

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.001

柔性力敏传感器发展现状

苏倩¹, 刘学婧¹, 张军诗², 刘磊^{3,4}, 邢宇^{1*}

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710600;
2. 西北工业大学航空学院, 陕西西安 710072; 3. 西北工业大学机电学院, 陕西西安 710072;
4. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘要:集高灵敏度、高柔韧性和易集成特点的柔性力敏传感器在电子皮肤、可穿戴设备、生物医药和人工智能等领域得到了广泛的研究。笔者通过总结压阻式、电容式、压电式和摩擦电型压力传感器近年来的研究进展, 归纳分析了不同新材料所制成传感器的优势和缺陷。在全面介绍了最新的柔性力敏传感器发展后, 讨论了当下柔性传感器所存在的问题以及潜在的发展前景: 探索新的传感原理, 挖掘新型复合材料, 研发性能优异的新型柔性力敏传感材料和器件。传感器综合性能的提升将是未来发展的方向。

关键词:柔性力敏传感器; 可穿戴设备; 导电复合材料; 传感机理

中图分类号: TH73 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2023)04-0001-14

Development Status of Flexible Force Sensor

SU Qian¹, LIU Xuejing¹, ZHANG Junshi², LIU Lei^{3,4}, XING Yu^{1*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China;
2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flexible force-sensitive sensors with high sensitivity, flexibility and easy integration have been widely studied in the fields of electronic skin, wearable devices, biomedicine and artificial intelligence. This paper summarizes the research progress of piezoresistive, capacitive, piezoelectric and triboelectric pressure sensors in recent years, and condenses the advantages and disadvantages of sensors made of different new materials. After a comprehensive introduction of the latest development of flexible force-sensitive sensors, the existing problems and potential development prospects of flexible sensors are discussed. Exploring new sensing principles, mining new composite materials, developing new flexible force-sensitive sensing materials and devices with excellent performance. Realizing the improvement of comprehensive performance will be the key direction in the sensor field in the future.

Keywords: flexible force sensor; wearable device; conductive composite; sensing mechanism

由于传统的半导体和金属基压力传感器具有灵敏度低、传感范围窄、拉伸能力有限和分辨率低等缺点, 难以应用于柔性接触或可穿戴设备上。因此, 随着材料科学、制造科学和纳米技术的快速发展, 智能、微型、柔性和可穿戴的新型柔性传感器技术应运而生, 改变

了传统信息器件的刚性物理属性, 实现了信息与人物和环境的有效融合; 并能以高灵敏度检测应变, 在人体内外环境接触过程中提供具体需求的重要信息。在可穿戴电子、电子皮肤、治疗、健康监测、机器人人机交互和触觉感知等领域具有重要意义。近年来, 柔性力敏

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2023-05-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M683682XB); 陕西省教育厅项目(22JK0404); 陕西省高速公路施工机械重点实验室项目(300102251506); 特种车辆及其传动系统智能制造国家重点实验室开放课题(GZ2019KF011)。

第一作者简介: 苏倩(1998), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械臂和柔性传感器。通信作者: 邢宇(1985), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要研究方向为柔性材料数值模拟和机构动/静力学仿真。E-mail: reevesxing@163.com

传感器在机械、材料、力学、生物以及信息等学科应用需求广泛,激发了国内外学者的研究开发热情,他们在前人的基础上制备各种不同的柔性力敏传感器,对灵敏度、周期稳定性和制备过程都进行了改进。根据其传感机理,柔性力敏传感器一般分为压阻式、电容式、压电式和摩擦电型4种^[1]。由于每种传感器都有其优缺点,所以我们根据实际的应用领域选择与其相匹配的传感器。其中,压阻式压力传感器可应用于医疗检查、可穿戴呼吸监测、健康监测和人机界面等。正如我们所知道的,市场上已经出现一些商业产品,比如令人难以置信的智能文胸,它可以通过电阻变化监测心跳,从而预防疾病的发生^[2]。电容式压力传感器不仅可以应用于温度不敏感的环境^[3],而且可以通过感应电容技术实现无线传输^[4];压电式压力传感器由于其自供电特性,已广泛应用于可穿戴电子设备、电子皮肤和医疗检测等领域;摩擦电型可以依靠被测对象自身和传感器之间接触与分离产生摩擦电荷,从而实现外界压力的动态感知。

1 压阻型柔性力敏传感器

压阻型柔性力敏传感器是一种将外部应力或应变刺激转换为电阻信号输出的传感器,是目前研究最为广泛的一种柔性力敏传感器。可分为压阻型柔性应变传感器和压阻型柔性压力传感器。通常由柔性基体材料和导电材料有机组合而成,这些材料在外界应力或者应变作用下,内部的导电通路发生了变化,从而引起了电阻值的变化,因此具备了传感的功能。引起导电通路的变化主要方式有:材料几何尺寸的变化(参数式)、导电颗粒间距变化(隧道效应)和微裂纹接触电阻变化等^[5]。

1.1 压阻型柔性应变传感器

压阻型柔性应变传感器是将物体受外因变形导致内部产生相互作用的内力信号转化为电阻响应的传感器件。近年来,随着材料科学及纳米技术等的发展,研究者在柔性应变传感器的研究方面取得了突破。

2014年Kong等^[6]利用隧道效应的压阻机制,采用溶液共混法制备炭黑-聚二甲基硅氧烷(PDMS)导电复合材料,然后采用一步接触转印法制备柔性应变传感器,应变测量范围达80%。在此基础上为了提高传

感器的稳定性,2014年Amjadi等^[7]将液态PDMS渗入导电银纳米(AgNWs)层,随后将其半固化,使得AgNWs均匀地嵌入PDMS弹性体中,最后再在其表面固化一层PDMS封装,获得了AgNWs-PDMS导电复合材料基柔性应变传感器,传感范围可达70%,灵敏度也较高。这种三明治结构使其稳定性得到提高,在监测手指弯曲运动时展现出良好的传感特性,如图1(a)所示。为了解决正压力对柔性应变传感器的耦合影响,2018年韩国学者Oh等^[8]提出一种压力不敏感的柔性应变传感器,将己烷与PDMS和碳纳米管(CNT)水溶液超声均匀混合,多步固化制得多孔结构的CNT-PDMS导电复合材料,该柔性多孔的导电复合材料具有优异的应变传感特性。压缩变形时微孔坍塌,电阻变化不明显,表现出对正压力不敏感特性,如图1(b)所示。但上述传感器存在可穿戴特性较差、制备工艺较复杂、制备成本较高以及批量制备较难等问题。

针对上述传感器所存在的问题,2018年Tang等^[9]提出了一种高温油浴辅助同轴纺丝技术制备核-壳结构纤维状柔性力敏传感器的新方法。用碳纳米管-硅橡胶复合材料为芯,纯硅橡胶为护套,采用高温硅油辅助同轴纺丝技术方法制备纳米复合纤维,如图1(c)所示。开发了碳纳米管/硅橡胶核-壳复合纤维传感器,该传感器具有优异的应变传感特性,如较大的测量范围(0%~330%)、快速的响应时间(<300ms)和良好的周期稳定性(循环10000次);同时由于其特殊的结构,因此还具备了超高的灵敏度和拉伸能力,良好的稳定性和耐洗性。该传感器可用于服装等电子设备中监测个人健康状况,且该方法简单、成本低,具有实现工业化的潜力。为进一步提高传感器的灵敏度,2021年Zhang等^[10]制备了TiO₂@CF/PDMS复合应变传感器,如图1(d)所示。这一复合应变传感器中TiO₂纳米线垂直环绕(carbon fiber, CF)周围,具有高孔结构,因此制备的应变传感器灵敏度显著提高。此外,在不同应变率下进行单调试验时,具有显著的应变率相关特性。该传感器还展示出一个非常快速的响应行为,因此,这一方法为柔性电子器件的应用提供了又一种新的技术,但此类柔性应变传感器因其导电机理,存在较强的非线性等问题,灵敏度和测量范围十分有限。

