

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.029

聚合物在压力触觉传感电子皮肤中的研究进展

杨陈^{1,2}, 林燕萍^{1,2}, 戴莹^{1,2}

(1. 江西服装学院, 南昌 330201; 2. 江西省现代服装工程技术研究中心, 南昌 330201)

摘要: 介绍了柔性电子技术革新对人工智能发展的促进作用, 以及压力触觉传感电子皮肤作为人机交互关键接口, 在可穿戴设备、医疗监测、智能交互等领域的重要意义。简述了聚合物凭借柔韧性、可加工性及成本优势, 成为构建电子皮肤核心材料的原因; 回顾了压力触觉传感电子皮肤的基本结构、工作原理, 以及聚合物在该电子皮肤中的研究与应用进展。分析表明, 聚合物可单独使用, 也可与纳米材料或其他聚合物复合等形式, 在电子皮肤的电极、柔性基材、介电材料及封装材料中有着广泛应用, 且能极大提高电子皮肤的响应灵敏性、柔韧性及可加工性; 同时分析指出, 目前其在耐久性、耐候性、传感性能多指标平衡及复杂场景适应性等方面仍面临挑战, 提出未来研究可聚焦于多功能聚合物复合材料开发、自修复/可降解体系构建, 以及与3D打印技术制备仿生微纳阵列的深度融合; 并指出这些研究方向将推动电子皮肤向类人感知系统演进。

关键词: 聚合物; 压力触觉传感; 电子皮肤; 基本结构; 工作原理; 研究与应用进展

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0233-07

Research progress of polymers in pressure tactile sensing electronic skin

YANG Chen^{1,2}, LIN Yanping^{1,2}, DAI Ying^{1,2}

(1. Jiangxi Institute of Fashion Technology, Nanchang 330201, China;

2. Jiangxi Modern Clothing Engineering Technology Research Center, Nanchang 330201, China)

Abstract : The promoting effect of flexible electronics technology innovation on the development of artificial intelligence was introduced as well as the significance of pressure and tactile sensing electronic skin as a key interface for human-machine interaction in the fields of wearable devices, medical monitoring, and intelligent interaction. The reasons why polymers, with their flexibility, processability, and cost advantages have become the core materials for constructing electronic skin were briefly described. The basic structure, working principle of pressure and tactile sensing electronic skin, and the research and application progress of polymers in this electronic skin were reviewed. The analysis show that polymers can be used alone or in the form of composites with nanomaterials or other polymers, and were widely applied in the electrodes, flexible substrates, dielectric materials, and encapsulation materials of electronic skin, which can greatly improve the response sensitivity, flexibility, and processability of electronic skin. At the same time, it was pointed out that there were still challenges in terms of durability, weather resistance, multi-index balance of sensing performance, and adaptability to complex scenarios. It was suggested that future research can focus on the development of multifunctional polymer composites, the construction of self-healing/degradable systems, and the deep integration with 3D printing technology to prepare bionic micro-nano arrays. It was also pointed out that these research directions will promote the evolution of electronic skin towards human-like perception systems.

Keywords : polymers ; pressure tactile sensing ; electronic skin ; basic structure ; working principle ; research and application progress

基金项目: 江西省教育厅科学技术重点研究项目(GJJ2202802), 江西服装学院横向项目(JFHX202521)

通信作者: 杨陈, 博士, 教授, 主要从事功能性纺织材料的开发

收稿日期: 2025-07-19

引用格式: 杨陈, 林燕萍, 戴莹. 聚合物在压力触觉传感电子皮肤中的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 233-239.

YANG Chen, LIN Yanping, DAI Ying. Research progress of polymers in pressure tactile sensing electronic skin[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 233-239.

电子皮肤作为一种能够模拟人类皮肤功能的新型可穿戴柔性仿生触觉传感器,能够感知外界压力、温度、湿度、疼痛等多种刺激,并能够将刺激传输给处理器做出相应反应,可广泛应用于可穿戴设备、生物医学、机器人等多个领域^[1-3]。聚合物材料物化性能可设计,生物相容性强,柔弹易加工,且能够与人体皮肤及其他不规则表面实现紧密贴合,确保电子皮肤能够在多种复杂环境下稳定工作,是电子皮肤的理想基材^[4-5]。近年来,聚合物材料合成与加工的进步,使其在电子皮肤功能化、弹性化及柔性化中的研究与应用取得了长足进步^[6-8]。基于此,笔者通过对压力触觉传感电子皮肤的综述,阐述了电子皮肤基本结构、传感工作原理及聚合物材料在电子皮肤中的应用及面临的问题,为推动压力电子皮肤技术的进一步发展和应用提供参考。

