

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.025

柔性聚合物在摩擦自供电传感应用中的研究进展

朱朝飞, 郑浩, 侯岩松, 张功学

(陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021)

摘要: 柔性聚合物基摩擦纳米发电机(TENG)兼具能量收集与传感特性,在健康监测、医疗康复及其他可穿戴电子领域展现出巨大潜力。本文首先介绍了柔性聚合物在摩擦自供电传感器中的应用进展,并简述了TENG的基本工作原理和自供电传感机制;回顾了低拉伸弹性模量、高摩擦电活性及功能型柔性聚合物的材料特性和适配场景;分析了表面技术、化学功能化改性、纳米填料掺杂等策略在提升传感性能和拓展应用场景方面的进展,并阐述其在运动监测、生理信号检测及智能人机交互等领域的应用情况。分析表明开发可降解、环境友好、稳定且可规模化制备的柔性聚合物,是实现该技术绿色可持续发展的关键,提出构建“结构-功能协同”的多尺度复合材料体系,以推动传感技术向智能化、集成化方向演进。

关键词: 柔性聚合物;摩擦纳米发电机;可穿戴传感器;自供电;功能化改性

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0217-08

Research progress in applications of flexible polymers for triboelectric self-powered sensing

ZHU Zhao-fei, ZHENG Hao, HOU Yansong, ZHANG Gongxue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Flexible polymer-based triboelectric nanogenerators (TENG), which integrate energy harvesting and sensing functions, exhibit great potential in health monitoring, medical rehabilitation and other wearable electronic fields. The application progress of flexible polymers in triboelectric self-powered sensors was reviewed in this work. The basic working principle of TENG and their self-powered sensing mechanism were briefly described. The material properties and suitable scenarios of flexible polymers with low Young's modulus, high triboelectric activity and functional features were reviewed. The progress of surface engineering, chemical functionalization, nanofiller incorporation and other strategies in enhancing sensing performance and expanding applications were analyzed. Their use in motion monitoring, physiological detection and intelligent human-machine interaction was discussed. Analysis indicates that developing degradable, environmentally friendly, stable, and scalable flexible polymers is key to achieve green and sustainable development of this technology. A multi-scale composite material system featuring "structure - function synergy" was proposed to promote the evolution of sensing technology toward intelligence and integration.

Keywords: flexible polymer; triboelectric nanogenerator; wearable sensors; self-powered; functional modification

可穿戴设备已在健康监测、人机交互、医疗康复及运动评估等领域被广泛应用^[1-3],但仍存在便携性和能量供给问题的困扰。传统化学能电池体积大、寿命短、刚性且需要定期充电,难以适配可穿戴设备轻柔化、分布式能源需求。为实现器件轻柔化、低功耗与高响应特性^[4],现有研究多依托热电、压电、光电效应收集环境中的低品位热能^[5-6]与机械能,但其核心材料稀缺昂贵,难以规模化应用。摩擦纳米

发电机(TENG)基于摩擦起电与静电感应耦合机理^[7],可采用廉价易得的柔性聚合物制备,具备结构简单、输出电压高、力学柔性适配等优点,能高效地将低频人体机械能转化为电信号,良好匹配可穿戴设备柔性化、供能传感一体化的发展需求。

近年来,为解决可穿戴器件在柔性适配、持续供能与多参数感知方面的协同难题,研究者将研究重点逐步转向实用

基金项目: 国家自然科学基金项目(52475475),陕西省重点研发计划-国际科技合作计划项目-一般项目(2019KW-006)

通信作者: 张功学,博士,教授,硕士生导师,研究方向为塑性成形力学、柔性传感技术

收稿日期: 2026-04-15

引用格式: 朱朝飞,郑浩,侯岩松,等. 柔性聚合物在摩擦自供电传感应用中的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 217-224.

ZHU Zhao-fei, ZHENG Hao, HOU Yansong, et al. Research progress in applications of flexible polymers for triboelectric self-powered sensing[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 217-224.

化的柔性聚合物基 TENG 自供电集成传感系统^[1,8],具体技术进展集中在材料拓展、制备革新与功能集成应用拓展三大方面。材料上,已从通用弹性体延伸至高摩擦电活性聚合物及功能水凝胶。制造工艺上,通过静电纺丝、3D 打印等表面工程技术构建微纳表面结构,增强接触面积并抑制电荷耗散^[3,9],结合表面化学修饰与纳米复合改性,提升电荷密度与环境适应性。功能集成应用拓展方向,实现了从单一的机械俘能到“发电-传感”一体化突破^[10-11]。柔性聚合物可作为摩擦层、柔性基底及可拉伸电极^[12,9],在健康监测、运动分析、人机交互等领域应用前景广阔(如图 1 所示)。

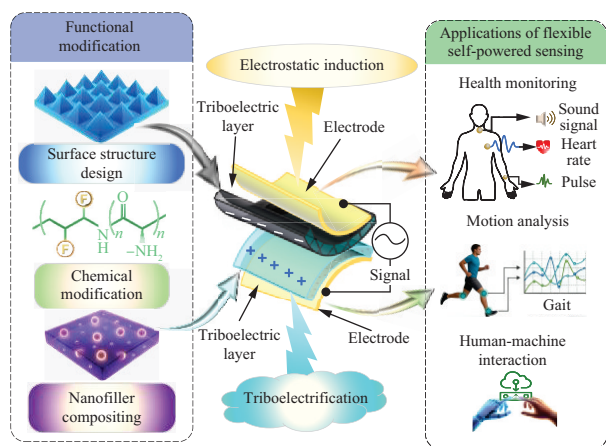


图 1 柔性聚合物基摩擦自供电可穿戴传感技术

Fig. 1 Flexible polymer-based triboelectric self-powered wearable sensing technology

本文重点讨论了材料特性、功能化改策略及典型应用场景的应用进展,分类论述了柔性聚合物特性,总结了主要功能改性优化路径,梳理了柔性聚合物基自供电传感技术在典型可穿戴应用中的进展,总结当前面临的材料稳定性、规模化制造及环境可持续性挑战,对未来发展进行展望。

