

超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的研究进展

罗灵欢 林祥德 姜佳怡 应娜 曾冬冬

Research progress of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring

LUO Linghuan, LIN Xiangde, JIANG Jiayi, YING Na, ZENG Dongdong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230222.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型三明治结构聚二甲基硅氧烷/聚偏氟乙烯-纳米Ag线/聚二甲基硅氧烷柔性应变传感器的制备与性能

Preparation and properties of a novel sandwich structure polydimethylsiloxane/polyvinylidene fluoride-Ag nanowires/polydimethylsiloxane flexible strain sensor

复合材料学报. 2020, 37(5): 1024–1032 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190923.001>

基于微结构的柔性压力传感器设计、制备及性能

Design, fabrication and performance of flexible pressure sensors based on microstructures

复合材料学报. 2021, 38(10): 3133–3150 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210520.004>

多壁碳纳米管界面传感器及其在纤维缠绕压力容器原位监测中的应用

Multi-walled carbon nanotube interfacial sensor and its application in in-situ monitoring of the filament wound pressure vessel

复合材料学报. 2020, 37(2): 336–344 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190417.004>

超疏水表面制备方法的比较

Comparison of methods for fabricating superhydrophobic surface

复合材料学报. 2021, 38(2): 361–379 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200715.001>

柔性可拉伸硅橡胶@多壁碳纳米管/硅橡胶可穿戴应变传感纤维

Flexible stretchable and highly sensitive silicone rubber@multiwalled carbon nanotubes/silicone rubber wearable strain sensing fibers

复合材料学报. 2020, 37(8): 2045–2054 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200103.002>

超疏水石墨烯/甲醛-三聚氰胺-亚硫酸氢钠共聚物海绵的制备及其在油水分离中的应用

Synthesis of superhydrophobic graphene/formaldehyde-melamine-sodium bisulfite copolymer sponge and its application as absorbent for oil water separation

复合材料学报. 2019, 36(7): 1728–1736 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190109.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的研究进展



分享本文

罗灵欢^{1,2}, 林祥德¹, 姜佳怡^{1,2}, 应娜¹, 曾冬冬^{*1}

(1. 上海健康医学院 医疗器械学院, 上海 201318; 2. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 柔性应变传感器是一种将外界应力变化转变为电信号的设备, 它克服了传统刚性传感器硬度大、人体适应性差等缺点, 作为一种可穿戴设备在人体运动监测领域有很大发展前景。但在恶劣条件或极端环境下使用仍然存在信号输出失真、易被腐蚀等风险。超疏水柔性应变传感器将超疏水涂层的拒水、表面自清洁、防腐抗污与柔性应变传感器的高延展性、高灵敏度等优势相结合, 增强了传感器的性能并拓宽了在人体运动监测等方面的应用。本文综述了超疏水柔性应变传感器的基本性能参数、常用的构建材料与构建方法及其在人体运动监测中的功能与应用, 并对该领域做出展望。

关键词: 超疏水; 柔性应变传感器; 人体运动监测; 水下监测; 可穿戴

中图分类号: TB332; TN04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)07-3837-15

Research progress of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring

LUO Linghuan^{1,2}, LIN Xiangde¹, JIANG Jiayi^{1,2}, YING Na¹, ZENG Dongdong^{*1}

(1. School of Medical Device Engineering, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China;

2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A flexible strain sensor is a device that converts changes in external stress into electrical signals. It overcomes the shortcomings of traditional rigid sensors such as high hardness and poor human adaptability. As a wearable device, it has great development prospects in the field of human motion monitoring. However, in harsh conditions or extreme environments, there are still risks such as signal output distortion and easy corrosion. The superhydrophobic flexible strain sensor combines the water repellency, surface self-cleaning, anti-corrosion and anti-fouling of the superhydrophobic coating with the high ductility and high sensitivity of the flexible strain sensor, which enhances the performance of the sensor and broadens the applications in human motion monitoring. This paper reviews the basic performance parameters of superhydrophobic flexible strain sensors, the commonly used construction materials and construction methods as well as their functions and applications in human motion monitoring, and provides perspectives on this field.

Keywords: superhydrophobic; flexible strain sensor; human motion monitoring; underwater monitoring; wearable

柔性应变传感器是一类利用柔性材料制备的具有超强环境适应性的电子器件, 其工作原理是将外界应力引起的材料形变转化为电信号, 具有

可拉伸性、响应范围广、灵敏度高优点^[1]。得益于柔性材料和智能科学的不断发展, 其在人机交互^[2]、电子皮肤^[3]、移动医疗^[4]等前沿领域有良

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-01-09; 录用日期: 2023-02-14; 网络首发时间: 2023-02-22 13:27:36

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230222.001>

基金项目: 上海市自然科学基金 (19ZR1474300); 上海健康医学院科研骨干校外导师制 (2021-4); 同济大学访问学者资助项目 (2022)

Shanghai Natural Science Foundation (19ZR1474300); External Mentorship for Research Cadre of Shanghai University of Medical and Health Sciences (2021-4); Visiting Scholar in Tongji University (2022)

通信作者: 曾冬冬, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为 DNA 纳米技术、纳米材料、生物传感器 E-mail: zengdd@sumhs.edu.cn

引用格式: 罗灵欢, 林祥德, 姜佳怡, 等. 超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3837-3851.

LUO Linghuan, LIN Xiangde, JIANG Jiayi, et al. Research progress of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3837-3851(in Chinese).

好应用前景。然而，一般的柔性应变传感器碰到恶劣条件或极端环境时，传感性能和使用寿命容易发生退化^[5-6]。因此，增强柔性应变传感器的稳定性及环境适用性仍面临较大挑战。

超疏水材料是研究者们通过对自然界中的“荷叶效应”深入观察和探究其微观表面结构后所开发出来的一种具有疏水、自清洁、抗菌、防黏附等特点的材料^[7-9]。超疏水柔性应变传感器将超疏水材料与柔性电子器件结合^[10]，很大程度上克服了使用环境对传感器性能的限制，在人体运动监测的应用中尤为体现。

运动监测设备在使用时难免会受到汗液附着、水滴冲击等情况，影响传感准确度，而水下运动的开发也意味着传感器必须在水中不受影响。超疏水柔性应变传感器将超疏水材料同时具有柔性应变传感器的高灵敏度和贴合人体表面的传感优点^[11]，还保证了在湿度、腐蚀、水下等极端环境下也能完成运动监测，具有很强的稳定性及抗腐蚀能力，能够在恶劣环境下实时监测人体各种生理运动，如手、腿、颈椎等大幅度的关节运动及呼吸、吞咽、皱眉等小幅度的运动信号^[12-13]。由此可见，超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中有着巨大的发展前景。本文主要总结了超疏水柔性应变传感器的性能参数，构建超疏水柔性应变传感器的常用材料和制备方法，并介绍了近年来超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中功能与应用的研究进展(图1)。

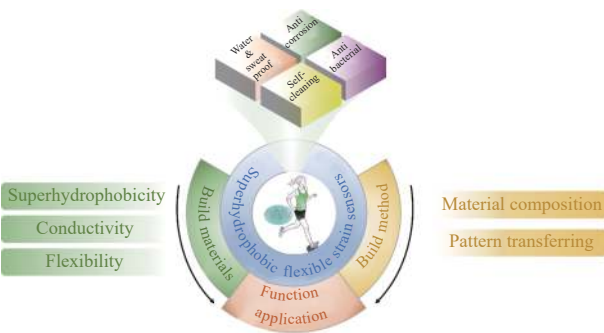


图1 超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的研究进展
Fig. 1 Research progress of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring

1 超疏水柔性应变传感器的性能参数

传感器的性能，需要从灵敏度、工作范围、稳定性、响应时间、应变与相对电阻变化之间的线性关系等多个方面进行测评^[2, 10]。同时，用于可穿戴超疏水柔性应变传感器必须具有高拉伸性

(>50%)、高灵敏度和高耐久性^[14]，以适应由人类活动引起的多尺度和动态形变。

1.1 灵敏度

灵敏度决定传感器是否能够准确反映人体信息^[15]，由灵敏系数(Gauge factor, GF)决定，指单位长度变化时电阻的单位变化。由以下公式表示：

$$GF = \frac{(\Delta R/R_0)}{\varepsilon}$$

其中： ΔR 表示初始电阻 R_0 减去实测电阻 R ； ε 表示应变系数。

超高灵敏度对于健康监测中准确的信号采集和提高信噪比至关重要^[16]，大多数高灵敏度传感器只能在有限的应变范围内保持其优势，因此同时具有高拉伸能力($\varepsilon \geq 100\%$)和高灵敏度($GF \geq 50$)的传感器仍然是研究的重点。

柔性应变传感器的GF值取决于多种因素，构建工程微观结构是一种广泛使用的手段^[17]。例如Chu等^[18]通过简单的预拉伸方法制备了具有梯度褶皱结构的柔性应变传感器。褶皱结构不仅提供了超高的灵敏度(在270%~300%范围内最大GF达167 665.6)且高灵敏度的位置可以根据实际应用的应变要求进行精确控制和调整，同时褶皱结构带来的粗糙表面还提高了传感器的超疏水性。