为了提高柔性应变传感器的传感性能,近年来研

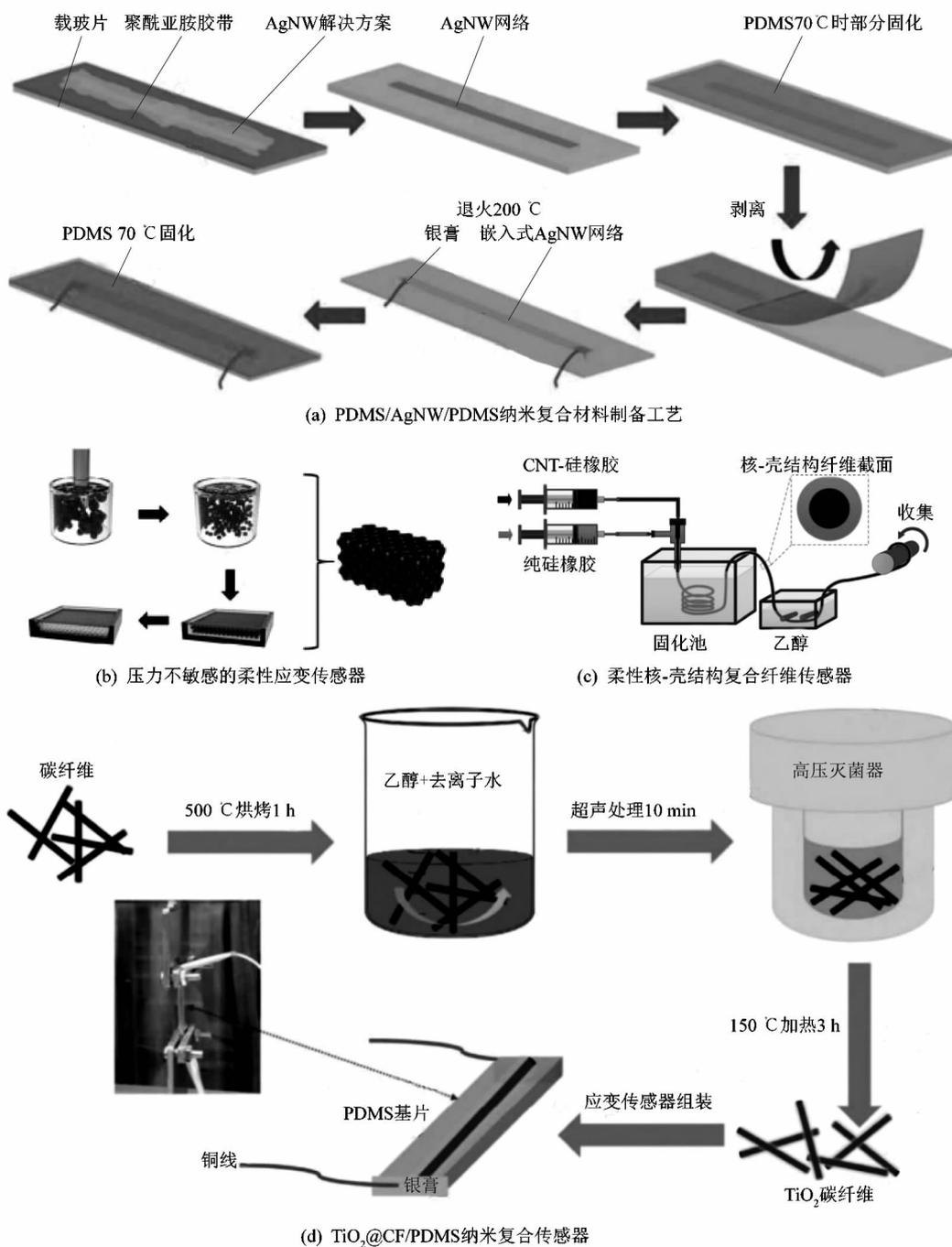


图 1 压阻型柔性应变传感器

Figure 1 Piezoresistive flexible strain sensor

究者纷纷采取各种新颖的材料和制造技术来获得灵敏度和测量范围的提升。韩国学者 Kang 等^[11-12]从蜘蛛足的狭缝感觉器官获得灵感,在柔性聚合物基底(聚氨酯丙烯酸酯,PUA)上沉积 20 nm 厚的铂薄层,再通过弯曲使铂薄层形成纳米级的裂缝,从而获得具有高灵敏度的微裂缝(或裂纹)型的柔性应变传感器。虽

然此类型的传感器灵敏度极高,但是测量范围有限(<5%)。为了增大测量范围,国内外学者在微裂纹型柔性应变传感器方面做了大量工作,但通常都是以牺牲传感器的灵敏度来获得较宽的测量范围,难以实现灵敏度和测量范围的兼顾。

值得注意的是,这种微裂纹型或导电复合材料型

的柔性应变传感器的成本高、制造工艺复杂以及样片呈平面状不易穿戴,一直以来都是其产业化应用面临的难题。为此,学者们相继提出了许多穿戴性良好、工艺简单、成本低廉的柔性应变传感器。例如: Cheng, Wang 和 He 等学者提出纤维状(或线状)的柔性应变传感器^[13-17],展现出良好的穿戴和编织特性。

1.2 压阻型柔性压力传感器

压阻型柔性压力传感器是将外部压力信号转化为电阻响应的传感器件,柔性高分子导电复合材料也常用作柔性压力传感器,其压阻机理与柔性应变传感器类似,只是压力传感器感知力的作用方向通常垂直于基面^[18]。受外界力作用方向的影响,通常柔性压力传感器的电阻随压力的增加而减小,呈现负压阻系数效应。这主要是压缩变形时,材料内部导电颗粒或接触面靠近,导电颗粒间距减小或电接触面积增大而导致的电阻减小^{[6]1}。而柔性应变传感器通常呈现正压阻系数效应,拉伸变形通常使得导电粒子间距增加,电阻随之增大^[19]。

由于微结构具有在微小压力下易变形的特点,国际学者将更多的精力投入到微结构的柔性压力传感器的研究上,相继提出了各种利用微结构之间相互接触

导致电阻变化进而实现传感的柔性压力传感器,如微金字塔结构、微圆柱结构、微圆顶结构和多级微结构型等。具体结构如图 2(a) 所示^[20-21]。2011 年 Cheng 等^[22]在 PDMS 中分散铜粉、炭黑及银粉导电填料,获得了具有压力响应的高分子导电复合材料。如图 2(b) 所示,柔性压力传感器的电阻随压力增大而减小,呈负压阻系数效应,将其制作成柔性压力传感阵列,展现出良好的柔软特性,能够准确探测压力分布。

目前学者普遍采用微结构增敏技术,旨在提高传感器的灵敏度,虽然在低压范围内传感器灵敏度得到极大提高,但传感范围普遍较小。为了均衡灵敏度和测量范围,2018 年韩国学者 Lee 等^[23]采用多层微结构堆叠的方式制备柔性压力传感器,如图 2(c) 所示,灵敏度和测量范围均得到极大提高,但其制造方法复杂、制造设备昂贵、无法批量生产以及测量范围相对较小 (< 10 kPa),因此限制了微结构柔性力敏传感器的广泛应用。

为了降低生产要求,2019 年 Huang 等^[24]采用 3D 打印方式制造多孔结构的石墨烯基柔性压力传感器,如图 3(a) 所示,虽然可以实现传感器的批量化生产,且成本相对较低,但是其制备的柔性压力传感器呈现