1 柔性可穿戴 TENG 自供电传感技术的基本原理

1.1 柔性自供电传感技术的工作机制

TENG 依靠两种材料的接触分离或相对滑动,实现表面电荷分离与定向电流输出^[7,11],根据运动形式可分为四种工作模式,如图 2 所示。基于 TENG 的柔性自供电传感器集成俘能与传感功能^[13],既可通过人体机械能改变摩擦层的接触状态调控电荷转移和电信号输出^[14-16],也可借助温湿度变化改变材料介电常数或润湿性等特性影响材料表面电势和电荷存储能力^[9],最终依据电信号变化实现目标参数检测。

1.2 柔性聚合物的关键性能要求

柔性聚合物的摩擦电性能由化学组成、表面状态与微观结构共同决定^[17-19],核心评价指标包括摩擦电序列、表面电荷密度与介电常数,直接决定 TENG 输出性能,是正负摩擦层选材的关键依据^[3,20-22]。常见柔性材料聚四氟乙烯(PTFE)、氟化乙丙烯(FEP)、聚三氟氯乙烯(PCTFE)、聚偏氟乙烯(PVDF)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚氯乙烯(PVC)、聚醚醚酮(PEEK)、丁腈橡胶(NBR)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、

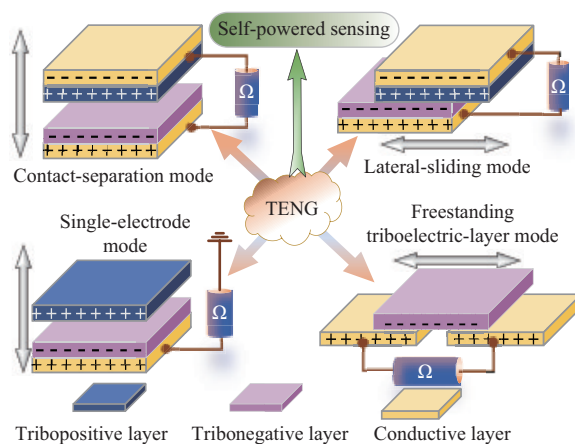


图 2 TENG 的四种工作模式与工作原理

Fig. 2 Four working modes and operating principles of TENG

聚氨酯(PUR)等的摩擦电性能参数见表 1^[21,23-25],官能团是调控聚合物电子亲和性的核心因素:含氟基(—F)、氰基(—CN)、酯基(—COOR)等强吸电子基团的聚合物多为负摩擦电序列材料;带有甲基(—CH₃)、羟基(—OH)、酰胺键(—CO—NH—)等供电子基团的聚合物多为正摩擦电序列材料^[25-26]。合理配对可大幅提升电荷分离效率和 TENG 的输出性能。调控官能团种类、含量与分布,可有效拓展柔性聚合物的应用场景,提升自供电传感器的输出性能。此外通过构建表面微纳结构可增大接触面积、抑制电荷耗散,将表面电荷密度提升 1~2 个数量级^[27]。此外,引入高介电无机纳米填料可在保持聚合物柔性的同时,将介电常数提升数倍,增强电荷存储能力^[28-29]。

同时,优异的力学柔顺性、生物相容性与环境稳定性,也是柔性聚合物在柔性自供电传感器系统中被广泛应用的前提。低模量聚合物可适配皮肤复杂形变^[16];高生物相容性可降低炎症与过敏风险;良好的化学及电学稳定性可抑制人体汗液、温湿度变化引发的降解、溶胀或电荷损耗,保障传感器长期稳定工作。

2 TENG 自供电可穿戴传感器中常见的柔性聚合物

柔性聚合物的多样性使其可满足 TENG 自供电可穿戴传感器的多维度需求。低拉伸弹性模量聚合物材料具有柔软易变形和可拉伸的力学特性,具有较好的皮肤适配性;高摩擦电活性聚合物材料保证能量转换效率;其他特种柔性聚合物材料则实现了传感特异性与性能优化。以下分类阐述各类聚合物材料的特性。

2.1 低拉伸弹性模量聚合物

低拉伸弹性模量聚合物具有优异的力学柔性、拉伸性及生物相容性。常见的 PDMS、PUR、水凝胶、氢化苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SEBS)等材料,常被用作柔性 TENG 介电层,或作为柔性可穿戴传感器的“骨架”。

纯 PDMS 的电荷转移效率较低,通常需要通过表面改性或复合改性来提升其摩擦电性能,早在 2013 年, Yang 等^[30]便利用具有微金字塔结构表面的 PDMS 薄膜和人体皮肤构建

表1 常见柔性材料的摩擦电性能参数和官能团

Tab. 1 Triboelectric performance parameters and functional groups of common flexible materials

Polymer	Triboelectric Series	Charge density /($\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$)	Functional group
PTFE	Negative	100–350	Fluorine group(—F)
FEP	Negative	120–400	Fluorine group(—F)
PCTFE	Negative	80–250	Fluorine group(—F)
PVDF	Negative	50–200	Fluorine substituent(C—F)
PDMS	Negative	60–200	Siloxane bond(—Si—O—)
Polyimide	Negative	70–210	Carbonyl group(C=O)
PVC	Negative	50–100	Fluorine group(—F)
PEEK	Negative	25–105	Ester group(—COOR)
Rubber	Slightly negative	30–90	C=C bond(C=C)
NBR	Slightly negative	40–100	Cyano group(—CN)
PMMA	Neutral	≈ 30	Ester group(—COOR)
Leather	Positive	15–40	Amide bond(—CO—NH—)
PUR	Positive	5–20	Hydroxyl group(—OH)
Cotton	Positive	5–20	Hydroxyl group(—OH)
Silk, Wool	Positive	30–100	Amide bond(—CO—NH—)
Nylon	Positive	20–100	Amide bond(—CO—NH—)