1.2 传感工作范围

作为可穿戴设备，要满足日常适用需求必须具备较宽的传感工作范围(传感应变范围)，它反映传感器保持其物理完整性和响应稳定性的最大应变^[10]。以步行时为例，脚部、腰部和关节处皮肤的拉伸率和收缩率高达55%^[19]，此外，还需要适应运动监测中产生弯曲角度变化。作为运动监测的可穿戴设备，要求在高灵敏度的同时达到尽可能宽的工作范围，这对传感器导电材料的延展性及制备工艺有一定要求。Li等^[20]以弹性橡胶带(EB)为柔性基底以获得优异的拉伸性能，碳纳米管(CNTs)、炭黑(CB)相结合作为双导电网络，保证在宽的传感工作范围(0%~996.5%)内导电网络不完全断开，最大GF值高达648.8。

1.3 循环稳定性

循环稳定性是指在多个拉伸-释放循环下，应变传感器在受到一定的应变力时仍能具有稳定的响应和机械完整性^[10]。基板上涂覆的敏感材料在多次循环后会出现断裂、剥离等现象，使传感器电阻增大，信号失真^[21]，因此它一定程度上反映了柔性应变传感器的耐久性。Gao等^[22]在聚氨酯

(PU) 基底上沉积还原氧化石墨烯 (rGO)、聚多巴胺 (PDA) 和 1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸硫醇 (PFDT) 组成超疏水柔性应变传感器。在高湿环境下测试传感器的性能, 结果显示 PU/rGO/PDA 传感器在经过 5 个循环后导电路径被破坏, PU/rGO/PDA/PFDT 传感器在水中浸泡 10 h 后依然能经受住 1 000 次的循环, 说明该传感器在极端湿度条件下具有耐久性, 而电性能耐久性测试表明其能保持灵敏度和稳定性。

1.4 线性度

线性度反映施加的应力与阻值变化之间的关系^[16], 是柔性应变传感器的一个重要参数, 它直接关系着传感器能否准确反映真实的应变。对于可拉伸的柔性应变传感器来说, 通常具有多个线性区域, 这是由于在拉伸形变过程中引起导电网络的重新排列及与基底材料的重新组合^[23]。大多数情况下, 传感器在工作时需要承受非常大的应变, 当薄膜的微观结构在拉伸过程中由“均匀形貌”变为“非均匀形貌”时, 应变传感器对应变的响应是非线性的^[21], 因此柔性应变传感器的结构构建方法对其线性度有很大影响。Wang 等^[24]利用超声诱导和非溶剂致相分离法 (NIPS) 在橡胶泡沫上沉积 CNTs 制备了具有荷叶微球状结构的超疏水柔性应变传感器, 微球之间有许多沟槽, 可以为基体变形提供额外的空间。在应力范围为 21%~180% 时, $\Delta R/R_0$ 稳定增长, 这是由于拉伸引起裂纹间隙和密度增加, CNTs 断裂的导电网络在塌陷沟槽上逐渐连接, 导致电阻在范围内呈线性增长。

1.5 响应时间

响应时间是指传感器将物理形变转化为传感信号所用的时间^[19], 决定应变传感器向稳态响应方向移动的速度。瞬时响应越小, 传感器越适合于突然应变测量应用, 如测量心跳、脉搏等生理信号^[25]。Li 等^[26]在基板上喷涂多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和热塑性聚氨酯 (TPU) 混合溶液, 制备了一种高灵敏度及快速响应时间 (<8 ms) 的超疏水柔性应变传感器, 比许多以前报道的传感器数据更好, 在监测眨眼动作或帕金森症患者手抖方面有很大应用潜力。

2 超疏水柔性应变传感器的构建

2.1 常用材料

构建超疏水柔性应变传感器的关键之一是选

择合适的材料, 以满足特定应用对传感、机械和结构的要求。超疏水柔性应变传感器的制备本质上要求可拉伸性材料在多级结构中形成超疏水层、导电层和柔性层, 并且在大范围变形下仍保持超疏水性和导电稳定性^[27]。

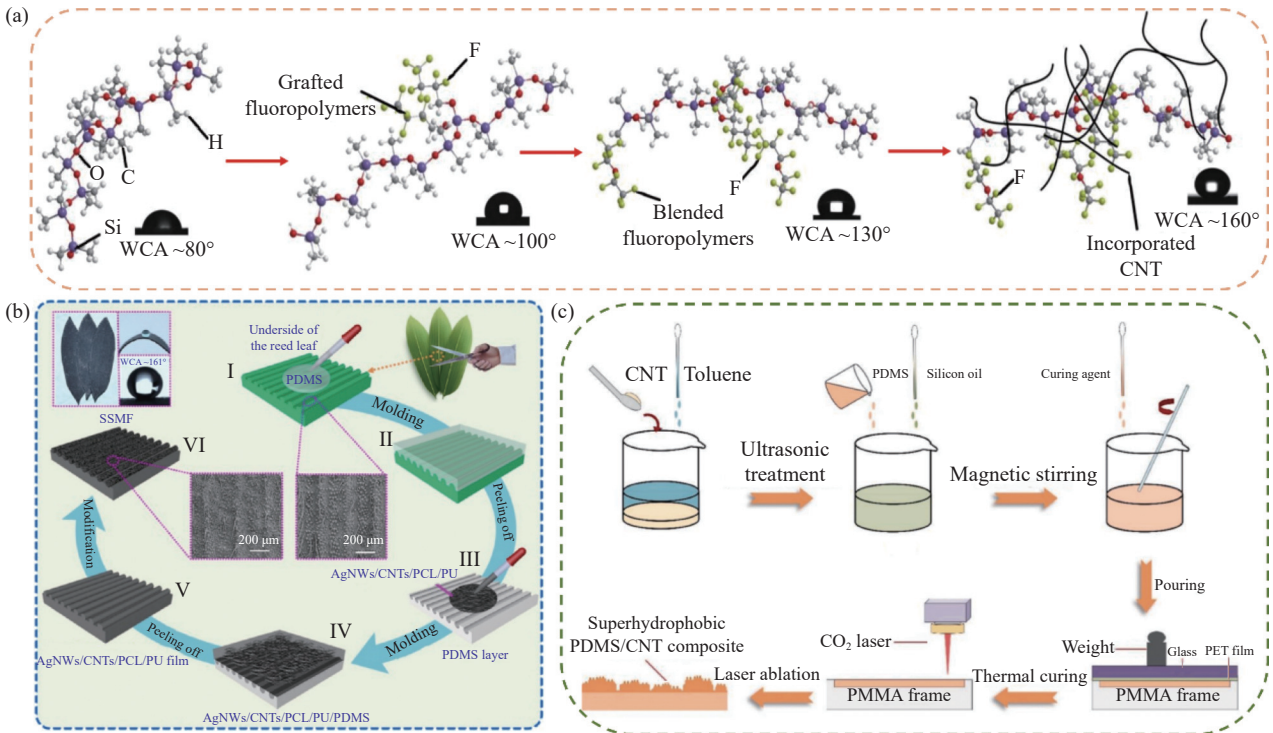
2.1.1 超疏水层

基于柔性应变传感器的超疏水涂层需具备很强的稳定性, 在受到强力拉伸、弯曲, 或是受到剧烈水流冲击时也不会被破坏。在传感器上构建超疏水涂层的方法从原理角度分类一般分为两种: 一是通过化学修饰降低表面能; 二是提高表面粗糙度^[28]。

表面能是影响固体表面润湿性的一个重要因素。一般来说, 当固体的表面能高于液体时, 固体的表面会被液体湿润; 相反, 当固体的表面能低于液体的表面能时, 液体不会湿润固体的表面, 它会倾向于呈球形构象^[29]。因此, 常通过嫁接、喷涂或混合低表面能材料 (如氟化物、硅氧烷化物) 的方式在基底形成超疏水层^[30]。聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 的每个硅 (Si) 原子上都有两个甲基 ($-\text{CH}_3$) 基团导致表面张力低, 具有优良的耐化学腐蚀性、回弹性和耐磨性等优点, 在构建超疏水涂层方面有巨大应用^[31]。Lin 等^[32]在制备的柔性应变传感器中引入 PDMS 作为防护结构, 使其具有超疏水性及抗恶劣环境和自清洁的性能, 即使在 70% 的最大应变下, 水滴在传感器表面仍然保持球形, 表现出优良的超疏水性。Wang 等^[33]提出了一种多氟化策略, 基于氟化 PDMS、全氟聚醚和 CNTs 的混合物制备了超疏水柔性应变传感器 (图 2(a))。其水接触角 (WCA) 高达 162°, 即使经过 200% 拉伸、1 000 次拉伸释放循环、砂纸磨损、手擦、高速落/射流冲击、腐蚀性液体浸泡、热处理等各种破坏后仍保持超疏水性。

另外一种方法是改变表面粗糙度, 最典型的方法是以自然界中荷叶表面形态为原型构建乳突状纳米结构^[11, 36] (图 3(a)), 这也是超疏水现象的由来。其原理是在液滴和材料表面增加空气层, 固体和空气混合构成的分层结构使液滴悬浮在材料表面 (图 3(b))^[9]。

