

一维结构柔性应变传感器在智能纺织 服用品中的应用进展

洪剑寒^{1,2}, 岳欣琰^{1,2}, 王华兵³, 王小虎^{1,2,4}, 韩 潇^{1,2}

(1. 绍兴文理学院 纺织科学与工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江省清洁染整技术研究重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 3. 江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122; 4. 浙江洁达新材料科技有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘 要:一维结构柔性应变传感器具有优异的可集成性、适形性和灵活的结构变化等特点,在智能纺织服用品的开发与应用方面具有很大潜力。通过对纤维和纱线制备一维结构柔性应变传感器的工艺及其优缺点的介绍,综述近年来纤维型和纱线型一维结构柔性应变传感器在智能纺织服用品设计与应用中的研究进展,分析其在智能可穿戴应用领域中存在的问题。研究表明,一维结构柔性应变传感器在智能纺织服用品中的应用前景广阔,未来研究人员可不断优化和提升传感器的性能和制备工艺,推动一维结构柔性应变传感器在智能纺织服用品的实际应用。

关键词:一维结构;柔性应变传感器;纤维式;纱线式;智能服装

中图分类号:TP 212;TS 941.373 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2024)05-0456-08

Advances in the Application of One-Dimensional Structural Flexible Strain Sensors in Smart Textile Clothing Products

HONG Jianhan^{1,2}, YUE Xinyan^{1,2}, WANG Huabing³, WANG Xiaohu^{1,2,4}, HAN Xiao^{1,2}

(1. School of Textile and Apparel, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China 3. College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Zhejiang Jieda New Material Technology Co., Ltd, Shaoxing 312000, China)

Abstract:The one-dimensional structural flexible strain sensor has excellent integrability, conformability, and flexibility in structural changes, which has great potential in the development and application of smart textile products. This review introduces the fabrication process and advantages and disadvantages of one-dimensional structural flexible strain sensors made of fibers and yarns, and summarizes the research progress of fiber-type and yarn-type one-dimensional structural flexible strain sensors in the design and application of smart textile products in recent years. It analyzes the problems existing in the application of one-dimensional structural flexible strain sensors in smart wearable applications. The research shows that the application prospect of one-dimensional structural flexible strain sensor in smart textile products is broad. In the future, researchers can continuously optimize and improve the performance and fabrication process of the sensor to promote the actual application of one-dimensional structural flexible strain sensor in smart textile products.

Key words:one-dimensional structure, flexible strain sensor, fibre-based, yarn-based, smart clothing

随着人工智能和柔性电子技术的快速发展,人们的生活迈入了“万物互联”的物联网新时代^[1]。未来智能可穿戴产品可通过柔性传感器来进行感

知交互。智能纺织服用产品集传统纺织服用品的基本功能与通讯^[2]、娱乐^[3]、生理监测^[4-5]等附加功能于一体,满足了人们对智能可穿戴产品的多元化

收稿日期:2024-03-07; 修订日期:2024-08-29。

基金项目:浙江省自然科学基金探索公益项目(LTGY24E030001);柯桥区产业关键技术攻关项目(2023JBGS110)。

作者简介:洪剑寒(1982—),男,教授,硕士生导师。主要研究方向为新型纺织材料的制备与应用。Email:jhhong@usx.edu.cn

需求。可穿戴式柔性传感器是智能纺织服用品的重要组成部分,在医疗监测^[6-7]、运动健康^[8-10]、电子通信与供能^[11-12]等领域广泛应用。提升智能纺织服用品的应用价值,开发穿着舒适、性能稳定和满足长期使用的柔性传感器,且实现可商业化量产,对研究人员是一种挑战。

早期传感器通常为柔性较差的硅(Si)基电子器件,体积相对较大,穿戴舒适性差,应用范围受限。柔性传感器不同于Si基传感器件的刚性物理形态,具有柔软轻质和方便携带的优点,且可紧密贴合在不规则或动态的物体表面上,提高所采集数据的准确性,实现信息、外界环境、人及物体多元感知。目前,国内外研究人员主要围绕材料、结构设计两大方向对柔性传感器展开研究。其中,结构设计以二维结构和三维结构为主,常通过聚合物薄膜或织物堆叠组装^[13],传感器有一定的厚度和面积,在曲面或动态物体表面应用时,容易出现适应性差、性能不稳定,应用范围小的问题。而一维结构柔性应变传感器具有优异适形性、灵活的结构变化和可集成性等特点,适合智能纺织服用品的开发和应用。

