

## • 可穿戴生理监测技术及其临床应用 •

## 电子皮肤在健康医疗及虚拟现实中的应用

赵光耀<sup>1</sup>, 姚宽明<sup>1</sup>, 刘一明<sup>1</sup>, 黄星灿<sup>1</sup>, 于欣格<sup>1,2,3</sup>

1. 香港城市大学 生物医学工程系 (香港 999077)

2. 香港心脑血管健康工程中心 (香港 999077)

3. 香港城市大学 深圳研究院 (广东深圳 518057)

**【摘要】** 电子皮肤由于其具有优异的传感特性、力学性能和生物相容性,近年来在健康监测、人机交互等领域展现出巨大的应用潜力。本文从电子皮肤材料选择和结构设计出发,综述了当前电子皮肤在医疗装备领域的应用现状,特别是不同功能可穿戴传感器的发展现状和虚拟现实下电子皮肤在医疗场景的应用。最后本文对电子皮肤在可穿戴器件和医疗装备领域所面临的挑战和应对策略展开讨论,旨在助力电子皮肤的进一步发展。

**【关键词】** 电子皮肤; 健康监测; 虚拟现实; 人机界面

## Application of electronic skin in healthcare and virtual reality

ZHAO Guangyao<sup>1</sup>, YAO Kuanming<sup>1</sup>, LIU Yiming<sup>1</sup>, HUANG Xingcan<sup>1</sup>, YU Xingge<sup>1,2,3</sup>

1. Department of Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, P. R. China

2. Hong Kong Center for Cerebra-Cardiovascular Health Engineering, Hong Kong, 999077, P. R. China

3. Shenzhen Research Institute, City University of Hong Kong, Shenzhen, Guangdong 518057, P. R. China

Corresponding author: YU Xingge, Email: xingeyu@cityu.edu.hk

**【Abstract】** Electronic skin has shown great application potential in many fields such as healthcare monitoring and human-machine interaction due to their excellent sensing performance, mechanical properties and biocompatibility. This paper starts from the materials selection and structures design of electronic skin, and summarizes their different applications in the field of healthcare equipment, especially current development status of wearable sensors with different functions, as well as the application of electronic skin in virtual reality. The challenges of electronic skin in the field of wearable devices and healthcare, as well as our corresponding strategies, are discussed to provide a reference for further advancing the research of electronic skin.

**【Key words】** Electronic skin; Healthcare monitoring; Virtual reality; Human-machine interaction

## 0 引言

近年来,随着工业化、信息化、集成化的快速发展,可穿戴器件由于其具有尺寸小、质量轻、可实时检测等优势受到了学术界和工业界的广泛关注。皮肤作为人体面积最大的器官,是人体感知温度、压力等外部刺激的桥梁,也包含大量反映人体健康状况的生理信息。根据皮肤的功能特点,电子皮肤(electronic skin)因其具有优异的生物相容性、传感特性和可穿戴舒适性,在健康监测相关的医疗装备和人机交互领域得到广泛研究<sup>[1-3]</sup>。

本文综述了电子皮肤及其相关技术的最新研

究进展,并探讨了其在医疗装备和虚拟现实领域的发展现状。首先,本文介绍了电子皮肤在材料选择和结构设计方面的最新进展,然后综述了基于电子皮肤技术在健康监测领域中的应用,特别是在虚拟现实场景下的研究进展。最后对电子皮肤在生物医学领域所面临的挑战和应对策略展开讨论,突出其在医疗装备和闭环人机交互中的应用潜力,以期可为可穿戴传感器用于健康实时监测和临床护理等领域的研究提供科学依据。

## 1 电子皮肤技术的材料和结构要求

人体皮肤是柔性的,同样,电子皮肤也需要一

DOI: 10.7507/1001-5515.202210035

基金项目: 香港城市大学资助项目(9667221, 9680322); 香港特别行政区研究资助局资助项目(21210820, 11213721, 111215722); 优秀青年科学基金(港澳)资助项目(62122002)

通信作者: 于欣格, Email: xingeyu@cityu.edu.hk



定的柔性和拉伸性,以保证其在使用过程中的稳定性。而长期的健康监测也对其生物相容性、可降解性和穿戴舒适性等提出了要求。通过对电子皮肤的材料和结构进行设计,可以大大提升电子皮肤器件工作的可拉伸性、生物相容性和可穿戴舒适性,近年来已有诸多工作在该方面取得进展。

### 1.1 电子皮肤可拉伸性的研究进展

电子皮肤器件经常会受到各种机械应力的刺激,如拉伸、压缩、扭转等。由于其在工作时需要与人体表面贴合,因此必须具备柔性和可拉伸性。目前实现电子皮肤可拉伸的方案主要分为两大类:一类是通过材料研发,利用可拉伸的单一或者复合材料来制备电子皮肤;另一类则是通过设计特殊的结构来吸收外力作用下的应变,保证其在拉伸过程中不会断裂。

**1.1.1 材料选择对于电子皮肤可拉伸性影响** 高分子聚合物:本征可拉伸的有机高分子聚合物因其具有低成本、力学特性接近人体皮肤等优势而被广泛应用于电子皮肤的制备。聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET)、聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS)、聚氨酯 (polyurethane, PU)、聚酰亚胺 (polyimide, PI) 等由于其具有优异的机械柔性、绝缘性和耐腐蚀性常被用作基底材料。其中,PDMS 拉伸性好、透明度高、生物毒性低,是电子皮肤常见的基材和封装材料<sup>[4]</sup>,并且可以通过等离子处理<sup>[5]</sup>等方式进行表面改性。导电高分子材料由于其兼具导电和柔性的优势,近年来也受到了广泛关注,如聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸 [poly(3,4-ethoxyethylene dioxy thiophene): polystyrene sulfonic acid, PEDOT:PSS)、聚吡咯、聚噻吩,离子水凝胶<sup>[6]</sup>等。

**液态金属:**液态金属具有优异的导电性和流动性,即使在拉伸下的状态下,仍然可以实现良好的导电连接。常见的液态金属有镓(Ga)、汞、铷、铯等,其中镓与铟(In)、锡(Sn)等元素形成的合金,如镓铟合金(GaIn)<sup>[7]</sup>、镓铟锡合金(GaInSn)<sup>[8]</sup>等具有更优的导电率及更低的毒性,在柔性电子和医疗领域得到了广泛的应用。