Ma 等^[34]将芦苇叶背面的微纳米结构转移至 PDMS 模板, 制备了能够可逆切换高/低黏态的柔性超疏水形状记忆薄膜 (图 2(b))。实验表明, 薄膜在受到微小拉伸压力 ($\epsilon=0\%\sim15\%$) 状态下处于低



WCA—Water contact angle; SSMF—Superhydrophobic shape memory film; AgNWs—Ag nanowires; PCL—Polycaprolactone; PU—Polyurethane; PMMA—Polymethyl methacrylate; PET—Polyethylene terephthalate

图 2 (a) 聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 多氟化策略示意图^[33]; (b) 以芦苇叶为模板的超疏水柔性应变传感器制备示意图^[34]; (c) 可拉伸和超疏水 PDMS/碳纳米管 (CNTs) 复合应变传感器的制备示意图^[35]

Fig. 2 (a) Illustration of the multi-fluorination strategy on polydimethylsiloxane (PDMS)^[33]; (b) Schematic diagram of superhydrophobic flexible strain sensor using reed leaf as template^[34]; (c) Schematic diagram of the fabrication process of the stretchable and superhydrophobic PDMS/carbon nanotubes (CNTs) composite strain sensor^[35]

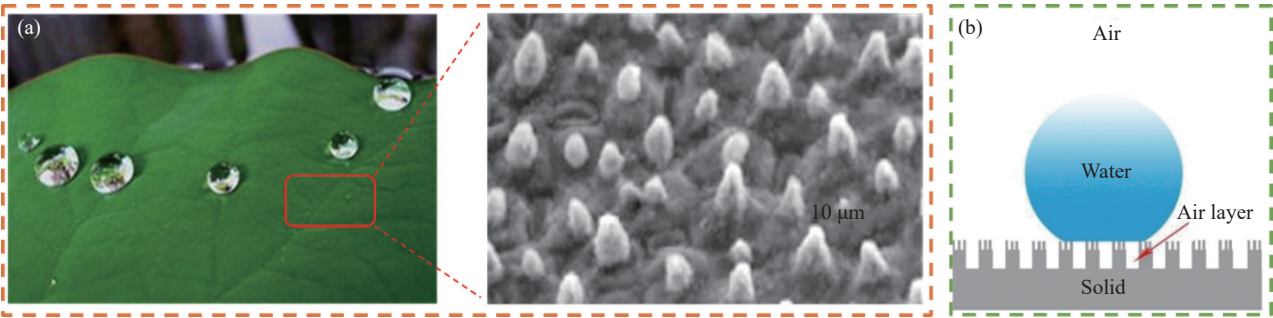


图 3 (a) 水滴落在超疏水荷叶上的光学图片及超疏水荷叶表面乳突状结构的 SEM 图像^[36]; (b) 荷叶表面的超疏水原理示意图^[9]

Fig. 3 (a) Optical picture of water drops falling on a superhydrophobic lotus leaf and SEM image of the papillae structure of the superhydrophobic lotus leaf^[36]; (b) Schematic diagram of the superhydrophobic principle of the lotus leaf^[9]

黏性超疏水滚动状态，这是由于超疏水微/纳米结构底部形成的气穴减小了实际固/液接触面积，阻止了水滴润湿表面，形成了“莲花效应”；当薄膜处于高黏附的超疏水钉住态 ($\epsilon=15\%$) 时，水滴与薄膜表面的接触面积增加，形成了“花瓣效应”。因此，基于该材料的可穿戴柔性传感器具有动态除湿特性，在疏水设备、可穿戴液滴操纵器和全天候智能执行器等多种应用领域显示出巨

大的潜力。

除了复制自然基底，通过刻蚀或表面沉积等方法制备人工基底的微结构用于改变表面粗糙度也是常见方法^[37]。Liu 等^[35]利用廉价的 CO₂ 激光雕刻机在复合材料的表面刻蚀出粗糙且不规则的凸结构成功制备了一种高度稳定的超疏水表面，避免了繁琐的化学修饰，使超疏水柔性应变传感器在各种液滴 (水、酸、碱和矿物溶液) 下保持超

疏水性(图 2(c))。同样的，Gao 等^[38]在拉伸产生裂纹的 PU 纳米复合材料上沉积了 SiO₂/石墨烯壳层结构，不仅降低了纳米纤维的表面能，而且提高了纳米纤维的表面粗糙度，从而提高了其超疏水性。

超疏水层的稳定是超疏水柔性应变传感器在恶劣环境下正常工作的关键，也是后续对人体运动监测等信息可靠性的基本保证。表面微观结构和化学成分决定润湿性能，但表面结构容易破坏，化学成分变化敏感，容易造成力学性能不稳定和化学腐蚀。增强超疏水层的稳定性和耐磨性一直都是研究难点，且大部分的超疏水层容易渗入导电层后影响传感器的导电性，因此超疏水层与导电层的合理构建方法也需要不断改进。

2.1.2 导电层

电极材料是影响器件灵敏度和稳定性的重要因素。除了导电性，还需要具备能与曲面吻合、适应大幅形变的性能，以满足柔性传感器的高灵敏度^[39]。

碳基材料(如 CB、CNTs、石墨烯等)及金属纳米产品(如金、银纳米线和纳米颗粒)拥有优异的导电性、多用途的纳米结构和良好的生物相容

性而被广泛用于制造柔性应变传感器，既可以形成渗透性网络弹性导电聚合物也可以直接作为导电填料^[40]。Lin 等^[41]将酸化碳纳米管(ACNTs)和银纳米颗粒(AgNPs)引入 PDMS 体系，制备具有双重导电网络的超疏水多功能碳纳米管，由 ACNTs 和 AgNPs 组成的双重导电层使单个纳米纤维具有高导电性，大纵横比的导电纳米纤维在材料内部构建完美的导电网络，电导率达 3 031.5 S/m。

此外，导电聚合物具有导电性好、柔韧性好、价格相对低廉、易于合成等优点^[42]，同样在柔性传感器中有很大应用前景。He 等^[43]设计了一种结构粗糙的超疏水棉织物聚吡咯/碳化钛 MXene (PPy/Ti₃C₂T_xMXene) 压力传感器，PPy 协同 Ti₃C₂T_xMXene 形成独特的网络导电结构和表面微纳米结构，且 PPy 中强大的化学键为 Ti₃C₂T_xMXene 提供了保护层，减少了 Ti₃C₂T_xMXene 的剥落。该传感器的电阻变化量仅由压力决定，不受施加压力频率变化的影响，表明获得的压力传感器具有良好的稳定性。

上述不同类型的材料存在不同的优劣特性(表 1)，根据需求选择适合的材料发挥协同作用是研究的关键。

表 1 不同类型导电材料的优劣势特点
Table 1 Advantages and disadvantages of different types of conductive materials

Conductive materials	Advantages	Disadvantages	Ref.
Carbon based materials	Chemical and thermal stability, good mechanical properties, easy functionalization	Poor durability and transparency	[40-41, 44]
Metal nanomaterials	Better electrical conductivity, suitable for complex structures	Poor adhesion, easy oxidation	[41, 45-46]
Conductive polymers	Easy to synthesize, low price	Short lifespan	[43, 47]

2.1.3 柔性衬底

作为柔性应变传感器，柔性基底是十分关键的，它需要具备较高的拉伸性能和柔韧性及易于与导电材料复合等优点。

聚合物拥有良好的化学稳定性、生物相容性和拉伸性及易于与导电材料复合等优点被广泛应用于柔性传感器领域^[48]。PDMS 除了在超疏水领域中被不断开发，还因具有优良的光学透明度、高拉伸性(高达 1 000%)、化学稳定性、透明性和热稳定性好、杨氏模量低、与电子材料黏接性好等优点常被作为柔性衬底的首选基材^[44]。其他常见的柔性高分子材料还有聚酰亚胺(PI)、PU 等。PI 是一种良好的耐高温材料，具有优异的力学性

能、耐辐射性能和耐溶剂性能，是制备柔性衬底的理想材料，但存在吸水性和易受潮性的缺点^[49]。PU 具有软硬段结构灵活、无毒、挥发性有机物含量低、不燃等特点，在柔性传感器中也常被用做基底材料，但同样存在导电性差的缺点，需要与导电材料结合^[50]。

除聚合物外，生物复合材料也常被用来作为柔性基底，如水凝胶、气凝胶、壳聚糖等，它们具有很高的柔韧性、良好的生物相容性及自黏性，能够成为皮肤可穿戴应用的理想材料^[1]。海绵、纸张等作为生活中的可再生资源，成本低、质量轻、弹性强^[39]，也可作为柔性传感器的衬底材料，但它们的亲水性会影响传感器的传感性能，因此

骨架，MXene 纳米片作为薄片将单个 AgNWs 紧密连接并覆盖在织物衬底上，形成连续的电子传递路径，MXene 保护 AgNWs 免受氧化，增强 AgNWs 与织物基体的结合，其官能团的转变导致了自衍生的疏水性。层层组装的制备方法虽然简单可控，但也存在制备时间长不适合大批量生产、表面稳定性差、容易受到一些溶剂破坏等不足。

2.2.2 图案转移

图案转移是在传感器表面获得所需几何形状的最常用制造方法^[45]。通过改变柔性应变传感器表面的几何形态提高传感器性能的方法已经受到广泛应用，常见的图案转移方法包括但不限于 3D 打印、光刻、模板法等。