单电极模式的 TENG, 作为触摸板的自供电触觉传感器系统, 展示了自供电和高分辨率触觉传感能力。Mirsepah 等^[31]利用 PDMS 和二维过渡金属碳/氮化物(MXene)材料制备出一款灵活轻便的透明腕带形 TENG, 为 MoS₂基的可穿戴光探测器供电, 使得该装置不依赖传统电池的情况下, 可以监测人的心率和环境中的紫外光。基于 PDMS 的 TENG 还可以构成人体生理特征监测的“发电-传感”一体化传感器系统。Liu 等^[32]提出了一种由聚己内酯与 TPU 纳米纤维构成的仿生血管。导电聚吡咯(PPy)纳米线层和 PDMS 组成的柔性摩擦电信号传感器包裹在仿生血管的外围。心脏搏动引发血管周期性形变, 使 PPy 和 PDMS 层接触摩擦, 电子从 PPy 转移至 PDMS, 实现脉搏波机械信号转化为电信号, 完成了对血管狭窄和血栓的原位、实时、长期监测。总体而言, PDMS 模量低、皮肤贴合性好, 微结构加工工艺成熟, 适合作为柔性摩擦层或可拉伸基底。但其本征介电常数较低、电子俘获能力有限, 器件输出依赖表面微结构改性或高介电填料复合。PDMS 的界面可设计性强、本征电学性能偏弱的特性, 更适配舒适性优先的可穿戴传感, 而非高输出导向的传感体系。

聚氨酯类(PUR/TPU)同样弹性优异(断裂伸长率>500%), 作为易失电子材料, 常与 PDMS、PTFE 等负电性材料配对, 广泛用于动态柔性传感^[33–36]。其中热塑性聚氨酯(TPU)适配 3D 打印成型, 可实现微结构精确调控, 结合材料内部的多孔结构, 提升摩擦接触面积, 提升 TENG 的输出性能。Jing 等^[9]将高导聚苯二咪唑二酮与 TPU 混合, 制成兼具良好导电性和拉伸性能双连续柔性电极。虽然 TPU 常被认为是正电性材料, 但与人体皮肤接触摩擦时表现为负电性。Wang 等^[37]将 TPU 颗粒以 10% 的浓度混合在二甲替甲酰胺中, 再复合离子液体, 然后利用静电纺丝技术得到离子凝胶纳米纤维电极层, 最终制备了一体化离子电子摩擦电感受器。该单电极器件贴合皮肤工作, 高瞬时功率密度可达 895 W/kg。

虽然 PUR/TPU 柔韧性好、耐疲劳、易成膜且界面贴合稳定, 但导电性能不足、力学强度偏低、高温与潮湿环境下稳定性较差。

水凝胶兼具生物相容性、柔韧性、自修复及可调力学性能, 引入导电介质后可作为柔性电极, 避免金属过敏^[38], 成为了可拉伸电路、柔性传感领域的研究热点^[39–42]。Liu 等^[43]利用非对称金字塔阵列结构的聚乙烯醇基水凝胶, 通过压缩形变驱动阳离子(Li⁺)和阴离子(Cl⁻)沿梯度方向以不同速率扩散, 产生净离子流, 在 0.1 Hz 的超低频振动下实现了 4 mA 峰值电流输出, 并成功为伤口治疗药物缓释控制系统供电。Wang 等^[44]基于黑磷/聚丙烯酰胺光热水凝胶, 实现了 149.8 mW/m²功率密度的 TENG。Zhao 等^[45]制备了基于聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚对苯乙烯磺酸盐的复合导电水凝胶, 通过多重动态非共价作用实现高韧性、超拉伸、强黏附与高效自修复。该水凝胶兼具应变、温度双传感, 可高质量采集人体生理信号, 在多模态可穿戴电子中极具应用潜力。此外, 水凝胶的亲水性特点, 也是其经常被用于液固摩擦发电^[38]的原因之一。水凝胶的高含水量带来的组织相容性、离子传导能力与超低模量特征, 使其在可穿戴电子领域前景广阔, 但仍需要解决抗冻性、长期水分维持、力学稳定性等挑战。

SEBS 是一种性能优异的热塑性弹性体, 在柔性 TENG 中, 常被用作高柔韧性、可拉伸的基底或介电层材料。Ye 等^[46]将表面活性剂引入 SEBS 基质中, 改善其表面润湿性, 改性后的 SEBS 可以直接进行电路和掩膜印刷, 从而形成具有可靠导电路径的电极, 该策略提供了一种高效且可扩展的柔性电极大规模生产解决方案。纯 SEBS 的介电常数较低, 限制其电荷存储能力, Zhao 等^[47]采用刮涂法制备 SEBS/脂肪酸复合薄膜, 在高温环境下输出性能大幅增强, 可用于高温环境机械能收集、柔性自供电触觉传感。但 SEBS 存在接触有机溶剂时易发生溶胀, 高介电常数或导电填料在 SEBS 基体中容易团聚等缺点, 从而影响复合材料的整体性能。

2.2 高摩擦电活性柔性聚合物

高摩擦电活性材料是 TENG 能量转换的关键功能材料,它的表面得失电子能力直接决定表面电荷密度,进而影响器件的发电效率。这类材料通常具有明确的电负性或电正性,且化学结构稳定,可长期保持摩擦电活性。

氟系聚合物(PTFE、FEP、PCTFE、PVDF)因分子链中强极性的 C—F 键,具有极强的电子捕获能力,是典型的高负电活性材料,同时兼具柔性、环境(耐温湿度、化学腐蚀)与力学稳定等特性,完美匹配柔性自供电传感的轻量化、长效性需求。由表 1 可知,氟系聚合物的摩擦电负性在所有高分子材料中居首,常与各类正性材料配对构建高性能 TENG,甚至可以直接与铝、钢等电极接触“摩擦起电”^[48-50]。另外在液固摩擦发电中,氟系聚合物也常作为负摩擦电材料^[51-54],与微流控技术相结合通过分析人体血液、汗液和呼吸气流等,还具有实时检测穿戴者的血糖、病毒感染等生理特征的潜力^[55-56]。虽然氟系聚合物电负性强、化学与热稳定性、绝缘性和耐湿耐污性强,易制备成柔性薄膜,但部分材料偏硬、界面黏附差,难降解、易造成废弃塑料污染。未来更合理的方向并非单纯继续提高电负性,而是通过复合化、薄膜化和界面协同设计,在保持输出能力的同时降低刚性与环境负担。