1 基本结构及工作原理

1.1 基本结构

电子皮肤由基底层、传感层及封装层 3 个基本单元组成,利用“三明治结构”通过基底层的柔性支撑、传感层的多维感知与封装层的防护增强,构建了从物理形变到电/光信号的完整转换链条。其中,基底层常选用具有一定强度和拉伸压缩性能良好的聚合物材料,经相应工艺处理,为感应层提供附着位置和保护作用,封装层则选用延展性良好的柔性透明弹性体作为电子皮肤传感器的封装层。同时,利用电导率较高的导电材料为导线,构成外部信号采集电路^[9-11]。目前,电子皮肤常见的结构设计有波形结构、岛-桥结构、折纸结构、剪纸结构、织物结构,其相关指标见表 1。

目前,在柔性电子器件(尤其柔性传感器)的基底层构建中,常用聚合物材料主要包括羧基丁苯橡胶(XSBR)、苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙炔嵌段共聚物(SEBS)、聚氨酯(PUR)及聚

二甲基硅氧烷(PDMS)等^[12]。其中,XSBR 是通过在丁苯共聚物分子链中引入羧基官能团改性得到的弹性体。该材料不仅具备优异的耐油性与耐热性,且因羧基的引入优化了分子间相互作用,能够在较宽温度范围内保持稳定的柔性及弹性,为传感基底提供了可靠的力学性能支撑。SEBS 是以苯乙烯-丁二烯-苯乙炔嵌段共聚物(SBS)为原料,经加氢反应饱和分子链中不饱和双键后制得的改性聚合物。其核心优势在于综合性能均衡:耐热性与抗紫外线辐射能力突出,可适应复杂环境;生物相容性良好,能满足生物医用场景需求;同时具备优异的结构稳定性、拉伸性能、抗氧化活性及力学强度。在功能复合方面,SEBS 可与二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)、液态金属等导电填料实现均匀复合,并通过湿法纺丝、静电纺丝等工艺制备 SEBS 弹性纤维导体,为柔性传感基底的“导电-支撑一体化”设计提供了可行路径。PUR 由异氰酸酯与多元醇经缩聚反应合成,其分子结构赋予材料良好的物理化学稳定性、力学性能及生物相容性。作为 PUR 的重要分支,热塑性聚氨酯(TPU)具有典型的“硬-软链段”微观结构:硬链段由 PUR 基团聚集形成,提供刚性支撑;软链段由非极性醚基或酯基聚集形成,赋予柔性及弹性。这种结构使 TPU 兼具高比表面积、高孔隙率及优异的拉伸性能,同时融合了塑料的刚性与弹性体的柔性,成为柔性传感器基底层的理想选择。PDMS 作为一种有机硅弹性体,热稳定性优异,可在宽温度范围内保持性能稳定;表面能低,不易吸附杂质;透明度高,适用于光学传感场景;生物相容性突出,且加工工艺成熟。在实际制备中,通过调节固化剂与 PDMS 预聚物的配比,结合成型工艺可制备具有不同表面结构、尺寸及形状传感弹性基底,加工灵活性极强。

表 1 各类电子皮肤设计结构相关指标

Tab. 1 Relevant indicators of various electronic skin design structures

Structural design type	Concrete form	Characteristics	Case studies
Wave structure	After the planar substrate was pre-stretched and then released, the conductive layer forms waves or wrinkles ^[13] .	By geometric deformation, stress is released and rigidity of the material was made flexible. However, the extensibility is limited and it is not suitable for scenarios with large strains ^[14-15] .	Sun, et al. fabricated corrugated single-crystal silicon strips on a PDMS substrate ^[16] .
Island-bridge structure	Composed of conductive lines (bridges) and functional components (islands), it includes structures such as serpentine, self-similar, spiral, arch bridge, and spring ^[17-19] .	The "bridge" structure was highly flexible in design and can meet various strain requirements. The serpentine structure, due to its simple manufacturing process, was widely applicable.	Fan, et al. optimized the parameters of the serpentine structure based on finite element analysis ^[20] .
Origami/ Paper-cutting structure	Origami: Utilizing folding structures to relieve stress Paper-cutting: Achieving stress relief through hollowing-out structures ^[21] .	No need for elastic substrate, compatible with mature production processes, featuring high versatility and large deformability ^[22-23] .	Flexible electronic devices fabricated based on origami technology can be folded and bent.
Fabric structure	Using filaments, fibers, yarns, etc. as the base material, supplemented by conductive materials ^[24] .	The natural mechanical properties were excellent, and it can be woven. However, the design freedom is limited by the warp and weft directions ^[25] .	Preparation of functional materials by inkjet printing on textiles ^[26-28] .