文中从纺织层面总结纤维和纱线制备一维结构柔性应变传感器件的工艺,综述了利用纤维式、纱线式柔性传感器件且以纺织产品为载体的智能纺织服用品的研究进展及存在的问题,为相关一维结构柔性器件制备和智能纺织服用品应用开发提供理论参考。

1 纤维式一维结构柔性应变传感器

纤维是纺织品的基础单元,纤维材料自身具有一定的拉伸形变能力,能够使柔性传感器件具有一定的拉伸性、柔软度。此外,纤维还具备一定的导电传感功能。采用湿法纺丝、熔体纺丝等工艺制备纤维式柔性传感器主要有两大方向:①采用导电材料与高分子聚合物混合的方法制成纺丝液,再通过选择湿法纺丝或熔体纺丝等工艺制备具有传感响应的纤维,同时改变纤维长度及直径,使内部导电网络发生变化;②用同轴部件加工成具有“芯鞘”结构的传感复合纤维,当外界出现应变刺激时,引起导电材料内部导电网络的变化,进而改变电容、电阻等。

1.1 湿法纺丝

湿法纺丝是将基础聚合物溶液通过纺丝喷嘴以合适的速率注入凝固浴来制造长丝的方法^[14]。将导电材料加入纺丝液中,通过湿法纺丝技术制造

可拉伸导电复合纤维,或者采用同轴部件制备“芯鞘”结构的复合长丝。在采用湿法纺丝技术制备纤维式传感器方面,LIANG Q Q等^[15]利用同轴湿法纺丝制备了皮芯结构螺旋形纤维电容传感器,该传感器具有良好的拉伸强度和断裂伸长率。HU S M等^[16]通过湿法纺丝技术先后将细菌纤维素水凝胶、碳纳米管(CNTs)、聚吡咯充分混合后,制备了大应变、可降解、耐水洗的导电纤维柔性电子器件,具有良好的高拉伸强度和电导率。这种纤维传感器件制备工艺复杂,但对于开发环保、可生物降解智能纺织品具有重要意义。另外,WANG F等^[17]利用湿法纺丝制备了一种由聚氨酯(polyurethane,PU)和离子液体组成的离子凝胶纤维,并将其设计成“S”形,得到一种可穿戴的应变不敏感温度传感器,能有效消除应变对温度传感的干扰。

湿法纺丝技术具有规模化生产的优势,研究人员往往采用同轴湿法纺丝制备纤维式柔性传感器件,通过调节纺丝液各组分的配比和纺丝参数,进而调控纤维的形貌、直径和性能,以此提高传感器的灵敏度,有利于实现传感复合纤维的连续制备。

1.2 熔体纺丝

熔体纺丝是利用挤出机将高分子材料的熔体通过一定形状的口模(喷丝头)连续挤出成型,然后在冷却室中将长丝冷却固化形成纤维。聚苯乙烯聚丁二烯聚苯乙烯(styrenic block copolymers,SBS)和热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethane,TPU)是熔体纺丝技术经常使用的热塑性弹性体,具有较好的拉伸性、优异的熔融加工性、良好的弹性恢复性。相同结构但工艺不同的还有1.1中湿法纺丝制备工艺的同轴部件制备的“芯鞘”结构,可将热塑性材料作为弹性“芯”层,导电材料做外“鞘”层。ZHONG J P等^[18]为了提高传感复合纤维的芯层与鞘层界面相容性,将SBS与多壁碳纳米管共混作为芯层即导电层,纯SBS作为鞘层即介电层。这种传感复合纤维具有超高的敏感因子、低响应时间、大应变的特点,可以适应弯曲和扭曲变形,可用以监测人体大幅度运动。赵蕾^[19]制备了抗环境温度、湿度干性3层同轴的纤维电容传感器,根据电容传感机理,将内导电层和TPU外介电层采用同轴部件制备,利用涂层包覆导电材料方式对“芯鞘”纤维做第3层外电极的组装。在应变作用下,内外两层电极距离减少且介电常数改变,电容值也随之发生变化,该纤维电容传感器的应变响应时间可低至50 ms。HE Y等^[20]制备了高拉伸复合弹性纤维压阻应变传感器,该传感器可以检测高达400%的大

应变,又可对 0.2 N 的微小外力作用进行响应;此外,其还可用作电加热器,在 0.6 V 电压时温度能迅速达到 45 ℃,展示了多功能纤维器件在智能可穿戴传感设备中的应用潜力。ZHANG Y J 等^[21]制备了“芯鞘”和“螺旋”式两种结构的电阻式纤维传感器,具有芯鞘结构的纤维传感器表现出应变超 580% 的高拉伸性。