与传统的旋涂、铸造或挤压制备的简单的平面或管状柔性器件相比，3D 打印柔性电子器件具有复杂的几何形状和精确规定的微结构，并具有良好的力学性能可以满足各种个性化的要求^[56]。如用 3D 打印技术制备了一种基于疏水表面功能化的钛酸钡/聚偏氟乙烯复合膜，用于构建柔性的、具有高压电性能的自供电传感器，可作为运动穿戴用于监测和分析运动员的运动^[57]。

可编程激光直写 (FsLDW) 已被公认为是光还原氧化石墨烯和弹性体表面结构的有力工具，在制备各种性能优良的纤维结构方面具有很大的优势。具有脉冲时间超短、峰值强度高、焦点直径小等优点，可实现微裂纹、热影响区最小、柔性高的超高精度三维微加工^[58]。Dinh Le 等^[59]用 FsLDW 技术将超短飞秒激光脉冲照射到涂覆在 PDMS 衬底上的 rGO 薄膜上，同时实现 rGO 的光还原和光热分解。通过单步 FsLDW 刻印，石墨烯的电导率得以恢复，并在表面有效形成荷叶状的层次化结构，实现超疏水柔性应变传感器的高灵敏度和快速响应等特性。

模板法具有精度高、可靠性高等优点，是指利用自然界中存在的高敏感性结构(昆虫裂缝或树叶等)、可拉伸结构(皱纹、纹理结构等)衍生出的人工微纳米结构提高柔性应变传感器灵敏度和可拉伸性的方法，在微纳米加工中占据主导地位^[60-61]。Baek 等^[62]使用褶皱弹性模板法在铂催化硅橡胶 (Ecoflex) 表面制备垂直于预应变方向的周期性波状微结构，通过比较无褶皱膜、单面褶皱膜和双面褶皱膜，证明双面褶皱薄膜在高压状态下的压敏系数比无褶皱压力传感器得到的要高，

且传感器响应和释放时间分别提高了 42% 和 25%，这是由于 Ecoflex 模板上的褶皱微结构能够最大限度地减少了 Ecoflex 弹性模板黏弹性行为带来的问题。虽然模板法已经在各个领域得到了较好的发展和运用，但复杂的加工工艺也限制了其成本和制造规模。

近年来，研究者们致力于开发简便高效的构建方式来优化传感器的性能，提高灵敏度、耐用性、稳定性及达到更宽的响应范围。如何高效、低成本和环保地将导电材料与柔性基底结合，并制备高性能的柔性传感器，仍然是一个技术上的难点。

3 功能

本节对超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的功能进行综述。一般的柔性应变传感器附在人体表面如关节手肘时，能够通过感知应变/应力的变化识别出不同的运动动作。根据力的大小和运动范围可大致分为两种运动模式，大的运动包括几个关节的运动，而脉搏、呼吸、心跳和发声属于细微运动的一部分^[65]。然而，当传感器的疏水性不够好时，可能会影响它们的使用寿命及限制其应用领域。超疏水柔性应变传感器克服了这个缺点，增加了其在人体运动监测应用领域的防水防汗、防腐、自清洁及抗菌的功能(表 3)。

3.1 防水防汗

作为可穿戴实时监测运动的传感器，防水、防汗及在恶劣条件(如高湿度环境)依然需要保持高的灵敏度及稳定性。超疏水层能够隔绝液滴与导电层的接触，有效防止液滴渗透到导电层影响电阻。在众多类型的柔性应变传感器当中，纸张、海绵及纺织品作为十分常见的柔性基底本身具有亲水性，接触水滴后容易降低传感性能。

近年来纸基柔性应变传感器越来越受到关注，由于它符合环保电子产品的未来发展趋势^[66-67]。然而，纸质电子产品在遇到水时很容易失效，因此无法应用于潮湿或水下环境。Bu 等^[68]将导电 $Ti_3C_2T_x$ MXene 涂覆在印刷纸上，然后在其表面沉积超疏水蜡烛灰层，制备了超疏水微裂纹导电纸基应变传感器，在水下也能清楚地识别和准确地记录腕部弯曲引起的皮肤不同区域的所有变形状态。

3D 海绵因其质量轻、孔隙率高、弹性好等优点^[69]，在制造高灵敏度触觉压力传感器方面显示出巨大的潜力，但海绵本身具有的亲水性极大程

表 3 超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的功能

Table 3 Functions of superhydrophobic flexible strain sensor in human motion monitoring

Functions	Construction materials	Max GF	Work scope/%	Cycle stability/time	Response time/ms	Ref.
Waterproof and sweatproof	TPE/WMCNTs/PDMS	69.84	0-80	1 000	60	[27]
	WMCNTs/PDMS	22.64	0-200	10 000	—	[33]
	Paper/MXene	17.4	0-0.8	1 000	200	[68]
	Sponge/PAN/PI/rGO/PDMS	—	>95	1 000	—	[70]
	PDMS/CB/SiO ₂	354	0-250	10 000	—	[80]
	PDMS/GO	1 199.10	0-400	3 000	88	[81]
Anti-corrosion	RB/AgNPs/PDMS	1 153.0	0-60	25 000	—	[72]
	RTV/WMCNTs	214	0-447	10 000	—	[73]
	EB/AgNPs/OCA	61.8	0-120	2 000	502	[82]
	Paper/CB/CNT/Hf-SiO ₂	7.5	-0.8-0.8	1 000	—	[83]
Self-cleaning	TPU/GO	14.14	0-350	1 000	—	[54]
	Sponge/rGO/PPy/PDMS	—	—	5 000	118	[75]
	CB/CNTs/PFOTES-TiO ₂ NPs	1 134.7	0-1 050.0	5 000	102	[76]
	CNC/G	23 600	0-98	1 000	33	[84]
Anti-bacterial	Fabric/GO/CNT/Cu	0.18	0-150	1 200	—	[79]
	FAS/Ag/MWCNG/G-PDMS	1 989	0.1-170	1 000	150	[78]

Notes: PAN—Polyacrylonitrile; RTV—Room temperature vulcanized silicone rubber; GO—Graphene oxide; CNC—Cellulose nanocrystal; FAS—Heptadecafluoro-1,1,2,2-tetradecyl trimethoxysilane; G-PDMS—Graphene-modified PDMS; PI—Polyimide; CB—Carbon black; RB—Rubber band; OCA—Octadecanoic acid; Hf-SiO₂—Hydrophobic fumed silic; PPy—Polypyrrole; PFOTES-TiO₂ NPs—Perfluoro-octyltriethoxysilane modified TiO₂ nanoparticles.

度上限制了其应用领域。Liang 等^[70]开发了一种具有高导电性、优良力学性能的超疏水海绵应变传感器。经由 PDMS 处理前后的海绵在盐水中浸泡多次后电流变化率无明显差异，具有良好的防水防汗功能。

在纺织品中实现导电性与超疏水性的结合是一个巨大的挑战，需要在表面对润湿结构和导电网络同时进行精密设计。Pei 等^[71]在织物上浸涂含硝酸银的硬脂酸前驱液，制备了超疏水的柔性织物应变传感器，即使受到连续水滴冲击时输出电流也不受影响。超疏水性使涂层具有优异的防水能力，使传感器不受液体影响，并确保导电纺织品能长期在各种恶劣环境中使用。

3.2 防腐

除了在高湿度和水下环境中起到防护作用，超疏水表面还可以有效防止腐蚀性溶液(如酸性、碱性和盐溶液)在复合材料内部扩散，从而保证了材料在恶劣环境下使用的耐久性和可靠性。Wang 等^[72]提出了一种利用 PDMS 改性的方法制备无氟超疏水高导电橡胶复合传感器，不仅赋予传感器超疏水性能，而且无论所处环境 pH 值如何，复合材料的 CA 值都在 154°左右，表现出良好的防腐功能。

然而，超疏水涂层结构脆弱，在水滴冲击、应变力作用等外界环境影响的情况下容易失效。

Jia 等^[73]设计了一种将导电层、超疏水层和可拉伸聚合物集成到单一的体系中，通过砂纸摩擦后在顶部和底部均呈现荷叶状双尺度粗糙度构建了一种耐用的无涂层超疏水柔性应变传感器。荷叶状表面的分级粗糙结构可以滞留大量的空气，形成双尺度气穴从而阻止水滴和腐蚀性物质的渗透。因此，稳定的超疏水性使该传感器在极端条件(强酸、强碱、高温等)下用于检测人体的全范围运动，如手腕、手指和关节的运动及脉搏率和语音识别的监测。

3.3 自清洁

自清洁现象最初由研究人员发现荷叶表面卓越的超疏水性能使水滴很容易从荷叶表面滚落，滚落的同时带走表面的污垢达到清洁效果^[74]，已被证明是一种有效的表面去污方法，对柔性电子材料的实际应用非常重要。Ni 等^[75]制备了一种多功能 rGO/PPy/PDMS/PU 海绵传感器，优异的超疏水性防止牛奶、咖啡、茶等液体渗入传感器内部对传感器的传感性能产生影响，在 80℃ 的热水中浸泡 30 min 后传感器表面依然保持干燥(图 5(a))。