1.2 工作原理

压力触觉传感电子皮肤是一种模仿人类皮肤感知功能的柔性电子器件,其工作原理涉及压力传感知、信号转换

与传输 2 部分,具体如下。

1.2.1 传感知

电子皮肤受压引起触觉传感器内部敏感材料形变,导致

电阻、电容、压电或光学特性发生变化,从而产生相应的电信号以表征电子皮肤的受力压力大小及变化^[29-30]。常见压力触觉传感器有压阻式、电容式、压电式及光学式,其中压阻式触觉传感器是基于压阻材料受力引起内部电阻变化转化为电信号,该信号被采集电路采集用以表征传感器受力情况。该法利用电信号表征受力,测量便捷、负载能力强,缺陷是迟滞性与温漂较大,快速响应与线性度较差。电容式触觉传感器的机理是指在法向力作用下引起电容上下电极板间距改变,或在切向力作用下引起电容上、下电极重合面积的改变,上述2种情况均会导致传感器电容值的改变。依据电容变化表征触觉传感器压力情况,该类触觉传感器适用于三维力的测量,且具有较宽响应幅度,空间分辨率与灵敏度高,缺陷是电路复杂,易受电气等因素影响。压电式触觉传感器的机理是外力作用引起晶体内部电极化,将电极化产生的电信号采集后放大表征压力。该法避免了外界电源的接入,且响应灵敏,线性度好,缺陷是介电性受温度与噪声影响较大。光学式触觉传感器是利用光的干涉测量、光线布拉格光栅及光强调制等技术分析光信号波长、强度等指标的变化,以此表征所受压力情况。该法无电气干扰、分辨率高,缺陷是光纤弯曲会造成光能损失,且受温度影响大,计算方法复杂。

1.2.2 信号转换与传输及

压力触觉传感器感知到的电信号通常较弱,且形式多样,需要对信号进行转换和放大,以便后续的传输和分析。

(1)信号放大与滤波。

通过电子皮肤中的集成信号放大电路,将传感器输出的微弱电信号放大,提高信号强度,并通过滤波电路去除信号中的噪声,确保信号质量。

(2)模数转换。

传感器输出信号多为模拟信号,须将其转换为数字信号。实践中,常利用电子皮肤中的模数转换器将连续变化的模拟信号转换为离散的数字信号,便于后期计算机或微控制器对数据的处理。

(3)无线传输。

利用无线通信模块(蓝牙、Wi-Fi或ZigBee等)实现电子皮肤与外部设备(如智能手机、电脑或其他控制系统)之间的数据通信,便于用户的实时监测和分析。

2 研究与应用进展

聚合物在电子皮肤中的应用方向主要为电极、柔性基材和介电材料等,通过聚合物在各方向的应用与相互协作,实现电子皮肤对外界刺激感知,并将这些刺激转化为可检测和处理的电信号,进而实现与外界环境的交互以及对各种信息的反馈^[31]。

2.1 电极

电极在电子皮肤中负责收集压力触觉产生的电信号,并将其传输到外部的信号处理系统进行分析 and 处理,因此要求电极材料须具备良好的导电性,确保电信号能够高效、稳定地传输。同时,为使电子皮肤能与人体皮肤或其他应用场景

具有良好的贴合性,电极材料还须具备一定的柔韧性和可拉伸性,然而实践中聚合物作为电极往往受到导电性相对较差、稳定性、耐候性不足及界面阻抗等问题的限制而无法规模应用。为此,研究者尝试通过将聚合物与其他高导材料复合来改善聚合物作为电极材料的弊端。目前,常用的方法是聚合物与纳米金属材料或纳米碳材料或不同聚合物间进行复合。Gong等^[32]利用印刷叉指的PDMS层与PDMS基体层夹持浸涂于纸巾的金纳米线制成的柔性压力传感器的响应时间小于17 ms,灵敏度高达1.14/kPa,检测下限低至13 Pa,并在50 000次循环后依然能保持稳定,缺陷是金纳米线的可拉伸性有限,大幅度形变会影响检测精准度。周冰等^[33]通过冻融循环和盐水浸泡制备了电导率高达2.50 S/m的明胶/聚乙烯醇(PVAL)双网络水凝胶,其最大应变与应力分别可达282.73%与745.72 kPa。以此水凝胶为电极,与ZnO/硅橡胶压电薄膜一起制成形状可任意设计的电子皮肤。该电子皮肤多孔透气,且与不同相材料具有较好的黏附性,测试显示输出电压为394.50~421.41 mV,响应时间仅为80 ms,经300次的拉伸,500次弯曲及扭转或5 000次循环按压仍能输出相对稳定的电信号,耐久性良好。该法通过冻融循环和盐水浸泡制备的明胶/PVAL双网络水凝胶电导率高且力学性能优异,以此为电极与压电薄膜制成的电子皮肤不仅形状可任意设计,还具备多孔透气、黏附性好的特点,输出电压稳定、响应迅速且经多次形变和按压后信号仍稳定,耐久性表现突出,制备方法也相对简便。缺陷是该法未提及水凝胶在长期储存或极端环境下的稳定性,缺乏材料生物相容性相关信息,也未与同类材料进行性能对比。Wang等^[34-35]以银纳米线/PDMS复合材料薄膜为电极,以力敏导电压阻橡胶开发的传感阵列与多孔PDMS一起制成柔弹传感层,利用“三明治”设计方法将柔弹传感层与金属薄层制成高弹、高柔的电子皮肤,测试显示该皮肤在0~180 kPa可实现活动关节与复杂表面受力的精确测量,且性能稳定。Yogeswaran等^[36]则选择与纳米碳材料复合,其以叉指银方式构建底部电极,连接PDMS/碳纳米管(CNT)纳米复合材料制成的顶部聚合物,制成电阻式柔弹性触感电子皮肤,该电子皮肤的监测低限压力值可达500 Pa,在假肢与智能机器人领域有着广泛应用。上述2个案例制作思路贴合柔性传感需求,缺陷是未对该电子皮肤的响应速度、长期使用后的耐久性细节进行研究,也未测试其在拉伸、弯曲等形变下的信号稳定性。Lyu等^[37]利用PDMS与印制电路板制成小体积的能够实时监测3D界面应力的电容性压力触觉传感器,并由其拼接成电子皮肤阵列触觉传感器,可用于监测人体足底、假体或截肢表面的应力分布,缺陷是未进行柔性形变下的性能测试。综述可知,聚合物作为电子皮肤电极材料具有柔韧性与可拉伸性、制备工艺简单且成本低和功能可设计性等优势,极具使用价值。