**纳米复合材料:**随着纳米合成技术的不断发展,纳米复合材料的研发及应用愈加广泛,与传统本征可拉伸导体不同,这类纳米复合材料通常需要在弹性体中混合导电填料,如石墨烯<sup>[4,9]</sup>、碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)、金属纳米线、纳米颗粒等,形成渗流网络来为复合材料提供导电通路。

**1.1.2 结构设计对于电子皮肤可拉伸性影响** 泡沫

结构:多孔的泡沫材料能通过增大材料的表面粗糙度和接触面积,来提升材料的传感性能,目前主要通过模板法制备。Wu等<sup>[10]</sup>基于盐模板法调整氯化钠(NaCl)与PDMS的混合比例,得到了具有不同孔隙度的PDMS泡沫;与纯PDMS薄膜相比,PDMS泡沫具有更加粗糙的表面和更加复杂的三维(three dimensional, 3D)交联结构,显著增加了该材料的传感性能,并且在弯曲、折叠、拉伸、扭转条件下都具有稳定的传感性能,如图1a所示。

**波浪结构:**波浪及褶皱结构有助于材料在拉伸过程中的应力释放。通常,要制备波浪及褶皱结构,首先需要对平面基底材料进行预拉伸,再对预拉伸的基底进行表面修饰,最后释放预应力,便会得到负载了活性材料的波浪或褶皱结构<sup>[11]</sup>。Gao等<sup>[5]</sup>通过在正己烷处理后的预拉伸PDMS基底上喷涂银纳米线,得到了具有优异电学、光学和力学性能的柔性透明电极,透明度大于78%,方阻为18 Ω/sq,可以承受上千次弯曲、按压和拉伸,如图1b所示。

**蛇形结构:**蛇形结构作为柔性电子中常用的一种结构,可以显著提升材料的弹性和可拉伸性<sup>[12]</sup>。He等<sup>[13]</sup>受蹦床力学设计的启发,开发了一种轻薄柔软、可拉伸的电子皮肤,通过砂纸进一步改善材料的微结构,得到的摩擦纳米发电机在形变超过35%的条件下仍然具有稳定的传感性能,如图1c所示。Liu等<sup>[14]</sup>利用蛇形结构的线路连接圆盘电极,得到的电子器件在形变达到30%、76°扭转和5 mm的弯曲状态下都具有稳定的性能,可以很好地适配人在现实生活中的运动情况,如图1d所示。另外,Liu等<sup>[15]</sup>采用分形曲线设计,大大提升了器件的拉伸能力。通过有限元分析,该器件在约18%的拉伸、180°的弯曲和90°的扭曲状态下都十分稳定,足以满足日常运动下的变形要求,可以灵敏地监测不同运动状态下的呼吸频率/深度,如图1e所示。Liu等<sup>[16]</sup>利用3D微打印技术得到了一种3D蛇形结构,覆盖金属涂层后用于可拉伸的导电网络,使用PDMS进行封装,该电子皮肤器件可以实现13.8%的拉伸、160°弯曲和24°的扭转。蛇形结构不仅对于材料的拉伸性能至关重要,其结构设计对其性能输出也具有重要的影响。如图1f所示,Yao等<sup>[17]</sup>首次系统评估了不同有效工作面积的蛇形结构电极与摩擦纳米发电性能输出的关系,通过有限元分析,在有效面积为51.34%时,电极的输出性能最佳,贴附于人体皮肤上可以实时将轻触、戳、拍打的动作转化为电信号,且在拉伸的条件下

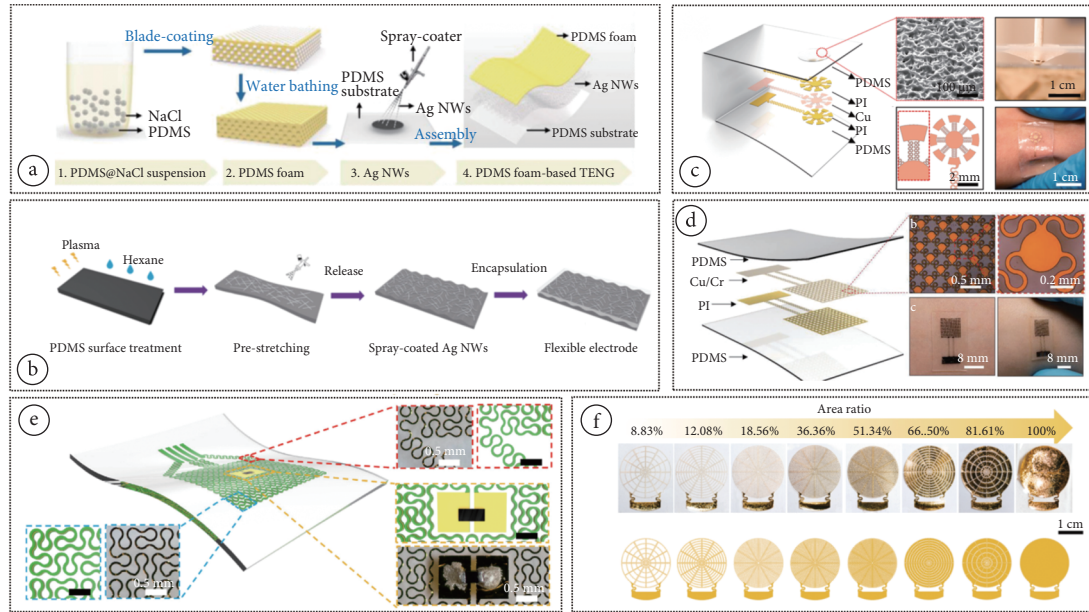


图 1 不同结构的电子皮肤设计示意图 a. 泡沫结构 PDMS 材料的制备及结构示意图<sup>[10]</sup>; b. 基于褶皱结构材料的制备及结构示意图<sup>[5]</sup>; c. 受蹦床设计启发得到的蛇形结构<sup>[13]</sup>; d. 蛇形线路连接圆盘结构<sup>[14]</sup>; e. 分形曲线结构<sup>[15]</sup>; f. 基于蛇形结构的电极有效工作面积与性能输出的关系研究<sup>[17]</sup>

Fig.1 Schematic design of electronic skins with different structures a. Preparation and structure of PDMS materials with foam structure. Reprinted with permission from ref. [10] (Wu et al. 2021). Copyright 2021 Elsevier; b. Preparation and structure based on folded structural materials. Reprinted with permission from ref. [5] (Gao et al. 2020). Copyright 2020 Royal society of chemistry. c. Serpentine structure inspired by trampoline design. Reprinted with permission from ref. [13] (He et al. 2021). Copyright 2021 Elsevier; d. Disk structure with serpentine circuit connection. Reprinted with permission from ref. [14] (Liu et al. 2019). Copyright 2019 Wiley; e. Fractal curve structure. Reprinted with permission from ref. [15] (Liu et al. 2020). Copyright 2020 Elsevier; f. Study on the relationship between effective working area and performance output of electrode based on serpentine structure. Reprinted with permission from ref. [17] (Yao et al. 2020). Copyright 2020 Elsevier.

