, Wu Z Y, et al. Self-adhesive, self-healing, biocompatible and conductive polyacrylamide nanocomposite hydrogels for reliable strain and pressure sensors[J]. *Nano Energy*, 2023, 109: 108324.
- [31] 王杰. 聚丙烯酰胺基水凝胶柔性应变传感器的制备及性能[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- [32] Sangeeta Yadav. Synthesis and properties of polypyrrole/polyacrylamide composite hydrogels[J]. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, 3(22): 6-7.
- [33] Shi J S, Dong F L, Zhao Z H, et al. Construction of polyacrylamide/chitosan quaternary ammonium salt/ferric oxide-tannic acid-polyaniline hydrogels with high detection sensitivity and electromagnetic dual function[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2023, 186: 105564.
- [34] Li T, Wei H G, Ying Y Z, et al. Sodium alginate reinforced polyacrylamide/xanthan gum double network ionic hydrogels for stress sensing and self-powered wearable device applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 309: 120678.
- [35] 高辉. 基于聚丙烯酰胺离子水凝胶的柔性自供电电子皮肤研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [36] Chen X Y, Zhang D Z, Luan H X, et al. Flexible pressure sensors based on molybdenum disulfide/hydroxyethyl cellulose/polyurethane sponge for motion detection and speech recognition using machine learning[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(1): 2043-2053.
- [37] He Z, Su J, Xia Y, et al. Fabrication and photocatalytic performance of $\text{Bi}_{24}\text{O}_{31}\text{Br}_{10}$ nanosphere by a polyacrylamide gel method[J]. *Micro & Nano Letters*, 2020, 15(8): 499-502.
- [38] Liao Y, Duan F, Zhang H, et al. Ultrafast response of spray-on nanocomposite piezoresistive sensors to broadband ultrasound[J]. *Carbon*, 2019, 143: 743-751.
- [39] Dong D, Ma J, Ma Z, et al. Flexible and lightweight microcellular RGO@Pebax composites with synergistic 3D conductive channels and microcracks for piezoresistive sensors[J]. *Composites Part A*, 2019, 123: 222-231.
- [40] Cao Q L, Shu Z, Zhang T Y, et al. Highly elastic, sensitive, stretchable, and skin-inspired conductive sodium alginate/polyacrylamide/gallium composite hydrogel with toughness as a flexible strain sensor[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(6): 2603-2613.
- [41] 臧亚萍, 狄重安, 朱道本. "触动"脑神经的电子皮肤[J]. *科学通报*, 2016, 61(11): 1146-1147.
- [42] 徐梦达. 功能化聚丙烯酰胺水凝胶的制备及其应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [43] Xue G F, Shi Y T, Wang S J, et al. Merkel cell-inspired skin-like hybrid hydrogels for wearable health monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: 140976.