2.2 柔性基材

柔性基材在电子皮肤中起支撑和承载其他组件的作用,决定了电子皮肤的整体柔韧性和可穿戴性。因此,柔性基材

须具备良好的柔韧性、力学强度、化学稳定性和生物相容性,确保电子皮肤在各种复杂环境下的工作稳定性。聚合物作为柔性基材可单独使用,也可与纳米金属材料或其他聚合物复合使用。Cheng等^[38]采用模具固化与光刻技术将PDMS制作为应变传感器的导电聚合物及主要基材,测试显示传感器达到70°扭转,触觉传感器阵列结构而未被破坏,稳定性极佳,缺陷是其在微弱信号检测能力上可能存在不足。为此,将聚合物与碳材料,与金属材料或其他聚合物材料的复合也极大改善柔性基材对微弱信号的感知性能。Shi等^[39]通过图案化微结构工艺制备了基于AgNWS/PDMS复合电介质的电容式压力传感器。该传感器兼具透明性与柔韧性,相较于平面结构PDMS传感器,其灵敏度提升至0.831/kPa,同时展现出更优异的耐久性、稳定性及更低的检测限。此外,该制备方法具有高分辨率、良好重复性等优势,适用于规模化生产。然而,其工艺存在明显局限:制备周期长、工艺复杂度高,且对光刻胶等材料要求严苛,导致生产成本较高。Li等^[40]以PDMS为基底材料,采用3D打印技术将导电油墨、炭黑及多壁碳纳米管(MWCNTs)等多种导电材料构建成为多级倾斜尖锥阵列结构,制备出柔性压力传感器。该传感器具有宽广的压力响应范围(0~396 kPa),检测下限低至7.69 Pa,响应时间仅32 ms,灵敏度高达212/kPa,且经过5 000次循环测试后仍保持稳定性能。尽管3D打印技术可实现各类复杂微结构的定制化制备,但其成型精度有限,导致微结构表面粗糙度较高且间隙分布不均。此外,适用的3D打印聚合物材料种类有限,这一技术瓶颈制约了其产业化推广进程。Lipomi等^[41]以PDMS为基底,将碳纳米管喷涂其上制成透明的电容式阵列触觉传感器电子皮肤,该电子皮肤在拉伸100%条件下仍保持较好的柔韧性和回弹,提高了复合材料的电信号的感知性能。缺陷是该电子皮肤在拉伸或挤压情况下电信号变化显著,适合测量拉伸率或应变不变下的压力情况,抗干扰能力较差。为此,Ma等^[42]开发了基于ZnS-CaZnOS发光材料与聚3,4-乙烯二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐热敏材料的压力-温度双模态触觉传感器。该传感器突破了传统依赖数学算法的信号解耦方式,可将压力和温度分别直接转换为光信号和电信号进行独立感知,具备较强的抗干扰能力,在加密通讯领域展现出应用潜力。然而,其性能表现存在温度依赖性:在低温环境下展现出较高精度,温度灵敏度在21~60℃范围内为-0.6%/℃,但随着温度升高,测量精度下降,限制了其在宽温域场景中的应用。Miyamoto等^[43]在聚乙烯醇纤维层覆盖纳米金后置于皮肤表面,利用水溶特性去除聚乙烯醇纤维制作纳米网导体,由此制备的电子皮肤具有更高的孔隙率,舒适性更好,但其存在工艺复杂、制作成本偏高及拉伸性能欠佳等缺陷。此外,聚合物还可与高性能二维材料复合,制备高灵敏度压力传感器。例如,Wu等^[44]以柔性硅胶基橡胶为衬底,将激光还原石墨烯与之复合,制备出仿三极管结构的石墨烯压力传感器。该传感器可直接贴合皮肤,适用于足底压力检测、波形采集、血压及脉搏监测、