仍具有较高性能输出。

### 1.2 电子皮肤生物相容性和可降解性的研究进展

生物相容性及可降解性为电子皮肤用于可穿戴电子器件提供重要保障。电子皮肤大多贴附于皮肤等生物界面，因而需要其具有优异的生物相容性，以防产生免疫反应。同时，如果能够将用完的电子皮肤进行无害降解，便可以从源头上大大减少电子垃圾的产生和环境污染。近期，Huang 等<sup>[18]</sup>制备了一种激光诱导石墨烯和金纳米颗粒的复合电极，负载酶后得到了高性能的瞬态燃料电池，可以产生 0.77 V 的开路电压和高达 483.1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的功率密度，在体内外都具有良好的生物相容性和供电性能，并且在人体内外都可以实现降解，具有灵敏度高、安全、无污染的优势，有助于开发更加安全、环保的医疗装备。电刺激疗法作为一种非药物治疗方式，目前已用于促进细胞、组织的增殖和功能发育。Huang 等<sup>[19]</sup>提出了一种小型化、可植入、可降解的微针电子平台，将电刺激和药物结合，可以将药物（如阿司匹林、布洛芬等）有效地输送到深层组织，减少炎症发生，促进肌肉组织再生。通过调控材料种类，该微针具有良好的生物可降解

性，当浸泡在 37 °C 的磷酸缓冲盐溶液（phosphate buffered saline, PBS）中，电子皮肤器件在 1 个月内溶解，7 周后剩余残留物几乎全部消失。对该微针表面进行加工修饰，还可以进一步调整器件的使用寿命。该方案为植入式可穿戴器件用于电刺激和给药综合疗法提供了新的解决思路。

### 1.3 电子皮肤可穿戴舒适性的研究进展

电子皮肤通常要与人体皮肤紧密接触或直接贴附于人体，因此，轻薄透气、穿戴舒适也是电子皮肤器件未来发展需要具备的重要特性。Liu 等<sup>[20]</sup>通过在纤维上涂覆石墨烯得到了可集成于服装的摩擦纳米发电器件，具有出色的柔性和透气性，可以承受超过 1 000 次的弯曲、拉伸和扭转，并且在这些变形下仍然能够保持稳定的性能输出，在自供电传感器、能源收集、人机界面等方面具有较大的应用潜力。Huang 等<sup>[21]</sup>制备了一种可集成于服装的汗液激活电池，可以轻易地与日常运动装备结合，如头带、肘垫和膝垫等，实现了在运动时对于汗液中钠离子 ( $\text{Na}^+$ ) 浓度、pH 值和皮肤阻抗的实时监测。为提升可穿戴舒适性，另一种策略是将电子皮肤尽可能做薄，来实现与皮肤的紧密贴合，如

电子皮肤纹身。Wong 等<sup>[22]</sup>提出了一种基于压阻效应的超薄电子皮肤纹身,可以在不影响用户正常运动的情况下与皮肤紧密接触,同时对人体脉搏和运动状态进行监测。基于摩擦纳米发电机的电子皮肤纹身,可随意定制形状,力学性能优异,收集的电信号不仅可以用来为其他电子器件供电,并且可以作为人机界面控制系统的信号源,实现了对模型车的远程遥控<sup>[23]</sup>。

## 2 电子皮肤技术在医疗装备的应用

随着更多的新材料和新结构的研发,多功能电子皮肤器件在医疗装备领域得到广泛应用,用以监测人体的物理信号(如温度、压力、应变等)和化学信号(葡萄糖、乳酸等)变化。本节主要对本团队在电子皮肤领域的应用进行总结,包括基于电子皮肤的自供能传感器、人体动作识别及皮肤力学检测、动态热监测、汗液激活电池及汗液成分检测等多个方面进行介绍。

### 2.1 电子皮肤在自供能传感器的应用

随着电子皮肤功能化、集成化快速发展,充足、稳定的能量供给对于驱动电子皮肤设备可靠、持续的运行至关重要。然而当前电子皮肤能源供应仍受制约,比如当电池过热时,可能会发生爆炸,对人体造成伤害;或者如果体积较厚、刚度较大,则不利于电子皮肤集成,难以在发生弯曲、扭转等机械变形下的皮肤表面稳定工作<sup>[1]</sup>。自供能电子皮肤的出现,为解决该问题提供了新的方案。当前,自供能电子皮肤的工作原理主要基于摩擦纳米发电机、压电纳米发电机、汗液激活电池和生物燃料电池,而介绍相关机制及应用的综述已经有很多<sup>[1, 3]</sup>,本文主要针对本团队近年来在此领域的研究工作介绍。

Liu 等<sup>[20]</sup>通过在柔性纤维上涂覆石墨烯得到一种单电极模式的摩擦纳米发电型的电子皮肤,具有很好的柔韧性、透气性和稳定性。该器件开路电压为 213.75 V,短路电流为 3.11  $\mu\text{A}$ ,在恒定频率和应力分别为 3 Hz 和 5.6 kPa 的条件下,该器件可以承受超过 1 000 次的弯曲。通过混合石墨烯、锆钛酸铅(lead zirconate titanate, PZT)和 PDMS 得到具有优异性能的压电橡胶<sup>[4]</sup>,在具有优异机械性能的同时短路电流达到 13.23  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

