

可穿戴织物基压阻式传感器的设计与应用

姚文涛 杨博凯 毛宝华 李春红 李伟

Structure design and application of fabric-based wearable piezoresistive sensor

YAO Wentao, YANG Bokai, MAO Baohua, LI Chunhong, LI Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241030.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[MXene-PEDOT:PSS修饰PDMS多孔弹性体高灵敏度柔性压阻传感器](#)

High sensitivity flexible piezoresistive sensor of PDMS porous elastomer decorated by MXene-PEDOT:PSS

复合材料学报. 2024, 41(10): 5443–5449 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240009.001>

[柔性纳米复合材料压阻式应变传感器的研究进展](#)

Research progress of flexible nanocomposites for piezoresistive strain sensors

复合材料学报. 2022, 39(1): 1–22 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210729.004>

[基于纤维素纳米晶体的多功能传感器的应用研究](#)

Application research of multi-functional sensor based on cellulose nanocrystals

复合材料学报. 2024, 41(7): 3483–3493 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231215.001>

[纳米纤维素基传感器的制备及其应用研究进展](#)

Research progress in preparation and application of nanocellulose-based sensors

复合材料学报. 2022, 39(3): 969–980 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211115.003>

[纳米材料在柔性压阻式压力传感器中的研究进展](#)

Research progress of nanomaterials in flexible piezoresistive pressure sensors

复合材料学报. 2023, 40(7): 3722–3737 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230225.001>

[超疏水柔性应变传感器在人体运动监测中的研究进展](#)

Research progress of superhydrophobic flexible strain sensors in human motion monitoring

复合材料学报. 2023, 40(7): 3837–3851 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230222.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

可穿戴织物基压阻式传感器的设计与应用



分享本文

姚文涛, 杨博凯, 毛宝华, 李春红*, 李伟*

(山东理工大学 鲁泰纺织服装学院, 淄博 255000)

摘要: 柔性压阻式传感器作为一种新型的压力传感设备, 因灵敏度高、易变形、质量轻、保形能力强, 受到了广泛关注。然而柔性压阻式传感器多采用聚合物材料作为衬底, 存在制造成本高、透气性和舒适度差等缺点, 阻碍了其在可穿戴领域的发展。与之相比, 纺织材料具有轻质、高弹的优良特性, 搭配上灵活的编织方式和独特的多孔结构, 使其具备良好的柔性、亲肤性和透气性, 纱线之间的交织方式和粗糙的纤维表面组成的多级结构也可以极大地提升传感器的灵敏度, 因此织物是新型柔性衬底的理想候选者。本文从纤维/纱线 (1D) 压阻式传感器和织物 (3D) 压阻式传感器两个角度出发, 系统整理了织物基压阻式传感器衬底的设计工艺, 讨论了织物基压阻式传感器的制造方法, 阐述了织物基压阻式传感器在运动监测、医疗服务及人机交互领域的应用。最后, 对本文进行了总结, 并谈及了织物基压阻式传感器在未来的优化方向。

关键词: 织物; 压阻式传感器; 结构设计; 可穿戴; 应用

中图分类号: TP212; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)07-3669-10

Structure design and application of fabric-based wearable piezoresistive sensor

YAO Wentao, YANG Bokai, MAO Baohua, LI Chunhong*, LI Wei*

(Lutai School of Textile and Apparel, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The flexible piezoresistive sensor is a new type of pressure sensing equipment. Because of its high sensitivity, easy deformation, light weight and strong shape-preserving ability, it has been widely concerned. However, flexible piezoresistive sensors often use polymer as substrate, which has some disadvantages such as high manufacturing cost, poor permeability and comfort. So it has hindered its development in the wearable field. In contrast, the textile fabric is light and elastic, with flexible weaving and unique porous structure. The sensor made with it has excellent flexibility, skin-friendly and breathability, and the interweaving of yarns and the multi-stage structure of rough fiber surfaces also greatly enhance the sensitivity of the sensor. Therefore, textile fabrics are ideal candidates for new flexible substrates. In this paper, based on the fiber/yarn (1D) piezoresistive sensor and the fabric (3D) piezoresistive sensor, the design process of textile piezoresistive sensor substrate is systematically finished. Secondly, the manufacturing method of fabric-based piezoresistive sensor is discussed. Then, the applications of textile-based piezoresistive sensors in the fields of motion monitoring, medical service and human-computer interaction are described. At last, the paper summarizes and discusses the optimization direction of textile sensor in the future.

Keywords: fabric; piezoresistive sensor; structure design; wearable; application

传感器是一种能够检测外部信息并按照一定规律将信息转变成电信号的测量装置, 其种类多样, 功能各异, 包括且不局限于应变式、电容式、电感式等类型, 可以检测光、电、力、热等信号,

作为电子设备与外界沟通的桥梁, 在国防、机械、航空及纺织领域都发挥着重要作用。压阻式传感器是应变式传感器的一种, 工作原理是基于力的施加引起材料变形从而改变电学性能^[1-3], 使用时

收稿日期: 2024-08-12; 修回日期: 2024-10-06; 录用日期: 2024-10-21; 网络首发时间: 2024-10-30 16:52:33

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241030.002>

通信作者: 李春红, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为功能纺织品开发 E-mail: lyf532@163.com;

李伟, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为智能可穿戴 E-mail: lweiyanb@163.com

引用格式: 姚文涛, 杨博凯, 毛宝华, 等. 可穿戴织物基压阻式传感器的设计与应用 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 3669-3678.

YAO Wentao, YANG Bokai, MAO Baohua, et al. Structure design and application of fabric-based wearable piezoresistive sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 3669-3678(in Chinese).

通过检测电阻、电流或者电压大小判断力的变化。然而,传统的压阻式传感器通常由刚性材料制成,不仅受限於材料自身性质及加工水平,其拉伸、弯折及扭转等复杂机械形变难度也相对较大,在舒适性与耐磨性方面也存在不足,无法满足医学看护、运动监测与软机器人等领域的使用要求^[4-5]。

近年来,柔性压阻式传感器开始大规模发展,柔性衬底搭配导电材料组成传感层取代了传统应变片,轻薄柔性的器件结构,使其具有高灵敏度、可变形、可拉伸、质量轻、保形能力好等优点^[6-7]。但市面上流通的柔性压阻式传感器多采用聚合物材料(如聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚氨酯(PU)等)作为衬底,普遍存在制造成本高、透气性及舒适度差等缺点,阻碍了其在可穿戴领域的发展^[8]。与之对比,纺织材料轻质、高弹的优良特性,搭配上灵活的编织方式和独特的多孔结构,使其具备优秀的手感、亲肤性及透气性,纱线之间的交织方式和粗糙的纤维表面组成的多级结构也可以极大地提升传感器灵敏度,因此织物基压阻式传感器在机器人^[9-11]、电子皮肤^[12-15]、可穿戴医疗设备^[16-20]等领域有巨大的应用前景(图1)^[21-29]。