聚酰胺类(尼龙、皮革、丝绸、毛发)分子链中的氨基(—NH—),具有较强的电子给予能力,使其表现出优异的电正性,是氟系聚合物的理想配对材料。例如,尼龙和 PVC 配对的 TENG,输出开路电压和短路电流分别为 1.5 kV 和 60 μ A,足以照亮低功率电子手表、210 个 LED 和两个紫外线管^[56]。此外,尼龙纤维的可编织性使其可集成于纺织物中,构建柔性织物基 TENG,适配智能服饰场景。皮革、丝绸和毛发这类以蛋白质为主要成分的天然材料兼具柔性、生物相容性,适合人体运动俘能,甚至可以利用佩戴者的皮肤充当正摩擦电极界面^[14,57],大大降低自供电传感器的结构复杂度,提高传感器的可靠性和便携性^[58]。聚酰胺材料柔性好、易取材、生物相容性佳,摩擦正电性优异;但耐湿性差、易形变老化,输出稳定性较弱,耐腐蚀性不足。

2.3 其他常用柔性聚合物

聚酰亚胺(PI)兼具良好的柔性聚合物,耐高温和高拉伸强度,可作为柔性基底承载金属电极^[36],构建可耐受恶劣环境的 TENG,适配户外可穿戴设备。Li 等^[59]将 PI 膜作为过渡层,防止掺杂了氧化石墨烯的 PVDF 与铝电极复合损耗。Liu 等^[60]在 PI 薄膜上负载银微网膜作为 TENG 的电极,搭配 PVDF 纳米纤维膜和聚酰胺 6(PA6)纳米纤维膜作为摩擦层,开发出可重复使用的电热灭菌、自供电实时呼吸监测膜口罩。此外,PI 也可用作负摩擦电材料^[61-62],Li 等^[61]采用带有铜电极的 Kapton 薄膜作为获电层、抛光铝箔作为失电层,集成 TENG 和葡萄糖燃料电池,混合收集人体的生物机械能量和生化能量。PI 凭借热稳定性和机械耐久性,在对可靠性、耐候性要求严苛的领域是首选材料,但 PI 膜成本较高,几乎没有弹性,不适合高拉伸性的应用场景。

Ecoflex 作为化石基生物可降解弹性体,具有超柔韧、耐高低温、耐老化、易成型等特性^[14],在柔性可穿戴传感器中应用广泛。Wang 等^[63]采用模板法构建了一种纳米结构的 V_2CTx - $BaTiO_3$ - $V_2CTx@Ecoflex$ 三层复合介电层薄膜。以上、下两层 V_2CTx 捕获电荷、抑制复合,中间高介电 $BaTiO_3$ 层增强电荷存储,协同提高 TENG 的输出性能。Zhang 等^[64]制备了多壁碳纳米管/二维 MXene/超软硅橡胶(MWCNTs/MXene/Ecoflex)复合薄膜,通过导电网络使材料介电常数提升 21 倍,器件具备 700% 的拉伸性能。虽然 Ecoflex 的力学性能优异,但介电常数低、电荷保持能力弱的缺点限制其进一步应用。

聚醚类材料(聚环氧乙烷、聚四氢呋喃、聚甲醛、PEEK),凭借良好的生物相容性、可加工性及柔韧性,在 TENG 中主要作为正摩擦层或柔性基体,常与负电性材料配对。通过表面微纳结构、纳米填料复合等改性策略,可有效提升表面电荷密度与发电性能,优化后器件功率密度可达 1.5 W/m²^[65],能高效收集环境及人体生物机械能。在传感应用中,聚醚类材料可实现压力、湿度等多参数检测,响应迅速且生物相容性突出,尤其适用于植入式医疗传感、可穿戴健康监测等场景^[66]。相较于 PDMS、PTFE、PI 等传统材料,聚醚类材料在可降解性、成本控制方面优势显著,是兼顾环保性与实用性的潜力材料,但本征摩擦电活性及环境稳定性较弱,需通过改性弥补。

针对自供电可穿戴传感的绿色化需求,生物基聚乳酸(PLA)纤维素复合材料成为主要候选材料。Zhang 等^[67]采用离心纺丝技术,以十二烷基苯磺酸钠为分散剂实现科琴黑在 PLA 基体中的均匀分散,制备多孔非织造纤维,其外层包覆 PDMS 构建一体化可降解器件。该传感器兼具应变传感与摩擦发电功能,经 1 000 次弯曲循环后仍保持性能稳定,输出电压可达 80 V,适用于人体运动监测。该方案易于规模化、多功能集成突出,但仅在碱性环境下降解较快,自然条件下降解速率有限,高湿度下导电稳定性有待提升。

柔性聚合物是 TENG 基自供能可穿戴传感器的核心材料,微结构调控、填料复合、3D 打印等技术已显著提升其发电与传感性能。但仍存在机械性能与电输出性能难以兼顾,规模化制备技术不完善,易引发污染的问题。当前材料设计已从单一低模量,转向离子导电、自修复的多目标协同,形态与评价标准也向多功能、绿色化拓展。

3 柔性聚合物的功能化改性策略

为了改善本征聚合物摩擦电活性不足、介电常数低、电荷易耗散及力学适配性差等问题,其功能化改性策略主要为:界面与表面工程优化接触界面、提高电荷密度、抑制电荷耗散;聚合物的本体改性(纳米复合掺杂、化学交联、离子与动态网络构筑),实现电荷增强与优异力学适配性。

