http://pmse.scu.edu.cn

# 基于聚二甲基硅氧烷弹性体的摩擦电纳米发电机的研究进展

李宸辉[1]，王璐[1]，刘晓骏[1]，吴治诚[2]，井新利[1]，樊威[3]，张承双[4]，王淑娟[1]

(1. 西安交通大学 化学学院，陕西 西安 710049；2. 西安交通大学 电气工程学院，陕西 西安 710049；3. 西安工程大学 纺织科学与工程学院，陕西 西安 710048；4. 西安航天复合材料研究所，陕西 西安 710025)

**摘要：**随着全球气候变化与环境污染问题日益严峻，可再生能源技术越来越受到关注。摩擦电纳米发电机(TENGs)可以将机械能转为电能，是重要的能量收集技术之一。TENG由于成本低、效率高且输出功率大，被广泛用于微纳电源、自供电传感器、大规模海洋能量收集和高压直接电源等领域。TENG的输出性能主要取决于摩擦电材料，聚二甲基硅氧烷(PDMS)由于具有良好的柔韧性、生物相容性及负极性是优异的负摩擦电材料。文中综述了PDMS作为负摩擦电材料的优势，探讨了PDMS的物理改性或化学改性对TENG性能的影响，并深入分析了PDMS基TENG的应用及存在的问题。

**关键词：**摩擦电纳米发电机；聚二甲基硅氧烷弹性体；物理改性；化学改性；应用

**中图分类号：**TM31 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)08-0181-10

摩擦电纳米发电机(Triboelectrification nanogenerator, TENG)是一种新兴的能量收集技术，其工作原理基于摩擦电气化效应和静电感应原理[1]，即2种对电子亲和力不同的材料经接触-分离后形成电势差，从而将环境中的机械能转化为电能[2]。TENGs具有能量转换效率高、输出功率大、适用性广、易组装、易操作和成本低等优点[3]，被广泛用于微纳电源、自供电传感器、大规模蓝色能量收集和高压直接电源等领域[4]。在全球能源危机的背景下，TENGs不仅能够收集风能，还可以与常规风速传感器集成，用于自供能、无线和远程气象探测，极大地促进了绿色可持续能源收集的发展[5]。常用于TENGs的摩擦电材料有高分子材料(如聚二甲基硅氧烷、聚偏氟乙烯、聚四氟乙烯和聚酰亚胺等[6])和二维材料(如石墨烯、氧化石墨烯、MXenes、黑磷等[7])。然而，基于上述摩擦电材料的TENGs的输出电压、短路电流和输出功率有待进一步提升，难以满足商业化应用[8]。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体由于良好的热稳定性、耐腐蚀性、化学惰性和透气性等特性，以及低成本、易回收等优势，广泛用于微流体系统、3D打印、摩擦发电、传感器和涂层等领域[9]。由于柔韧性好、生物相容性好和负极性强等特点[10]，PDMS弹性体是TENGs常用的负摩擦电材料之一。但传统的PDMS弹性体存在力学性能差、输出性能低和抗磨损性差等问题，使其应用受到限制。基于PDMS弹性体的摩擦电材料改性方法有物理改性和化学改性，其中，物理改性通过物理混合或模板压印提高TENG的输出性能，化学改性通过化学键合(如引入动态共价键、改变交联剂含量和等离子处理等)实现。基于改性PDMS的摩擦电材料不仅具备开路电压、短路电流和功率密度高等优点，在制作工艺上也更加简化。尤其是基于动态共价键的PDMS弹性体表现出良好的自修复、可再加工性和耐溶剂性[11]，将其作为摩擦电材料制备的TENG也表现出上述性能。本综述总结了PDMS弹性体作为负摩擦电材料

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0149
收稿日期：2023-08-15
基金项目：国家重点研发计划(2019YFA0706801)；国家自然科学基金资助项目(52173080)
通讯联系人：王淑娟，主要从事功能和智能高分子材料研究，E-mail: shujuanwang@mail.xjtu.edu.cn

的研究现状，讨论了PDMS弹性体的物理改性和化学改性对TENG性能的影响，并探讨了基于PDMS弹性体的TENG的应用与面临的挑战。

## 1 基于PDMS弹性体的TENG摩擦电材料研究现状

### 1.1 未改性的PDMS弹性体

PDMS弹性体可以作为负摩擦电材料及摩擦电荷保护层提升TENG的输出性能。通过选择合适的正摩擦电材料与PDMS弹性体配合可以提高TENG的输出电压、输出功率。例如，Yang等[12]以人体皮肤和PDMS弹性体分别作为TENG的正摩擦和负摩擦电材料制备了接触分离式TENG(Fig.1(a))，其输出电压可以达到1000 V。Jian等[13]将填充了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的花状$TiO_2$(F-$TiO_2$)作为TENG的正摩擦电材料(Fig.1(b))，其输出电压和输出功率分别为1200 V和34.85 W/m$^2$。此外，PDMS弹性体也可以作为摩擦电荷保护层提高TENG的功率密度。Kim等[14]在摩擦层和电极之间添加PDMS弹性体作为摩擦电荷保护层(Fig.1(c))，最终TENG的输出功率密度提升了173倍(20.8 W/m$^2$)。此外，将TENG与其它能量类型(如太阳能、风能、水能等)的发电机结