超疏水柔性应变传感器不仅对液体污渍有优异的防护性，对固体污渍也同样存在排斥现象。Dong 等^[76]将 CB 纳米粒子结合 CNTs 制备可拉伸导电网络与氟化二氧化钛纳米粒子(PFOTES-TiO₂ NPs)协同组合，成功制备了一种兼具健康监测性

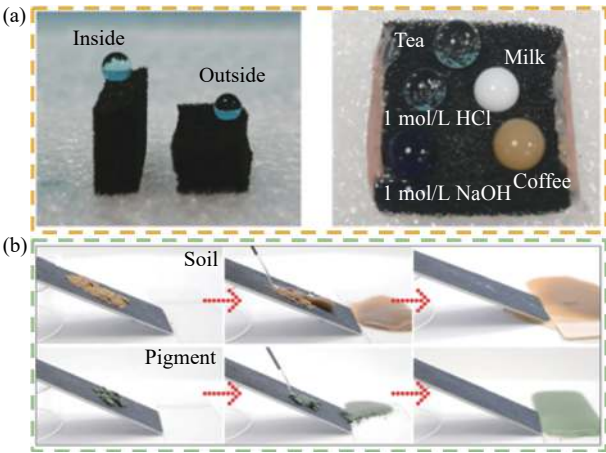


图5 超疏水柔性应变传感器的自清洁性能: (a) 水滴在 rGO/PPy/PDMS/PU 海绵传感器表面和内部的照片以及牛奶、咖啡、茶和 pH 值为 1、13 的常见液体滴在传感器表面的照片^[75]; (b) 利用水轻松去除无纺布基超疏水柔性应变传感器表面的天然土壤和色素^[76]

Fig. 5 Self-cleaning performance of the superhydrophobic flexible strain sensor: (a) Photographs of water drops on the surface and inside of the rGO/PPy/PDMS/PU sponge sensor as well as milk, coffee, tea, and common liquids with pH=1 and 13 on the sensor surface^[75]; (b) Easy removal of natural soil and pigments from the surface of the nonwoven-based superhydrophobic flexible strain sensor using water^[76]

能和抗污能力的超拉伸自洁无纺布基超疏水柔性应变传感器。PFOTES-TiO₂ 层所贡献的微拓扑结构和较低的表面能使织物基生物电极具有出色的拒水性能, 将天然土壤、色素和黏稠番茄酱作为模型污染物, 用水流冲洗可以轻松、快速地吸附和去除污染物, 保持薄膜的干燥和清洁达到自清洁效果 (图 5(b))。通过简单的冲洗就能使传感器除去杂质, 不仅能减少表面磨损, 而且应用时减少了额外清洗工作。

3.4 抗菌

柔性应变传感器在人体运动监测中会和人体皮肤直接接触, 出汗或环境因素容易导致细菌滋生, 对人体造成伤害的同时还会腐蚀传感器。超疏水柔性应变传感器具有一定隔绝细菌能力, 并与一些无机抗菌材料 (如金属纳米颗粒和金属氧化物纳米颗粒) 结合达到防止细菌黏附的效果^[77]。Lin 等^[78] 采用 LBL 的方式, 利用低表面能的氟碳链与 AgNWs/MWCNT 微纳结构的协同作用, 开发了一种具有超疏水性、水下疏油性及抗细菌黏附的柔性应变传感器 (FAMG)。由于超疏水的表面及 AgNWs 的加入, 传感器对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗黏附率分别达到 99.91% 和 99.95%(图 6)。

通过简单的清洗去除表面污渍, 避免细菌黏附的同时还具有防止细菌增长的能力。Park 等^[79]

将 rGO、CNTs 和铜喷涂到织物上, 制成具有超疏水和抗菌性能的可穿戴传感装置。由于超疏水性及铜元素的存在织物传感器对金黄色葡萄球菌及大肠埃希菌表现出了良好的抗菌性能, 织物还可以通过加热抑制细菌或病毒生长。

4 应用

本节对超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的应用进行综述。超疏水柔性应变传感器相比于普通柔性应变传感器更加不受应用环境和条件的限制, 因此拓宽了在人体运动监测中的应用范围。将其与人机界面和物联网等技术相结合, 为健康监测、康复训练、信号通讯、远程控制应用领域提供了便携、可穿戴且实时的优势, 能够及时地获得人体运动监测信息。

4.1 健康监测

在公众健康越来越被重视的当下, 超疏水柔性应变传感器为制备具有恶劣环境适应性的健康监测电子器件提供了新的思路。Dong 等^[76] 开发了一款可以准确稳定地监测心电和肌电信号的超疏水纺织柔性应变传感器 (图 7(a))。传感器收集到的心电信号经过放大处理后可以清晰分辨出 P、QRS 复波和 t 波形, 这些精细的信号包含了心肌梗死、冠状动脉疾病、动脉硬化等心血管疾病的重要生理和生物学信息; 采集到的肌电信号可准确分辨肱二头肌收缩动作 (握紧、肘部抬起、前臂旋后), 可用于分析肌肉状态 (异常、激活水平等) 和人体运动的生物力学。

随着海洋开发的不断深入, 对具有传感能力的水下可穿戴设备的要求越来越高, 超疏水柔性应变传感器还能作为水下报警器用于协助救援活动。Zhu 等^[85] 提出了一种由 rGO 和 PDMS 微球修饰的超疏水织物柔性应变传感器, 可用于检测水中振动、水下人体手指弯曲等行为。与无线蓝牙智能系统相结合, 当游泳者存在溺水风险时会发出警报。该智能系统可用于在潜在危险的情况下进行远程探测, 保证消防救援等人员在工作中的健康安全情况。

4.2 康复训练

根据采集的人体运动信号, 分析与个人运动目标的偏差数据, 进行姿态校正和运动损伤警示, 达到康复训练的目的。例如 Zhai 等^[86] 开发了一种应用于游泳运动员训练监测的超疏水柔性应变传感器, 由于其优异的水下抗干扰能力, 可在水下

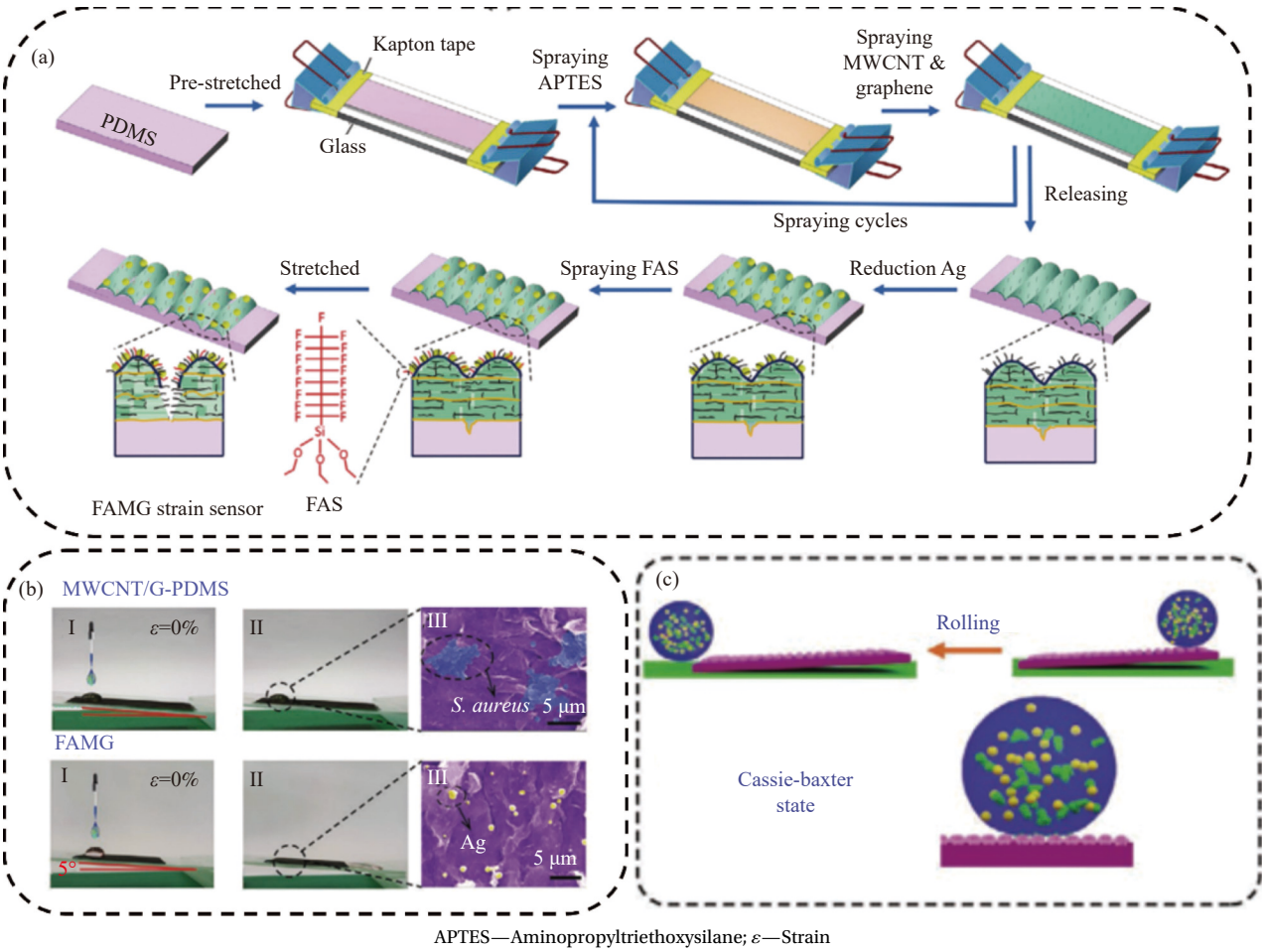


图 6 FAMG 超疏水柔性应变传感器在抗菌中的应用^[78]: (a) FAMG 传感器的制备示意图; (b) Ag 离子加入前后传感器的抗细菌粘附实验 (I: 初始状态; II: 结束状态; III: 细菌粘附在表面的 SEM 图像); (c) FAMG 传感器抗细菌粘附原理示意图