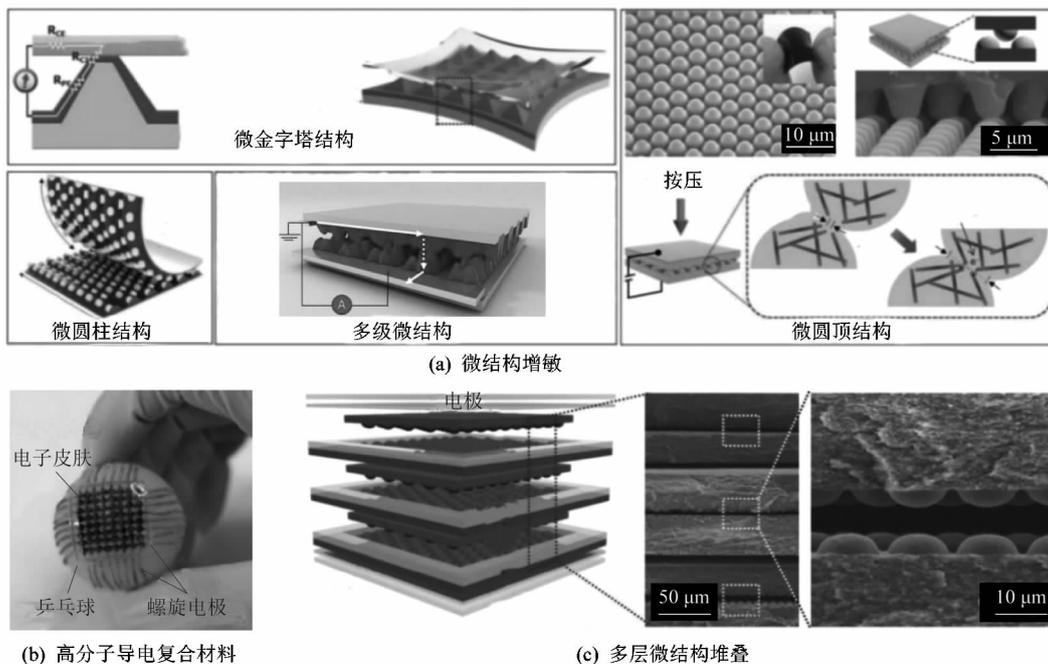


图 2 微结构柔性压力传感器

Figure 2 Micro-structure flexible pressure sensor

非单调压力响应,极大地限制其实际工程应用。

在降低制造成本方面,2021年 Hao 等^[26]开发了一种低成本制造的可穿戴式柔性压阻(laser induced graphene, LIG)压力传感器,如图3(b)所示,由2个三维激光诱导石墨烯(LIG)泡沫电极组装在聚酰亚胺薄膜上。2个泡沫电极之间的气隙设计使传感器的检测限低至0.274 Pa,在运动检测和手腕脉搏监测中具有良好的传感性能。在2个泡沫电极之间添加球形MoS₂纳米颗粒,灵敏度提高至88 kPa⁻¹,并增加了传感范围,显著优于以往传感器,在补充现有的可穿戴医疗监测设备方面显示了巨大的潜力。

He 等^[25]开发了一种基于高导电性石墨烯(ISC)

薄膜的压阻压力传感器。该传感器具有前所未有的综合性能,灵敏度高达1 875.53 kPa⁻¹,线性探测范围宽为0~40 kPa,稳定性高,峰值信噪比高达78 dB,具有1.5万个周期的高耐久性,响应时间0.5 ms,恢复时间0.8 ms,可以检测出的最小压力限为1.8 Pa,如图3(c)所示。基于该传感器的优良性能,He 等构建了一种通用的高精度无线可穿戴脉冲监测系统,首次提供了在剧烈运动(跑步或骑车)干扰下细微脉搏信号的实时信息,有望为未来的个性化诊断应用提供更丰富和准确的信息。

迄今为止,为了提高压阻式压力传感器的灵敏度,各国学者进行了大量的研究,取得较好进展的同时发

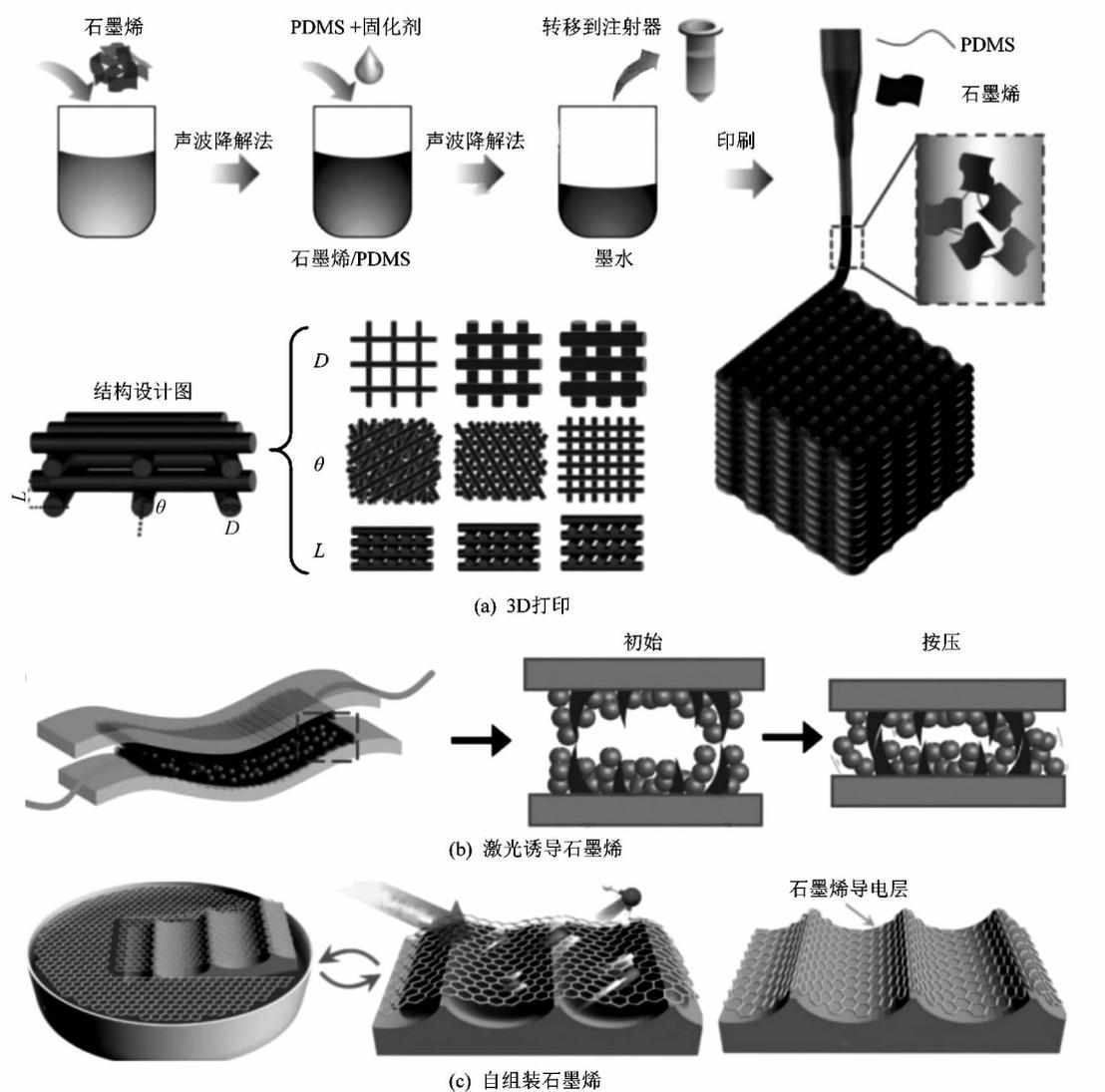


图3 近年来典型的柔性压力传感器

Figure 3 Typical flexible pressure sensors in recent years

现压阻式压力传感器存在着较大的滞后性,限制了该器件的应用,并且其温度稳定性非常差,难以在温度变化大的环境中工作,因此压阻式压力传感器仍旧面临着很大的挑战。

2 压容型柔性力敏传感器

压容型柔性力敏传感器主要是基于平行板电容器的电容变化原理,传感机理是在外力作用下其结构参数变化,即当电容型传感器受到机械变形时,结构参数的变化引起电容的变化,从而具有力敏传感特性。为了提高电容式压力传感器的性能,研究人员普遍关注于介电层和电极的材料以及结构的改进。