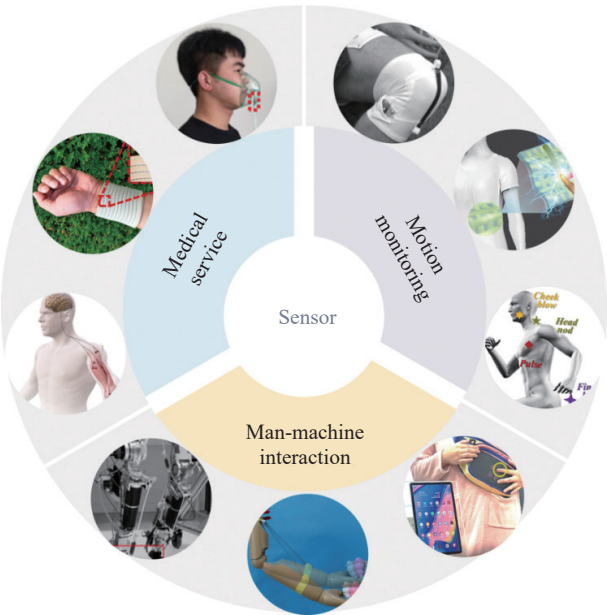


图1 压阻式传感器的相关应用^[21-29]
Fig. 1 Application of piezoresistive sensors^[21-29]

本文围绕织物基压阻式传感器的设计与应用进行综述。首先,从纱线(1D)压阻式传感器和织物(3D)压阻式传感器的角度出发,整理了衬底设计的相关工艺,然后阐述了织物基压阻式传感器

的制造方法。其次,讨论了织物基压阻式传感器在运动监测、医疗服务以及人机交互领域的应用。最后进行了总结,同时谈到了关于织物基压阻式传感器在未来发展方向的个人见解。

1 织物基压阻式传感器的设计

与常见的柔性压阻式传感器相似,织物基压阻式传感器由电极和柔性传感层组成,传感层感知应力变化并反馈电信号,电极与外电路连接,作为电信号传输的媒介。但与多数聚合物材料制成的柔性传感器不同,织物基压阻式传感器的传感层是由纤维/纱线(1D)或者织物(3D)作为衬底与导电材料结合制成。对于压阻式传感器的设计,本节分两部分探讨:第一部分从纤维/纱线(1D)和织物(3D)的角度出发,整理了相关的衬底结构与制作工艺;第二部分分析了制作织物基压阻式传感器常用的方法。

1.1 织物基柔性衬底的设计

1.1.1 纤维/纱线(1D)衬底的设计

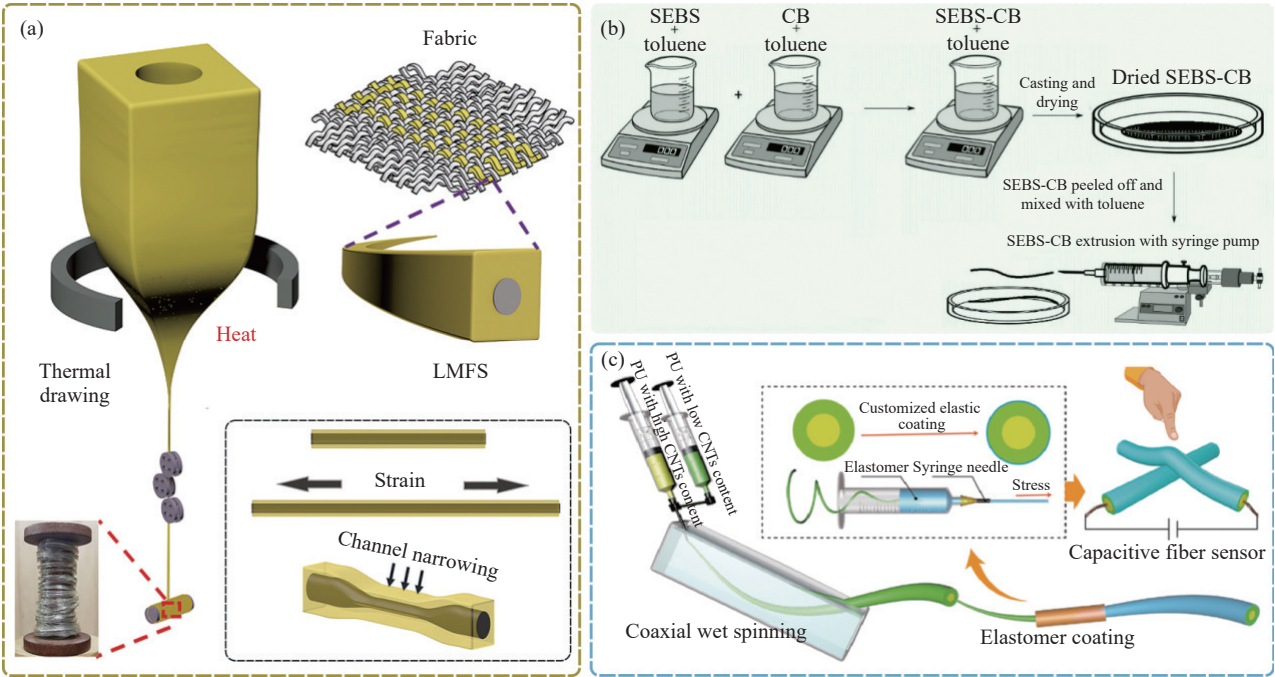
聚合物材料弹性好、可重复性高,是研究制备纤维/纱线压阻式传感器衬底的首选材料,因此多选用化纤的制造工艺,如热拉伸法、挤压法、熔融纺丝法和溶液纺丝法。

(1) 热拉伸法

热拉伸法是一种在高温条件下将材料拉长的加工方法。具体过程如图2(a)所示,He等^[30]将苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯颗粒模压成固体棒材后,在棒材中心钻孔形成热拉拔预制件,然后在拉伸塔中将预制体慢慢拉伸成中空纤维,最后,将铜颗粒混合的液态金属注入中空纤维中制造了复合液体金属纤维传感器(LMFS)。作为一种压力传感器,LMFS可以检测到轻至0.2 N的物体,响应时间短至25 ms,该纤维还具有很强的灵活性和柔性,能轻松地被编织成不同的结构。

(2) 挤压法

与热拉伸工艺类似,挤压法是将流体状态下的材料放入注射器,在外力的作用下挤出,在特殊的条件下定型。Jamatia等^[31]采用溶剂加工的方法制备了苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯(SEBS)和炭黑(CB)分散液,经干燥处理后,与甲苯混合装入单通道可编程注射泵,注射器开口作为挤压模,挤出速度为2.5 mL/h,挤出的股径平均为1.65 mm,在室温干燥后可正常使用(制备过程如图2(b)所示)。经过测试,制备的SEBS/CB纳米复合纤维具



SEBS—Styrene-*b*-(ethylene-co-butylene)-*b*-styrene triblock copolymer; CB—Carbon black; PU—Polyurethane; CNTs—Carbon nanotubes
图2 纤维/纱线(1D)衬底的设计工艺: (a)复合液体金属纤维传感器(LMFS)的热拉伸过程^[30]; (b)注射器挤压制作纤维过程^[31]; (c)同轴湿纺丝过程^[35]
Fig. 2 Design process of fiber/yarn (1D) substrate: (a) Thermal tensile process of composite liquid metal fiber sensor (LMFS)^[30]; (b) Process of extruding fibers from syringe^[31]; (c) Coaxial wet spinning process^[35]