采用熔体纺丝技术的聚合物必须符合熔点低于分解温度、熔融形成热稳定熔体的要求。纺丝过程中需要控制纤维的结构、导电材料的比例、拉伸速度等关键参数,调整纤维的预拉伸形态。由于聚合物在纺丝时处于熔融状态,导电材料的添加可能会干扰聚合物的熔融状态和纺丝过程的稳定性,因此熔体纺丝添加导电材料的比例少。

1.3 其他制备工艺

制备纤维式传感器除湿法纺丝和熔体纺丝外,还有涂层法、结构组合法、喷涂法、原位沉积法等,这些方法通过将导电材料转移至纤维材料表层或内部,完成纤维式传感器件的制备;或是利用弹性聚合物材料进一步封装处理,并将其作为介电层,充当保护层的作用。YU L T 等^[22]使用结构组合法将导电材料填充弹性微管内部双腔,弹性微管既是介电层又是保护层,由此构建的一种微纤维电容传感器具有响应时间快、拉伸应变大的特点。微纤维电容传感器如图 1^[22]所示。

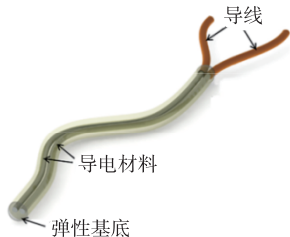


图 1 微纤维电容传感器
Fig. 1 Microfiber capacitive sensor

利用液态金属(liquid metal, LM)具有液体和金属的特性,在应变时既保持导电性又能快速响应,LEE S M 等^[23]通过将 LM 注入有叉指结构的超拉伸中空弹性纤维内部形成电极,开发的纤维电容传感器可监测人体手部各种运动。除此之外,TENG Y C 等^[24]将同轴湿法纺丝技术和涂层法相结合,制备了具有自我调节电容和体温监测功能的传感纤维。具体操作为:采用湿法纺丝将纤维素纳米纤维(cellulose nanofibers, CNFs)作鞘层, CNFs 和石墨烯(graphene, GE)充分混合作导电芯层;在制备 GE/CNFs“芯鞘”纤维上形成聚苯胺导电层,构成了电容式复合传感微纤维。但是该制备工艺复杂,导电层

易受外力影响而破损,传感器使用耐久性较差。

微流控技术是在传统湿法纺丝快速成型的基础上,结合微流体的层流效应制备微米级纤维的一种方法。该技术中,微流体受到芯片微通道尺寸的限制产生层流效应,可实现常规纺丝方法难以实现的多相纺丝液快速交联、在线组装接枝、在线结构调控等反应或流体行为^[25]。根据微流体可精确调控的特性,YU Y R 等^[26]成功制备了超弹微纤维,其使用微流体纺丝和注射法连续生成的微纤维由 PU 外壳和 LM 内芯组成,得益于微流体技术的精准流体操控能力,该纤维具有形态可调性,响应电导率良好的特点,能够充当柔性电阻应变传感器和运动指示器。WU Y T 等^[27]基于同轴微流体纺丝制备了芯鞘复合导电纤维,可直接用作电阻应变传感器。该纤维以弹性聚合物 TPU 为皮层,聚苯胺(polyaniline, PANI)为芯层, PANI 在 TPU 内部构成了连续的导电网络,避免一般涂层纤维导电层在纤维表面易磨损失效的问题;同时这种复合导电纤维对拉伸、弯曲和压力应变都能响应。MXene 又称二维过渡金属碳化物、复合物或碳氮化物,具有大比表面积和高电导率, GUO J H 等^[28]选用 MXene 为内芯流体,通过同轴微流体纺丝制备了由 MXene 封装的螺旋形海藻酸钙水凝胶电阻式微纤维,其传感信号主要取决于内芯 MXene 截面积的变化,应变增大导致纤维伸长及其截面积减小,使相对电阻的信号发生变化,具体结构如图 2^[28]所示。由图 2 可知,微通道的轴向对称排列以及海藻酸钠和钙离子二者之间的快速交联凝胶化,形成了纤维内部的中空螺旋结构。中空螺旋纤维具有优异的三维可拉伸性,拉伸应变可达 180%。

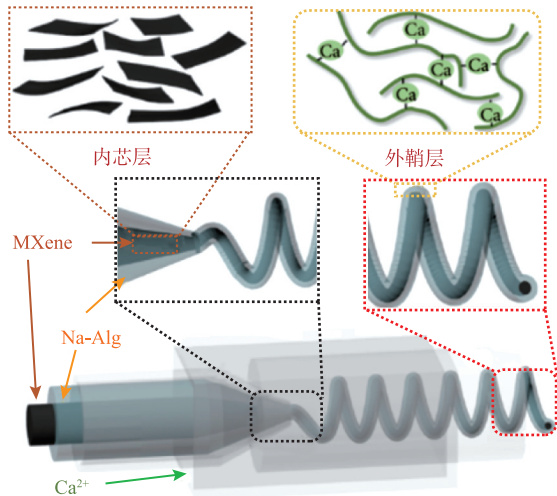


图 2 MXene 封装的螺旋结构水凝胶微纤维示意
Fig. 2 Schematic diagram of MXene encapsulated spiral structure hydrogel microfibers