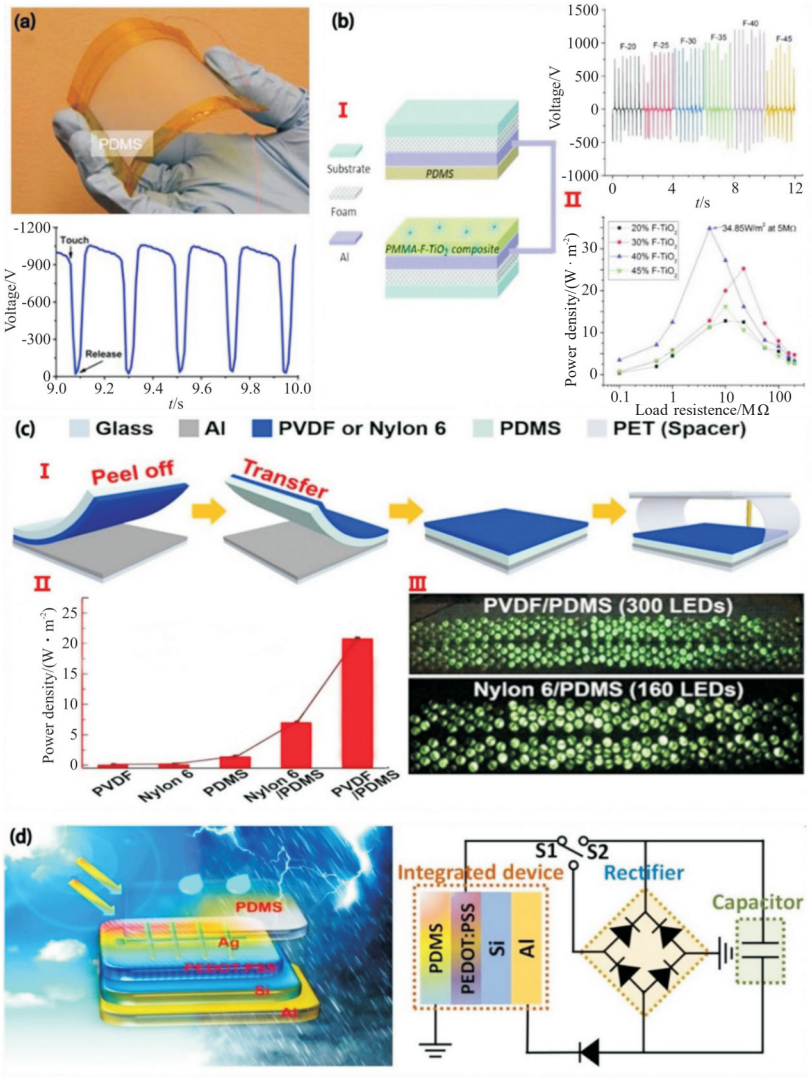



**Fig. 1 (a) Diagram and output voltage of TENG[12]. (b) I) Structure diagram of TENG; II) output voltage and power density of TENG[13]. (c) I) structure diagram of TENG; II) power density of PVDF, Nylon 6, PDMS, Nylon 6/PDMS and PVDF/PDMS as triboelectric materials; III) LED power supply diagram of TENG with Nylon 6/PDMS and PVDF/PDMS as triboelectric materials[14]. (d) Schematic diagram and circuit diagram of the solar-mechanical hybrid power system device[15]**