备极强的弹性与柔韧性。

(3) 熔纺

熔融纺丝是制造聚合物纤维常用的方法, 在这个过程中, 聚合物球团或颗粒被送入由螺杆组成的挤出机, 通过加热进行熔化, 聚合物熔体在压力下通过喷丝器泵送出, 再经过冷空气淬火, 熔融的物质固化成纤维^[32]。Bautista-Quijano 等^[33]采用熔融混合法制备了聚碳酸酯(PC)-多壁碳纳米管(MWCNTs)复合纤维。纺丝前需要将干燥的PC球团和MWCNTs人工混合后添加到DSM复合机中, 以280℃的温度熔融混合5 min, 螺杆转速为250 r/min。纺丝机器喷丝板模孔直径选用0.6 mm, 熔融混合温度与熔体温度均设置为280℃。通过改变输送量和卷取速度, 可以得到不同的卷取比, 在测试后发现, 该纤维应变系数最高可以达到18, 能够作为压阻式传感器的衬底使用, 并且相比于其他工艺, 熔融纺丝整个过程不需要溶剂, 因此不需要等待溶剂的挥发, 节约了成本的同时提高了生产效率。

(4) 湿纺

湿法纺丝是将聚合物材料溶解在溶剂, 通过喷丝器的孔泵将溶剂挤入凝固浴, 成型的纤维通过卷取辊收集。该工艺相较于熔体纺丝制作难度

更高, 但优点是不需要较高的温度, 并且可以生产各种形状、尺寸截面的纤维, 有更广的应用^[34]。Qu 等^[35]采用同轴湿纺丝法制备了关于聚氨酯(PU)、碳纳米管(CNTs)和硅橡胶的三层芯-护套结构的电阻-电容混合响应光纤压力传感器(HFPs), 其中以碳纳米管含量高的聚氨酯层为弹性电极, 碳纳米管含量低的聚氨酯层为压阻层, 涂覆的弹性体作为绝缘层。具体过程如图2(c)所示, 通过同轴针(18 G和23 G)将不同浓度的CNTs/PU纺丝溶液挤压到去离子水凝固浴中, 10wt%的CNTs/PU纺丝溶液作为纤维内层, 3wt%的CNTs/PU纺丝液作为外层。经固化干燥后, 得到双层核鞘纤维, 再将双层芯-护套纤维放入更大口径的注射器中, 并倒入硅橡胶溶液。在外力的牵引下, 表面均匀涂覆硅橡胶弹性体的三层纤维被慢慢拉出。三层结构的混合响应直接提高了HFPs的灵敏度, HFPs在0~2 kPa范围内可达1.28 kPa⁻¹, 响应时间和恢复时间仅为20 ms。

1.1.2 织物(3D)衬底的设计

织物衬底的制备方式主要分为两类: 一类以纺纱、纺织为主的织造工艺; 另一类是以定向或随机的纤维通过摩擦、抱合或粘合方式组成织物的非织造工艺。

(1) 织造工艺

织造工艺是指机器或手工控制纱线有规律地弯曲环绕交叉绕结, 形成有稳定结构的片块状织物的过程, 织造方式主要分为针织、机织或编织。徐鹏等^[36]利用手工编织工艺将碳纳米管涂层纱线/还原氧化石墨烯涂层纱线替换部分普通纱线编织成织布, 通过真空辅助树脂传递模塑工艺合成了织物压阻式传感器。Jiang 等^[37]提出了一种新型的全机织间隔片压阻式传感器结构(具体结构如图 3(a)所示), 表面层采用镀银纱作为电极, 中间层材料使用不锈钢-银-聚酯纤维混纺纱, 当受到垂直/经纬方向的力时, 中间层被压缩, 导电路径变短, 电阻减小, 这种类似三明治的结构, 可以有效地检测多个方向的形变, 同时保证了柔软性和稳定性。

(2) 非织造工艺

非织造工艺主要是指通过机械、热或化学方式将纤维缠结在一起的形成片状或网状结构织物的过程, 以此生成的织物具有优秀的结构稳定性与柔软性。Hou 等^[38]以撕碎的纤维纸片为原料, 从中提取出具有网状结构的薄膜, 加入石墨烯导电油墨后制成作为传感层的石墨烯墨水/纸薄膜,

搭配上具有微锥体表面结构的铜/聚二甲基硅氧烷电极, 成功组成具有夹层结构的压力传感器(图 3(b)), 灵敏度达到 3.22 kPa^{-1} , 能检测到 0~98 kPa 的压力。静电纺丝技术是制备高表面积、大孔隙率纳米级无纺布纤维支架的一种简便、低成本的方法, 在构造高灵敏度压阻式传感器时有广泛的应用^[39]。Xue 等^[40]采用静电纺丝技术组装了一种基于微结构静电纺聚氨酯 (PU) 纤维薄膜的柔性压阻传感器, 由聚二甲基硅氧烷作为基底, PU/银薄膜作为传感层, 铝带作为电极。整个过程如图 3(c)所示, PU 溶液放置在 20 mL 的注射器中, 针尖距离铝箔覆盖的圆柱形收集器为 8 cm, 针尖之间施加 8.5 kV 的高直流电压, PU 溶液流速为 1 mL/h。圆柱形集热器保持静止, 转速为 0。在经过 90 min 的纺丝后获得的 PU 纳米纤维薄膜具有良好的柔韧性, 制造的传感器在超过 10 000 次循环以后, 响应时间依然可以达到 60 ms。