就微流控技术而言,通过改变纺丝液黏度等溶液参数、芯片中微通道结构尺寸等芯片参数以及流体流速等参数来调控纤维的结构和尺寸,可以制备出具有多元结构的复合传感微纤维。微流控技术制备纤维式柔性传感器件的研究大多在实验室阶段,重点关注微流控芯片通道结构、纺丝过程中纤维固化问题,避免影响传感器的灵敏度和稳定性。

运用湿法纺丝工艺、熔体纺丝工艺以及基于纤维制备工艺方法构建的纤维式应变传感器,灵敏度较高且信号响应迅速。但是,纤维式传感器存在力学性能较弱、在复杂外力环境下结构稳定性差的问题,难以满足自动化纺织加工需求;同时导电层易脱落,传感性能不稳定;另外,集成在纺织服用品中时避免不了与人体皮肤直接接触,从而影响服用舒适性。

2 纱线式一维结构柔性应变传感器

2.1 传统包芯纱制备

一维结构纱线式传感器如图 3 所示。纱线式电子器件可在纤维式电子器件的基础上,利用包芯纱纺纱工艺加工制得,也可以直接在纱线表面构建导电层并赋予其传感响应能力,在外力作用下,通过纱线结构或表面的形变引起传感信号变化。ZHANG S C 等^[29]利用浸涂和磁控溅射方法制备了一种基于聚氨酯纱线的电阻应变传感器,为了提高纱线状传感器的使用耐久性,采用聚二甲基硅氧烷进行封装保护。UNO M O 等^[30]使用两根包芯纱交叉缠绕,组成了可对压缩和拉伸应变传感响应的一维结构电阻柔性传感器,具体见图 3(a)^[30]。利用自动化包芯纱工艺开发纱线状传感器的方法,制备效率高且成本较低,有利于纱线状传感器的大规模连续生产。ZOU S Z 等^[31]制备了具有阻燃功能的包芯纱结构式电阻柔性传感器件,利用芳纶纤维作为外包纱,得到具有优异的耐热性、隔热性能的传感纱线,其在 50~400℃ 温度范围内仍具备传感监测功能。纱线电子器件的电导率稳定性对可穿戴设备性能的稳定至关重要。为减少纱线在变形时电阻急剧上升的情况,ZHENG X H 等^[32]设计了一种同轴螺旋结构纱线,通过将聚苯胺(PANI)/MXene弹性包芯纱以线圈的形式缠绕在自身纱线上,使之具有应变不敏感特性。WU R H 等^[33]采用两根导电锦纶纱线对 PU 纱线进行包覆缠绕的新方式制备了纱线柔性电阻传感器,具体见图 3(b)^[33]。由图 3(b)可知,外包纱之间直接裸露在芯纱之上,

在长时间使用后,对导电纱损耗较大,容易导致传感性能下降。

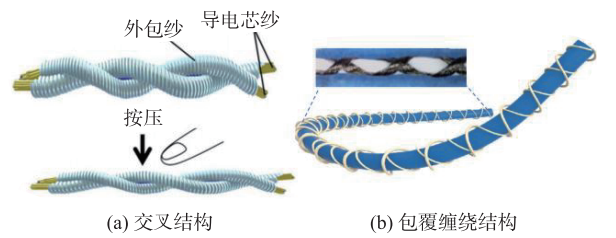


图 3 一维结构纱线式传感器
Fig. 3 Schematic illustration of one-dimensional structure sensor of yarn-based

纱线式柔性应变传感器相较于纤维式应变传感器在结构稳定性、可嵌入性、灵活性方面更具优势。利用包芯纱纺纱工艺制得纱线式柔性应变传感器是一种简单高效的制备方法,将弹性纱线和包芯纱相结合可以提高传感器的应变能力和稳定性。若进一步研究包芯纱加工工艺,优化传感器结构,将其运用到纺织品织造过程中,可以减少嵌入式柔性电子器件在人体穿着时的不适感,提升纺织品的舒适性。