有关基于生物燃料电池与汗液激活电池的电子皮肤器件在本文 2.4 小节中进行详细介绍。

自供能电子皮肤的出现,为电子皮肤的集成化、功能化应用的能源供给提供了解决方案。其轻

薄柔软,不仅可以收集人体在不同运动状态、手势动作下的能量,而且通过对不同状态下的电信号进行分析,可以实现对人体常见生理信息如脉搏的监测,有助于人机界面的搭建和医疗装备的发展。

### 2.2 机械信息与力学性能检测

电子皮肤设备的基本功能之一是对机械信息的感知。人体运动和皮肤力学信息可以通过压阻式、压电式或摩擦电式传感器获得。目前,商用机械传感解决方案如拉力测试仪和超声波探头体积庞大、结构复杂,在日常生活中使用不方便,急需一种灵活、轻便的替代品。为了实现对人体运动和触觉信息的感知,Liu 等<sup>[24]</sup>通过丝网印刷得到 PZT 弹性体阵列,提出了一种高通量、可拉伸的压电式电子皮肤。这种电子皮肤可以集成在身体上进行动作识别,通过感知关节张力,并编码成相应的动作指令,从而实现机械手的实时手势动作跟随,这种阵列式的电子皮肤具有较高的空间分辨率(集成器件的数量可达 25 个/ $\text{cm}^2$ )和超高的灵敏度(180  $\mu\text{V}/\text{kPa}$ ),可以获取手指触摸等细腻的触觉信息,如图 2a 所示。之后将传感器与致动器进行集成构建闭环人机交互系统,在手势识别的同时,将机器手上的触感反馈到人手上,可以实现对如气球和不同重物的精准抓握,在人机交互方面具有巨大的应用潜力,如图 2b 所示<sup>[25]</sup>。Wu 等<sup>[10]</sup>通过模板法制备的泡沫状 PDMS 薄膜,用于摩擦纳米发电机型的电子皮肤,其开路电压可达 78.7 V,功率密度达 33.75  $\text{W}/\text{m}^2$ ,将该传感器集成于手套上可以研究抓握不同物体时手掌不同部位的施力大小,如图 2c 所示。Song 等<sup>[26]</sup>将应变传感器和致动器结合在一起,开发了一种用于快速表征皮肤和深层组织生物力学的小型机电系统。通过致动器振动引起的皮肤及深层组织的变形,检测相同频率下传感器电阻的波动来表征应变,获得了毫米级皮肤弹性模量的识别及其他软组织力学性能的检测,在运动监测和康复治疗方面有很好的应用前景,如图 2d 所示。

### 2.3 动态热监测

人体动态热监测对于感知人体呼吸、血液流动等健康状态十分重要。Liu 等<sup>[15]</sup>提出了一种柔软轻便、可拉伸的热敏呼吸传感器。结合分形结构、热敏电阻和超薄的柔性封装技术,该设备在较大的机械变形下仍然可与皮肤紧密贴合,实时监测运动、小憩、长时间休息(如午睡)时的呼吸频率和睡眠深度,在未来的呼吸诊断分析和呼吸状态识别中具有应用潜力。此外, Park 等<sup>[27]</sup>开发了一种超薄、无创、柔软的热传感电子皮肤,通过密集的热传感

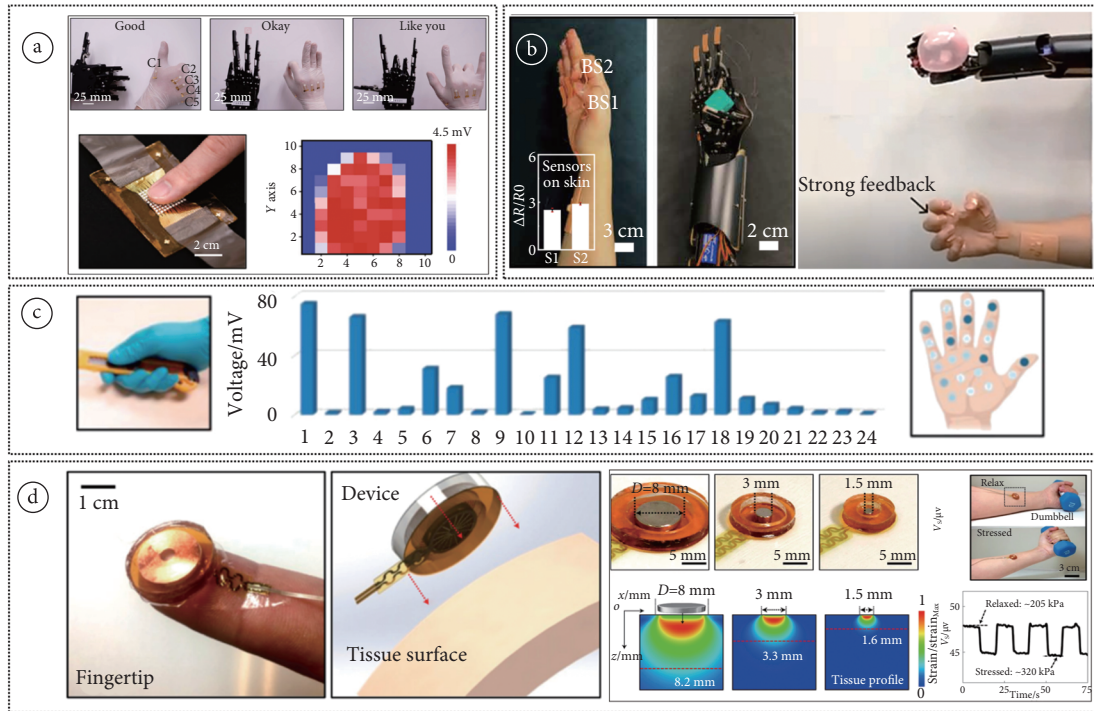


图 2 电子皮肤用于动作识别和皮肤力学检测 a. 高通量和可伸缩的电子皮肤用于动作识别<sup>[24]</sup>; b. 电子皮肤用于物体的抓取及触觉反馈<sup>[25]</sup>; c. 电子皮肤用于检测手部施力情况的检测<sup>[10]</sup>; d. 电子皮肤用于快速表征皮肤和深层组织生物力学的研究<sup>[26]</sup>