2011年,Lipomi等^[27]基于CNT电极和透明硅橡胶介电层设计了一种电容型压力传感器;整体结构柔软性好,具有一定的透明度,但是其灵敏度较低,难以探测微小压力。为了进一步提高微弱信号的探测能力,Pang等在使用微结构基础上,提出了一种可以完美地贴附于皮肤的电容型柔性压力传感器,用于监测脉搏信号,其结构如图4(a)所示^[28]。介电层为微结构(金字塔)柔性薄膜,贴附表面分布微纤维用以增大有效接触面积,从而提高传感器的探测能力,同时灵敏度可以通过微纤维形貌尺寸进行有效调节,能够精确地探测脉搏信号。

为了提高介电层的压缩特性以提高灵敏度,研究者们相继提出各种形式的微结构及其成形方法,即介质层可以在较小的压力输入水平下发生高度变形,从而大大提高了灵敏度。2016年Lee等开发了一种低成本的柔性压力传感器,该传感器是基于一种硅氧烷聚合物和水滴的弹性聚合物材料制成的多孔膜,如图4(b)所示,在小于0.02 kPa低压下的灵敏度为1.18 kPa⁻¹,响应时间为150 ms。Kang等^[29]利用一定直径的聚苯乙烯珠制备PDMS介质层的多孔结构,如图4(c)所示,在低压下具有0.63 kPa⁻¹的高灵敏度,响应和松弛时间约40 ms,超低压检测2.42 Pa,超过10 000次工作循环的耐久性和稳定性。

除上述2种方法外,还可以通过化学反应在PDMS中生成气体来获得具有微孔结构的介质层。Kou等^[41]在PDMS中加入NH₄HCO₃,搅拌均匀,加热分解NH₄HCO₃得到PDMS海绵,如图4(d)所示。该

介质层具有性能高、灵敏度高、响应时间快(7 ms)、检出限低(5 Pa)、稳定性好、可恢复性和重复性好等特点。

2017年Wang等^[30]采用3D多孔结构的氧化石墨烯(GO)海绵作为介电层,石墨烯作为电极层,制作了一种柔性压力传感器,灵敏度达0.8 kPa⁻¹,测量范围为0~4 kPa。此外,该传感器具有快速的松弛时间(1 s)、良好的耐久性和压力定位的空间分辨率,在低加载范围的微压力检测中显示出巨大的潜力。

为避免微孔结构会降低介电常数从而影响灵敏度的问题,2019年Yang等^[31]制造了一种新型的多孔锥体介质层(PPDL),在电容式压力传感器中实现了前所未有的灵敏度。在压力<100 Pa时,电容式传感器的灵敏度为44.5 kPa⁻¹,如图4(e)所示。该传感器灵敏度的增加是由于较低的压缩模量和在压力作用下有效介电常数的变化较大,因此具有超高的灵敏度,而且对应力和温度均无响应。

其他的微结构介质层也被许多研究小组研究过,2018年,Ma等^[31]报道了一种采用简单微阵列结构PDMS介质层的高灵敏度柔性电容式压力传感器,如图5(a)所示。该传感器采用涂覆银纳米线(AgNWs)的PDMS柔性衬底作为上/下电极材料,并采用具有微阵列结构的PDMS介质层来保证压力传感器的高灵敏度,在低压范围(0~2 000 Pa)内灵敏度高达2.04 kPa⁻¹,检出限低,响应时间快。

2019年Luo等^[32]开发了一种由倾斜微柱阵列结构介质层增强的电容式传感器,如图5(b)所示。该传感器基于PDMS介质层结构,倾斜微柱阵列,在大范围内高度均匀,并与镀金电极紧密结合。倾斜微柱阵列呈现弯曲变形而不是压缩变形,使电极之间的距离更容易改变,因此其压力灵敏度为0.42 kPa⁻¹,检出限为1 Pa,非常小。该传感器的一个显著优点是可以切割成任意形状的较小传感器,每个较小的传感器与原来的大传感器具有相同的传感特性,从同一个传感器切下的单个传感器可以相互替换,在遭受机械损伤过程中和损伤后,传感器可以提供连续的信号输出,不会出现突然故障。