2.2 新型静电纺丝技术

静电纺丝法是指利用电力将导电流体(聚合物溶液或熔体)牵引至纳米级纤维的过程。该技术具有纤维直径可调、纤维形态多样、对纤维材料适应性强等特点^[34]。为了构建一维结构传感器,HAN X、范梦晶等^[35-36]使用新型多针头水浴静电纺丝技术与包芯纱结构结合,将聚酰胺(polyamide,PA)纳米纤维包覆在镀银尼龙(silver-coated nylon,SCN)芯纱表面,制备了 SCN/PA 纳米纤维包芯纱,通过两根 SCN/PA 纳米纤维包芯纱双螺旋缠绕在高弹丝上设计了一维结构电容柔性传感器。该传感器可实时监测人体膝盖间歇、连续弯曲以及行走运动时的数据,在人体运动健康可穿戴监测领域具有潜在的应用价值。QI K 等^[37]通过静电纺丝技术直接将 PU 纳米纤维包缠在导电芯纱表面建立外包层,外包的纳米纤维结构具有较大的表面积和表面粗糙度,能够提高传感器的灵敏度。TANG J 等^[38]采用多针头水浴静电纺丝和加捻工艺制备了 CNT/TPU 复合纳米纤维纱线,为提高纱线的导电性,又浸涂了 CNT 导电材料,使传感器在 140% 的大应变下相对电阻变化率达到 440%。同时,该团队^[39]又通过此工艺将不同维度的碳基导电材料加入 TPU 纺丝液内构建多元导电网络的纱线式电阻柔性传感器,该传感器在 100% 拉伸应变时灵敏度为 17.74,具有

超过5 000次的循环耐久性。

采用新型静电纺丝技术制备的纱线式电子器件具有高电导率、低检测限、高敏感度优势,有利于提升柔性电子器件传感的响应性能。但目前该类研究还处于实验室阶段,纱线式电子器件生产效率较低,还需在宏量制备上进一步发掘潜力,从而达到连续化生产的目标。

3 一维结构柔性应变传感器在智能服用品中的应用

3.1 智能运动绷带

随着人们对身体健康的重视度不断提高,具有运动监测功能的智能服用品受到消费者的青睐。SU C L 等^[40]将制备的自供电应变响应性一维结构纤维式柔性传感器缝制在运动护腕上,直接作为手指屈伸训练工具,其传感器输出响应信号与人体手指活动同步,实现了对人体手指各种活动训练的实时监测。TANG J 等^[38]将制备的 CNT/TPU 电阻传感复合纱直接缝制成弹性自粘绷带,配戴者在篮球、羽毛球等运动时可以稳定输出臂肘弯曲角度变化数据,有利于智能运动服开发。ZHANG Y J 等^[21]将纤维式柔性电阻传感器集成在腕带中,手腕的各种弯曲伸展运动都能被准确感知和监测。NING C 等^[41]采用包芯纱结构对银纤维进行多层编织包覆后,通过螺旋方法构建一维结构柔性应变传感器,制备了用于连续监测人体不同呼吸状态的智能胸带。

基于一维结构柔性应变传感器设计的智能运动绷带能够持续监测人体不同部位及关节的运动^[42]、呼吸、心跳等生理信息。智能运动绷带作为便携式健康监测设备,可以及时了解人体状况,在个人健康管理方面发挥着重要作用。

3.2 智能手套

智能手套通过在手套中嵌入或植入一维结构柔性应变传感器监测手指的运动变化,其数据可用于评估手指的运动能力。SHUAI L 等^[43]制备了一种导电自修复应变传感的水凝胶纤维,利用该纤维可以开发出将机械动能转化为电能自供能传感智能纺织品,为多功能智能纺织品和可穿戴电子产品提供策略。为了改善传感器和纺织品之间的集成与连接缺陷,WU R H 等^[33]将纱线式柔性电阻传感器与人工神经网络算法结合开发出智能手语翻译手套。该智能手套对 26 个英语字母的识别准确率达到 99.8%,同时,其还可以借助移动设备将手语

动作转化为文本或语音,对听障群体有很大帮助。ZHANG C 等^[44]基于直接墨水书写打印技术制备了纤维式柔性电容应变传感器,将其与便携数据采集装置组合后安装在手套中,可以捕获不同通道电容信号,实时收集手势动作信息,适用于人机交互、VR 交互等基于手势操作的场景,具体如图 4^[43]所示。