1.2 织物基压阻式传感器的设计

1.2.1 涂层法

涂层法是在织物表面添加导电材料, 在力的作用下, 导电材料伴随织物发生形变引起电阻值变化, 添加方式主要分为物理涂层法与化学原位

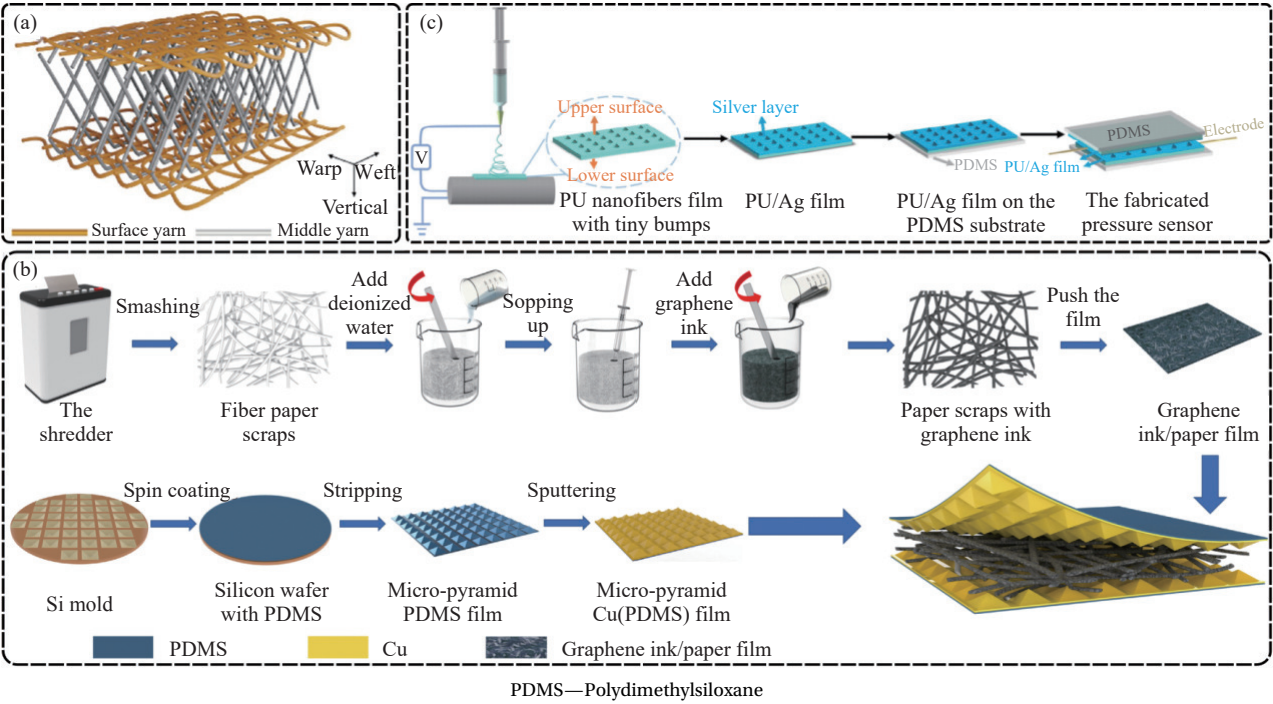


图3 织物(3D)衬底的设计工艺: (a)全机织间隔片压阻式传感器结构示意图^[37]; (b)具有夹层结构的压力传感器的制作过程^[38]; (c)静电纺丝制造压阻式传感器的过程^[40]

Fig. 3 Design process of fabric (3D) substrate: (a) Schematic diagram of the full woven spacer piezoresistive sensor^[37]; (b) Manufacturing process of a pressure sensor having a sandwich structure^[38]; (c) Process of making piezoresistive sensors by electrospinning^[40]

生长法。

(1) 物理涂层法

物理涂层法是指通过物理方式在织物表面生成涂层，主要方式为浸渍和喷涂。浸渍是将纱线浸入导电溶液，取出干燥处理后生成一层导电涂层。Innocent 等^[41]使用聚多巴胺 (PDA) 对聚醚嵌段酰胺 (PEBA) 纤维进行表面改性，并在表面改性聚醚嵌段酰胺纤维上浸涂了由苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯弹性体和炭黑组成的纳米复合导电油墨，制备了具有较高灵敏度的应变纤维 (图 4(a))。合成的纤维具有极好的柔性与耐久性，表现出良好的压阻线性关系。

喷涂也是常用的物理涂层方法，与浸渍法相比，不仅操作简单，消耗成本也相对较低。Dai 等^[42]利用共轭高压电场和金属漏斗，将 Ag 纳米粒子均匀嵌入到聚氨酯纳米纤维 (PUNF) 中，在金属漏斗旋转的过程中，嵌入 Ag 纳米粒子的 PUNF 层层缠绕在可拉伸芯电极上，形成具有取向和螺旋结构的可拉伸银纳米纤维嵌入聚氨酯纳米纤维传感器 (AENSY)，图 4(b) 展示了详细制作过程。这种嵌入式多尺度结构，增加了孔隙率和弹性，赋予了 AENSY 纺织品传感器高达 16.7 N^{-1} 的灵敏度，并且在长期循环下传感器依旧保持高性能。

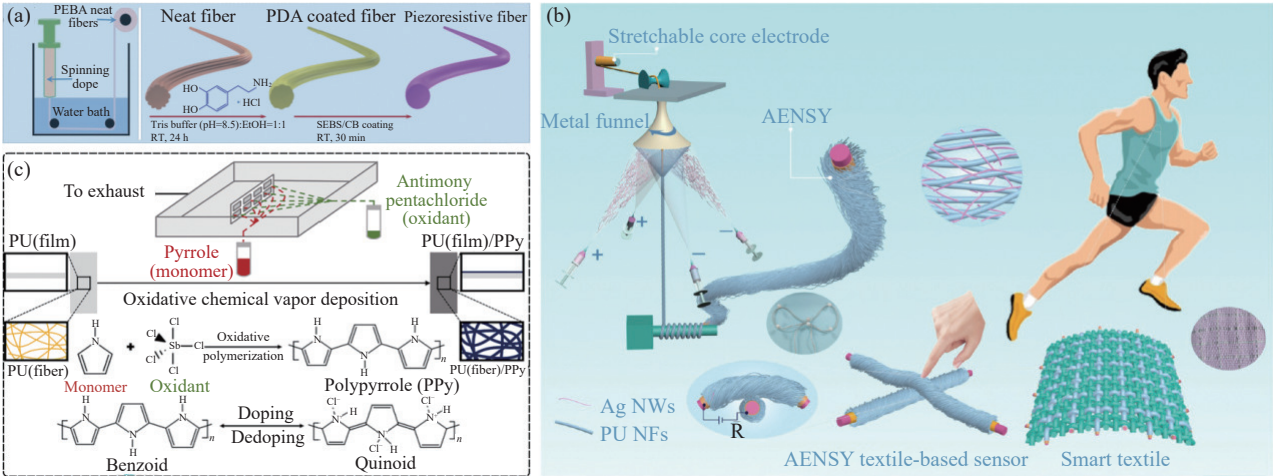
(2) 化学原位生长法

化学原位生长法包括氧化化学气相沉积法 (oCVD)、激光化学气相沉积法 (LCVD) 与化学液

相沉积法 (LPD)^[43]，是一种材料生长工艺，是利用纤维与外部材料反应生成涂层的技术，反应可以通过多种方式激活，包括热、光、等离子体或化学剂。

oCVD 是非常先进的无溶剂沉积技术，其主要原理是借助两种气体材料发生化学反应生成薄膜。Mukherjee 等^[44]以五氯化锑为氧化剂，通过 oCVD 方法在柔性聚氨酯 (PU) 膜和静电纺纤维垫上制备了超薄导电聚吡咯涂层。实验过程见图 4(c)，吡咯单体和五氯化锑分别通过两个相互垂直的独立入口进入主反应室，为防止反应物冷凝，两种反应物都在玻璃罐中加热，反应物气体管路保持在 110°C ，主反应室加热到 40°C ，以保证足够的蒸汽压力推动反应物流动。在反应开始后，加入氮气促进氧化剂的流通速度，两反应物在主反应室中的 PU 薄膜与纤维垫上发生聚合反应生成涂层。该方法制备的涂层非常坚固，在 1 000 次的重复疲劳实验后传感器性能依然稳定。

LCVD 是通过激光局部加热衬底引发气体涂层材料沉积。Wang 等^[45]使用碳布作为衬底，利用氩气将六甲基二硅烷 (HMDS) 送入室中，并注入氢气作为稀释气体，采用自制的 LCVD 方法诱发前驱体 HMDS 发生分解，与碳化硅共同构建了高质量的石墨烯/碳化硅涂层。优秀的灵敏度 (52.93 kPa^{-1}) 与检测范围 ($0\sim186\text{ kPa}$)，证实了该方法制造压阻式传感器的可行性。