压容型柔性压力传感器的结构简单、单一,通常为三明治结构。其响应速度较快(<100 ms),测量精度

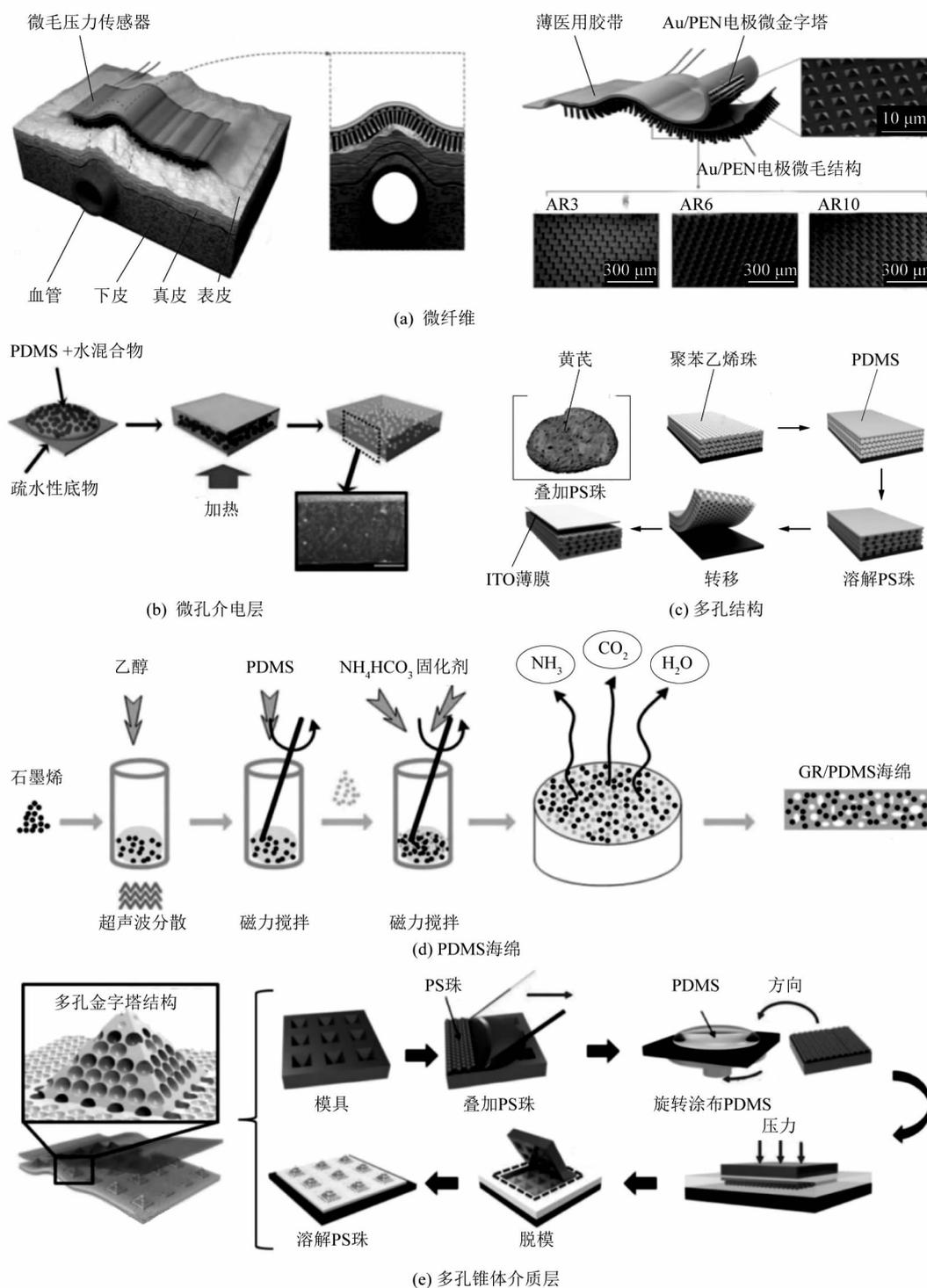


图4 压容式柔性压力传感器

Figure 4 Pressure and volume type flexible pressure sensor

较高,迟滞小,常用于电子皮肤、医疗监测等领域,但其探测电路复杂,易受电磁干扰和寄生电容影响,极大限制了应用范围。在前沿研究领域,压容式柔性传感器主要集中在探索新材料和新结构上,但受其固有缺陷

的限制,其研究热度不如压阻型柔性传感器。

3 压电型柔性力敏传感器

压电型柔性力敏传感器是在外界应力/应变作用下材料内部电偶极子在电场中发生排列改变而产生电

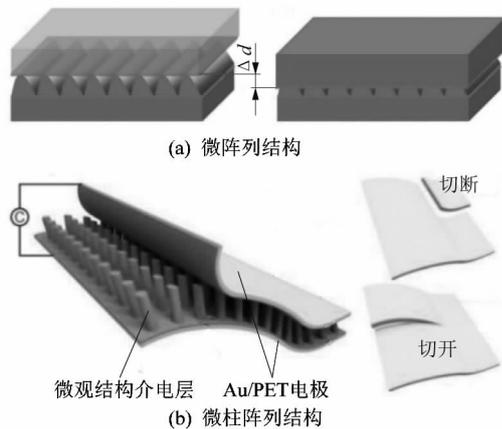


图5 微结构压容式柔性传感器

Figure 5 Micro-structure pressure-volume flexible sensor

响应的传感器^[33-35]。相较于压阻式、电容式等往往需要外部电源驱动的传感器,自供电的压电式压力传感器能够使机械能和电能相互转化,无需外加电源,被认为是解决即将到来的可穿戴医疗传感器时代的功耗问题的有希望候选者。压电式压力传感器主要由压电敏感材料组成,可以直接响应机械力产生电信号,方便实现自供电的传感器系统,其传导机制可以描述为:当材料受外力变形时,内部会发生正、负电荷分离,在材料相对的2个表面上,会出现排列相反的正、负电荷,内部会形成电位差,研究这些电位差以确定外力的影响。

压电材料中,锆钛酸铅(PZT)、钛酸钡(BaTiO_3)和石英等由于其自身压电特性较差和固态刚性特性的限制,在柔性传感器领域的研究相对较少,且有的无机压电材料(PZT)含有重金属并不适合可穿戴应用。1969年日本科学家Kawai发现聚偏氟乙烯(PVDF)有着极高的压电电压常数($200 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$),其偶极子在压力作用下发生重取向,从而形成内部极化电场,导致电极上积累感应电荷,表现出压电响应特性;并且通过掺杂其它共聚物、改善工艺等方法可以进一步提高PVDF的结晶度^[36]。学者们通常将无机压电材料掺杂到柔性聚合物(PVDF、PDMS等)基体中来获得柔性压电材料。

2011年Wang等报道了一种基于PVDF织物的力传感器,其具有良好的柔韧性和透气性,可作为一种特定的人体相关传感器。2013年,Sharma等^[37]在前人

基础上将PVDF和三氟乙烯(TrFE)以一定比例(7:3或8:2)混合获得性能优异的压电薄膜,并将其用于导尿管的压力监测,压力响应范围为 $0 \sim 40 \text{ kPa}$,平均灵敏度为 $13.2 \mu\text{V} \cdot \text{kPa}^{-1}$,如图6(a)所示。

2016年Shin等^[38]利用氧化锌(ZnO)纳米线/PVDF复合膜成功地制备了一种高灵敏、可穿戴和无线的压力传感器。由于其高介电常数、低极化响应时间和优良的耐久性,混合膜可以作为实时压力传感器监测心率。为了获得更高灵敏度的压电压力传感器,2017年Wang等^[39]通过简单的3步热压法演示了蜂窝式氟碳压电压力传感器(FPS)。通过在电池内部构建微米大小的空隙,结合氟碳极其出色的电荷存储能力,可以实现巨大的压电活性。柔性FPS在低压($< 1 \text{ kPa}$)下具有显著的灵敏度($7380 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$),响应时间快(50 ms),检出限极低(5 Pa),稳定性高(3万次),如图6(b)所示。

压电效应已广泛应用于压力传感器的动态信号检测中。但这些压电感应压力传感器在测量由动态应力产生的压电势驱动的外部负载中的瞬态电子流所产生的静态信号方面存在挑战。2017年Chen等^[40]提出了一种用于静态测量的纳米线/石墨烯热结构压力传感器。与传统的纳米线或石墨烯压力传感器相比,该传感器可以测量静态压力,灵敏度高达 $9.4 \times 10^3 \text{ kPa}^{-1}$,响应时间低至57 ms。2018年Xie等^[41]采用冷冻铸造法制备了层状PZT结构,并将PDMS基体浸渍到孔板中制备了压电复合材料。PZT-PDMS复合材料的有效纵向压电系数为 $750 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$,高于整体陶瓷材料的有效纵向压电系数。Park等^[42]展示了一种基于PZT薄膜的自供电柔性压电脉冲传感器,柔性压电传感器的灵敏度为 0.018 kPa^{-1} ,响应时间为60 ms,在5000次推动循环下具有良好的机械稳定性。同年,Guo等^[43]利用静电纺丝技术制备了PVDF/ BaTiO_3 纳米纤维薄膜,并在两侧贴附铝箔电极,获得了具有良好柔韧性的柔性力敏(压力/弯曲)传感器,如图6(c)所示。掺杂 BaTiO_3 有效提高了PVDF压电材料的压电特性,可用于人体运动等动态监测。但是,其输出电流为纳安培级,通常需要后续放大电路。

此外,2021年Kannichankandy等^[44]提出一种压电式可穿戴压力传感器,该传感器使用聚苯胺(PANI)

与纤维素纸(CP)基板结合,采用简单的浸涂法将传感材料涂覆在纸上,制备出超低成本传感器。该传感器可用于大规模生产,如图 6(d)所示。在多个 PANI-CPs 叠加时,柔性传感器的灵敏度达到 2.23 kPa^{-1} ,响

应速度快,可达 70 ms ,工作范围 $2 \sim 90 \text{ kPa}$ 。此外,该传感器表现出优异的灵活性、卓越的稳定性,可达 800 个加载卸载循环;以及具有生物降解性;还可以精确地检测到手指快速敲击等人机交互过程。