呼吸感知等场景,在0~200 kPa压力范围内灵敏度达11.09/kPa。MXene作为典型二维材料,通过与聚合物基底的涂覆或复合,在应变式力敏传感器及压阻式传感器制备中展现出优异应用前景。Yang等^[45]的研究中,先在砂纸表面浇筑PUR,再采用喷涂法将MXene沉积为压力敏感层;同时将MXene喷涂于聚酰亚胺薄膜上作为叉指电极层,最终将压力敏感层与叉指电极层复合,得到MXene/PUR/叉指电极结构的高性能柔性传感器。该传感器响应时间与恢复时间分别为67.3 ms和44.8 ms,灵敏度高达509.8/kPa,经过10 000次循环测试后仍保持较高稳定性。Li等^[46]采用模板法,在PDMS基材上利用MXene构筑微圆顶阵列传感层,制备出互锁结构的柔性压阻式电子皮肤传感器。通过有限元软件对传感器微结构进行受力分析并优化设计后,其灵敏度提升约100倍。韩仁厚^[47]在此基础上,开发了TPU/氧化锌纳米线三维互锁结构传感器,测试显示该结构传感器线性传感范围约2 000 kPa,传感器信噪比可达20 dB,缺陷是应用场景单一。魏传娟^[48]以PUR为基体,通过引入不同导电组分或采用特定技术制备了三类柔性力学传感器: PUR-G柔性应变传感器在0~225%应变范围内应变系数最高达549,可监测人体运动;自愈合离子导电PUR弹性体应变传感器愈合效率约88%,愈合后性能稳定,还能实时跟踪愈合过程,缺陷是该传感器灵敏度较低;TPU/PVDF“三明治”结构全柔性触觉传感器伸长率300%,可检测日常压力。上述5个案例表明,高性能二维材料与聚合物基体复合制备压力传感器时,核心难点在于二维材料在聚合物中的分散性——若二维材料含量过高,易在聚合物中发生团聚,进而降低检测的灵敏度与准确性。此外,聚合物之间的复合可以综合利用不同聚合物的优势,使其对微小压力的监测更加灵敏,因此也被视为柔性基材的理想材料。如Veeralingam等^[49]以铝膜为电极,利用压电沉积将聚二甲硅氧烷/聚吡咯(PDMS/PPy)沉积在掺锡氧化铟(ITO)涂层的聚对苯二甲酸乙二酯上,以此为基材制作的传感器在1.47 N/cm压力下可产生0.11 μ A/cm的电流密度和12 V的输出电压,对脉搏测试的响应时间仅为95 ms,具有较好的应用前景,缺陷是压电沉积法使得物质各界面间结合力相对较弱,耐用性较差。

聚合物作为柔性基材在电子皮肤中的应用优势突出,尤其在力学适配与加工成本方面优势明显,但其耐久性及界面兼容性问题仍需要通过材料改性(如纳米复合、动态共价交联)或结构设计(如仿生分层结构)进一步优化。如刘懿坤^[50]针对传统压力传感器灵敏度与线性矛盾、拉伸传感器功能单一等问题,以PPy为核心材料制备了两类柔性传感器:(1)仿生压力传感器,制作工艺为“设计梯度SBS海绵→沉积银纳米颗粒和PPy”,借助梯度刚度与导电性协同作用,实现80%传感范围、72%线性范围及1.07灵敏度,可用于脉搏检测、语音识别等,优点是平衡了灵敏度与线性,应用场景明确,制备思路可迁移;(2)应变传感器,制作工艺为“设计SBS/丝素蛋白膜复合材料→原位聚合Py→喷涂沉积CNTs”,利

用 PPy/CNTs 与 SFM 的协同作用,实现 270% 传感范围、 2.64×10^4 应变系数,兼具机械发光特性,可用于运动监测及信息加密,优点是传感范围宽、响应速度快,融合数字信号与视觉图像实现功能创新。2 种传感器的缺陷是 PPy 长期使用可能因氧化导致导电稳定性下降,机械发光在强光环境下的辨识度未验证。基于此,美国麻省理工学院研制的应用于航天器机械臂及躯干上的电子皮肤可以充分感知方位、地点及物质硬度等信息,未来将致力于开发与人类更加相似的触觉电子皮肤以促进与人类的互动交流^[51-52]。