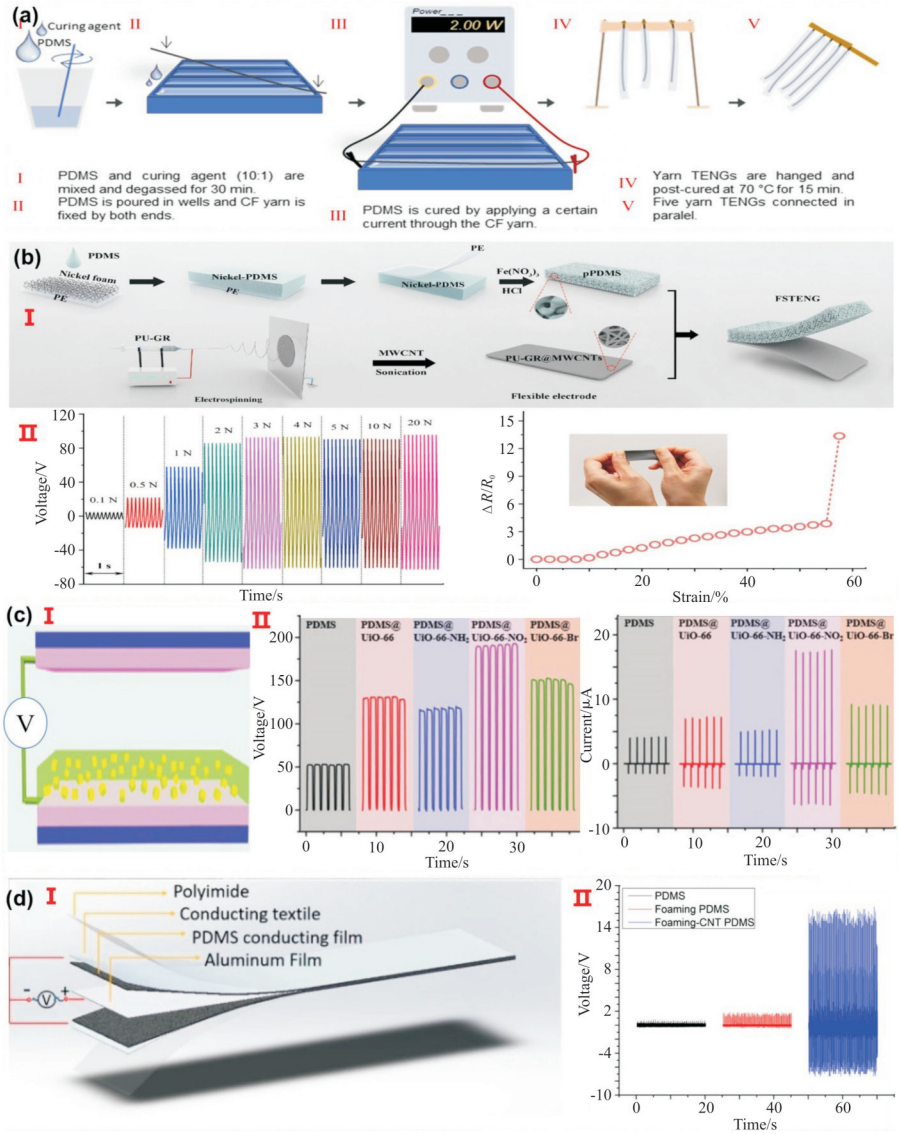



**Fig. 2 (a) Curing process of PDMS on the conductive carbon wire[17]. (b) I) Preparation of FSTENG; II) output voltage of FSTENG at different pressures; III) Resistance change rate of FSTENG at different strains[18]. (c) I) Structure diagram of TENG; II) OUTPUT voltage of TENG; III) output current of TENG[19]. (d) I) Structure diagram of TENG; II) output voltage of TENG[20]**

合,可以提高能源利用率并扩大装置在不同环境的适用范围。Liu 等[15]将 PDMS 摩擦层和电极聚 3, 4-乙烯二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)层相结合(Fig.1(d)),构建了含有太阳能电池的单电极式水滴 TENG,可以将太阳能及水滴的机械能转化为电能,该研究提供了一种从环境中收集能量的有效方法。虽然 PDMS 弹性体作为负摩擦电材料提升了 TENG 的输出电压(千伏左右)和输出功率,但是基于传统 PDMS 弹性体的 TENG 存在穿戴性差、灵敏度低和耐久性差等问题,即使与其它装置组合也无法解决上述问题。

### 1.2　改性 PDMS 弹性体

虽然采用 PDMS 弹性体制备的 TENG 在输出电压、输出电流和功率密度等方面均有不错的表现,但存在输出功率低、可穿戴性(舒适性和灵活性[16])差、灵敏度低以及耐用性差等问题。通过对 PDMS 弹性体进行改性,在提高 TENG 输出性能的同时,可以改善上述问题。PDMS 弹性体的改性方法通常包括物理改性和化学改性。其中,物理改性方法包括“原位”固化法、模板压印法和掺杂(如碳纳米管和银纳米线等导电填料)等;化学改性方法包括引入动态共价键、调节交联密度、层层组装和等离子体处理增强富氧官能团等。本节综述了 PDMS 基摩擦电材料的改性方法及其对 TENG 输出性能的影响。

**1.2.1** PDMS弹性体的物理改性：为了改善传统PDMS弹性体制备的TENG可穿戴性差、灵敏度低、输出功率小以及耐用性差等缺点，研究人员常采用“原位”固化法、模板法、掺杂等方法对PDMS弹性体进行物理改性。Barras等[17]通过“原位”固化法将PDMS弹性体沉积在导电碳丝上(Fig.2(a))，提高了TENG的电输出性能(输出电压和短路电流分别为72 V和10 μA)。Li等[18]利用超声和磁力搅拌方法制备出多孔PDMS摩擦层(Fig.2(b))，采用该材料制备的TENG的输出电压可达92 V，虽然其在50%的应变下可以稳定工作，但在大应变后会出现拉伸破坏的风险。Li等[19]将聚吡咯(PPy)&Cu海绵掺杂在PDMS中制备出TENG(Fig.2(c))，通过改变PPy含量和Cu海绵的多孔结构能够提升TENG的输出性能，但多孔结构导致力学性能降低限制了TENG的应用。Ding等[20]通过在PDMS弹性体中掺杂碳纳米管制备出具有高灵敏度和高输出电压的TENG(Fig.2(d))，能够便捷地获取人体的运动信号、呼吸信号和心跳信号。

提高TENG输出性能的关键是调控摩擦电材料的表面电荷密度。表面电荷密度是摩擦电材料的固有特性，不随TENG的接触方式与接触时间而改变。通过对摩擦电材料进行改性(如沉积和掺杂等)可以提高其表面电荷密度，进而提高TENG的输出功率。Park等[21]将$TiO_x$ EBL沉积在PDMS和Al电极之间，制备出输出功率高达2.5 mW(是未沉积EBL的25倍)的TENG(Fig.3(a))。在PDMS弹性体中掺杂高介电常数金属可以提高TENG的表面电荷密度，从而提高TENG的输出功率。Shi等[22]以$BaTiO_3$(BT)改性的纤维素纸为正摩擦电材料，Ag纳米粒子(AgNPs)改性的PDMS弹性体为负摩擦电材料，制备出在低频(3 Hz)下最大输出功率为141 μW的TENG(Fig.3(b))。虽然人们在材料掺杂方面进行了诸多探索，但缺乏摩擦层特性的理论分析，使TENG在实际应用中受限。如提高表面电荷密度提升TENG输出性能的作用机理尚不明确。Yu等[23]研究了PDMS膜的表面结构对TENG输出性能的影响，制备了以超柔性阵列PDMS薄膜和Cu电极为摩擦材料的摩擦电纳米发电机(CS-TENG) (Fig.3(c))，结果表明，PDMS膜表面的微型柱状结构提高了摩擦表面积，进而有效提升了TENG的输出性能。由于$TiO_2$纳米颗粒中的氧空位带正电荷提高了电子的交换和俘获，Park等[24]通过调整PDMS中$TiO_2$纳米颗粒的比例(Fig.3(d))，显著提升了TENG的输出性能(输出电