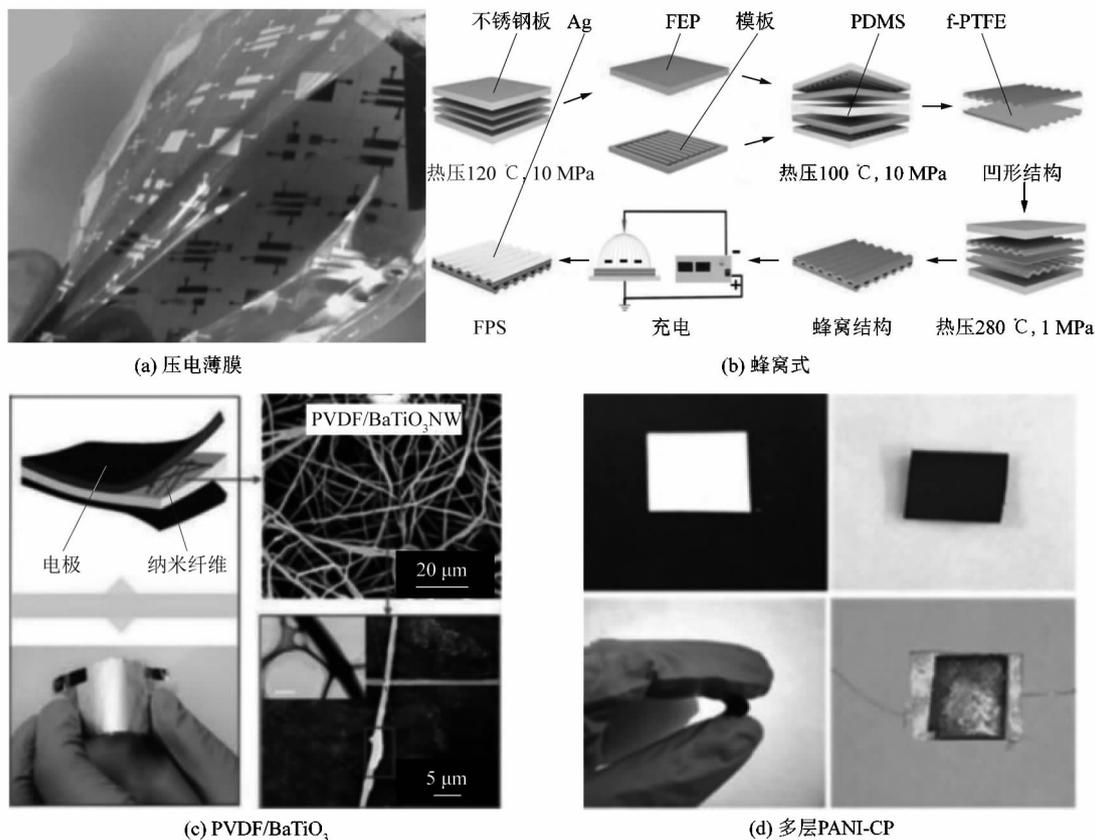


图 6 典型的压电型柔性力敏传感器

Figure 6 Typical piezoelectric flexible force sensor

虽然压电材料在柔性传感器的制备中有着广泛的应用,但压电材料也有许多不利于其在柔性传感器中应用的特性。例如压电材料一般具有热电性,在温度容易发生变化的地方,压电式压力传感器的应变因子和温度变化会导致电荷变化,而变化因子无法准确测量。目前压电型柔性力敏传感器的研究主要基于压电高分子聚合物材料,如 PVDF 薄膜,但由于压电型传感器输出信号微弱、灵敏度低及拉伸性较差,不如压阻型和压容型的研究广泛^[45],因此压电柔性传感器的实际应用还需要进一步探索和改进。

4 摩擦电型柔性力敏传感器

摩擦电型柔性力敏传感器是基于摩擦纳米发电机技术,利用摩擦起电及静电感应原理将机械能转化为

电能的装置,通常用于收集机械能,也可以用作传感装置。

2012 年 Fan 等^[46]基于摩擦纳米发电机原理提出了一种自供电的柔性压力传感器,外界压力导致局部弯曲引起的接触和分离实现摩擦起电,从而实现压力感知。在电负性 PDMS 介电薄膜表面设计不同的微结构以增强其性能,金字塔微结构型的传感器输出电压幅值可达 18 V ,电流为 $0.7 \mu\text{A}$ 。2013 年, Yang 等^[47]设计了一种基于 ITO 透明电极和微结构 PDMS 的柔性自供能触觉传感器阵列,如图 7(a)所示,当手指皮肤按压(接触—分离)时,传感器输出电压响应与施加压力成正比,灵敏度约为 $0.29 \text{ V} \cdot \text{kPa}^{-1}$ 。

为了提高传感器件的拉伸特性,2016 年 Lai 等^[48]

受电鳗皮肤的启发,设计研发了一种可拉伸的摩擦纳米发电机,如图7(b)所示。采用 AgNW 作为内嵌电极,PDMS 作为摩擦起电基体,该纳米发电机在不同的拉伸状态(0% ~ 300%)仍具有触觉(压力)感知能力。将其用作柔性电子皮肤,具有良好的力学顺从性和可拉伸性,可以完美地贴附于不规则表面。

摩擦电型柔性力敏传感器通常感知外界压力、振动、触觉等信息,由于其传感器工作原理的限制,拉伸型的纳米发电机较难实现(需要复杂的结构设计和工

艺)。2017年,He 等^[49]采用多步法在柔性硅橡胶纤维表面涂覆 CNT 电极,然后再结合弹簧状的铜线获得一种线状的拉伸型摩擦纳米发电机,该器件具有良好的拉伸性和柔韧性,依靠拉伸过程中芯层纤维与铜线之间接触与分离产生摩擦电荷,从而实现具有拉伸传感功能,如图7(c)所示。