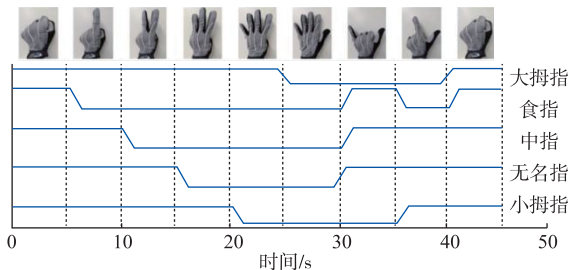


图 4 纤维式柔性电容应变传感器集成智能手套

Fig. 4 Fiber-based flexible capacitive strain sensor integrated smart glove

在康复训练中,利用智能手套分析手指运动的生理特征,有助于患者了解正确的手指康复姿势;在人机交互应用中,通过获取手指的运动信息,可以实现手指与机器之间的信息交换与合作。因而,智能手套在手势识别、远程操作、手指康复训练等方面具有潜在的应用前景。

3.3 智能服装

一维结构柔性应变传感器不仅可以应用在服用品上监测人体关节运动,还可用于脉搏和呼吸等微小健康信号的监测,将其集成于服装中可实现服装智能化和功能化。YU L T 等^[21]将微纤维电容传感器与纺织品无缝集成,设计了可以解读手势、检测肢体运动和监测呼吸频率的智能服装与智能可穿戴纺织品。TRUONG T 等^[45]将一维结构电阻柔性传感器与服装、织带结合,检测腹部呼吸振动,通过低功耗蓝牙模块将获取的电阻信号传输到计算机,计算呼吸频率。JAMATIA T 等^[46]将制备的柔性压阻传感纤维缝制在运动 T 恤、护膝、护肘等服用品中,监测人体运动呼吸频率和关节变化,对人体运动强度、运动姿势、运动训练方式进行评估分析,具体如图 5^[45]所示。NIU L 等^[47]提出用高速赛络纺技术制备包芯纱结构的纱线式电阻柔性电子器件,按照智能可穿戴纺织品的需求,利用针织技术制备嵌入式传感器的纺织柔性元件,将其通过嵌花技术无缝嵌入服装,既能保持服装的舒适性,又可实现服装的智能化。

随着柔性传感技术的发展,将一维结构柔性应变传感器与服装结合,开发智能监测人体生理信息

的智能服装,成为功能型服装开发的新趋势。



图 5 一维结构电阻应变传感器在服装上的应用
Fig. 5 One-dimensional structural resistive strain sensors for clothing applications

4 结 语

智能纺织服用品作为智能可穿戴产品之一,将产业用纺织品与电子通信及柔性传感技术相结合,成为智能纺织服用品未来发展趋势。现有制备智能纺织服用品电子器件的方式,及其与织物的结合方法存在一定的局限。将二维和三维结构的片状或块状的传感器与纺织物直接缝合或贴合,易导致纺织材料失去原本的透气性和舒适性。而一维结构柔性电子器件能够与各类纺织品相结合,在智能可穿戴领域具有非常大的潜力。目前,一维结构相关柔性电子器件在智能服装、医疗健康、运动监测等领域广泛应用。但是基于纤维和纱线制备柔性电子器件方面仍存在问题。

1)纤维状的柔性电子器件在用纺织长丝纤维工艺生产时,存在纤维长度、均匀性以及机械化生产适应性问题,添加的导电材料难以在聚合物中分布均匀,使得导电性能不稳定。此外,具有导电涂层的纤维易受涂层界面强度和涂层厚度影响,导致传感器耐久重复性和应变能力变弱。

2)纱线是介于纤维和织物之间的具有一定力学性能的纤维集合体,纱线状电子器件相对于纤维状电子器件容易制备,可以最大限度保持纺织材料的基本属性和应用需求。有关纱线状电子器件的研究大多以形成涂层的方式制备具有传感响应纱线,将赋予纱线功能性的材料与纱线进行简单结合,未能充分发挥纱线自身所具备的结构优势,甚至损害了纱线本身的柔软性。而选用生产包芯纱

工艺制备的一维结构柔性应变传感器,通过选用合适的纱线和调控包缠角度,可以使传感器具有良好的重复稳定性与较大的应变承受能力,这种自动化可连续加工的制备工艺,有利于推动柔性传感器的商业化生产和在智能纺织品中的应用。

参考文献:

[1] HE X C, WANG W Y, YANG S J, et al. Adhesive tapes: from daily necessities to flexible smart electronics [J]. Applied Physics Reviews, 2023, 10(1): 011305.

[2] ALIYANA A K, STYLIOS G. A review on the progress in core-spun yarns (CSYs) based textile TENGs for real-time energy generation, capture and sensing [J]. Advanced Science, 2023, 10(29): 2304232.

[3] LIU Q, ZHANG Y Q, SUN X W, et al. All textile-based robust pressure sensors for smart garments[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454: 140302.

[4] WANG Q L, HUANG X W, HAN F L, et al. Superhydrophobic, biocompatible and durable nanofiber composite with an asymmetric structure for anisotropic strain sensing and body motion detection [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 137899.