Fig. 6 Application of FAMG superhydrophobic flexible strain sensors in anti-bacterial applications^[78]: (a) Schematic diagram of the FAMG sensor; (b) Anti-bacterial adhesion experiments of the sensor before and after Ag ion addition (I: Initial state; II: End state; III: SEM images of bacteria adhering to the surface); (c) Schematic diagram of the anti-bacterial adhesion principle of the FAMG sensor

实时捕捉并记录了身体各部位的运动情况，记录对不同泳姿(自由泳、蛙泳和踩水)的运动信号(图 7(b))。

4.3 信号通讯

在水环境下能够快速、稳定、灵敏、实时监测的多功能柔性应变传感器的研发对于发展水下传感技术尤为重要。超疏水柔性应变传感器在普通柔性应变传感器上多增加的超疏水涂层有助于可穿戴传感器拓宽水下应用领域，包括水下信号采集和通讯。Dai 等^[80]设计的超疏水柔性应变传感器可以在水中识别手指弯曲角度，因此可以根据手指弯曲的持续时间产生典型的莫尔斯电码的“破折号”和“点”信号，以诱导电阻的变化完成水下通信介质，不仅可用于水下运动记录，而且可作为一种高效、可靠的水下通信信号发射器

(图 7(c))。

Yang 等^[87]设计了一款可穿戴式远程监控设备，将超疏水 MXene 包被羧基化碳纳米管 (C-CNTs)/羧甲基壳聚糖 (CCS) 气凝胶柔性应变传感器与带有蓝牙模块的微控制器相连后用于监测手指的弯曲或伸展运动，微控制器通过无线通信向手机发送相应信息，完成远程信息通讯。基于超疏水气凝胶的传感器具有广阔的应用前景，可广泛应用于多水、多汗环境下的电子皮肤、可穿戴设备、智能医疗监护仪等电子产品中。

4.4 远程控制

展望未来，基于超疏水柔性应变传感器的可穿戴远程控制设备将会为用户控制家用电器提供了极大的便利。Ma 等^[34]制备的可穿戴交互设备可以在全天候(干燥及潮湿环境下)准确区分手指

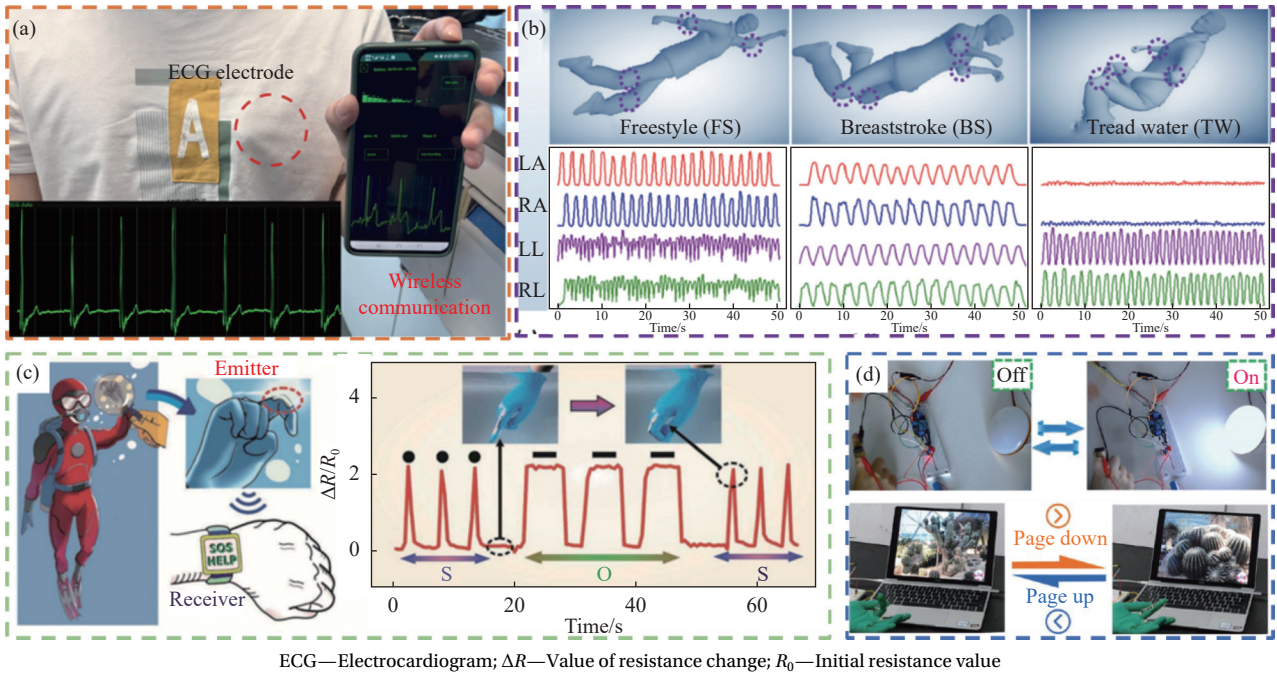


图 7 超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的应用：(a) 实时监测心电信号^[76]；(b) 监测各种泳姿的电信号 (LA、RA、LL、RL 分别代表左臂、右臂、左腿、右腿)^[86]；(c) 利用手指弯曲在水下产生连续莫尔斯电码 SOS^[85]；(d) 远程控制电灯开关及 PowerPoint 演示^[34]

Fig. 7 Applications of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring: (a) Real-time monitoring of ECG signals^[76]; (b) Monitoring of electrical signals for various swimming positions (LA, RA, LL, RL represent left arm, right arm, left leg, and right leg, respectively)^[86]; (c) Generate continuous Morse code SOS underwater using finger flexion^[85]; (d) Remote control of light switches as well as PowerPoint presentations^[34]

关节弯曲和放松等不同的机械运动，并将其转换为电信号。然后，这些获得的传感信号通过连接在传感器两端的多路复用电路进行处理，实现对各种电子设备的精确控制 (图 7(d))。

同样的，归功于传感器的超高灵敏度和快速响应，可以实现远程智能语音控制。例如 Dinh Le 等^[59] 将基于声带振动直接检测生理机械声信号的超疏水柔性应变传感器与智能声控安全系统绑定，当所采集的声谱匹配概率大于 90% 时即可自动解锁，即使在极其嘈杂的环境中也可以识别不同的语音模式。并且由于具有自清洁特性，传感器不会因水基污染物而导致性能下降。

5 总结与展望

精确反馈及稳定输出有效人体运动信息对医学临床、运动健康有着重要的意义。超疏水柔性应变传感器在保证传感性能的同时还增强了防水防汗、防腐、自清洁及抗菌的功能。随着可穿戴设备的普及，超疏水柔性应变传感器在人体运动监测领域展现出巨大市场前景，并在健康监测、康复训练、信号通讯和远程控制方面带来了新的突破口。本文介绍了超疏水柔性应变传感器的性

能参数、常见的构建材料及构建方法，并对其在人体运动监测中的功能应用做了综述。

尽管有着很好的发展前景，但根据已知的研究现状，仍旧存在不容忽视的问题。

(1) 即使现在有大量的材料和结构被不断开发，但平衡传感器性能的所有关键参数也很困难。通常高灵敏度的传感器意味着较小的工作范围或较差的稳定性，然而在人体运动监测的实际应用中要求传感器具备高灵敏度和宽工作范围。

(2) 超疏水柔性应变传感器虽然较普通柔性应变传感器增加了多功能应用，但在亲肤性、透气性和舒适度方面仍需要更多研究及改进。

(3) 大多数的超疏水柔性应变传感器依然存在制备过程较复杂的问题，采用合理制备方法的同时也要考虑高效商业化大规模生产及相对低成本的环保设计。超疏水柔性应变传感器自开发以来，极大扩展了应变传感器的形式和应用。未来随着通信技术的迅速发展，将向着集成、人机交互的方向不断前进，催生出更多丰富的智能可穿戴设备。