纳米技术的快速发展使我们能够开发大量新型的可穿戴设备,但传统的纳米材料主要来自不可再生资源,存在较多的环境问题。2018年,He 等^[50]开发了一

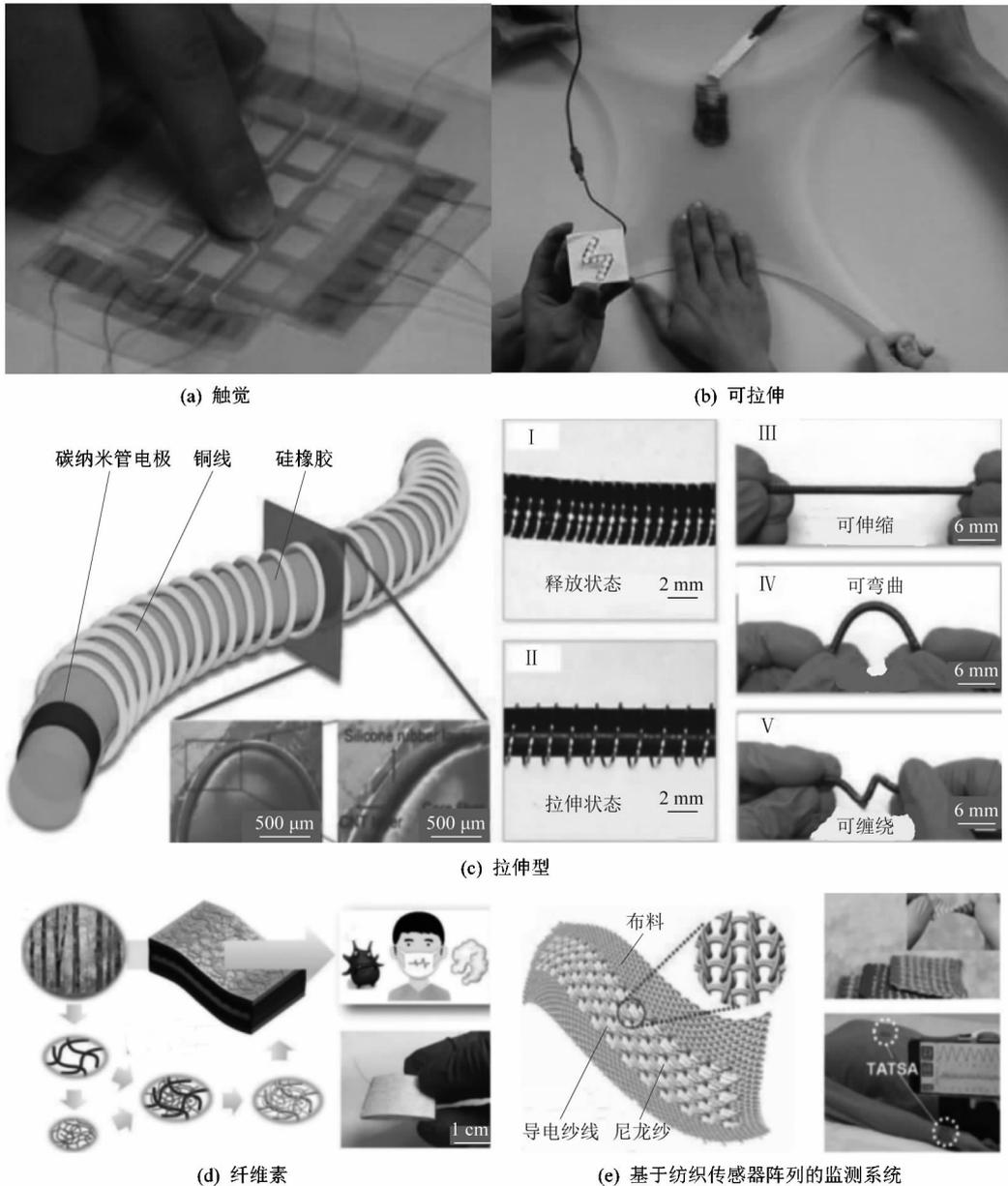


图7 摩擦电型柔性力敏传感器发展

Figure 7 Development of triboelectric flexible force sensor

种基于环保纤维素纤维的传感器,如图7(d)所示。其由2层作为摩擦层的电介质层和镀银电极组成,将一维可生物降解纤维素纳米纤维(CNFs)引入纤维素微纤维(CMFs)骨架的大孔隙中,形成纳米结构的CMFs/CNFs纸。以此纸为模板制备银(Ag)纳米纤维膜,得到了CMFs/CNFs/Ag分层二维纳米结构;在底部,氟化乙丙烯(FEP)薄膜作为相反的摩擦材料被打上微孔以辅助气体流动。该装置被植入口罩中,通过人的呼吸触发传感器,去除PM_{2.5}的效率高达98.83%,保证人们的身体健康。

在实用性和舒适性方面,针对大多数报道的可穿戴柔性传感器只能处理单一信号且舒适性较差的问题,2020年,Fan等^[51]报道了一种基于摩擦电全纺织传感器阵列(TATSA)的健康监测系统。相较于其他刚性基底的可穿戴设备,其有着透气、轻便及良好的柔软舒适性,如图7(e)所示。TATSA中导电纱由内部的不锈钢纱和包绕的涤纶纱组成,2股联锁纱之间存在2种接触面,由于应力分布的不同,2者在外力作用下都会发生变化,从而产生摩擦电荷转移,灵敏度为7.84 mV·Pa⁻¹,响应时间为20 ms。此外,该纺织品传感器具有灵活性和可机洗性(可洗40次),适合集成到衣服中,用以监测呼吸和脉搏信号。

摩擦电型压力传感器依靠被测对象自身与传感器之间接触和分离产生摩擦电荷,从而实现外界压力的动态感知。通常情况下,传感器的输出响应不仅与压力大小有关,还与加载速度、载荷物性和环境条件等有

关。摩擦电型柔性力敏传感器通常感知外界压力、振动、触觉等信息,但由于其传感器工作原理的限制,输出电流小,稳态性能差,研究热度低。

5 存在问题及发展趋势

5.1 存在问题

近年来,研究人员通过开发新材料和优化结构,在柔性力敏传感器的灵敏度、响应时间和检测极限方面皆取得了很大进展,表现出了不同的优势和应用特点。

目前柔性力敏传感器存在的问题主要表现在以下方面:

1) 随着科学的进步和人工智能的发展,特别是5G时代的到来,压力传感器将更多地应用于超精度领域,如超小压力检测,而现有的压力传感器不具备足够的灵敏度和检测范围。

2) 大多数柔性传感器只能单独检测压力,无法排除2个或2个以上物理量之间的相互作用,不利于实际应用。

3) 传统的柔性压力传感器制造方法(如模板法、多步涂布法等)过于复杂,需要昂贵的设备,并且制造周期长、成本高,无法满足批量制备。

因此,虽然关于柔性力敏传感器的研究已经很多,但仍有很多问题需要进一步探索。

表1总结了不同类型的柔性力敏传感器的优缺点,在实际应用中可以根据具体要求选择合适的传感器类型。从表中可以看出每种传感器都有着或多或少的缺陷,许多问题尚待学者们进一步深入探索和研究。

表1 不同类型的柔性力敏传感器比较

Table 1 Comparison of different types of flexible force-sensitive sensors

类型	优点	缺点
压阻型	灵敏度较高,量程较大,处理电路简单,价格低廉。	非线性严重,稳定性较差,停滞较大,温度影响大。
压容型	结构简单,制备容易,温度影响小及停滞小。	寄生电容,处理电路复杂,抗电磁干扰能力差。
压电型	响应速度快和功耗低。	静态性能差,温度影响大,信号漂移严重。
摩擦电型	自供电,输出电压高,绿色环保,安全性好。	输出电流小,稳定性差,静态性能差,环境因素影响大。

5.2 发展趋势

根据各个领域的应用需求,未来柔性力敏传感器的发展趋势主要体现在以下几个方面:

1) 超高灵敏度一直是研究者所追求的目标,也是压力传感器未来发展的必然趋势;探索新型传感材料、结构和制造工艺,以提高柔性压力传感器的灵敏度或

测量范围,实现柔性传感器技术突破。

2) 柔性传感器制备过程会产生一些对环境和人体有害的物质,而且设备昂贵、工艺复杂,无法满足工业上大批量需求;因此,需要寻找一种性能高又环保的复合材料,同时制备工艺须简单高效、成本低。

3) 研究者的目光主要聚焦于传感器的应力应变

传感性能,忽略了其他的物理量,如环境(温度、湿度)、变形形式(弯曲、扭转)等。因而开发可以同时检测各种物理量的压力传感器非常重要。

4) 柔性传感器需要与其他设备集成,进而扩大应用领域,以顺应未来的发展趋势;因此,将柔性可穿戴压力传感器与信号传输、数据处理、电源和性能优化策略集成是另一个重大挑战。

6 结语

柔性力敏传感器具有质地柔软、测量范围广、灵敏度高、可穿戴性良好的等诸多优点,是未来传感器发展的重要热点方向之一。笔者对几类柔性力敏传感器的发展进行了分析和总结。其中压阻式柔性力敏传感器因其材料多样化、结构多变和性能可调而受到广泛关注。虽然学者们在材料、结构和应用方面的研究取得了一定的进展,但在制造技术、传感机理和性能方面仍存在着许多问题和挑战。压容式柔性力敏传感器结构简单、制备容易、迟滞小,适用于压力传感,但其存在寄生电容、后续处理电路复杂、抗电磁干扰能力差等问题,应用范围受到了极大限制。摩擦式和压电式柔性力敏传感器具有自能和环保的优点,但不适合静态测量。因此,通过寻找新型材料,设计合理的结构,提高柔性力敏传感器的稳定性和灵敏度,扩大测量范围,以及自能和环保仍旧是未来发展的主要趋势。

参考文献:

- [1] CHEN S,JIANG K,LOU Z, et al. Recent developments in graphene-based tactile sensors and E-skins [J]. *Advanced Materials Technologies*,2018,3(2):1700248.
- [2] XU F L, LI X Y, SHI Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: a review[J]. *Micromachines*,2018,9(11):580.
- [3] YANG J C, KIM J O, OH J, et al. Microstructured porous pyramid-based ultrahigh sensitive pressure sensor insensitive to strain and temperature[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2019,11(21):19472-19480.
- [4] KOU H R, ZHANG L, TAN Q L, et al. Wireless wide-range pressure sensor based on graphene/PDMS sponge for tactile monitoring[J]. *Scientific Reports*,2019,9(1):3916.
- [5] 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):1678-98.
- [6] KONG J H, JANG N S, KIM S H, et al. Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors[J]. *Carbon*,2014,77:199-207.
- [7] AMJADI M, PICHITPAJONGKIT A, LEE S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. *ACS Nano*,2014,8(5):5154-5163.
- [8] OH J, YANG J C, KIM J O, et al. Pressure insensitive strain sensor with facile solution-based process for tactile sensing applications[J]. *ACS Nano*,2018,12(8):7546-7553.
- [9] TANG Z H, JIA S H, WANG F, et al. Highly stretchable core-sheath fibers via wet-spinning for wearable strain sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2018,10(7):6624-6635.
- [10] ZHANG F, HU H L, HU S M, et al. Significant strain-rate dependence of sensing behavior in TiO₂@ carbon fibre/PDMS composites for flexible strain sensors [J]. *Journal of Advanced Ceramics*,2021,10(6):1350-1359.
- [11] KANG D, PIKHITSA P V, CHOI Y W, et al. Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system [J]. *Nature*,2014,516(7530):222-226.
- [12] PARK B, KIM J, KANG D, et al. Dramatically enhanced mechanosensitivity and signal-to-noise ratio of nanoscale crack-based sensors: effect of crack depth[J]. *Advanced Materials*,2016,28(37):8130-8137.
- [13] CHENG Y, WANG R R, SUN J, et al. A stretchable and highly sensitive graphene-based fiber for sensing tensile strain, bending, and torsion[J]. *Advanced materials*,2015,27(45):7365-7371.
- [14] WANG Z F, HUANG Y, SUN J F, et al. Polyurethane/cotton/carbon nanotubes core-spun yarn as high reliability stretchable strain sensor for human motion detection [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2016,8(37):24837-24843.
- [15] HE Y L, GUI Q Y, WANG Y X, et al. A polypyrrole elastomer based on confined polymerization in a host polymer network for highly stretchable temperature and strain sensors [J]. *Small*,2018,14(19):1800394-1-1800394-7.
- [16] MI Q, WANG Q, ZANG S Y, et al. RGO-coated elastic fibres as wearable strain sensors for full-scale detection of human motions[J]. *Smart Materials and Structures*,2017,27(1):015014.
- [17] LUO W, WU T F, CHEN B Q, et al. Highly stretchable conductors based on expanded graphite macroconfined in tubular rubber[J]. *ACS applied materials & interfaces*,2017,9(49):43239-43249.
- [18] JIAN M Q, XIA K L, WANG Q, et al. Flexible and highly sensitive pressure sensors based on bionic hierarchical structures [J]. *Advanced Functional Materials*,2017,27(9):1606066.
- [19] LI Y X, HAN D Y, JIANG C J, et al. A facile realization scheme for tactile sensing with a structured silver nanowire-PDMS composite [J]. *Advanced Materials Technologies*,2019,4(3):1800504.

- [20] CHOONG C L, SHIM M B, LEE B S, et al. Highly stretchable resistive pressure sensors using a conductive elastomeric composite on a micropylar array[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3451–3458.
- [21] TIAN H, SHU Y, WANG X F, et al. A graphene-based resistive pressure sensor with record-high sensitivity in a wide pressure range [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 08603.
- [22] CHENG M Y, TSAO C M, LAI Y Z, et al. The development of a highly twistable tactile sensing array with stretchable helical electrodes[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 166(2): 226–233.
- [23] LEE Y, PARK J, CHO S, et al. Flexible ferroelectric sensors with ultrahigh pressure sensitivity and linear response over exceptionally broad pressure range[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 4045–4054.
- [24] HUANG K, DONG S M, YANG J S, et al. Three-dimensional printing of a tunable graphene-based elastomer for strain sensors with ultrahigh sensitivity[J]. *Carbon*, 2019, 143: 63–72.
- [25] HE J, XIAO P, LU W, et al. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor[J]. *Nano Energy*, 2019, 59: 422–433.
- [26] HAO D P, YANG R X, YI N, et al. Highly sensitive piezoresistive pressure sensors based on laser-induced graphene with molybdenum disulfide nanoparticles[J]. *Science China Technological Sciences*, 2021, 64(11): 2408–2414.
- [27] LIPOMI D J, VOSGUERITCHIAN M, TEE B C, et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(12): 788–792.
- [28] PANG C, KOO J H, NGUYEN A, et al. Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(4): 634–640.
- [29] KANG S, LEE J, LEE S, et al. Highly sensitive pressure sensor based on bioinspired porous structure for real-time tactile sensing [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(12): 1600356.
- [30] WAN S, BI H C, ZHOU Y L, et al. Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors[J]. *Carbon*, 2017, 114: 209–216.
- [31] MA L Q, SHUAI X T, HU Y G, et al. A highly sensitive and flexible capacitive pressure sensor based on a micro-arrayed polydimethylsiloxane dielectric layer [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(48): 13232–13240.
- [32] LUO Y S, SHAO J Y, CHEN S R, et al. Flexible capacitive pressure sensor enhanced by tilted micropillar arrays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(19): 17796–17803.
- [33] CHEN S, JIANG K, LOU Z, et al. Recent developments in graphene-based tactile sensors and E-skins [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(2): 1700248.
- [34] XU F L, LI X Y, SHI Y, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: a review[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11): 580.
- [35] LI J, BAO R R, TAO J, et al. Recent progress in flexible pressure sensor arrays: from design to applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(44): 11878–11892.
- [36] 赵昕. 半椭圆柔性基底 PVDF 压电传感器设计及研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 35–37.
- [37] SHARMA T, AROOM K, NAIK S, et al. Flexible thin-film PVDF-TrFE based pressure sensor for smart catheter applications [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2013, 41(4): 744–751.
- [38] SHIN K Y, LEE J S, JANG J. Highly sensitive, wearable and wireless pressure sensor using free-standing ZnO nanoneedle/PVDF hybrid thin film for heart rate monitoring[J]. *Nano Energy*, 2016, 22: 95–104.
- [39] WANG B, LIU C, XIAO Y J, et al. Ultrasensitive cellular fluorocarbon piezoelectric pressure sensor for self-powered human physiological monitoring[J]. *Nano Energy*, 2017, 32: 42–49.
- [40] CHEN Z F, WANG Z, LI X M, et al. Flexible piezoelectric-induced pressure sensors for static measurements based on nanowires/graphene heterostructures [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4507–4513.
- [41] XIE M Y, ZHANG Y, KRASNY M J, et al. Flexible and active self-powered pressure, shear sensors based on freeze casting ceramic-polymer composites[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(10): 2919–2927.
- [42] PARK D Y, JOE D J, KIM D H, et al. Self-powered real-time arterial pulse monitoring using ultrathin epidermal piezoelectric sensors[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(37): 1702308-1–1702308-9
- [43] GUO W Z, TAN C X, SHI K M, et al. Wireless piezoelectric devices based on electrospun PVDF/BaTiO₃ NW nanocomposite fibers for human motion monitoring[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(37): 17751–17760.
- [44] KANNICHANKANDY D, PATANIYA P M, NARAYAN S, et al. Flexible piezo-resistive pressure sensor based on conducting PANI on paper substrate[J]. *Synthetic Metals*, 2021, 273: 116697.
- [45] LEE J H, YOON H J, KIM T Y, et al. Micropatterned P(VDF-TrFE) film-based piezoelectric nanogenerators for highly sensitive self-powered pressure sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(21): 3203–3209.
- [46] FAN F R, LIN L, ZHU G, et al. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 3109–3114.