NWs—Nanowires; NFs—Nanofibers; PEBA—Polyether block amide; PDA—Polydopamine; RT—Room temperature

图 4 涂层法制备织物基压阻式传感器: (a) 浸渍法制备应变敏感纤维的过程^[41]; (b) 喷涂法制备银纳米纤维嵌入聚氨酯纳米纤维传感器 (AENSY) 传感纱的过程^[42]; (c) 氧化化学气相沉积法 (oCVD) 制备聚吡咯涂层织物传感器的过程^[44]

Fig. 4 Fabric-based piezoresistive sensor prepared by coating method: (a) Process of preparing strain-sensitive fibers by dip coating^[41]; (b) Preparation of Ag nanowire-embedded polyurethane nanofiber sensing yarn (AENSY) sensing yarn by spraying method^[42]; (c) Preparation of polypyrrole-coated fabric sensor by oxidative chemical vapor deposition (oCVD)^[44]

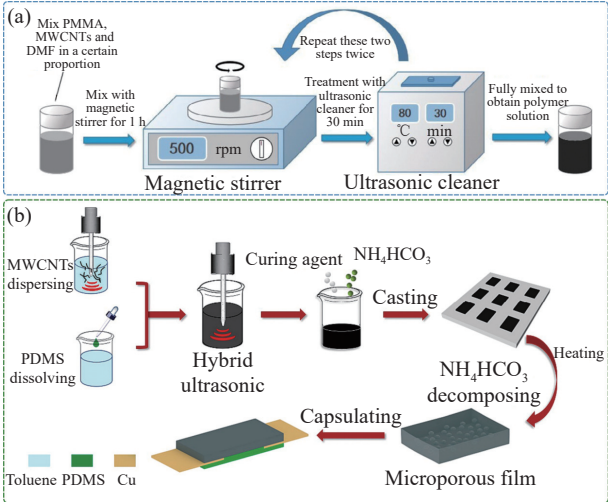
LPD 通常是将其中一种材料加入到另一溶液反应物，在液相环境中发生化学反应生成涂层。Lan 等^[46]通过滴加的方式在聚酯制作的双绞纤维表面添加了一层二硫化钼 (MoS₂)，当把处理过的纤维浸入四氯金酸 (HAuCl₄) 分散液时，MoS₂ 与 HAuCl₄ 瞬间发生氧化还原反应，在纤维表面形成“爆米花”结构涂层，整个制造过程不到 5 min。独特的爆米花状金纳米结构和粗糙的表面显著提高了压力传感器的性能，可以检测到多方向应变、弯曲等机械变形，响应时间快至 93 ms。

1.2.2 掺杂

掺杂法是在织物基传感器的制作过程中，将导电材料 (如纳米粒子) 掺杂混合到纺织材料，根据渗流理论^[47]和隧穿效应^[48]，在传感器受到挤压后，内部导电材料的分布状态受到影响，从而改变了导电路径的数量^[1, 49]。

碳纳米管具有高强度、低质量及优导电性等优点，是使用掺杂法的优选材料。Cheng 等^[50]使用静电纺丝工艺，以聚甲基丙烯酸甲酯、多壁碳纳米管 (MWCNTs) 和二甲基甲酰胺分散体为原料制造了共形压阻纤维薄膜。MWCNTs 颗粒之间存在范德华力，为防止出现团聚体，配制静电纺丝溶液时需要将混合的材料持续搅拌 1 h 与超声振动 30 min，直到材料完全混合均匀后才可以开始纺丝 (纺丝溶液制作过程如图 5(a) 所示)。纺丝开始后，注射器针尖沿水平方向匀速来回运动，同时收丝辊高速旋转，保证压阻纤维均匀分布。在进行测试后发现，该薄膜应变系数高达 207.95，以此制备的传感器具有较高的耐用性和快速响应能力。Jiang 等^[51]开发了一种三维微孔的聚二甲基硅氧烷 (PDMS)/MWCNTs 柔性压力传感器。研究人员将 MWCNTs 分散在 PDMS 基体中制备导电复合材料，以碳酸氢铵 (NH₄HCO₃) 颗粒作为牺牲模板添加到 PDMS 和 MWCNTs 的未固化混合材料里面。基体的固化过程中，NH₄HCO₃ 颗粒完全分解为氨、水和二氧化碳，并在 PDMS/MWCNTs 中留下三维微孔 (图 5(b))。通过调节 NH₄HCO₃ 与 MWCNTs 的粒径和质量比，能够控制内部微孔的大小和密度，制备出具有不同力学性能和电导率的传感器。

天然生物材料，如棉、麻、丝，柔韧性强、穿着舒适，但没有导电性，利用高温碳化工艺可获得完整的导电网络^[52]。Chen 等^[53]利用炭化废棉



PMMA—Polymethyl methacrylate; DMF—Dimethylformamide
图 5 掺杂法制备织物基压阻式传感器：(a) 静电纺丝溶液的制作过程^[50]；(b) 聚二甲基硅氧烷 (PDMS)/多壁碳纳米管 (MWCNTs) 柔性压力传感器的制作过程^[51]

Fig. 5 Fabric-based piezoresistive sensor prepared by doping method: (a) Preparation of electrospinning solutions^[50]; (b) Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS)/multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) flexible pressure sensors^[51]

织物与天然胶乳相结合，成功地开发了一种绿色制造柔性传感器的方法。废棉织物首先在氮气气氛中进行热处理碳化，然后采用真空装袋、负压吸附和滴涂 3 种方法与天然胶乳结合。炭化棉经天然橡胶浸渍后，保持织物结构不变，并表现出良好的导电性，制备的可穿戴柔性应变传感器对应变敏感，在循环加载下稳定。

2 织物基压阻式传感器的应用

2.1 运动监测

Li 等^[54]提出了一种制造工艺简单的便携式智能鞋垫，整个系统由 104 个高鲁棒性压阻传感器组成，具有良好的压力传感均匀性。智能鞋垫不仅可以检测人体重心的细微位移，还可以实时、高分辨率地展示人体活动过程中足底压力分布的热力学图 (图 6(a))。通过对整个足底压力分布进行区域化和数字化，该鞋垫还实现了运动智能识别功能，对 6 个预定义动作的平均识别准确率达到 83.32%。

Gao 等^[55]报道了一种用于压阻式传感器的超疏水导电棉织物 (CF) 的制备方法。它是基于利用超疏水导电棉织物上的还原氧化石墨烯 (rGO) 层来形成导电通路。同时，通过端接二羟基的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 与钛酸四丁酯的水解缩聚和