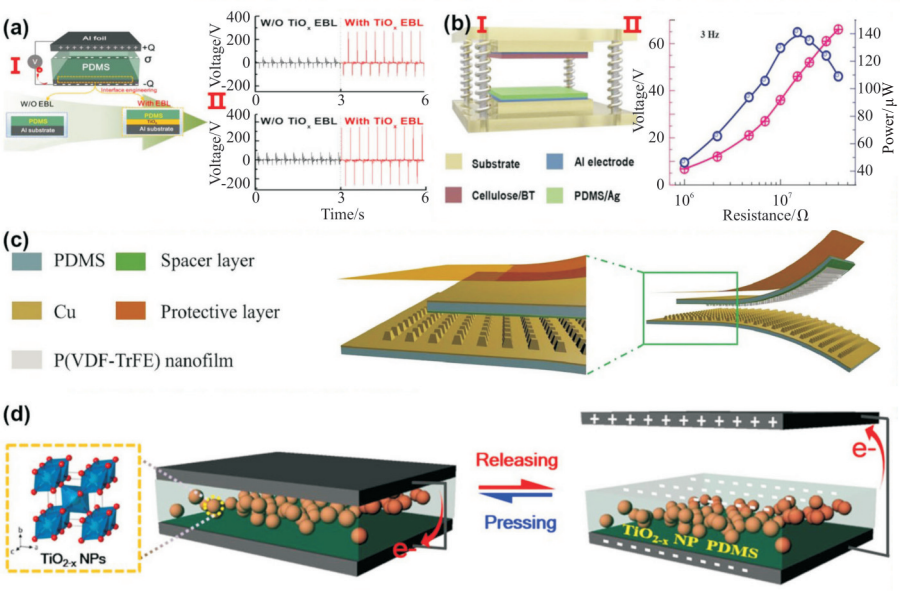



**Fig. 3 (a) I) Structure diagram of multifunctional TiOx EBL-TENG; II) output voltage and short-circuit current of TiOx EBL-TENG[21]. (b) I) Structure diagram of AgNPs modified PDMS-based TENG; II) output voltage and output power of TENG[22]. (c) Schematic diagram of TENG device and electron microscope diagram of micro-columnar structure[23]. (d) Schematic diagram of PDMS-based TENG embedded with $TiO_2$[24]**

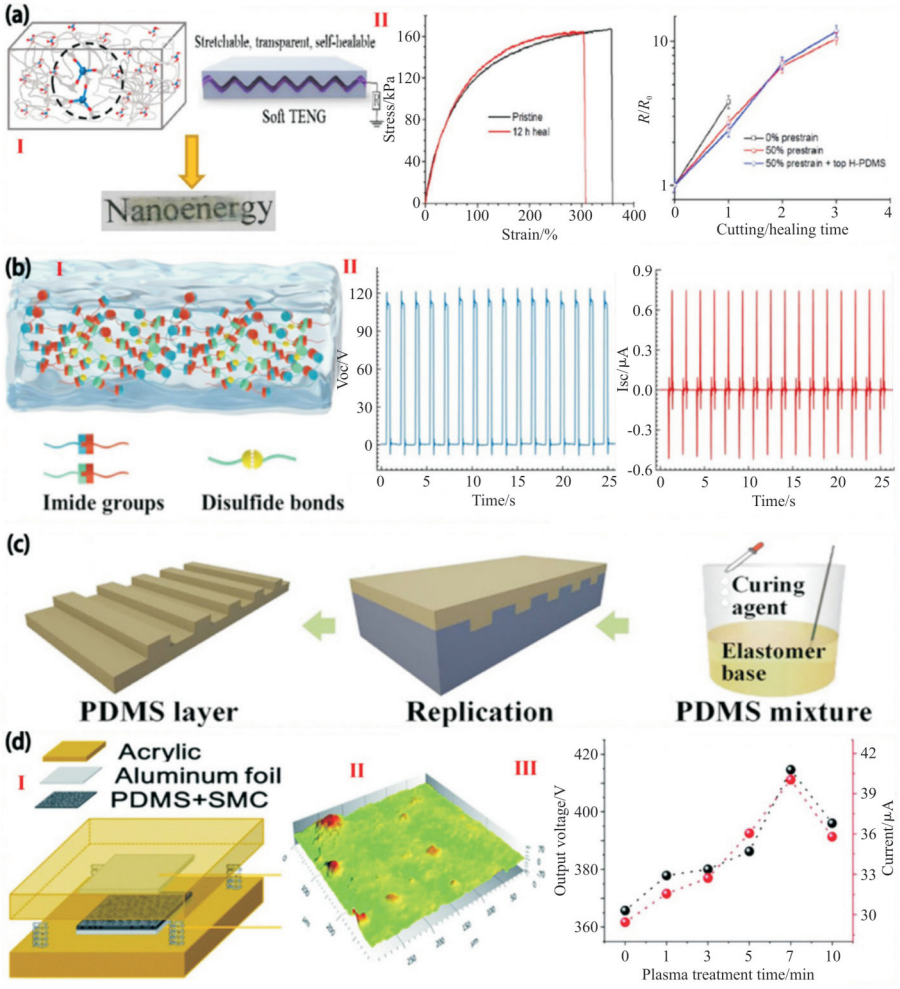



**Fig. 4 (a) I) Structure diagram of TENG with self-healing, stretchability and transparency; II) stress-strain curves before and after healed for 12 h and resistance change rate[25]. (b) I) Self-healing mechanism of PDMS-based TENG; II) output voltage and short-circuit current of TENG[26]. (c) Rectangular groove texture PDMS friction layer with different curing agent contents[27]. (d) I ) Structure diagram of TENG; II) TENG microscope image after plasma treatment; III) output voltage and short-circuit current of TENG [28]**