**Fig.2 Electronic skin for action recognition and skin mechanics detection** a. High-throughput and scalable electronic skin for action recognition. Reprinted with permission from ref.[24](Liu et al. 2020). Copyright under the license of CC BY 4.0; b. Electronic skin for object grasping and tactile feedback. Reprinted with permission from ref.[25](Liu et al. 2022). Copyright under the license of CC BY-NC 4.0; c. Electronic skin used to detect hand force. Reprinted with permission from ref.[10](Wu et al. 2021). Copyright 2021 Elsevier; d. Studies on the rapid characterization of skin and deep tissue biomechanics using electronic skin. Reprinted with permission from ref.[26] (Song et al. 2021). Copyright 2021 Springer Nature

器阵列来监测血管的热特性；在体表试验中，可以准确区分裸露的表皮和血管，并可以同时检测血液流动方向，借助蓝牙通信实现无线高通量传感，无需特殊的成像设备即可独立感知血管血液流动力学信息，减少了昂贵、大型的医学成像设备的使用，为下一代便携式即时诊断提供了新的解决方案。

### 2.4 汗液激活电池及人体健康监测

汗液，作为人体健康状况识别生理标志物的重要载体之一，在可穿戴传感器中备受关注，汗液的持续监测有利于了解人体实时的健康情况，特别是人体在运动时的健康状况。但目前可对汗液进行分析的医疗传感设备仍需要外部供电设备，大多为刚性且体积较大，在运动场景下使用很不方便。比色法也是一种常见汗液检测的策略<sup>[28]</sup>，但数据难以连续记录以及定量分析。

为搭建便携式可穿戴汗液传感平台，本团队开发了一系列汗液激活电池和生物燃料电池，通过与功能电子模块相集成，用于智能感知汗液和人体生理指标的实时监测。如图 3a 所示，Liu 等<sup>[29]</sup>基于锌 (Zn) 和硫酸铜 (CuSO<sub>4</sub>) 的化学反应提出了一种

柔性的、可拉伸的 Zn/CuSO<sub>4</sub> 基汗液激活电池，具有较高电池容量和功率密度，足以为 120 个 LED 灯供电超过 5 h，并且仅需少量的汗水 (0.04 mL/cm<sup>2</sup>) 便可以快速激活电池。一般来说，串联 4 个汗液激活电池即可直接为自主开发的集成电子设备供电，通过蓝牙实现无线数据传输，实时监测汗液中 Na<sup>+</sup>、葡萄糖浓度和 pH 值变化。Liu 等<sup>[30]</sup>通过在泡沫镍上涂覆石墨烯得到超薄柔软的汗液激活电池，泡沫镍有助于增强气体扩散，创可贴般大小的器件可产生 74.4 mAh 的能量容量和 16.3 mW/cm<sup>2</sup> 的功率密度，串联汗液激活电池即可为可穿戴电子设备供电，实现了体温、脉搏和血氧饱和度的实时监测，如图 3b 所示。为缩小设备尺寸以更好地贴合皮肤，Huang 等<sup>[21]</sup>以透气胶带为基底制备了一种超薄的镁 (Mg)/氧 (O<sub>2</sub>) 汗液激活电池，并将其贴合于运动服中，重复弯曲后仍保持稳定输出，可为无线微电子系统连续供电 3 h，来监测汗液中 Na<sup>+</sup>浓度、pH 值和皮肤阻抗变化，如图 3c 所示。提升汗液的收集效率，同样可以有效提升汗液激活电池的性能，Wu 等<sup>[31]</sup>基于仿生微流道的设计来促进

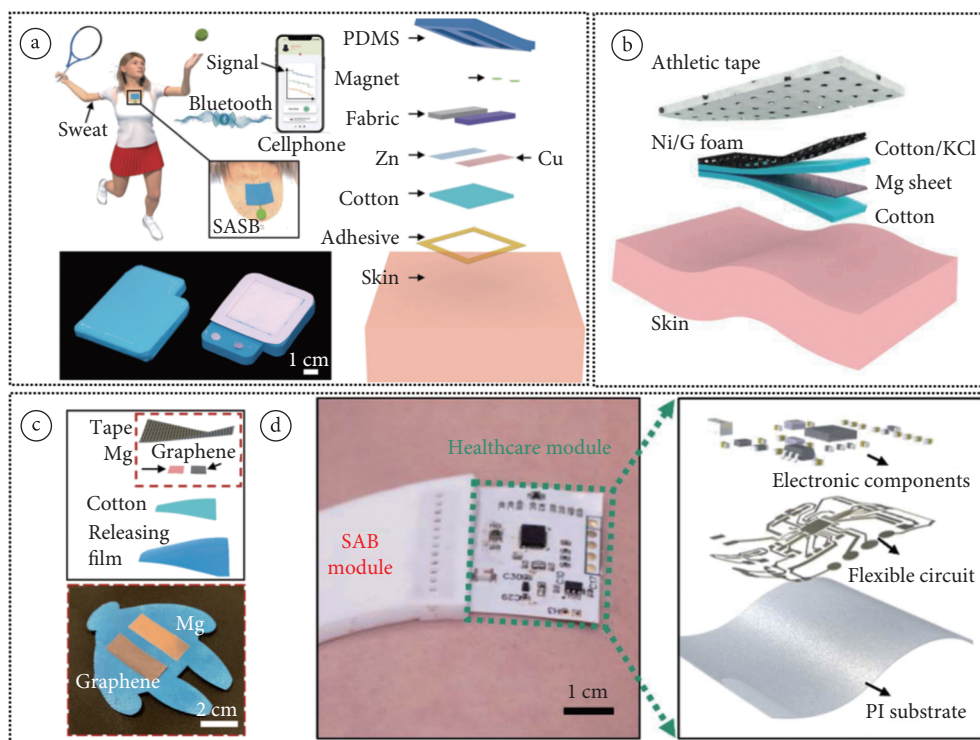


图3 电子皮肤用于汗液激活电池及人体健康监测 a. Zn/CuSO<sub>4</sub>基汗液激活电池<sup>[29]</sup>; b. 基于绷带的汗液激活电池<sup>[30]</sup>; c. Mg/O<sub>2</sub>基汗液激活电池<sup>[21]</sup>; d. 基于仿生微流道的Ag<sub>2</sub>O/Mg汗液激活电池<sup>[31]</sup>