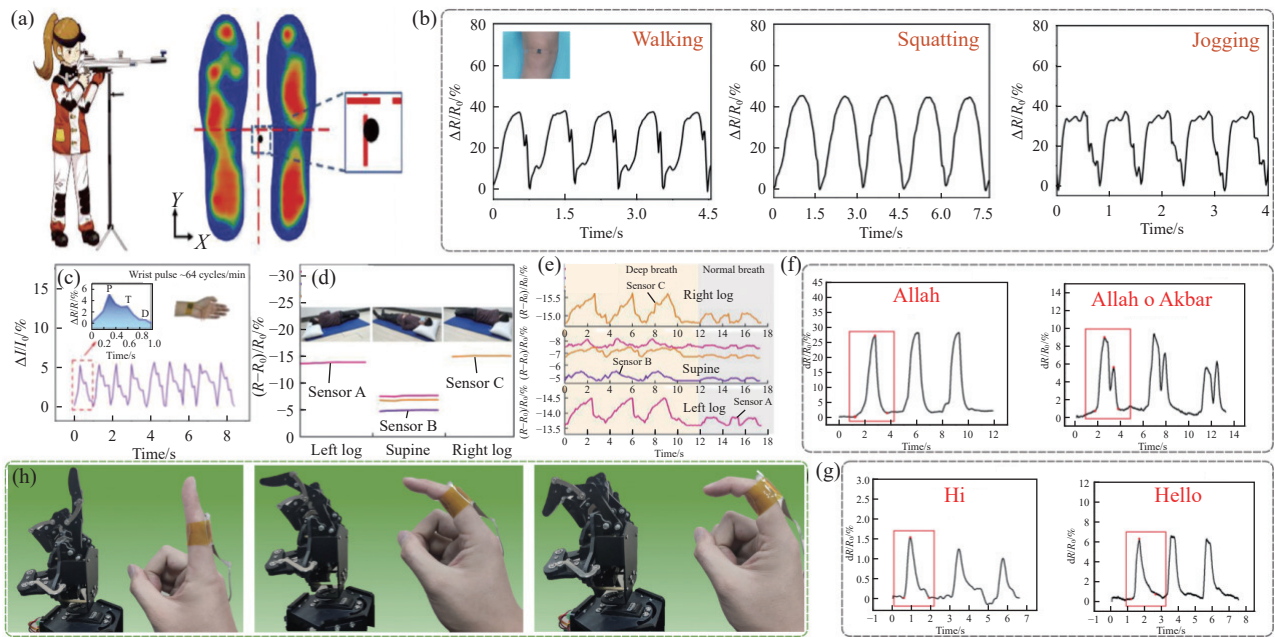


图6 织物基压阻式传感器的相关应用: (a) 足底压力分布的热力学图^[54]; (b) 传感器检测行走、下蹲和慢跑图像^[55]; (c) 传感器监测手腕脉搏信号^[56]; (d) 枕形压力传感器监测左卧、仰卧和右卧^[57]; (e) 枕形压力传感器监测呼吸^[57]; (f) “Allah”和“ Allah o Akbar”的电阻响应区别^[58]; (g) “Hi”和“Hello”的电阻响应区别^[58]; (h) 人与机械手的远程交互^[38]

Fig. 6 Application of fabric-based piezoresistive sensors: (a) Thermodynamic diagram of plantar pressure distribution^[54]; (b) Sensors detect walking, squatting and jogging images^[55]; (c) Sensor monitors the wrist pulse signal^[56]; (d) Pillow-shaped pressure sensors monitor left, supine and right recumbent positions^[57]; (e) Pillow-shaped pressure sensors monitor breathing^[57]; (f) Difference between the resistance responses of "Allah" and "Allah o Akbar"^[58]; (g) Resistance response difference between "Hi" and "Hello"^[58]; (h) Remote human-robot interaction^[38]

交联反应，在还原氧化石墨烯 (rGO) 层上原位生成 PDMS/TiO₂ 杂化物，起到构建粗糙结构和降低表面能的作用。为了评估传感器对不同人体运动的实用性，研究人员将制作好的传感器安装在测试者的膝盖上，检测测试者的行走、下蹲和慢跑，随着运动周期的增加，响应波形呈现出良好的规律性和重复性 (图 6(b))。

2.2 医疗服务

Wang 等^[56] 提出了一种将非织造布浸入二硫化钨 (WS₂) 和 Ti₃C₂T_x MXene 溶液中的压阻式传感器。通过层层交替沉积的原理，目标化合物 MXene 与 WS₂ 衬底表面官能团之间的协同作用诱导溶液中的 MXene 自发附着在衬底上，形成结构完整、稳定的功能膜。组成的柔性压力传感器具有高灵敏度 (45.81 kPa⁻¹)、宽检测范围 (0~410 kPa)、快速响应/恢复时间 (18/36 ms)、出色的稳定性和长期耐用性 (高达 5 000 次测试循环)。将传感器安装在手腕内侧可以监测人体脉搏信号，在 8.5 s 内准确检测到 9 个周期脉冲信号，图 6(c) 精确地显示了一个完整的脉冲波形，放大后的图像清晰地

显示了波形中 3 个可区分的特征峰的位置：冲击波 (P)、潮汐波 (T) 和二向散波 (D)。

睡眠姿势不仅影响人体睡眠质量和精神状态，错误的睡眠姿势甚至会诱发多种疾病，因此睡眠监测具有重要的意义。Tian 等^[57] 提出了一种枕形三维层次化压阻式传感器，实时监测人们睡眠时的呼吸和姿势。枕形压力传感器由 3 种原料通过热粘接法制备。一块镀银成分的织物通过热塑性聚氨酯薄膜粘合到氨纶织物上，以实现口袋形状。然后，将相同质量的组装好的聚丙烯纤维填充到这个口袋中。最后，用银膏将铜线连接到镀银元件的织物上，以获得所需的枕形压力传感器。聚丙烯组件固有的柔性针织结构和良好的回弹性协同作用，即使在 4 500 次循环后，也能提供出色的传感性能。图 6(d) 为传感器 A、B、C 的相对电阻变化情况，这 3 个插图显示了人体的 3 种姿势：左卧、仰卧和右卧。在左图姿势下，传感器 A 的相对电阻变化为 13.6%，而其他两个传感器处于无负载状态。转到仰卧位，当传感器 A、B、C 均按下时，3 个体位的相对阻力变化分别为 7.5%、

4.7%、6.8%。然后，转到右卧姿势，只有传感器C反映了14.8%的电阻变化。此外，图6(e)显示了不同姿态下线段(人体正常呼吸信号)和局部放大呼吸状态的轻微波动。尽管相对电阻的变化趋势不同，但在深呼吸和正常呼吸时，它们的频率相似，分别为0.25 Hz和0.67 Hz，这表明在不同的姿势下，呼吸频率可以被精确检测到。

2.3 人机交互

语音识别是人机交互的一个重要方向。Ahmed等[58]以二甲基甲酰胺为溶剂，氯仿为分散剂，通过静电纺丝的方式制作了一种应用于语音识别的超灵敏柔性应变传感器。为了评估开发的传感器的语音识别行为，传感器被连接到喉结处，以此记录不同单词的电阻响应。该传感器可以识别出单音节和多音节组成的不同单词并作出响应，例如图6(f)中的单词“Allah”和单词“Allah o Akbar”，虽然两个句子很相似，但是后者的语句记录的多个峰使其与前者有明显区分。图6(g)中分别给出了问语“Hi”和“Hello”，这再次证明了传感器能够清楚区分不同语言的能力。