[5] 李玲,刘庆生,李大伟,等. 三维非织造材料基压阻式传感器的制备与性能[J]. 服装学报, 2023, 8(6): 502-507.

LI Ling, LIU Qingsheng, LI Dawei, et al. Preparation and performance of piezoresistive sensors based on three-dimensional nonwovens[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(6): 502-507. (in Chinese)

[6] LEE Y, KIM H, KIM Y, et al. A multifunctional electronic suture for continuous strain monitoring and on-demand drug release[J]. Nanoscale, 2021, 13(43): 18112-18124.

[7] SHENG F F, ZHANG B, ZHANG Y H, et al. Ultras-tretchable organogel/silicone fiber-helical sensors for self-powered implantable ligament strain monitoring[J]. ACS Nano, 2022, 16(7): 10958-10967.

[8] 宋伟宁,张佩华. 基于三维模拟的智能文胸压力舒适性优化设计[J]. 服装学报, 2023, 8(4): 315-322.

SONG Weining, ZHANG Peihua. Pressure comfort optimization design of intelligent bra based on 3D simulation [J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(4): 315-322. (in Chinese)

[9] CHO C J, CHUNG P Y, TSAI Y W, et al. Stretchable sensors: novel human motion monitoring wearables [J]. Nanomaterials, 2023, 13(16): 2375.

[10] YU M, JIN J Q, WANG X, et al. Development and design of flexible sensors used in pressure-monitoring

- sports pants for human knee joints[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(22): 25400-25408.
- [11] YU Y N, LUO C, CHIBA H, et al. Energy harvesting, and wireless communication by carbon fiber-reinforced polymer-enhanced piezoelectric nanocomposites[J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108588.
- [12] ZHU Y F, ZHAO B B, LEI L L, et al. Facile construction of a flexible smart core-sheath flax yarns with temperature-responsive resistance for ultra-fast fire-alarm response[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144718.
- [13] ZHAI S L, KARAHAN H E, WANG C J, et al. 1D supercapacitors for emerging electronics: current status and future directions[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(5): e1902387.
- [14] YIN Z, LU H J, GAN L L, et al. Electronic fibers/textiles for health-monitoring: fabrication and application [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(3): 2200654.
- [15] LIANG Q Q, ZHANG D, WU Y C, et al. Stretchable helical fibers with skin-core structure for pressure and proximity sensing[J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108598.
- [16] HU S M, HAN J, SHI Z J, et al. Biodegradable, super-strong, and conductive cellulose macrofibers for fabric-based triboelectric nanogenerator [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 115.
- [17] WANG F, CHEN J W, CUI X H, et al. Wearable ionogel-based fibers for strain sensors with ultrawide linear response and temperature sensors insensitive to strain[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2022, 14(26): 30268-30278.
- [18] ZHONG J P, CHEN R R, SHAN T T, et al. Continuous fabrication of core-sheath fiber for strain sensing and self-powered application [J]. *Nano Energy*, 2023, 118: 108950.
- [19] 赵蕾. 电容型柔性复合传感纤维的制备及电气性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022: 41-45.
- [20] HE Y, WAN C W, YANG X, et al. Thermally drawn super-elastic multifunctional fiber sensor for human movement monitoring and joule heating [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023: 2202079.
- [21] ZHANG Y J, LI X Y, KIM J, et al. Thermally drawn stretchable electrical and optical fiber sensors for multimodal extreme deformation sensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(6): 2001815.
- [22] YU L T, FENG Y, SOM T S D, et al. Dual-core capacitive microfiber sensor for smart textile applications [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, 11(36): 33347-33355.
- [23] LEE S M, BHUYAN P, BAE K J, et al. Interdigitating elastic fibers with a liquid metal core toward ultrastretchable and soft capacitive sensors: from 1D fibers to 2D electronics[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(12): 6275-6283.
- [24] TENG Y C, WEI J, DU H B, et al. A solar and thermal multi-sensing microfiber supercapacitor with intelligent self-conditioned capacitance and body temperature monitoring [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(23): 11695-11711.
- [25] 张波, 胡希丽, 曲丽君. 微流控纺丝技术及多元结构微流控纤维柔性可穿戴应用[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(5): 2536-2549.
- ZHANG Bo, HU Xili, QU Lijun. Microfluidic spinning technology and flexible wearable application of multi-structure microfluidic fiber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(5): 2536-2549. (in Chinese)
- [26] YU Y R, GUO J H, MA B, et al. Liquid metal-integrated ultra-elastic conductive microfibers from microfluidics for wearable electronics [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(20): 1752-1759.
- [27] WU Y T, YAN T, ZHANG K Q, et al. A hollow core-sheath composite fiber based on polyaniline/polyurethane: preparation, properties, and multi-model strain sensing performance [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(1): 2200777.
- [28] GUO J H, YU Y R, ZHANG D G, et al. Morphological hydrogel microfibers with MXene encapsulation for electronic skin[J]. *Research*, 2021: 7065907.
- [29] ZHANG S C, XU J T. PDMS/Ag/mxene/polyurethane conductive yarn as a highly reliable and stretchable strain sensor for human motion monitoring [J]. *Polymers*, 2022, 14(24): 5401.
- [30] UNO M O, MORITA S, OMORI M, et al. Pressure sensor yarns with a sheath-core structure using multi-fiber polymer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 337: 113440.
- [31] ZOU S Z, WANG Y, LI D Q, et al. Facile and scalable fabrication of stretchable flame-resistant yarn for temperature monitoring and strain sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138465.
- [32] ZHENG X H, WANG P, DING B B, et al. Coaxial-helix MXene/PANI-based core-spun yarn towards strain-insensitive conductor and supercapacitor[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36: 106788.
- [33] WU R H, SEO S, MA L Y, et al. Full-fiber auxetic-interlaced yarn sensor for sign-language translation glove assisted by artificial neural network [J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 139.