**Fig.3 Electronic skin for sweat activation battery and human health monitoring** a. Zn/ CuSO<sub>4</sub>-based sweat activated battery. Reprinted with permission from ref. [29] (Liu et al. 2022). Copyright under the license of CC BY 4.0; b. Bandage-based sweat activated battery. Reprinted with permission from ref. [30] (Liu et al. 2022). Copyright 2022 Elsevier; c. Mg/O<sub>2</sub>-based sweat activated battery. Reprinted with permission from ref. [21] (Huang et al. 2022). Copyright 2022 Springer Nature; d. Ag<sub>2</sub>O/Mg sweat activated battery based on biomimetic microchannel. Reprinted with permission from ref. [31] (Wu et al. 2022). Copyright 2022 Royal society of chemistry

表1 汗液激活电池的性能及应用

Tab.1 Performance and application of sweat activated battery

| 电极                   | 功率密度/(mW·cm <sup>-2</sup> ) | 放电容量/mAh | 应用                          | 参考文献 |
|----------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|------|
| Mg/O <sub>2</sub>    | 3.17                        | 14.33    | Na <sup>+</sup> , pH, 皮肤阻抗  | [21] |
| Mg/O <sub>2</sub>    | 16.3                        | 74.4     | 体表温度、脉搏和血氧饱和度               | [30] |
| Zn/CuSO <sub>4</sub> | 7.46                        | 42.5     | Na <sup>+</sup> , 葡萄糖浓度和pH值 | [29] |
| Mg/Ag <sub>2</sub> O | 122                         | 8.33     | 心率、血氧饱和度和体温                 | [31] |

汗液快速收集 (114 μL/s), 与 Mg/氧化银 (Ag<sub>2</sub>O) 汗液激活电池集成, 可以实现高性能输出 (8.33 mAh 的放电容量, 122 mW/cm<sup>2</sup> 的功率密度), 与功能电子模块集成后可以实现对于人体心率、血氧饱和度和体温的实时测量, 如图 3d 所示。如表 1 所示, 本文统计了近年来汗液激活电池在电极材料、输出性能及在生物传感领域的应用现状, 展现出其在可穿戴传感器供能方面具备广阔的应用潜力。

Huang 等<sup>[32]</sup> 结合微流道系统与生物燃料电池, 通过微流道对汗液进行收集, 生物燃料电池作为供能及传感模块, 实现了自供能汗液传感器。乳酸检测灵敏度为 2.48 mV/mmol (R<sup>2</sup> = 0.98), 葡萄糖检测灵敏度为 0.11 mV/μmol (R<sup>2</sup> = 0.98), 在人体不

同部位 (额头、胸部和背部) 均可以实现对于人体乳酸及葡萄糖浓度变化的实时测量。

### 3 基于电子皮肤技术的闭环人机交互/界面在医学中的应用

随着各类传感器和自供能器件的研发, 集成化成为研究的重点方向, 并且也可减少不必要的接触。基于电子皮肤的人机界面 (human-machine interaction, HMI) 可以帮助人们实现远程感知事物, 通过与一系列致动器结合来提供触觉反馈, 可以实现闭环人机交互体验, 帮助用户在视频通话、假肢控制、医患护理等场景中感知触觉信息。

2019 年, Yu 等<sup>[33]</sup> 首次开发了一种基于无线触

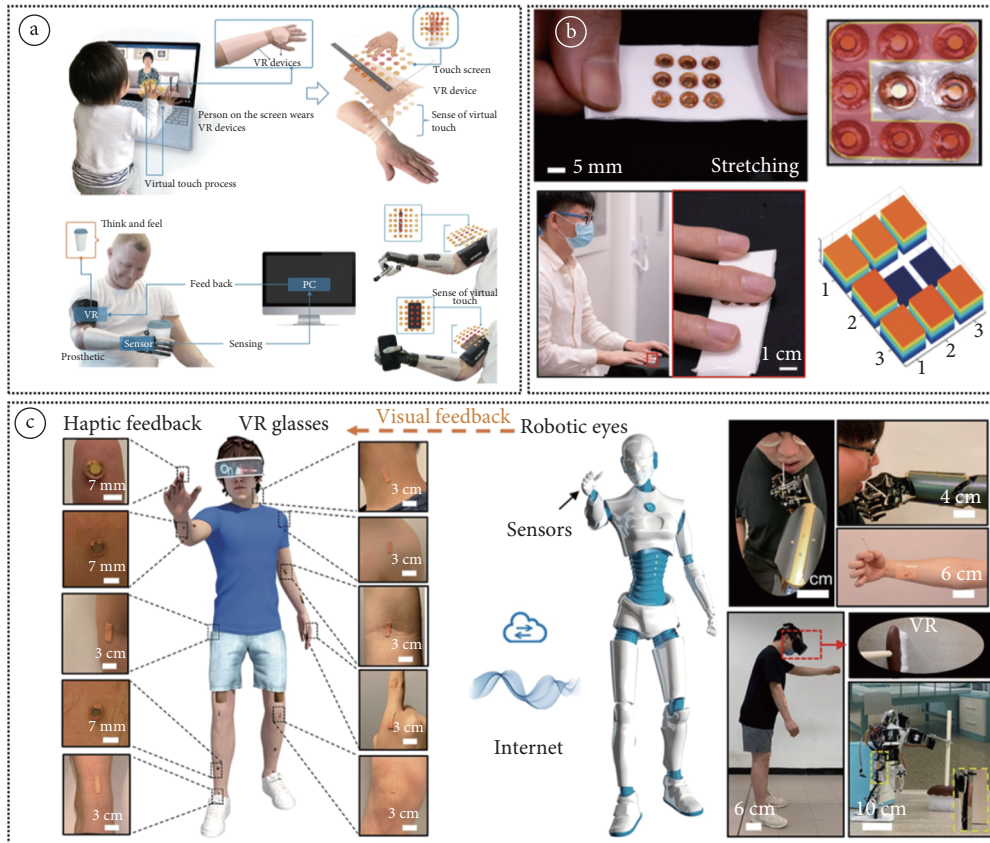


图 4 基于电子皮肤技术的虚拟现实场景在医学中的应用 a. 电子皮肤用于虚拟现实及假肢触觉反馈<sup>[33]</sup>; b. 电子皮肤器件用于盲文识别<sup>[34]</sup>; c. 闭环人机界面系统用于非接触式生物样本采集、传染病患者护理<sup>[25]</sup>