体感机械臂在人机交互领域引起了广泛的关注。Hou等[38]成功研制了一种基于低成本绿色压力传感器的便携式体感机械臂系统。该传感器以添加石墨烯涂层的纤维纸浆为传感层，以微金字塔结构的铜/聚二甲基硅氧烷为电极层。当传感器附着在人体皮肤表面时，它可以成功地检测到人体表面的微弱信号和人体的运动姿态。通过后端电阻采集电路、无线通信电路、智能控制处理电路及算法的设计，成功实现人与机械手之间的远程无线人机交互(图6(h))。

3 总结与展望

织物基压阻式传感器具有高灵敏度、强透气性、亲肤性等特点，可以在满足穿着舒适性要求的同时实现人体健康监测。本文从纤维/纱线(1D)和三维织物两个角度出发，系统阐述了织物基压阻式传感器衬底的制造方法，如热拉伸法、挤压法、熔融纺丝及湿法纺丝，整理了制造织物基压阻式传感器用到的涂层法与掺杂法。然后，讨论了织物基压阻式传感器在运动监测、医学服务、人机交互领域的应用，证明了织物基压阻式传感器的实用性。尽管织物基压阻式传感器已经发展到一个成熟的阶段，但有许多问题依然需要解决。

(1) 改善传感器柔性。虽然织物衬底本身具备

较好的柔性，但与导电材料的结合(如涂层)会极大地增大织物的杨氏模量。而改善织物衬底与导电材料的结合方式是一个良好的解决思路，如选取模量低的粘合剂整理织物衬底，或者采用非织造方式取代织造方式，都能够有效地改善传感器柔性。

(2) 增强检测范围。特殊的编织方式与多孔结构赋予了织物易变形的特点，提升了传感器的灵敏度、降低了检测限，但也因此缩小了检测范围。因此可以采用适度增加织物密度、在纱线表面构建多层微结构的方法，在不影响原先传感性能的基础上适度增大检测范围。

(3) 提高耐用性。织物基压阻式传感器面临着长期耐用性和可靠性方面的挑战，作为可穿戴使用，需要频繁的机械变形甚至水洗，涂层或者纳米粒子都会受到影响，导致电性能退化甚至传感器组件失效，因此增加导电材料与织物结合的稳固性是未来的一个发展方向。

参考文献：

[1] LIU E, CAI Z, YE Y, et al. An overview of flexible sensors: Development, application, and challenges[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 817.

[2] SHARMA A, ANSARI M Z, CHO C. Ultrasensitive flexible wearable pressure/strain sensors: Parameters, materials, mechanisms and applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 347: 113934.

[3] 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. Research progress of flexible nanocomposites for piezoresistive strain sensors[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(1): 1-22(in Chinese).

[4] SEESAARD T, WONGCHOOSUK C. Flexible and stretchable pressure sensors: From basic principles to state-of-the-art applications[J]. *Micromachines*, 2023, 14(8): 1638.

[5] 门海蛟, 宋健尧, 黄秉经, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(21): 45-67.

MEN Haijiao, SONG Jianyao, HUANG Bingjing, et al. Recent advances in flexible and wearable strain sensors[J]. *Materials Review*, 2023, 37(21): 45-67(in Chinese).

[6] WANG M, ZHANG H, WU H, et al. Bioinspired flexible piezoresistive sensor for high-sensitivity detection of broad pressure range[J]. *Bio-Design and Manufacturing*, 2022, 6(3): 243-254.

[7] BAO Y, XU J C, GUO R Y, et al. High-sensitivity flexible pressure sensor based on micro-nano structure[J]. *Progress in Chemistry*, 2023, 35(5): 709-720.

[8] TIAN G, SHI Y, DENG J, et al. Low-cost, scalable fabrica-

- tion of all-fabric piezoresistive sensors via binder-free, in-situ welding of carbon nanotubes on bicomponent non-wovens[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6(1): 120-132.
- [9] WANG Y, DUAN S, LIU J, et al. Highly-sensitive expandable microsphere-based flexible pressure sensor for human-machine interaction[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2023, 33(11): 115009.
- [10] XU S, XU Z, LI D, et al. Recent advances in flexible piezoresistive arrays: Materials, design, and applications[J]. *Polymers*, 2023, 15(12): 2699.
- [11] DAS S, BHATTACHARJEE M, THIYAGARAJAN K, et al. Nonlinear response analysis of a polymer-based piezoresistive flexible tactile sensor at low pressure[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2023, 7(11): 2504204.
- [12] ZHONG F, HU W, ZHU P, et al. Piezoresistive design for electronic skin: From fundamental to emerging applications[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(8): 210029.
- [13] CHEN B, ZHANG L, LI H, et al. Skin-inspired flexible and high-performance MXene@polydimethylsiloxane piezoresistive pressure sensor for human motion detection[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 617: 478-488.
- [14] KONG M, XIANG Z, XU X Y, et al. Transparent and stretchable piezoresistive strain sensors with buckled indium tin oxide film[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023, 9(8): 2300197.
- [15] SHARMA S, CHHETRY A, MAHARJAN P, et al. Polyaniline-nanospines engineered nanofibrous membrane based piezoresistive sensor for high-performance electronic skins[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 106970.
- [16] LONG Z, LIU X, XU J, et al. High-sensitivity flexible piezoresistive pressure sensor using PDMS/MWNTS nanocomposite membrane reinforced with isopropanol for pulse detection[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4765.
- [17] YU Z, HU G, CHEN J, et al. Resonant printing flexible piezoresistive pressure sensor with spherical microstructures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(3): 035020.
- [18] HE X, WANG F, LIANG Y, et al. Carbonization fabrication of a piezoresistive sensor with improved sensitivity via Ni decoration of carbonized cotton fibers[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(12): 3000-3009.
- [19] SU Y, MA K, LIU M, et al. Compressible, reliable, and flexible pressure sensor based on carbonized melamine foam capped by $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene for versatile applications[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(3): 035032.
- [20] 王志伟, 黄继伟, 凌新龙. 纺织基柔性力学传感器的研究进展[J]. *纺织科学与工程学报*, 2023, 40(4): 108-114.
WANG Zhiwei, HUANG Jiwei, LING Xinlong. Research progress of textile-based flexible mechanical sensors[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2023, 40(4): 108-114(in Chinese).
- [21] WANG R, SHEN Y, QIAN D, et al. Tensile and torsional elastomer fiber artificial muscle by entropic elasticity with thermo-piezoresistive sensing of strain and rotation by a single electric signal[J]. *Materials Horizons*, 2020, 7(12): 3305-3315.
- [22] TIAN G L, ZHAN L, DENG J X, et al. Coating of multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) on three-dimensional, bicomponent nonwovens as wearable and high-performance piezoresistive sensors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 425: 130682.
- [23] LU Y J, TIAN M W, SUN X T, et al. Highly sensitive wearable 3D piezoresistive pressure sensors based on graphene coated isotropic non-woven substrate[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 117: 202-210.
- [24] ONGGAR T, KRUPPKE I, CHERIF C. Techniques and processes for the realization of electrically conducting textile materials from intrinsically conducting polymers and their application potential[J]. *Polymers*, 2020, 12(12): 2867.
- [25] SHU Q, HU T, XU Z, et al. Non-tensile piezoresistive sensor based on coaxial fiber with magnetoactive shell and conductive flax core[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 149: 106548.
- [26] WANG M X, WU J J, DONG L, et al. A highly aligned microgrid structure for wearable nanofibrous sensors with an enhanced sensitivity and detection range[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(34): 12323-12331.
- [27] JANG S J, KIM M, LIM J Y, et al. Development of mode-switchable touch sensor using MWCNT composite conductive nonwoven fabric[J]. *Polymers*, 2022, 14(8): 1545.
- [28] DONG L, REN M, WANG Y, et al. Self-sensing coaxial muscle fibers with bi-lengthwise actuation[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(9): 2541-2552.
- [29] YAN T, WU Y, YI W, et al. Recent progress on fabrication of carbon nanotube-based flexible conductive networks for resistive-type strain sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 327: 112755.
- [30] HE Y, WAN C, YANG X, et al. Thermally drawn super-elastic multifunctional fiber sensor for human movement monitoring and joule heating[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(11): 2202079.
- [31] JAMATIA T, MATYAS J, OLEJNIK R, et al. Wearable and stretchable SEBS/CB polymer conductive strand as a piezoresistive strain sensor[J]. *Polymers*, 2023, 15(7): 1618.
- [32] RAWAL A, MUKHOPADHYAY S. Advances in filament yarn spinning of textiles and polymers[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014: 75-99.
- [33] BAUTISTA-QUIJANO J R, PÖTSCHKE P, BRÜNIG H, et al. Strain sensing, electrical and mechanical properties of polycarbonate/multiwall carbon nanotube monofilament fibers fabricated by melt spinning[J]. *Polymers*, 2016, 82: 181-189.
- [34] OZIPEK B, KARAKAS H. Advances in filament yarn spinning of textiles and polymers[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014: 174-186.