2.3 其他用途

聚合物材料在电子皮肤中还可以用作介电材料,在电子皮肤中起隔离和绝缘作用,在防止电极之间发生短路的同时,对电子皮肤的电容特性产生影响。介电材料通常选择具备较高介电常数的聚合物材料,从而实现较小电极间距下电容的扩容,提高电子皮肤的传感灵敏度。如 Pignanelli 等^[53]制作的压力传感器,其以 PDMS 为柔性介质,设计图见图 7a,通过对其拉伸测试及微观形貌的观察得知该传感器动态与静态压力下性能稳定,该法工艺简单、成本低廉,缺陷是动静态转换时误差较大。Kang 等^[54]在此基础上,利用多层聚苯乙烯微珠对 PDMS 多孔化,并以此为电容压力传感器的介质层,使得耐用性得到极大改善,但该工艺一定程度上降低了复合材料的灵敏度。此外,聚合物还可作为电子皮肤中传感器中的封装材料。Liu 等^[55]在金属表面涂层 3D 蛇形结构导电网络,并使用 PDMS 对此封装,该结构设计使传感器可在 24° 下扭转, 160° 弯曲,满足电子皮肤柔韧性的需求,但该结构也限制了其拉伸变形,仅能维持 13.8% 的拉伸。Wang 等^[56]报道利用水性 PUR 制作的黏附层与感应层双层自黏附柔性可拉伸应变传感器,其中黏附层为生物相容性的水性 PUR,感应层为石墨烯/碳纳米管的水性 PUR 复合物,该设计应用在身体皮肤时,确保了传感器能够精确地随皮肤的变形而变形。综上所述,由于聚合物作为介电材料和封装材料可与柔性基材和其他组件良好匹配,确保了电子皮肤在各种变形条件下都能保持性能稳定。

3 结语与展望

聚合物材料凭借自身出色的柔韧性、灵活的可设计性以及便捷的加工特性,在压力触觉传感电子皮肤的研发中占据着不可替代的地位。其中,柔韧性能够让材料更好地贴合接触面,确保压力信号能够被充分捕捉,为高灵敏度响应提供基础条件;可设计性使得人们可以通过调整分子结构、改变成分比例等方式,定制材料的性能,从而满足不同场景下对传感精度的需求;加工便利性则支持采用多种工艺制备出符合结构要求的部件,助力柔性基材在柔韧性、力学强度与传感性能之间实现协同优化。这些优势让聚合物基压力触觉传感电子皮肤在医疗监测(如对人体生理状态的实时感知)、智能交互(如人机之间的触觉信息传递)等实际场景中拥有广阔的应用潜力。不过,当前该领域的研究和应用还存在一些突出问题:在传感性能方面,灵敏度与线性范围等多指标

之间难以平衡,往往提升其中一项性能就会导致另一项性能下降;材料耐久性欠佳,长期循环使用后,导电网络容易出现不稳定的情况,影响器件的使用寿命;在复杂场景中,高温高湿等环境因素会使材料性能发生变化,进而造成信号漂移,降低传感的准确性。为解决这些问题,未来的研究可从技术创新入手:借助动态共价键构建自修复聚合物基体,使材料在受到损伤后能够自主恢复性能,增强耐久性;结合 3D 打印技术制作仿生微纳阵列,模拟生物皮肤的结构特点,提高传感的精准度。通过这些方式,实现材料力学性能与电学性能的协同提升,进一步提高压力空间分辨率和响应速度,从而推动聚合物基压力触觉传感电子皮肤在可穿戴设备多模态健康监测等高端场景中得到更深入的应用。

参考文献

- [1] MA C, WANG M, UZABAKIRIHO P C, et al. High sensitivity, broad working range, comfortable, and biofriendly wearable strain sensor for electronic skin[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2022, 7(8). DOI:10.1002/admt.202200106.
- [2] 郭予宸,姜永昌,陆晓,等. 电子皮肤及其在泛在健康监测中的应用[J]. *科学*, 2025, 77(2):31-35.
GUO Yuchen, JIANG Yongchang, LU Xiao, et al. Electronic skin and its applications in ubiquitous health monitoring[J]. *Science*, 2025, 77(2):31-35.
- [3] ZHANG J H, LI Z T, XU J, et al. Versatile self-assembled electropun micropylramid arrays for high-performance on-skin devices with minimal sensory interference[J]. *Nature Communications*, 2022, 13. DOI:10.1038/s41467-022-33454-y.
- [4] 朱盛鼎,陈冬冬,雷静桃. 触觉传感器与电子皮肤研究进展[J]. *电子机械工程*, 2022, 38(4):4-9.
ZHU Shengding, CHEN Dongdong, LEI Jingtao. Research progress of tactile sensor and electronic skin[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2022, 38(4):4-9.
- [5] 万魁伟,陈家林,李世鸿,等. 电子皮肤新型材料与性能研究进展[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(6):704-714.
WAN Suwei, CHEN Jialin, LI Shihong, et al. Research progress on new materials and properties of electronic skin[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(6):704-714.
- [6] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (E-skin): A brief history, design considerations, and recent progress[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42):5 997-6 038.
- [7] 黄英,陆伟,赵小文,等. 用于机器人皮肤的柔性多功能触觉传感器设计与实验[J]. *机器人*, 2011, 33(3):347-353, 359.
HUANG Ying, LU Wei, ZHAO Xiaowen, et al. Design and experiment of flexible multi-functional tactile sensors for robot skin[J]. *Robot*, 2011, 33(3):347-353, 359.
- [8] 丁俊香,葛运建,徐菲,等. 基于导电橡胶的一种新型类皮肤触觉传感器阵列[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(3):315-321.
DING Junxiang, GE Yunjian, XU Fei, et al. Study of a new type skin liked arrayed tactile sensor based on conductive rubber[J].

- Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(3):315–321.
- [9] LI L, JIANG S, TAO Y D, et al. Fabrication and testing of a filmy “feelingless” stretchable strain sensor[C]//2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). December 11–14, 2017. Taipei. IEEE, 2017:362–367.
 - [10] PYO S, CHOI J, KIM J. Flexible, transparent, sensitive, and crosstalk-free capacitive tactile sensor array based on graphene electrodes and air dielectric[J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(1). DOI:10.1002/aelm.201700427.
 - [11] LI L, JIANG S, SHULL P B, et al. SkinGest: Artificial skin for gesture recognition via filmy stretchable strain sensors[J]. Advanced Robotics, 2018, 32(21):1 112–1 121.
 - [12] 昌康琪. 具有导电微结构的柔性多孔材料的制备及其触觉传感性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
CHANG Kangqi. Preparation and tactile sensing performances-tudy of flexible porous materials with conductive microstructure [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.
 - [13] ROGERS J A, GHAFARI R, KIM D H. Stretchable Bioelectronics for Medical Devices and Systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
 - [14] LEE J, CHUNG S, SONG H, et al. Lateral-crack-free, buckled, inkjet-printed silver electrodes on highly pre-stretched elastomeric substrates[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46 (10). DOI:10.1088/0022-3727/46/10/105305.
 - [15] KALTENBRUNNER M, WHITE M S, GŁOWACKI E D, et al. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility [J]. Nature Communications, 2012, 3. DOI:10.1038/ncomms1772.
 - [16] SUN Y, KUMAR V, ADESIDA I, et al. Buckled and wavy ribbons of GaAs for high-performance electronics on elastomeric substrates[J]. Advanced Materials, 2006, 18(21):2 857–2 862.
 - [17] WANG C F, WANG C H, HUANG Z L, et al. Materials and structures toward soft electronics[J]. Advanced Materials, 2018, 30 (50). DOI:10.1002/adma.201801368.
 - [18] MATSUHISA N, CHEN X D, BAO Z N, et al. Materials and structural designs of stretchable conductors[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(11):2 946–2 966.
 - [19] YANG S X, NG E, LU N S. Indium Tin Oxide (ITO) serpentine ribbons on soft substrates stretched beyond 100%[J]. Extreme Mechanics Letters, 2015, 2:37–45.
 - [20] FAN Z C, ZHANG Y H, MA Q, et al. A finite deformation model of planar serpentine interconnects for stretchable electronics[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 91:46–54.
 - [21] CALLENS S J P, ZADPOOR A A. From flat sheets to curved geometries: Origami and kirigami approaches[J]. Materials Today, 2018, 21(3):241–264.
 - [22] TANG Y C, LIN G J, YANG S, et al. Programmable kiri-kirigami metamaterials[J]. Advanced Materials, 2017, 29(10). DOI: 10.1002/adma.201604262.
 - [23] SHYU T C, DAMASCENO P F, DODD P M, et al. A kirigami approach to engineering elasticity in nanocomposites through patterned defects[J]. Nature Materials, 2015, 14(8):785–789.
 - [24] GHOSH T. Stretch, wrap, and relax to smartness[J]. Science, 2015, 349(6246):382–383.
 - [25] ZHAO H, HOU L, WU J X, et al. Fabrication of dual-side metal patterns onto textile substrates for wearable electronics by combining wax-dot printing with electroless plating[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(29):7 156–7 164.
 - [26] LEE S S, CHOI K H, KIM S H, et al. Wearable supercapacitors printed on garments[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28 (11). DOI:10.1002/adfm.201705571.
 - [27] MATSUHISA N, KALTENBRUNNER M, YOKOTA T, et al. Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications[J]. Nature Communications, 2015, 6. DOI: 10.1038/ncomms8461.
 - [28] JOST K, STENGER D, PEREZ C R, et al. Knitted and screen printed carbon-fiber supercapacitors for applications in wearable electronics[J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(9). DOI: 10.1039/C3EE40515J.
 - [29] 尹宝凡, 杨静, 李少波, 等. 柔性触觉传感器智能感知技术与应用研究进展[J]. 传感技术学报, 2025, 38(1):1–20.
YIN Baofan, YANG Jing, LI Shaobo, et al. Research progress of intelligent sensing technology and application of flexible tactile sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2025, 38(1): 1–20.
 - [30] 马超, 赵刚. 电子皮肤研究进展: 材料、功能与应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2021, 51(10):725–746.
MA Chao, ZHAO Gang. Recent progress in electronic skin: Materials, functions and applications[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2021, 51(10):725–746.
 - [31] 程斌, 陈家祥, 曹凌云, 等. 柔性触觉传感电子皮肤研究进展[J]. 科学通报, 2024, 69(20):2 978–2 999.
CHENG Bin, CHEN Jiaxiang, CAO Lingyun, et al. Flexible electronic skin for tactile sensing[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(20):2 978–2 999.
 - [32] GONG S, SCHWALB W, WANG Y W, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. Nature Communications, 2014, 5. DOI:10.1038/ncomms4132.
 - [33] 周冰, 范精国, 周严, 等. 采用离子导电水凝胶电极的触觉传感电子皮肤[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(9):60–70.
ZHOU Bing, FAN Jingguo, ZHOU Yan, et al. Tactile sensing electronic skin using ionic conductive hydrogel electrode[J]. Micronanoelectronic Technology, 2024, 61(9):60–70.
 - [34] WANG H P, ZHOU D B, CAO J G. Development of a skin-like tactile sensor array for curved surface[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(1):55–61.
 - [35] WANG H P, ZHOU D B, CAO J G. Development of a stretchable conductor array with embedded metal nanowires[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2013, 12(4):561–565.