3.1 提升柔性聚合物性能的界面与表面工程

柔性聚合物表面的微观结构直接决定接触面积、电荷耗散行为及力学性能。合理的表面结构设计能够增大有效接

触面积,提高表面电荷密度,优化柔性传感器的输出性和传感灵敏度^[68]。Wu等^[69]在PDMS膜表面构建金字塔型微结构,并引入PTFE制备低电荷复合率的存储层,有效降低电荷损耗,实现长期循环稳定的电信号输出。现阶段已经有刻蚀法、模板法^[70]、静电纺丝^[71]、发泡^[72-73]等多种技术手段制备微米柱、纳米凹凸、纳米孔隙、纳米线等微纳形貌^[74-77],使材料接触面积提升10~100倍,显著增强表面电荷积累能力。总之各类针对柔性聚合物表面的微纳改性技术工艺成熟、适配柔性基底且结构可调,模板法、刻蚀法、自组合法各具优势。但整体流程烦琐、成本较高,易损伤基底,形貌易塌陷,循环稳定性不足,大面积均匀制备难度大。

虽然众多材料具有摩擦起电效应,但自身官能团得失电子差异导致材料表面的电子亲和能力和表面电荷密度有限。等离子体离子注入可拓宽摩擦材料的选择范围,注入离子的材料还可以作为电荷源。Jan等^[68]采用CF₄/O₂等离子体处理Ecoflex表面的微穹顶阵,增强其负电特性及产生负电荷的能力,并结合复合介电增强层提高电荷存储能力,进一步提升自供电传感器的输出电压和能量转换效率。研究者常用官能团化学修饰、接枝共聚等技术优化摩擦材料性能^[7]。Liu等^[78]利用3-氨基丙基三乙氧基硅烷作为改性剂,对纤维素基复合水凝胶进行表面改性,得到了力学和导电性能优异的柔性电极,可应用于柔性电路和自供电传感器件。Kamilya等^[79]通过原子转移自由基聚合将二乙二醇甲基醚甲基丙烯酸酯接枝到PVDF上,实现其摩擦电性由负转正,制备成的TENG在9 500次循环和150 d内保持稳定性。无论化学方法还是等离子体诱导方法,都可以实现接枝共聚改性^[80],并且这类材料具有结合强度高、功能可控且长效的优势,但工艺相对复杂,成本也可能更高。在对耐久性要求不高的场景下,物理吸附、表面涂覆、化学沉积等方法操作简便、快速普适,是更具成本效益的选选方案。

3.2 柔性聚合物的本体改性

向聚合物基体中引入如金属纳米颗粒、金属氧化物、碳基材料或二维MXene,可协同优化材料的摩擦电性能与传感性能,尤其是在多孔弹性体中进行纳米复合掺杂改性,材料的电荷增强效果尤为显著^[44,81-82]。Cheng等^[83]通过熔融纺丝法制备石墨烯、碳纳米管、炭黑单一及复合填充的聚丙烯复合纤维(HPCF),探究了填料对比对纤维力学及摩擦电性能的调控规律;结果表明,总碳填料质量分数为5%时,HPCF构建的TENG表现最优,接触分离与横向滑动模式下功率密度分别提升1 400%和1 632%。Wang等^[33]通过牺牲模板法制备了具有分级多孔结构的碳纳米管(CNT)改性TPU海绵。实验表明CNT质量分数优化至6%时,在导电性提升的同时避免结构劣化。该海绵具有高压缩性(80%),并表现出优异的结构稳定性、导电性和压阻性能,具有作为电极和摩擦层的潜力。纳米复合掺杂是提升TENG输出性能的有效手段,但掺杂量难控,易引发缺陷与性能波动,容易出现填料团聚和渗流风险。

化学交联在聚合物分子链间形成共价键网络,增大力学性能、弹性、耐磨性,抑制内部电荷迁移和耗散。Zhu等^[84]通过多组分化学交联制备丙烯酰胺基水凝胶,结合羧基活性位点、共价交联与主客体动态作用构建稳定三维网络,显著提升了材料力学与界面性能。Wang等^[44]以聚丙烯酰胺(PAM)为基体,复合琼脂、硼砂、单宁酸修饰黑磷(TABP)制备高透明、高导电、可自修复、光热响应复合水凝胶,将其作为柔性电极与微结构PDMS封装,构建透明TENG。该水凝胶采用共价化学交联为主、硼酯键与氢键动态交联为辅的策略,结合离子传导机制,实现高透明、高导电、高拉伸与光热响应的一体化改性。水凝胶具备高拉伸、强黏附、自修复特性,改性后作为柔性电极构筑的摩擦纳米发电机表现出优异的输出与循环稳定性,但易失水、透气性差,制备工艺繁琐,不利于低成本规模化制备。

Joo等^[85]通过咪唑基离子液体二醇对聚氨酯进行离子交联与动态网络构筑,以聚己内酯(PCL)为可降解软段、脂肪族二异氰酸酯(HDI)交联剂为共价交联硬段,依托离子-偶极作用与多重氢键构建可逆动态交联网络,可在75℃下快速自修复,修复效率达90%。该技术制备的聚合物兼具自修复、可生物降解、高摩擦正电性,但离子液体含量过高致材料刚性增大、加工性受限;长期环境稳定性与长期服役寿命仍需优化。

各类功能化改性策略并不存在普适最优解。表面微结构可提升瞬时输出和灵敏度,但易发生形貌塌陷与磨损;化学改性界面电性稳定,但制备繁琐、成本偏高;纳米填料复合可同步增强介电性能与力学性能,易出现分散不均和渗流风险;离子及动态网络虽可赋予器件自修复和高柔顺性,却可能牺牲长期环境稳定性。因此,材料设计不应追求单一性能,而在于围绕目标应用建立输出性能、柔顺性、耐久性和可制造性之间的平衡。