压和短路电流分别为180 V和8.15 μA)。

**1.2.2** PDMS弹性体的化学改性：基于PDMS弹性体的TENG在运行过程中极易因机械损伤影响其使用寿命，在PDMS弹性体中引入动态共价键(如二硫键、亚胺键、Diels-Alder反应和硼酸酯键等)，利用动态共价键在外界刺激下发生的可逆交换反应可赋予PDMS弹性体可修复、自愈合和再加工性，进而延长TENG的使用寿命。Sun等[25]将银纳米线/聚(3, 4-乙烯二氧噻吩)复合电极包裹在含有亚胺键的PDMS弹性体中，研制出具有室温自愈合性能、可拉伸和透明的TENG(Fig.4(a))。Li等[26]在聚酰亚胺(PI)中引入含有动态二硫键的PDMS弹性体，制备出可完全愈合(100 ℃/3 h)的TENG(Fig.4(b))，其开路电压和短路电流分别为124 V与0.75 μA。基于动态共价键的PDMS基TENG在保证输出性能的同时具有可修复性，为开发可回收的TENG提供了有效途径。

通过调整PDMS弹性体的交联程度和对PDMS弹性体进行等离子体机处理等化学改性方法也可以提高PDMS基TENG的输出电压和短路电流。Sun等[27]通过调节PDMS弹性体与固化剂的比例调控摩擦电材料的刚度，较低的PDMS含量使摩擦电材料之间横向摩擦产生的表面电荷增多，提高了TENG的输出性能(Fig.4(c))。Lee等[28]将经过表面改性的碳纳米管与PDMS预聚体物理混合后制成摩擦电材料，通过等离子体处理增加摩擦层材料的表面粗糙度与富氧官能团，制备的TENG(Fig.4(d))输出电压和

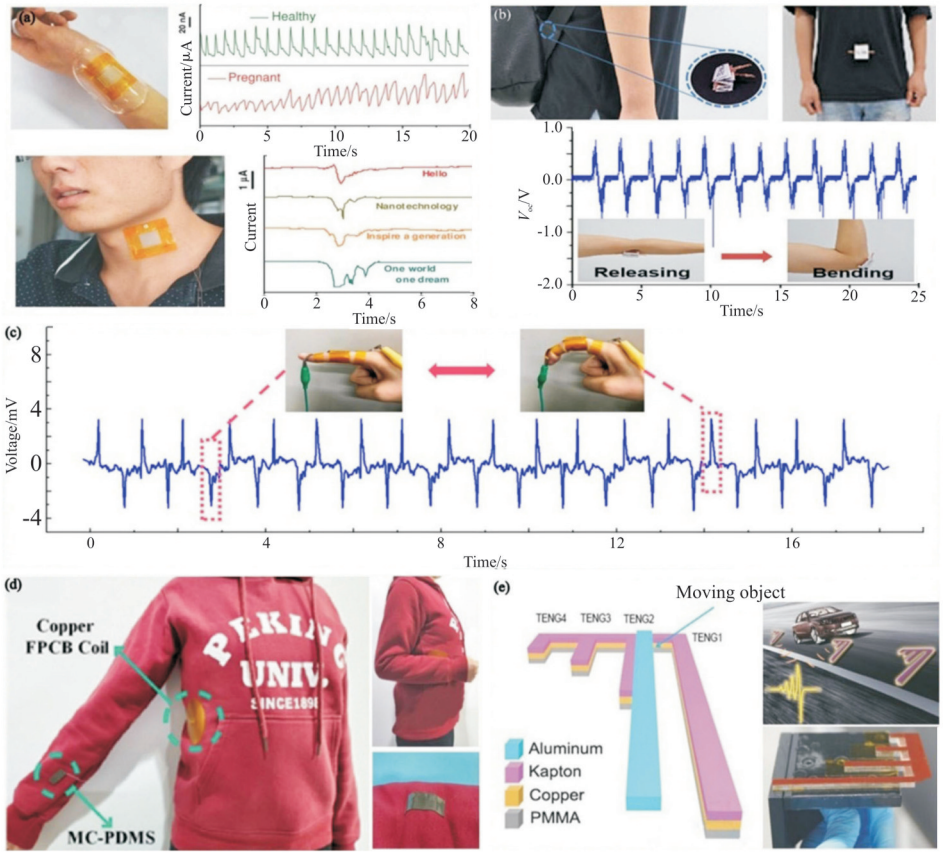



**Fig. 5 (a) TENG for monitoring pulse and laryngeal vibration[30]; (b) FG-TENG for monitoring human motion[31]; (c) ultra-soft TENG for monitoring finger joint motion[32]; (d) fabric-based TENG for 3D trajectory sensing monitoring[33]; (e) composition, working principle and physical map of TENG motion tracking system[34]**

短路电流分别高达414.63 V和40.03 mA。

## 2 基于PDMS的TENG的应用

TENG作为一种自供电传感器，可以收集并检测人类生活和自然界中的各种环境能量，从而摆脱传统电池的限制，提高传感器的便携性和实用性。TENG可用于自供电系统的微纳电源、运动检测、基础设施、医疗和环境监测的自供电传感器、大规模蓝色能量收集的基本网络单元以及高压应用的直接电源。基于PDMS的TENG具有生物相容性好、柔韧性好和输出性能高等特点，使其在低频能量收集方面具有巨大的应用潜力[29]。本节重点总结了PDMS基TENG作为自供电传感器在运动监测、医疗及环境监测方面的应用。