**Fig.4 Application of virtual reality scenario based on electronic skin technology in medicine** a. Electronic skin for virtual reality and prosthetic tactile feedback. Reprinted with permission from ref.[33](Yu et al. 2019). Copyright 2019 Springer Nature; b. Electronic skin for braille recognition. Reprinted with permission from ref.[34](Li et al. 2021). Copyright 2021 Springer Nature; c. Closed-loop human-machine interface system used for non-contact biological sample collection and the care of infectious disease patient. Reprinted with permission from ref.[25](Liu et al. 2022). Copyright under the license of CC BY-NC 4.0

觉接口的电子皮肤，通过射频以无线方式传递信息并供电，通过一系列电磁致动器向皮肤提供触觉反馈信息，只需 1.75 mW 的功率便可使致动器诱发触感，用户也可通过假肢帮助患者感知真实物体形状以及抓取力量的大小如图 4a 所示。之后，Li 等<sup>[34]</sup>进一步对致动器尺寸进行优化，最终达到毫米级别，实现了在 2×2 cm<sup>2</sup> 范围内 3×3 阵列的制备，使得触觉反馈具有更高的分辨率，特别是在盲文识别的方面具有很大的应用潜力，如图 4b 所示。另一方面，Huang 等<sup>[35]</sup>利用致动器作为汗液监测过程中的安全预警模块，当人体生理状态异常时可以提供振动刺激，对用户做出提醒。Song 等<sup>[26]</sup>利用致动器与应变片相结合得到一种简单的微型机电系统，可以紧密贴合皮肤并对皮肤及其他组织的杨氏模量进行快速测量，测量深度可达 8 mm，这一器件有助于快速确定如牛皮癣等相关皮肤病的病变位置。人机界面的实现也为呼吸道疾病的治疗与防护提供了新的解决方案。Liu 等<sup>[25]</sup>提出了一种

基于电子皮肤的闭环人机界面系统，通过对整个身体的动作进行捕捉及触觉反馈，结合视觉虚拟现实，在非接触式生物样本采集、传染病患者护理等方面都具备可行性，如图 4c 所示。

心血管疾病 (cardiovascular diseases, CVDs) 是一种致命的慢性疾病，心电图 (electrocardiogram, ECG) 监测可能是早期诊断的一个突出解决方案，然而目前市面上 ECG 系统相对比较笨重，难以实现连续测量。基于此，Yiu 等<sup>[36]</sup>通过将 ECG 数据采集系统集成于电子皮肤上，该系统配备的特制水凝胶具有优异的粘性 (约 9.9 kPa) 和导电性 (约 6.5 kΩ)，实现了 ECG 信号的持续监测 (6.5 h) 和无线传输 (20.9 m)，可以满足大部分的日常应用；当其致动器相连，可以实现及时的 ECG 信号预警，在改善心血管疾病人群的生活质量方面具有很大的潜力。

#### 4 未来展望

近年来，随着材料合成技术的不断发展、信息

技术的不断进步,不同新材料(如PDMS、PZT、石墨烯、碳纳米管等)和各种新技术(如3D打印、光刻等)不断涌现,从而高性能的物理、化学传感器的设计得以实现。基于压电、摩擦电、生物燃料电池和汗液激活电池的自供能电子皮肤进一步提升了电子皮肤在可穿戴设备和医疗装备中的续航能力及应用潜力。尽管通过材料合成、结构设计等手段,电子皮肤在拉伸性、稳定性、生物相容性、可降解性以及舒适性等性能改良方面已经取得较大进展,但距离实际应用还有一定距离,仍需进一步开发低成本、多功能、高性能的各类电子皮肤,相应的研究方向总结如下:

### (1) 功能集成化研究

当前传感器的功能相对单一,为增强电子皮肤的应用潜力,一方面需要将更多的传感模块集成,实现对于多物理、化学信号的综合监测,更有利于疾病的综合分析,以提升健康监测的准确性。另一方面随着人机交互的快速发展,既应该有信号的输出,也应该有信号的反馈。反馈模块的集成,有助于实现健康状态的及时预警,更有助于提升患者的用户体验,在医疗健康方面具有一定的应用前景。

### (2) 芯片优化、算法提升

随着电子皮肤多功能研究,更多的数据需要及时处理反馈,这就需要更强有力的芯片、算法,以实现数据快速的采集、分析,进一步提升检测效率和准确性。

### (3) 柔性电源开发

供能是电子皮肤的关键问题,足够的能量、与电子皮肤匹配的结构,都是电子皮肤正常工作的前提。虽然当前已经有大量的柔性电池及自供能电子皮肤研究报道,如何进一步在保证安全性的前提下提升其功率密度和能量密度,仍然是一个亟待改善的关键问题。

## 5 总结

随着第五代移动通信(5th generation mobile communication technology, 5G)技术的快速发展,万物互联不再是梦想,基于电子皮肤的传感器件也将迎来快速发展的机遇,随着微型化、集成化、信息化的不断推进,医疗检测和信息技术的快速发展,低成本、多功能的电子皮肤器件将被持续开发,也将在医疗健康、虚拟现实增强等领域得到更多的应用。

### 重要声明

利益冲突声明:本文全体作者均声明不存在利益冲突。

作者贡献声明:赵光耀总体设计并撰写论文、定稿;姚宽明提出研究思路及论文起草;刘一明和黄星灿负责论文最终版本修改及论文思路分析,于欣格参与论文思路分析,论文修改指导与审核。