4 柔性聚合物TENG驱动的可穿戴自供电传感典型应用场景

柔性聚合物基TENG凭借柔性、轻量化及自供电特性,已在可穿戴设备的多个应用场景中展现出实用价值,从人体运动监测到生理信号检测,再到人机交互,其应用覆盖健康管理、运动科学、人机智能交互等领域。

4.1 人体运动监测

人体运动(如关节弯曲、肢体摆动、足底接触)产生的机械能是TENG的理想能量源^[86],同时运动参数(角度、频率、压力)可通过TENG的输出信号反演,实现自供电运动监测。量化关节运动状态是对医疗康复和运动训练等场景进行精准赋能的关键。将柔性TENG贴附于膝关节、肘关节等部位,通过关节弯曲引起的材料接触分离,输出与弯曲角度相关的电信号,通过数据替代主观判断,既保障健康安全,又驱动可穿戴自供电传感器等技术落地。Zou等^[87]设计了一种基于硅胶和PDMS的双层仿生可拉伸纳米发电机,利用PDMS和有机硅之间的应力不匹配效应,构建充满了带电液

体的微通道,模仿电鳗细胞膜上的离子通道结构,将该可拉伸 TENG 佩戴于集成了多通道无线模块的肘、膝部位时,可实时采集不同泳姿(蛙泳、自由泳等)的运动信号(幅度、频率存在差异),可分析游泳动作、监督训练,还可以记录溺水信号,充当游泳者危险状态的“黑匣子”。此外,将柔性 TENG 集成于手指关节,可通过不同手指的弯曲组合,输出差异化电信号,实现手势识别(如握拳、伸展)^[14]、智能量化运动监控和分析^[88]。

基于高分子泡沫或纤维的 TENG 压力传感器阵列,可实现高分辨率足底压力监测,定量分析人体平衡能力与步态特征。Wang 等^[13]开发了一种通过非线性协同压力传感自供电智能鞋垫。该鞋垫配备由上下电极、碳纳米管、乙炔黑和 PDMS 组成的 22 个压力传感单元。这 22 个传感单元集成到 PDMS 基底上,利用聚酰亚胺进行封装,将脚底压力信号转换为电信号,由模数转换器收集,并通过蓝牙模块传输到移动终端。最后,通过集成的机器学习模型,该系统成功采集并分类各种运动状态的脚底压力数据,用于足底压力的空间分辨监测和步态的实时可视化。

4.2 生理信号检测

人体生理信号(如呼吸、心跳、汗液成分)通常伴随微小机械能或化学变化,柔性聚合物基 TENG 可通过捕获这些微小能量实现自供电,同时将生理信号转换为电信号,实现健康监测^[31,49]。例如,基于超柔性 PDMS 薄膜和铜电极组成的接触分离式 TENG,可以排列成 1×3 阵列贴附于手腕动脉处,脉搏跳动引起的微小压力变化可使 TENG 输出电压波动,实现自供电的微弱生理信号监测^[74]。通过分析电压波形的峰值间隔与幅度,可提取心率与血压信息,适配心血管健康监测。

汗液中的代谢物(如葡萄糖、乳酸)与电解质(如 Na⁺、K⁺)是反映人体健康状态的重要指标,功能化的聚合物基 TENG 可以实现自供电汗液检测^[89-90]。Song 等^[89]提出一种可穿戴自供电汗液传感器系统,该系统中的柔性 TENG 由滑动单元和静止单元组成,其中经光刻制成的光栅结构柔性覆铜板为滑动单元,背面有叉指式铜电极的 PTFE 为静止单元,通过高效俘获人体运动能量,实现 416 mW/m² 的高功率输出;集成的微流控汗液传感器阵列,可精准监测汗液中 pH 值和 Na⁺ 浓度,该系统在佩戴者 60 min 跑步过程中可完成 18 个周期监测,数据准确性与电池供电系统一致。Chang 等^[90]设计了基于 N 型掺杂石墨烯量子点修饰聚苯胺(NGQDs/PANI)复合层的 TENG,该自供电传感系统利用摩擦起电与酶促反应的耦合效应,实现人体汗液中葡萄糖的无创监测。NGQDs 的引入提升了 PANI(聚苯胺)的表面电负性和导电性,使传感器灵敏度达到 23.52/mmol,且具有优异的选择性、重复性和稳定性,可通过 LED 电路实现高血糖报警,为糖尿病的无创连续监测提供了新的医疗平台。

4.3 智能人机交互

柔性聚合物基摩擦电自供电可穿戴传感器兼具柔性与

透明属性,能够融入可穿戴设备的交互界面设计,达成自供电式人机交互;与此同时,经过功能化改性的 TENG,还能对有害气体、温度等环境刺激作出灵敏响应,进而实现自供电的智能防护功能^[16]。Pu 等^[91]将柔性聚合物 TENG 集成于智能眼镜,通过摩擦起电与静电感应耦合机制,可非侵入式捕获眨眼引起的皮肤微动,输出信号强度达 750 mV,是传统心电图的 750 倍以上。该系统可实现无需生物电信号采集、非侵入式、高灵敏度的人机交互,尤其适用于运动障碍患者(如闭锁综合征患者)和健康人群的日常辅助交互。功能化聚合物 TENG 在保持透明度、拉伸性的同时,还被赋予了良好导电性与光热效应。例如,Wang 等^[40]设计并制备了一种基于黑磷复合水凝胶的透明柔性 TENG。该研究采用聚丙烯酰胺-琼脂-硼砂-单宁酸改性黑磷复合水凝胶作为电极材料,构建了具有高透明度、高拉伸性、良好导电性与光热效应的柔性器件。该器件不仅可用于收集人体机械能并驱动小型电子设备,还可通过红外光触发温敏墨水变色,实现信息加密与防伪应用。