### 2.1 运动监测

TENG模糊了传统电池和传感器的界限，在低频能量收集方面具有巨大的应用前景，并可提高能源效率。TENG作为一种高效的自供电传感器，提高了传感器的便携性和可用性，可用于人体运动监测。Wang等[30]分别以均匀微图案PDMS薄膜和SWCNT超薄膜作为摩擦电材料开发了可用于监测人体脉搏或喉部振动的TENG(Fig.5(a))，其输出电流可达80 mA。Han等[31]采用鱼胶(FG)薄膜和PTFE/PDMS复合材料制备出一种具有高输出功率(45.8 μW/cm$^2$)的鱼胶基TENG(FG-TENG)(Fig.5(b))，可用于实时监测手指触摸、关节运动和呼吸等人体生理信号。但是FG薄膜易水解的特性限制了其应用。Wang等[32]制备了微金字塔结构的PDMS薄膜和铝电极组成的超柔软TENG，并以柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜作为间隔层，其良好的灵敏度(2.54 V/kPa)证明了在摩擦层中引入微结构可以有效提高TENG的摩擦性能、柔韧性和循环稳定性(超过30000次循环) (Fig.5(c))。此外，Wan等[33]采用PDMS、多壁碳纳米管(MWCNT)和钕铁硼微粒制备

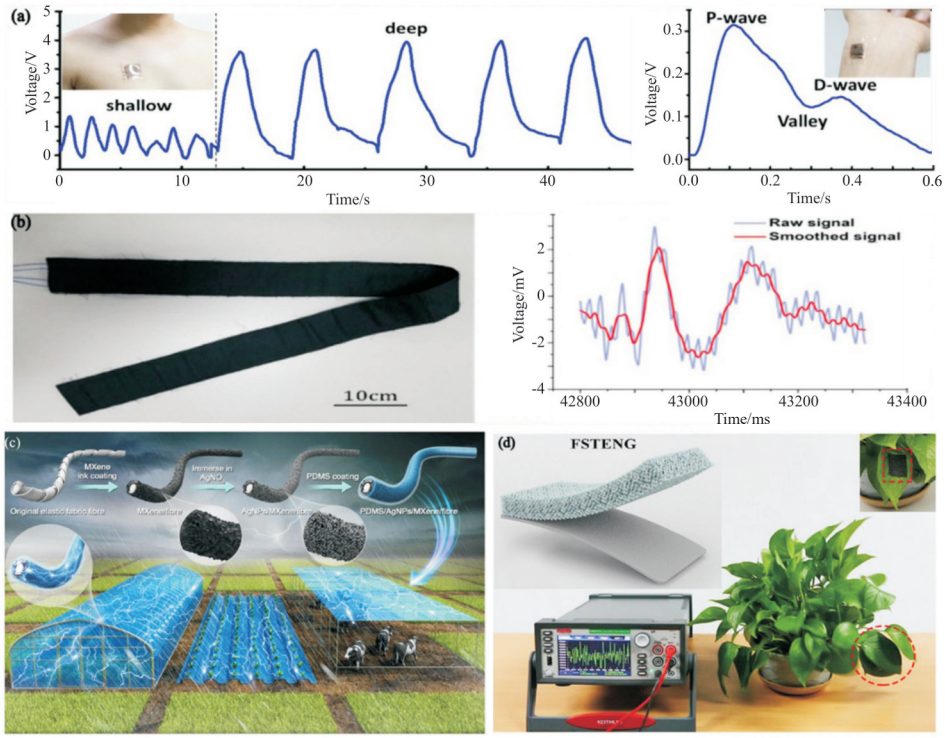



**Fig. 6 (a) Ultrasensitive TENG sensor for monitoring respiration and pulse[36]; (b) TENG for sleep monitoring[20]; (c) weather monitoring of TENG yarns in the agricultural sector[39]; (d) FSTENG used for monitoring wind speed[40]**

了柔性电磁TENG(Fig.5(d)),其可以通过胶带附着在布料和人体皮肤上,从运动中收集能量并通过电磁感应进行轨迹跟踪,但摩擦电材料分离式结构设计会受运动轨迹的影响从而降低传感监测的稳定性。便携式TENG传感器也可用于监测机械运动。Chen等[34]将自供电TENG传感器固定在车轮上,可实时监测车轮温度和车速(Fig.6(e)),其在400 r/min的转速下可提供55 μA的短路电流和500 V的开路电压,上述研究为TENG在智能交通领域的应用提供了新思路,但TENG的固定方式对车轮的影响尚不清楚。

### 2.2　医疗及环境监测

人类身体运动产生的间歇性能量被认为是TENG最丰富的能量来源之一,尤其是关节运动、人体行走和肌肉伸展等,因此,TENG被广泛应用于医疗领域[35]。近期,Liu等[36]制备了掺杂可膨胀微球的PDMS基TENG传感器(Fig.6(a)),其超高的灵敏度(150 mV/Pa)可以安装在人体胸部和手腕上用于监测人体的呼吸和脉搏。掺杂可膨胀微球在提高传感器灵敏度的同时,影响了摩擦电材料的平整性,同时膨胀微球过度凸起影响TENG的输出性能。Ding等[20]制备了掺杂碳纳米管的多孔PMDS基TENG(Fig.6(b)),多孔结构极大提升了TENG的输出性能(是未掺杂的16倍),还具有响应快、灵敏度高、耐用性强和成本低的优势。

利用PDMS基TENG环境适应性强的特性[37],人们将其用于环境监测领域[38]。Jiang等[39]首次将TENG用于纺织品中(Fig.6(c)),涂覆MXene,AgNPs和PDMS弹性体的TENG摩擦电纱线具有优异的力学性能和疏水性,采用此TENG纱线制成的大棚可以作为自供电传感器(输出电压为2.6 V/cm)收集雨滴能量,从而提供天气状况的基本信息。虽然上述方法易于规模化和工程化应用,但亟需解决摩擦电材料(MXene和AgNPs)高昂的制作成本。Li等[40]利用静电纺丝技术制备电极和具有抗镍泡沫结构的多孔PDMS弹性体摩擦层组成可拉伸的TENG(FSTENG),并将其应用于叶片上(Fig.6(d))监测自然环境中的风速。