- [35] QU X, LI J, HAN Z, et al. Highly sensitive fiber pressure sensors over a wide pressure range enabled by resistive-capacitive hybrid response[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(15): 14904-14915.
- [36] 徐鹏, 王冠韬, 刘奎, 等. 石墨烯/碳纳米管嵌入式纤维传感器对树脂基复合材料原位监测的结构-性能关系对比 [J]. *材料工程*, 2019, 47(9): 29-37.
XU Peng, WANG Guantao, LIU Kui, et al. Structure-property relationship of graphene/carbon nanotube enabled embeddable fiber sensors for in-situ monitoring of composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(9): 29-37(in Chinese).
- [37] JIANG M, HU H, JIN C, et al. Three-directional spacer-knitted piezoresistant strain and pressure sensor for electronic integration and on-body applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(47): 55009-55021.
- [38] HOU X, WU H, ZHAO J, et al. A portable somatosensory manipulator system based on graphene ink/paper film piezoresistive sensors for human-computer interaction[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(18): 21728-21738.
- [39] ZHAO Z C, LI B T, XU L Q, et al. A sandwich-structured piezoresistive sensor with electrospun nanofiber mats as supporting, sensing, and packaging layers[J]. *Polymers*, 2018, 10(6): 575.
- [40] XUE B, XIE H Y, ZHAO J X, et al. Flexible piezoresistive pressure sensor based on electrospun rough polyurethane nanofibers film for human motion monitoring[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(4): 723.
- [41] INNOCENT M T, ZHANG Z, CAO R, et al. Piezoresistive fibers with large working factors for strain sensing applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 15(1): 2277-2288.
- [42] DAI Y, QI K, OU K, et al. Ag NW-embedded coaxial nanofiber-coated yarns with high stretchability and sensitivity for wearable multi-sensing textiles [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(8): 11244-11258.
- [43] LAU K K S. Chemical vapor deposition[M]. Philadelphia: Medical Coatings and Deposition Technologies, 2016: 403-455.
- [44] MUKHERJEE A, DIANATDAR A, GLADYSZ M Z, et al. Electrically conductive and highly stretchable piezoresistive polymer nanocomposites via oxidative chemical vapor deposition[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(26): 31899-31916.
- [45] WANG C J, XU Q F, HU J R, et al. Graphene/SiC-coated textiles with excellent electromagnetic interference shielding, Joule heating, high-temperature resistance, and pressure-sensing performances [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2023, 12(4): 778-791.
- [46] LAN L, ZHAO F, YAO Y, et al. One-step and spontaneous in situ growth of popcorn-like nanostructures on stretchable double-twisted fiber for ultrasensitive textile pressure sensor [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 10689-10696.
- [47] CHOI J, KWON D, KIM K, et al. Synergetic effect of porous elastomer and percolation of carbon nanotube filler toward high performance capacitive pressure sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(1): 1698-1706.
- [48] LI F C, KONG Z, WU J H, et al. Advances in flexible piezoresistive pressure sensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 100703.
- [49] 汤桂君, 殷柯柯, 原会雨. 纳米材料在柔性压阻式压力传感器中的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(7): 3722-3737.
TANG Guijun, YIN Keke, YUAN Huiyu. Research progress of nanomaterials in flexible piezoresistive pressure sensors [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 3722-3737(in Chinese).
- [50] CHENG X, CAO X, WU Z, et al. A flexible conformal piezoresistive sensor based on electrospinning for deformation monitoring of carbon fiber-reinforced polymer [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(19): 2300341.
- [51] JIANG C S, LYU R Y, ZOU Y L, et al. Flexible pressure sensor with wide pressure range based on 3D microporous PDMS/MWCNTs for human motion detection [J]. *Micro-electronic Engineering*, 2024, 283: 112105.
- [52] LIU S L, ZHANG W T, HE J Z, et al. Fabrication techniques and sensing mechanisms of textile-based strain sensors: From spatial 1D and 2D perspectives [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 23(9): 338.
- [53] CHEN X, AN J, CAI G, et al. Environmentally friendly flexible strain sensor from waste cotton fabrics and natural rubber latex [J]. *Polymers*, 2019, 11(3): 404.
- [54] LI X, LIU X, ZENG W, et al. Carbon fiber-based smart plantar pressure mapping insole system for remote gait analysis and motion identification [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(16): 2300095.
- [55] GAO S, LI H, ZHENG L, et al. Superhydrophobic and conductive polydimethylsiloxane/titanium dioxide@reduced graphene oxide coated cotton fabric for human motion detection [J]. *Cellulose*, 2021, 28(11): 7373-7388.
- [56] WANG J, ZHANG D, WANG D, et al. Efficient fabrication of TPU/MXene/tungsten disulfide fibers with ultra-fast response for human respiratory pattern recognition and disease diagnosis via deep learning [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(31): 37946-37956.
- [57] TIAN M, LU Y, QU L, et al. A pillow-shaped 3D hierarchical piezoresistive pressure sensor based on conductive silver components-coated fabric and random fibers assembly [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(14): 5737-5742.
- [58] AHMED S, NAUMAN S, KHAN Z M. Electrospun nanofibrous yarn based piezoresistive flexible strain sensor for human motion detection and speech recognition [J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, 36(6): 2459-2481.