柔性可穿戴自供电传感技术强调安全性、隐私性、可靠性和用户便利性,并应该围绕智能集成与场景深化方向展开。智能集成研究致力于实现多参数生理信号(如压力、温度、生化指标)的同步监测,并融合低功耗传感芯片、无线传输技术与轻量化储能单元,构建一体化的自供电感知系统。智能化将成为核心驱动力,通过嵌入边缘计算与 AI 算法,实现数据的实时处理、行为识别及健康风险早期预警。应用场景将从健康监护拓展至运动科学、人机交互、虚拟现实等广阔领域,最终推动个性化、智能化、网络化的下一代可穿戴生态系统成型。

5 结语

柔性聚合物凭借优异的力学顺应性、可功能化修饰性及良好的生物相容性,已成为自供能可穿戴传感器发展的核心支撑材料。本文系统阐述了柔性可穿戴 TENG 自供能传感的工作原理,综述了低拉伸弹性模量、高摩擦电活性及功能性柔性聚合物的特性及其在器件中的关键作用。通过分析材料界面与表面改性、纳米复合、化学交联等策略,揭示了提升器件输出性能与传感灵敏度的有效途径,并探讨了其在人体运动监测、生理信号检测及智能人机交互等领域的典型应用。总之,柔性聚合物已经在自供能可穿戴传感器领域得到了广泛应用,未来可以从下述材料及相关研究角度,拓展和改进柔性聚合物在摩擦电自供能可穿戴传感器中的应用。

(1)在提高能量转换效率方面,未来聚合物功能化改性发展趋势,将从单一聚合物本体优化,转向纳米填料复合、表面功能化、动态/离子网络、微结构等技术协同,提升材料电荷密度、介电常数、电荷捕获能力、能量转换效率,并追求力学性能、耐久性和可穿戴舒适性的多目标平衡。

(2)在提高稳定性方面,应聚焦多功能集成与一体化创新,实现摩擦层与电极的融合设计,赋予材料自愈合、防水透气、环境自适应等复合功能。同时开发如抗冻凝胶、长期水

分维持及力学稳定性材料,保持极端环境下(高温、高湿度)材料的摩擦电活性与结构稳定性,满足复杂场景应用需求。

(3)在智能化与信息化发展方向,应融合边缘计算、机器学习等技术,实现生理信号的实时处理、行为识别与健康风险预警,推动器件从单一感知向“感知-分析-响应”一体化升级,拓展应用场景边界,从传统健康监测、运动分析向智能服饰、虚拟现实交互、植入式医疗设备等领域延伸,构建个性化、网络化的可穿戴生态系统。

(4)在践行绿色电子发展理念方面,应积极开发在使用周期后可完全降解的柔性聚合物材料,并关注器件制造与回收过程中的环境友好性。

参考文献

- [1] BISWAS S, et al. *small science*, 2024, 4(3). DOI: 10.1002/smssc.202300148.
- [2] CAO X L, et al. *Nano Micro Letters*, 2023, 15(1). DOI: 10.1007/s40820-022-00981-8.
- [3] NEERAJ, et al. *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 2025, 4(4): 146–153.
- [4] WANG Y L, et al. *Nano Micro Letters*, 2025, 17(1). DOI: 10.1007/s40820-025-01778-1.
- [5] KIM J H, et al. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2025, 27:255–282.
- [6] ZHENG G P, et al. *Measurement*, 2026, 257. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.118815.
- [7] XIANG H J, et al. *Science Advances*, 2024, 10(48). DOI: 10.1126/sciadv.ads2291.
- [8] HUR J, et al. *Nano Energy*, 2025, 135. DOI: 10.1016/j.nanoen.2025.110645.
- [9] JING Z X, et al. *Advanced Materials*, 2025, 37(34). DOI: 10.1002/adma.202506511.
- [10] BIJALWAN V, et al. *Polymer Reviews*, 2025, 65(3):975–1 009.
- [11] YANG H M, et al. *Nano Energy*, 2025, 135. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110623.
- [12] FALLAHRAD M, et al. *Nature Communications*, 2025, 16(1). DOI: 10.1038/s41467-025-64101-x.
- [13] CHEN Z D, et al. *Nature Nanotechnology*, 2025, 20(12): 1 796–1 804.
- [14] XIONG K X, et al. *Energy*, 2025, 327. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136434.
- [15] WANG Q, et al. *Science Advances*, 2025, 11(16). DOI: 10.1126/sciadv.adu1598.
- [16] ZOU R, et al. *Device*, 2024, 2(11). DOI: 10.1016/j.device.2024.100466.
- [17] HE S S, et al. *Science Advances*, 2024, 10(27). DOI: 10.1126/sciadv.ado6793.
- [18] CHAO X J, et al. *Science Advances*, 2025, 11(36). DOI: 10.1126/sciadv.adw6179.
- [19] LIN S M, et al. *Science Advances*, 2025, 11(41). DOI: 10.1126/sciadv.adx2628.
- [20] TANG W, et al. *Nature Communications*, 2025, 16(1). DOI: 10.1038/s41467-025-64575-9.
- [21] ZOU H Y, et al. *Nature Communications*, 2019, 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- [22] BABURAJ A, et al. *Nano Energy*, 2023, 118. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108983.
- [23] CHEN A H, et al. *Advanced Science*, 2020, 7(14). DOI: 10.1002/advs.202000186.
- [24] YU A F, et al. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(41). DOI: 10.1002/adfm.201900098.
- [25] LIU Y H, et al. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(50). DOI: 10.1002/adfm.202004714.
- [26] CHOI G J, et al. *Polymers*, 2025, 17(14). DOI: 10.3390/polym17141962.
- [27] 周灵琳,等. *科技导报*, 2022, 40(17):24–35.
ZHOU Linglin, et al. *Science & Technology Review*, 2022, 40(17):24–35.
- [28] FAN L, et al. *Polymer*, 2020, 201. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122608.
- [29] CUI N Y, et al. *ACS Nano*, 2016, 10(6):6 131–6 138.
- [30] YANG Y, et al. *ACS Nano*, 2013, 7(10):9 213–9 222.
- [31] MIRSEPAH A, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499. DOI: 10.1016/j.cej.2024.155953.
- [32] LIU Z R, et al. *Nature Communications*, 2025, 16(1). DOI: 10.1038/s41467-025-58056-2.
- [33] WANG Y Y, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521. DOI: 10.1016/j.cej.2025.166530.
- [34] ZHANG Z X, et al. *ChemNanoMat*, 2024, 10(10). DOI: 10.1002/cnma.202300614.
- [35] SUN J F, et al. *Nature Communications*, 2025, 16(1). DOI: 10.1038/s41467-025-57656-2.
- [36] CHEN X J, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499. DOI: 10.1016/j.cej.2024.156431.
- [37] WANG H L, et al. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1). DOI: 10.1007/s40820-022-00834-4.
- [38] GAO Z G, et al. *Nature Communications*, 2025, 16(1). DOI: 10.1038/s41467-024-55030-2.
- [39] CHEN Y W, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(1):291–300.
- [40] SHEN K X, et al. *Materials Horizons*, 2023, 10(6):2 096–2 108.
- [41] LU Y, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021. DOI: 10.1021/acsami.1c16828.
- [42] 王晨晓,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(4):167–172.
WANG Chenxiao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(4):167–172.
- [43] LIU H Z, et al. *Nature Communications*, 2024, 15(1). DOI: 10.1038/s41467-024-45931-7.
- [44] WANG R, et al. *Matter*, 2023, 6(5):1 514–1 529.
- [45] ZHAO R R, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 510. DOI: 10.1016/j.cej.2025.161645.