## 3　结语和展望

本综述介绍了传统PMDS弹性体和改性PDMS弹性体作为TENG摩擦电材料的性能,以及基于PDMS弹性体的TENG作为自供电传感器的应用现

状。TENG的发明是能量收集领域的一个重要里程碑，经过近几年的快速发展，其应用领域日益扩大并逐渐走向商业化应用。为了促进基于PDMS弹性体的TENG的开发和应用，还必须解决以下问题。

（1）TENG摩擦电材料的改性方法探究。TENG的改性目前还停留在物理改性层面，尤其是基于PDMS的TENG改性研究大多集中在接触面的形态优化上。为了提高TENG的输出性能和应用范围，需要探索新的物理和化学改性方法，对PDMS基TENG摩擦电材料升级换代，研制兼具良好自愈合性和高输出性能的PDMS基TENG。

（2）TENG的摩擦起电机制。目前人们对TENG的摩擦起电机制尚未研究清楚，理解TENG的摩擦起电机制对于高性能TENG的研制并扩大其应用范围尤为重要。

（3）探索TENG的环境适应性。多样化的运行模式和结构设计使TENG在多种应用场景中展现出了潜力，这是TENG区别于传统发电机的最大特点，因此，需要探索兼具高摩擦电性能和广泛应用场景的新型TENG将是一个极具研究价值的方向。

**参考文献：**


[1] 高晓波,郭锋,陈宝东,等. 聚四氟乙烯掺杂对弹性基摩擦纳米发电机输出性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(1): 131-141.
Gao X B, Guo F, Chen B D, *et al*. Effect of polytetrafluoroethylene doping on the output performance of elastic based triboelectric nanogenerator[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(1): 131-141.

[2] Xu L, Hasan M A M, Wu H, *et al*. Electromagnetic–triboelectric hybridized nanogenerators[J]. Energies, 2021, 14: 6219-6246.

[3] Qin H, Gu G, Shang W, *et al*. A universal and passive power management circuit with high efficiency for pulsed triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy, 2020, 68: 104372.

[4] Wu C, Tetike H, Cheng J, *et al*. Electrohydrodynamic jet printing driven by a triboelectric nanogenerator[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 1901102.

[5] Hatta F F, Mohammad Haniff M A S, Mohamed M A. A review on applications of graphene in triboelectric nanogenerators[J]. International Journal of Energy Research, 2021: 544-576.

[6] Ding Y, Hou H, Zhao Y, *et al*. Electrospun polyimide nanofibers and their applications[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 61: 67-103.

[7] Li S S, Sun J R, Guan J Q. Strategies to improve electrocatalytic and photocatalytic performance of two-dimensional materials for hydrogen evolution reaction[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2021, 42: 511-556.

[8] Shi K, Zou H, Sun B, *et al*. Dielectric modulated cellulose paper/PDMS - based triboelectric nanogenerators for wireless transmission and electropolymerization applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 30: 1904536.

[9] 王肃, 何旭, 李庆业, 等. 基于聚硼硅氧烷/碳纳米管复合材料的柔性摩擦纳米发电机的构建及在自供电系统中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(11): 152-158.
Wang X, He X, Li Q Y, *et al*. Fabrication of the flexible triboelectric nanogenerator based on polyborossiloxane/carbon nanotube composites for self- powered electronic systems[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(11): 152-158.

[10] Yun B K, Kim J W, Kim H S, *et al*. Base- treated polydimethylsiloxane surfaces as enhanced triboelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2015, 15: 523-529.

[11] Sun S, Fei G, Wang X, *et al*. Covalent adaptable networks of polydimethylsiloxane elastomer for selective laser sintering 3D printing[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412: 128675-128687.

[12] Yang Y, Zhang H L, Lin Z H, *et al*. Human skin based triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy and as self-powered active tactile sensor system[J]. ACS Nano, 2013, 7: 9213-9222.

[13] Jian G, Meng Q, Jiao Y, *et al*. Enhanced performances of triboelectric nanogenerators by filling hierarchical flower- like $TiO_2$ particles into polymethyl methacrylate film[J]. Nanoscale, 2020, 12: 14160-14170.

[14] Kim D W, Lee J H, You I, *et al*. Adding a stretchable deep-trap interlayer for high- performance stretchable triboelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2018, 50: 192-200.

[15] Liu Y, Sun N, Liu J, *et al*. Integrating a silicon solar cell with a triboelectric nanogenerator via a mutual electrode for harvesting energy from sunlight and raindrops[J]. ACS Nano, 2018, 12: 2893-2899.

[16] Haleem A, Haider Z, Ahmad R U S, *et al*. Highly porous and thermally stable tribopositive hybrid bimetallic cryogel to boost up the performance of triboelectric nanogenerators[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44: 8442-8454.

[17] Barras R, Dos Santos A, Calmeiro T, *et al*. Porous PDMS conformable coating for high power output carbon fibers/ZnO nanorod- based triboelectric energy harvesters[J]. Nano Energy, 2021, 90: 106582-106592.

[18] Li X, Jiang C, Zhao F, *et al*. Fully stretchable triboelectric nanogenerator for energy harvesting and self- powered sensing [J]. Nano Energy, 2019, 61: 78-85.