参考文献：

[1] WANG W, YANG S, DING K, et al. Biomaterials- and bio-

- structures inspired high-performance flexible stretchable strain sensors: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 129949.
- [2] PYO S, LEE J, BAE K, et al. Recent progress in flexible tactile sensors for human-interactive systems: From sensors to advanced applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(47): e2005902.
 - [3] LIU X, WEI Y, QIU Y. Advanced flexible skin-like pressure and strain sensors for human health monitoring[J]. *Micromachines (Basel)*, 2021, 12(6): 695.
 - [4] SERVATI A, ZOU L, WANG Z J, et al. Novel flexible wearable sensor materials and signal processing for vital sign and human activity monitoring[J]. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(7): 1622.
 - [5] GE G, HUANG W, SHAO J, et al. Recent progress of flexible and wearable strain sensors for human-motion monitoring[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(1): 15554-15564.
 - [6] SUN L, GUO J, CHEN H, et al. Tailoring materials with specific wettability in biomedical engineering[J]. *Advanced Science (Weinh)*, 2021, 8(19): e2100126.
 - [7] ZHANG W, WANG D, SUN Z, et al. Robust superhydrophobicity: Mechanisms and strategies[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(6): 4031-4061.
 - [8] ZHU H, HUANG Y, LOU X, et al. Bioinspired superwetting surfaces for biosensing[J]. *View*, 2020, 2(1): 1032640.
 - [9] FAN H, GUO Z. Bioinspired surfaces with wettability: Biomolecule adhesion behaviors[J]. *Biomaterials Science*, 2020, 8(6): 1502-1535.
 - [10] DUAN L, D'HOOGE D R, CARDON L. Recent progress on flexible and stretchable piezoresistive strain sensors: From design to application[J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 114: 100617.
 - [11] LIU L, JIAO Z, ZHANG J, et al. Bioinspired, superhydrophobic, and paper-based strain sensors for wearable and underwater applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 13(1): 1967-1978.
 - [12] WANG X, YU J, CUI Y, et al. Research progress of flexible wearable pressure sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 330: 112838.
 - [13] GAO J, WANG L, GUO Z, et al. Flexible, superhydrophobic, and electrically conductive polymer nanofiber composite for multifunctional sensing applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: 122778.
 - [14] SOURI H, BANERJEE H, JUSUFI A, et al. Wearable and stretchable strain sensors: Materials, sensing mechanisms, and applications[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, 2(8): 2000039.
 - [15] LIU Y F, LI Y Q, HUANG P, et al. On the evaluation of the sensitivity coefficient of strain sensors[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(12): 1800353.
 - [16] HAN F, LI M, YE H, et al. Materials, electrical performance, mechanisms, applications, and manufacturing approaches for flexible strain sensors[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2021, 11(5): 1220.
 - [17] LIM H R, KIM H S, QAZI R, et al. Advanced soft materials, sensor integrations, and applications of wearable flexible hybrid electronics in healthcare, energy, and environment[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(15): e1901924.
 - [18] CHU Z, JIAO W, HUANG Y, et al. Superhydrophobic gradient wrinkle strain sensor with ultra-high sensitivity and broad strain range for motion monitoring[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(15): 9634-9643.
 - [19] 邢任权, 闫静, 杨光, 等. 纤维/纱线柔性电阻式应变传感器的研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2022, 40(1): 1-7.
 - XING Renquan, YAN Jing, YANG Guang, et al. Research progress on flexible resistive strain sensors for fibers/yarns[J]. *Technical Textiles*, 2022, 40(1): 1-7(in Chinese).
 - [20] LI S, XU R, WANG J, et al. Ultra-stretchable, super-hydrophobic and high-conductive composite for wearable strain sensors with high sensitivity[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2022, 617: 372-382.
 - [21] AMJADI M, KYUNG K U, PARK I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1678-1698.
 - [22] GAO W C, WU W, CHEN C Z, et al. Design of a superhydrophobic strain sensor with a multilayer structure for human motion monitoring[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2022, 14(1): 1874-1884.
 - [23] 胡海龙, 马亚伦, 张帆, 等. 柔性纳米复合材料压阻式应变传感器的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(1): 1-22.
 - HU Hailong, MA Yalun, ZHANG Fan, et al. Advances in flexible nanocomposite piezoresistive strain sensors[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(1): 1-22(in Chinese).
 - [24] WANG L, HUANG X, WANG D, et al. Lotus leaf inspired superhydrophobic rubber composites for temperature stable piezoresistive sensors with ultrahigh compressibility and linear working range[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 127025.
 - [25] KHALID M A U, CHANG S H. Flexible strain sensors for wearable applications fabricated using novel functional nanocomposites: A review[J]. *Composite Structures*, 2022, 284: 115214.
 - [26] LI L, BAI Y, LI L, et al. A superhydrophobic smart coating for flexible and wearable sensing electronics[J]. *Advanced*

- [Materials](#), 2017, 29(43): 1702517.
- [27] DING Y R, XUE C H, FAN Q Q, et al. Fabrication of superhydrophobic conductive film at air/water interface for flexible and wearable sensors[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2021, 404: 126489.
- [28] 王志磊. 超亲水、超疏水表面的研究进展[J]. [当代化工](#), 2010, 39(5): 590-593.
- WANG Zhilei. Advances in research on superhydrophilic and superhydrophobic surfaces[J]. [Contemporary Chemical Industry](#), 2010, 39(5): 590-593(in Chinese).
- [29] ZHAO H, GAO W C, LI Q, et al. Recent advances in superhydrophobic polyurethane: Preparations and applications[J]. [Advances in Colloid and Interface Science](#), 2022, 303: 102644.
- [30] 张秋霞, 龚复学, 董楠楠. 有机氟化物等离子体处理制备超耐腐蚀聚氯乙烯及性能研究[J]. [塑料科技](#), 2021, 49(2): 44-47.
- ZHANG Qiuxia, GONG Fuxue, DONG Nannan. Preparation of super corrosion resistant polyvinyl chloride by organofluoride plasma treatment and performance study[J]. [Plastic Technology](#), 2021, 49(2): 44-47(in Chinese).
- [31] WANG Q, SUN G, TONG Q, et al. Fluorine-free superhydrophobic coatings from polydimethylsiloxane for sustainable chemical engineering: Preparation methods and applications[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2021, 426: 130829.
- [32] LIN L, CHOI Y, CHEN T, et al. Superhydrophobic and wearable TPU based nanofiber strain sensor with outstanding sensitivity for high-quality body motion monitoring[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2021, 419: 129513.
- [33] WANG P, WEI W, LI Z, et al. A superhydrophobic fluorinated PDMS composite as a wearable strain sensor with excellent mechanical robustness and liquid impalement resistance[J]. [Journal of Materials Chemistry A](#), 2020, 8(6): 3509-3516.
- [34] MA L, WANG J, HE J, et al. Biotemplated fabrication of a multifunctional superwetable shape memory film for wearable sensing electronics and smart liquid droplet manipulation[J]. [ACS Applied Materials and Interfaces](#), 2021, 13(26): 31285-31297.
- [35] LIU K, YANG C, SONG L, et al. Highly stretchable, superhydrophobic and wearable strain sensors based on the laser-irradiated PDMS/CNT composite[J]. [Composites Science and Technology](#), 2022, 218: 109148.
- [36] MA Y, TIAN P, BOUNMYXAY M, et al. Calcium carbonate@silica composite with superhydrophobic properties[J]. [Molecules](#), 2021, 26(23): 7180.
- [37] ALLIONE M, LIMONGI T, MARINI M, et al. Micro/nano-patterned superhydrophobic surfaces fabrication for biomolecules and biomaterials manipulation and analysis[J]. [Micromachines \(Basel\)](#), 2021, 12(12): 1501.
- [38] GAO J, LI B, HUANG X, et al. Electrically conductive and fluorine free superhydrophobic strain sensors based on SiO₂/graphene-decorated electrospun nanofibers for human motion monitoring[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2019, 373: 298-306.
- [39] REN Z, YANG J, QI D, et al. Flexible sensors based on organic-inorganic hybrid materials[J]. [Advanced Materials Technologies](#), 2021, 6(4): 2000889.
- [40] YAN T, WANG Z, PAN Z J. Flexible strain sensors fabricated using carbon-based nanomaterials: A review[J]. [Current Opinion in Solid State and Materials Science](#), 2018, 22(6): 213-228.
- [41] LIN L, WANG L, LI B, et al. Dual conductive network enabled superhydrophobic and high performance strain sensors with outstanding electro-thermal performance and extremely high gauge factors[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2020, 385: 123391.
- [42] 王军庆, 李龙, 钱祥宇. 基于导电聚合物柔性超级电容器电极材料的研究进展[J]. [合成纤维](#), 2020, 49(8): 51-56.
- WANG Junqin, LI Long, QIAN Xiangyu. Research progress of flexible supercapacitor electrode materials based on conducting polymers[J]. [Synthetic Fiber](#), 2020, 49(8): 51-56(in Chinese).
- [43] HE J, SHI F, LIU Q, et al. Wearable superhydrophobic PPy/MXene pressure sensor based on cotton fabric with superior sensitivity for human detection and information transmission[J]. [Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects](#), 2022, 642: 128676.
- [44] WEN N, ZHANG L, JIANG D, et al. Emerging flexible sensors based on nanomaterials: Recent status and applications[J]. [Journal of Materials Chemistry A](#), 2020, 8(48): 25499-25527.
- [45] LIU Y, WANG H, ZHAO W, et al. Flexible, stretchable sensors for wearable health monitoring: Sensing mechanisms, materials, fabrication strategies and features[J]. [Sensors \(Basel\)](#), 2018, 18(2): 645.
- [46] JOO H, JUNG D, SUNWOO S H, et al. Material design and fabrication strategies for stretchable metallic nanocomposites[J]. [Small](#), 2020, 16(11): e1906270.
- [47] PAVEL I A, LAKARD S, LAKARD B. Flexible sensors based on conductive polymers[J]. [Chemosensors](#), 2022, 10(3): 97.
- [48] CHENG M, ZHU G, ZHANG F, et al. A review of flexible force sensors for human health monitoring[J]. [Journal of Advanced Research](#), 2020, 26: 53-68.
- [49] 王鲁凯, 冯军宗, 李良军, 等. 疏水改性聚酰亚胺的研究进展[J]. [材料导报](#), 2018, 32(S2): 264-269.