- [46] YE Q, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 720. DOI:10.1016/j.colsurfa.2025.137132.
- [47] ZHAO Y J, et al. *Nano Energy*, 2023, 114. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108654.
- [48] LI X J, et al. *Nature Food*, 2022, 3(2):133–142.
- [49] LI Y Z, et al. *Cell Reports Physical Science*, 2023, 4(1). DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.101191.
- [50] HAO D N, et al. *Small*, 2024, 20(28). DOI: 10.1002/smll.202311036.
- [51] LIU T, et al. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(45). DOI: 10.1002/adfm.202304321.
- [52] ZHU Y P, et al. *Nano Energy*, 2024, 122. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109340.
- [53] WU H, et al. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(16). DOI: 10.1002/aenm.202100038.
- [54] LI C Z, et al. *Nano Energy*, 2022, 95. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.106998.
- [55] YANG W Q, et al. *ACS Nano*, 2013, 7(12):11 317–11 324.
- [56] YANG Z, et al. *ACS Nano*, 2021, 15(2):2 611–2 623.
- [57] ZHANG H, et al. *Rare Metals*, 2022, 41(9):3 117–3 128.
- [58] XIONG J Q, et al. *Nature Communications*, 2018, 9(1). DOI: 10.1038/s41467-018-06759-0.
- [59] LI S, et al. *Nano Energy*, 2025, 133. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110436.
- [60] LIU W Q, et al. *Nano Energy*, 2023, 105. DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107987.
- [61] LI H, et al. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1). DOI: 10.1007/s40820-020-0376-8.
- [62] QU X C, et al. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(5). DOI: 10.1002/adfm.202006612.
- [63] WANG Y F, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 512. DOI: 10.1016/j.cej.2025.162397.
- [64] ZHANG S Y, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 505. DOI:10.1016/j.cej.2025.159562.
- [65] LIU X, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(1): 265–273.
- [66] WU L Y, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(19): 2500210. DOI:10.1002/adem.202500210.
- [67] ZHANG D Q, et al. *ACS Sensors*, 2025:acssensors.5c02723. DOI: 10.1021/acssensors.5c02723.
- [68] JAN A A, et al. *Soft Matter*, 2024, 20(33):6558–6 567.
- [69] WU W L, et al. *ACS Applied Electronic Materials*, 2025, 7(18): 8 655–8 664.
- [70] LIU S, et al. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(10): 2 930–2 941.
- [71] ZHOU H F. *AIP Advances*, 2024, 14(6). DOI:10.1063/5.0213289.
- [72] NADERI G, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2025: pen.70196. DOI:10.1002/pen.70196.
- [73] YOON S, et al. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):938. DOI:10.1038/s41598-020-78580-z.
- [74] YU J B, et al. *Nano Energy*, 2020, 69: 104437. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104437.
- [75] ZHAO X, et al. *Nano Energy*, 2021, 85: 106001. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106001.
- [76] WU Y, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(9). DOI: 10.1002/adem.202201442.
- [77] 潘雨晴, 等. *工程塑料应用*, 2025, 53(3):166–173.
PAN Yuqing, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3): 166–173.
- [78] LIU A F, et al. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2025. DOI:10.1016/j.jobab.2025.08.003.
- [79] KAMILYA T, et al. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5 (12):6 521–6 530.
- [80] WANG C C, et al. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(13): 4 542–4 548.
- [81] SUO X, et al. *Nano Energy*, 2023, 114. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108651.
- [82] HATTA F F, et al. *ACS Omega*, 2024, 9(5):5 608–5 615.
- [83] CHENG Y, et al. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(3). DOI:10.1007/s42114-025-01341-x.
- [84] ZHU K R, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149948.
- [85] JOO H, et al. *Nano Energy*, 2024, 126. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109706.
- [86] ZHU Z Z, et al. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(4). DOI: 10.1088/1361-665X/adcbf7.
- [87] ZOU Y, et al. *Nature Communications*, 2019, 10(1). DOI:10.1038/s41467-019-10433-4.
- [88] LIAN Q, et al. *Nano Research Energy*, 2025, 4(1). DOI:10.26599/NRE.2024.9120139.
- [89] SONG Y, et al. *Science Advances*, 2020, 6(40). DOI: 10.1126/sciadv.aay9842.
- [90] CHANG Y H, et al. *Nano Energy*, 2023, 112. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108505.
- [91] PU X J, et al. *Science Advances*, 2017, 3(7). DOI: 10.1126/sciadv.1700694.