- [34] TENG Y C, WEI J, DU H B, et al. A solar and thermal multi-sensing microfiber supercapacitor with intelligent self-conditioned capacitance and body temperature monitoring [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8 (23): 11695-11711.
- [35] HAN X, FAN M J, YUE X Y, et al. Linear flexible capacitive sensor with double helix structure based on multi-needle water-bath electrospinning technology [J]. *Smart Material Structures*, 2023, 32(3): 035012.
- [36] 范梦晶, 吴玲娅, 周歆如, 等. 镀银聚酰胺 6/聚酰胺 6 纳米纤维包芯纱电容传感器的构筑 [J]. *纺织学报*, 2023, 44(11): 67-73.
- FAN Mengjing, WU Lingya, ZHOU Xinru, et al. Construction of capacitive sensor based on silver coated polyamide 6/polyamide 6 nanofiber core-spun yarn [J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(11): 67-73. (in Chinese)
- [37] QI K, WANG H B, YOU X L, et al. Core-sheath nanofiber yarn for textile pressure sensor with high pressure sensitivity and spatial tactile acuity [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 561: 93-103.
- [38] TANG J, WU Y T, MA S D, et al. Flexible strain sensor based on CNT/TPU composite nanofiber yarn for smart sports bandage [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 232: 109605.
- [39] TANG J, WU Y T, MA S D, et al. Sensing mechanism of a flexible strain sensor developed directly using electrospun composite nanofiber yarn with ternary carbon nanomaterials [J]. *iScience*, 2022, 25(10): 105162.
- [40] SU C L, YU Q H, YANG X, et al. One-step braided tubular supercapacitor for integration with a fibrous strain sensor as a wearable fibrous self-powered integrated system [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2023, 6 (20): 10564-10577.
- [41] NING C, CHENG R W, JIANG Y, et al. Helical fiber strain sensors based on triboelectric nanogenerators for self-powered human respiratory monitoring [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 2811-2821.
- [42] 冯雨果, 刘宇, 周晋. 可穿戴惯性传感器在全膝关节置换术后步态分析中的应用进展 [J]. *皮革科学与工程*, 2023, 33 (6): 52-58.
- FENG Yuguo, LIU Yu, ZHOU Jin. A review of gait analysis after total knee arthroplasty using wearable inertial measurement sensors [J]. *Leather Science and Engineering*, 2023, 33 (6): 52-58.
- [43] SHUAI L, GUO Z H, ZHANG P P, et al. Stretchable, self-healing, conductive hydrogel fibers for strain sensing and triboelectric energy-harvesting smart textiles [J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105389.
- [44] ZHANG C, OUYANG W Y, ZHANG L, et al. A dual-mode fiber-shaped flexible capacitive strain sensor fabricated by direct ink writing technology for wearable and implantable health monitoring applications [J]. *Microsystems and Nanoengineering*, 2023, 9: 158.
- [45] TRUONG T, KIM J. A wearable strain sensor utilizing shape memory polymer/carbon nanotube composites measuring respiration movements [J]. *Polymers*, 2024, 16 (3): 373.
- [46] 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.
- [47] NIU L, WANG J, WANG K, et al. High-speed sirospun conductive yarn for stretchable embedded knitted circuit and self-powered wearable device [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(1): 154-167.

(责任编辑:张 雪)