[19] Li Z, Hu K, Yang M, *et al*. Elastic Cu@PPy sponge for hybrid device with energy conversion and storage[J]. Nano Energy, 2019, 58: 852-861.

[20] Ding X, Cao H, Zhang X, *et al*. Large scale triboelectric nanogenerator and self-powered flexible sensor for human sleep monitoring[J]. Sensors, 2018, 18: 1713-1724.

[21] Park H W, Huynh N D, Kim W, *et al*. Electron blocking layer-based interfacial design for highly- enhanced triboelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2018, 50: 9-15.

[22] Shi K, Zou H, Sun B, *et al*. Dielectric modulated cellulose paper/PDMS - based triboelectric nanogenerators for wireless transmission and electropolymerization applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 30: 1904536.

[23] Yu J, Hou X, He J, *et al.* Ultra- flexible and high- sensitive triboelectric nanogenerator as electronic skin for self- powered human physiological signal monitoring[J]. Nano Energy, 2020, 69: 104437-104448.

[24] Park H W, Huynh N D, Kim W, *et al*. Effects of embedded $TiO_{2-x}$ nanoparticles on triboelectric nanogenerator performance[J]. Micromachines, 2018, 9: 9407-9417.

[25] Sun J, Pu X, Liu M, *et al*. Self-Healable, stretchable, transparent triboelectric nanogenerators as soft power sources[J]. ACS Nano, 2018, 12: 6147-6155.

[26] Li C, Wang P, Zhang D. Self- healable, stretchable triboelectric nanogenerators based on flexible polyimide for energy harvesting and self-powered sensors[J]. Nano Energy, 2023, 109: 108285.

[27] Sun Z, Yang W, Chen P, *et al*. Effects of PDMS base/agent ratios and texture sizes on the electrical performance of triboelectric nanogenerators[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9: 2102139.

[28] Lee K, Mhin S, Han H, *et al*. A high-performance PDMS-based triboelectric nanogenerator fabricated using surface- modified carbon nanotubes via pulsed laser ablation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 3: 1299-1308.

[29] Long L, Liu W, Wang Z, *et al*. High performance floating self-excited sliding triboelectric nanogenerator for micro mechanical energy harvesting[J]. Nature Communications, 2021, 12: 4689-4699.

[30] Wang X, Gu Y, Xiong Z, *et al*. Silk- molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. Advanced Materials, 2014, 26: 1336-1342.

[31] Han Y, Han Y, Zhang X, *et al*. Fish felatin based triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy and self-powered sensing of human physiological signals[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 16442.

[32] Wang J, Qian S, Yu J, *et al*. Flexible and wearable PDMS-based triboelectric nanogenerator for self- powered tactile sensing[J]. Nanomaterials, 2019, 9: 1304-1315.

[33] Wan J, Wang H, Miao L, *et al*. A flexible hybridized electromagnetic- triboelectric nanogenerator and its application for 3D trajectory sensing[J]. Nano Energy, 2020, 74: 104878.

[34] Chen M, Li X, Lin L, *et al*. Triboelectric nanogenerators as a self-powered motion tracking system[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24: 5059-5066.

[35] Zhai Y M, Li W, Chen M F, *et al*. A self-powered triboelectric nanosensor for detecting the corrosion state of magnesium treated by micro- arc oxidation[J]. RSC Advances, 2019, 9: 10159.

[36] Liu Z, Zhao Z, Zeng X, *et al*. Expandable microsphere-based triboelectric nanogenerators as ultrasensitive pressure sensors for respiratory and pulse monitoring[J]. Nano Energy, 2019, 59: 295-301.

[37] Zhai Y M, Li W, Chen M F, *et al*. A self-powered triboelectric nanosensor for detecting the corrosion state of magnesium treated by micro- arc oxidation[J]. RSC Advances, 2019, 9: 10159.

[38] Trinh V L, Chung C K. Harvesting mechanical energy, storage, and lighting using a novel PDMS based triboelectric generator with inclined wall arrays and micro-topping structure[J]. Applied Energy, 2018, 213: 353-365.

[39] Jiang C M, Li X J, Ying Y B, *et al*. A multifunctional TENG yarn integrated into agrotextile for building intelligent agriculture[J]. Nano Energy, 2020, 74: 104863.

[40] Li X, Jiang C, Zhao F, *et al.* Fully stretchable triboelectric nanogenerator for energy harvesting and self- powered sensing [J]. Nano Energy, 2019, 61: 78-85.

# Progress on Research of Triboelectric Nanogenerators Based on Polydimethylsiloxane Elastomers

Chenhui Li[1], Lu Wang[1], Xiaojun Liu[1], Zhicheng Wu[2], Xinli Jing[1], Wei Fan[3], Chengshuang Zhang[4], Shujuan Wang[1]

(*1. School of Chemistry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 4. Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025, China*)

**ABSTRACT:** Climate change and energy-related environmental issues are becoming increasingly serious, thus the renewable energy technologies have attracted more attention. Triboelectric nanogenerator (TENG) can convert mechanical energy into electrical energy, which is one of the important energy harvesting technologies. Due to low cost, high efficiency, and high output power, TENG is widely used in fields such as micro-nano power supplies, self-powered sensors, large-scale ocean energy collection, and high-voltage DC power supply. The output performance of TENG mainly depends on the triboelectric material. Polydimethylsiloxane (PDMS) has good flexibility, biocompatibility and negative polarity, which is an excellent negative triboelectric material. This article reviewed the advantages of PDMS as negative triboelectric material, discussed the effect of physical or chemical modification of PDMS on performance of TENGs, and analyzed the application and existing problems of PDMS-based TENGs.

**Keywords:** triboelectric nanogenerators; polydimethylsiloxane elastomer; physical modification; chemical modification; application