- [36] YOGESWARAN N, TINKU S, KHAN S, et al. Stretchable resistive pressure sensor based on CNT-PDMS nanocomposites[C]//2015 11th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). June 29-July 2, 2015, Glasgow, UK. IEEE, 2015:326-329.
- [37] LYU X Z, SUNDARA-RAJAN K, LU W K, et al. Transfer function of interfacial stress sensor for artificial skin applications[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(8):2 640-2 647.
- [38] 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.
- [39] SHI R L, LOU Z, CHEN S, et al. Flexible and transparent capacitive pressure sensor with patterned microstructured composite rubber dielectric for wearable touch keyboard application[J]. Science China Materials, 2018, 61(12):1 587-1 595.
- [40] LI T, PAN P, YANG Z C, et al. 3D printing of a flexible inclined-tip cone array-based pressure sensor[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(6). DOI:10.1002/admt.202101135.
- [41] 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.
- [42] MA X L, WANG C F, WEI R L, et al. Bimodal tactile sensor without signal fusion for user-interactive applications[J]. ACS Nano, 2022, 16(2):2 789-2 797.
- [43] MIYAMOTO A, LEE S, COORAY N F, et al. Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nanomeshes[J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(9):907-913.
- [44] WU Q, QIAO Y C, GUO R, et al. Triode-mimicking graphene pressure sensor with positive resistance variation for physiology and motion monitoring[J]. ACS Nano, 2020, 14(8):10 104-10 114.
- [45] YANG M, CHENG Y F, YUE Y, et al. High-performance flexible pressure sensor with a self-healing function for tactile feedback[J]. Advanced Science, 2022, 9(20). DOI:10.1016/j.cesj.2024.147585.
- [46] LI T, XU Z Z, XU B B, et al. Advancing pressure sensors performance through a flexible MXene embedded interlocking structure in a microlens array[J]. Nano Research, 2023, 16(7): 10 493 - 10 499.
- [47] 韩仁厚. 高性能柔性压力传感器的灵敏层设计研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- HAN Renhou. Sensitive layer design study of high-performance flexible pressure sensor[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [48] 魏传娟. 聚氨酯基力敏感材料的构筑、性能及柔性力学传感器[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.
- WEI Chuanjuan. Construction, properties and flexible mechanical sensors of polyurethane-based force-sensitive materials[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024.
- [49] VEERALINGAM S, BHARTI D K, BADHULIKA S. Lead-free PDMS/PPy based low-cost wearable piezoelectric nanogenerator for self-powered pulse pressure sensor application[J]. Materials Research Bulletin, 2022, 151. DOI: 10.1016/j. materres-bull.2022.111815.
- [50] 刘懿坤. 基于聚吡咯杂化导电网络的构筑及在柔性传感器中的应用[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- LIU Yikun. Construction of polypyrrole-based hybrid conductive network and its application in flexible sensors[D]. Jinan: University of Jinan, 2023.
- [51] DIFTLER M A, MEHLING J S, ABDALLAH M E, et al. Robonaut 2 - The first humanoid robot in space[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. May 9-13, 2011, Shanghai, China. IEEE, 2011:2 178-2 183.
- [52] DIFTLER M A, CULBERT C J, AMBROSE R O, et al. Evolution of the NASA/DARPA robonaut control system[C]//2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. September 14-19, 2003, Taipei, China. IEEE, 2003:2 543-2 548.
- [53] PIGNANELLI J, SCHLINGMAN K, CARMICHAEL T B, et al. A comparative analysis of capacitive-based flexible PDMS pressure sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 427-436.
- [54] KANG S B, 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). DOI: 10.1002/aelm.201600356.
- [55] LIU Y M, XU Y S, AVILA R, et al. 3D printed microstructures for flexible electronic devices[J]. Nanotechnology, 2019, 30(41). DOI:10.1088/1361-6528/ab2d5d.
- [56] WANG S, FANG Y L, HE H, et al. Wearable stretchable dry and self-adhesive strain sensors with conformal contact to skin for high-quality motion monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(5). DOI:10.1002/adfm.202007495.