- WANG Lukai, FENG Junzong, LI Liangjun, et al. Progress in the research of hydrophobically modified polyimide[J]. *Materials Guide*, 2018, 32(S2): 264-269(in Chinese).
- [50] 魏子尊. 聚氨酯复合材料在柔性传感器领域的应用与研究进展[J]. *塑料科技*, 2021, 49(8): 109-112.
- WEI Zizun. Application and research progress of polyurethane composites in the field of flexible sensors[J]. *Plastic Technology*, 2021, 49(8): 109-112(in Chinese).
- [51] 王志刚, 徐琴琴, 林润泽, 等. 基于银/石墨烯纳米复合材料的柔性压力传感器—材料制备和微纳结构构建[J]. *化工进展*, 2021, 40(6): 3300-3313.
- WANG Zhigang, XU Qinqin, LIN Runze, et al. Flexible pressure sensors based on silver/graphene nanocomposites—Material preparation and micro and nano structure construction[J]. *Chemical Progress*, 2021, 40(6): 3300-3313(in Chinese).
- [52] LIU Y, SHENG Z, HUANG J, et al. Moisture-resistant MXene-sodium alginate sponges with sustained superhydrophobicity for monitoring human activities[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 432: 134370.
- [53] HEO J S, HOSSAIN M F, KIM I. Challenges in design and fabrication of flexible/stretchable carbon- and textile-based wearable sensors for health monitoring: A critical review[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(14): 3927.
- [54] WANG P, SUN B, LIANG Y, et al. A stretchable and superrobust graphene superhydrophobic composite for electromechanical sensor application[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(22): 10404-10410.
- [55] LIU L X, CHEN W, ZHANG H B, et al. Flexible and multifunctional silk textiles with biomimetic leaf-like MXene/silver nanowire nanostructures for electromagnetic interference shielding, humidity monitoring, and self-derived hydrophobicity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(44): 1905197.
- [56] YANG H, LEOW W R, CHEN X. 3D printing of flexible electronic devices[J]. *Small Methods*, 2018, 2(1): 1700259.
- [57] LI H, SONG H, LONG M, et al. Mortise-tenon joint structured hydrophobic surface-functionalized barium titanate/polyvinylidene fluoride nanocomposites for printed self-powered wearable sensors[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(4): 2542-2555.
- [58] ZHAO J, ZHAO Y, PENG Y, et al. Review of femtosecond laser direct writing fiber-optic structures based on refractive index modification and their applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107473.
- [59] DINH LE T S, AN J, HUANG Y, et al. Ultrasensitive anti-interference voice recognition by bio-inspired skin-attachable self-cleaning acoustic sensors[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 13293-13303.
- [60] NIU H, ZHANG H, YUE W, et al. Micro-nano processing of active layers in flexible tactile sensors via template methods: A review[J]. *Small*, 2021, 17(41): e2100804.
- [61] 陈莉, 张艳琳, 刘皓, 等. 智能可穿戴产品用柔性传感器研究进展[J]. *针织工业*, 2021, 394(11): 81-85.
- CHEN Li, ZHANG Yanlin, LIU Hao, et al. Research progress on flexible sensors for smart wearable products[J]. *Knitting Industry*, 2021, 394(11): 81-85(in Chinese).
- [62] BAEK S, JANG H, KIM S Y, et al. Flexible piezocapacitive sensors based on wrinkled microstructures: Toward low-cost fabrication of pressure sensors over large areas[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(63): 39420-39426.
- [63] LIU K, YANG C, ZHANG S, et al. Laser direct writing of a multifunctional superhydrophobic composite strain sensor with excellent corrosion resistance and anti-icing/deicing performance[J]. *Materials & Design*, 2022, 218: 110689.
- [64] SAHOO B N, WOO J, ALGADI H, et al. Superhydrophobic, transparent, and stretchable 3D hierarchical wrinkled film-based sensors for wearable applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(10): 1900230.
- [65] 彭军, 李津, 李伟, 等. 柔性可拉伸应变传感器研究进展与应用[J]. *化工新型材料*, 2018, 46(11): 39-43.
- PENG Jun, LI Jin, LI Wei, et al. Research progress and application of flexible stretchable strain sensors[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(11): 39-43(in Chinese).
- [66] TAI H, DUAN Z, WANG Y, et al. Paper-based sensors for gas, humidity, and strain detections: A review[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 31037-31053.
- [67] LIAO X, ZHANG Z, LIAO Q, et al. Flexible and printable paper-based strain sensors for wearable and large-area green electronics[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(26): 13025-13032.
- [68] BU Y, SHEN T, YANG W, et al. Ultrasensitive strain sensor based on superhydrophobic microcracked conductive Ti₃C₂T MXene/paper for human-motion monitoring and E-skin[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(18): 1849-1857.
- [69] DING Y, XU T, ONYILAGHA O, et al. Recent advances in flexible and wearable pressure sensors based on piezoresistive 3D monolithic conductive sponges[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7): 6685-6704.
- [70] LIANG Z, ZHANG H, HUANG R, et al. Superhydrophobic and elastic 3D conductive sponge made from electrospun nanofibers and reduced graphene oxide for sweatproof wearable tactile pressure sensor[J]. *Polymer*, 2021, 230: 124025.
- [71] PEI X, WANG J, ZHANG J, et al. Facile preparation of superhydrophobic conductive textiles and the application of real-time sensor of joint motion sensor[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021,

- 628; 127257.
- [72] WANG L, LUO J, CHEN Y, et al. Fluorine-free superhydrophobic and conductive rubber composite with outstanding deicing performance for highly sensitive and stretchable strain sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(19): 17774-17783.
- [73] JIA S, DENG S, QING Y, et al. A coating-free superhydrophobic sensing material for full-range human motion and microliter droplet impact detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 128418.
- [74] XU Q, ZHANG W, DONG C, et al. Biomimetic self-cleaning surfaces: Synthesis, mechanism and applications[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2016, 13(122): 0300.
- [75] NI Y, HUANG J, LI S, et al. Robust superhydrophobic rGO/PPy/PDMS coatings on a polyurethane sponge for underwater pressure and temperature sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(44): 53271-53281.
- [76] DONG J, WANG D, PENG Y, et al. Ultra-stretchable and superhydrophobic textile-based bioelectrodes for robust self-cleaning and personal health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022, 97: 107160.
- [77] FALDE E J, YOHE S T, COLSON Y L, et al. Superhydrophobic materials for biomedical applications[J]. *Biomaterials*, 2016, 104: 87-103.
- [78] LIN J, CAI X, LIU Z, et al. Anti-liquid-interfering and bacterially antiadhesive strategy for highly stretchable and ultrasensitive strain sensors based on cassie-baxter wetting state[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(23): 2000398.
- [79] PARK C, KIM T, SAMUEL E P, et al. Superhydrophobic antibacterial wearable metallized fabric as supercapacitor, multifunctional sensors, and heater[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 506: 230142.
- [80] DAI Z, DING S, LEI M, et al. A superhydrophobic and anti-corrosion strain sensor for robust underwater applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(27): 15282-15293.
- [81] CHU Z, JIAO W, LI J, et al. A novel wrinkle-gradient strain sensor with anti-water interference and high sensing performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 421: 129873.
- [82] WANG L, XIA M, WANG D, et al. Bioinspired superhydrophobic and durable octadecanoic acid/Ag nanoparticle-decorated rubber composites for high-performance strain sensors[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(21): 7245-7254.
- [83] LI Q, LIU H, ZHANG S, et al. Superhydrophobic electrically conductive paper for ultrasensitive strain sensor with excellent anticorrosion and self-cleaning property[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(24): 21904-21914.
- [84] LIU H, LI Q, BU Y, et al. Stretchable conductive nonwoven fabrics with self-cleaning capability for tunable wearable strain sensor[J]. *Nano Energy*, 2019, 66: 104143.
- [85] ZHU T, NI Y, ZHAO K, et al. A breathable knitted fabric-based smart system with enhanced superhydrophobicity for drowning alarming[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(11): 18018-18026.
- [86] ZHAI H, XU L, LIU Z, et al. Twisted graphene fibre based breathable, wettable and washable anti-jamming strain sensor for underwater motion sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 439: 135502.
- [87] YANG Z, LI H, ZHANG S, et al. Superhydrophobic MXene@carboxylated carbon nanotubes/carboxymethyl chitosan aerogel for piezoresistive pressure sensor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130462.