### 参考文献

- 1 Wu M, Yao K, Li D, *et al.* Self-powered skin electronics for energy harvesting and healthcare monitoring. *Materials Today Energy*, 2021, 21: 100786.
- 2 Huang Y, Yao K, Li J, *et al.* Recent advances in multi-mode haptic feedback technologies towards wearable interfaces. *Materials Today Physics*, 2022, 22: 100602.
- 3 Liu Y, Wang L, Zhao L, *et al.* Recent progress on flexible nanogenerators toward self-powered systems. *InfoMat*, 2020, 2(2): 318-340.
- 4 Liu Y, Zhao L, Wang L, *et al.* Skin-integrated graphene-embedded lead zirconate titanate rubber for energy harvesting and mechanical sensing. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(12): 1900744.
- 5 Gao Z, Yiu C, Liu Y, *et al.* Stretchable transparent conductive elastomers for skin-integrated electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(43): 15105-15111.
- 6 Liu Y, Wong T H, Huang X, *et al.* Skin-integrated, stretchable, transparent triboelectric nanogenerators based on ion-conducting hydrogel for energy harvesting and tactile sensing. *Nano Energy*, 2022, 99: 107442.
- 7 Li M, Wu Y, Zhang L, *et al.* Liquid metal-based electrical interconnects and interfaces with excellent stability and reliability for flexible electronics. *Nanoscale*, 2019, 11(12): 5441-5449.
- 8 Teng L, Ye S, Handschuh-Wang S, *et al.* Liquid metal-based transient circuits for flexible and recyclable electronics. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(11): 1808739.
- 9 Yao K, Yao J, Hai Z, *et al.* Stretchable self-powered epidermal electronics from piezoelectric rubber for tactile sensing. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(17): 178701.
- 10 Wu M, Gao Z, Yao K, *et al.* Thin, soft, skin-integrated foam-based triboelectric nanogenerators for tactile sensing and energy harvesting. *Materials Today Energy*, 2021, 20: 100657.
- 11 Joo Y, Byun J, Seong N, *et al.* Silver nanowire-embedded PDMS with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor. *Nanoscale*, 2015, 7(14): 6208-6215.
- 12 Pan T, Pharr M, Ma Y, *et al.* Experimental and theoretical studies of serpentine interconnects on ultrathin elastomers for stretchable electronics. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(37): 1702589.
- 13 He J, Xie Z, Yao K, *et al.* Trampoline inspired stretchable triboelectric nanogenerators as tactile sensors for epidermal electronics. *Nano Energy*, 2021, 81: 105590.
- 14 Liu Y, Wang L, Zhao L, *et al.* Thin, skin-integrated, stretchable triboelectric nanogenerators for tactile sensing. *Advanced Electronic Materials*, 2020, 6(1): 1901174.
- 15 Liu Y, Zhao L, Avila R, *et al.* Epidermal electronics for respiration monitoring via thermo-sensitive measuring. *Materials Today Physics*, 2020, 13: 100199.
- 16 Liu Y, Xu Y, Avila R, *et al.* 3D printed microstructures for flexible electronic devices. *Nanotechnology*, 2019, 30(41): 414001.



- 17 Yao K, Liu Y, Li D, *et al.* Mechanics designs-performance relationships in epidermal triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2020, 76: 105017.
- 18 Huang X, Li H, Li J, *et al.* Transient, implantable, ultrathin biofuel cells enabled by laser-induced graphene and gold nanoparticles composite. *Nano Letters*, 2022, 22(8): 3447-3456.
- 19 Huang Y, Li H, Hu T, *et al.* Implantable electronic medicine enabled by bioresorbable microneedles for wireless electrotherapy and drug delivery. *Nano Letters*, 2022, 22(14): 5944-5953.
- 20 Liu Y, Yiu C, Jia H, *et al.* Thin, soft, garment-integrated triboelectric nanogenerators for energy harvesting and human machine interfaces. *EcoMat*, 2021, 3(4): e12123.
- 21 Huang X, Liu Y, Zhou J, *et al.* Garment embedded sweat-activated batteries in wearable electronics for continuous sweat monitoring. *npj Flexible Electronics*, 2022, 6: 10.
- 22 Wong T H, Yiu C K, Zhou J, *et al.* Tattoo-like epidermal electronics as skin sensors for human machine interfaces. *Soft Science*, 2021, 1: 10.
- 23 Wong T H, Liu Y, Li J, *et al.* Triboelectric nanogenerator tattoos enabled by epidermal electronic technologies. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(15): 2111269.
- 24 Liu Y, Zheng H, Zhao L, *et al.* Electronic skin from high-throughput fabrication of intrinsically stretchable lead zirconate titanate elastomer. *Research (Wash D C)*, 2020, 2020: 1085417.
- 25 Liu Y M, Yiu C K, Song Z, *et al.* Electronic skin as wireless human-machine interfaces for robotic VR. *Science Advances*, 2022, 8(2): eabl6700.
- 26 Song E, Xie Z, Bai W, *et al.* Miniaturized electromechanical devices for the characterization of the biomechanics of deep tissue. *Nature Biomedical Engineering*, 2021, 5(7): 759-771.
- 27 Park W, Yiu C, Liu Y, *et al.* High channel temperature mapping electronics in a thin, soft, wireless format for non-invasive body thermal analysis. *Biosensors*, 2021, 11(11): 435.
- 28 Ghaffari R, Yang D S, Kim J, *et al.* State of sweat: emerging wearable systems for real-time, noninvasive sweat sensing and analytics. *ACS Sensors*, 2021, 6(8): 2787-2801.
- 29 Liu Y, Huang X, Zhou J, *et al.* Stretchable sweat-activated battery in skin-integrated electronics for continuous wireless sweat monitoring. *Advanced Science*, 2022, 9(9): e2104635.
- 30 Liu Y, Huang X, Zhou J, *et al.* Bandage based energy generators activated by sweat in wireless skin electronics for continuous physiological monitoring. *Nano Energy*, 2022, 92: 106755.
- 31 Wu M, Shi R, Zhou J, *et al.* Bio-inspired ultra-thin microfluidics for soft sweat-activated batteries and skin electronics. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(37): 19662-19670.
- 32 Huang X, Li J, Liu Y, *et al.* Epidermal self-powered sweat sensors for glucose and lactate monitoring. *Bio-Design and Manufacturing*, 2022, 5: 201-209.
- 33 Yu X, Xie Z, Yu Y, *et al.* Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality. *Nature*, 2019, 575(7783): 473-479.
- 34 Li D, He J, Song Z, *et al.* Miniaturization of mechanical actuators in skin-integrated electronics for haptic interfaces. *Microsyst Nanoeng*, 2021, 7: 85.
- 35 Huang, X, Liu Y, Park W, *et al.* Intelligent soft sweat sensors for the simultaneous healthcare monitoring and safety warning. *Advanced Healthcare Materials*, 2023, 12(15): e2202846.
- 36 Yiu C, Liu Y, Zhang C, *et al.* Soft, stretchable, wireless intelligent three-lead electrocardiograph monitors with feedback functions for warning of potential heart attack. *SmartMat*, 2022, 3(4): 668-684.

收稿日期: 2022-10-14 修回日期: 2023-11-11

本文编辑: 陈咏竹