

摩擦纳米发电机输出性能提升策略的研究进展

鲍艳 朱孝锋 高璐 雷鹏 顾陇 刘超

Research progress on strategies for enhancing the output performance of triboelectric nanogenerator

BAO Yan, ZHU Xiaofeng, GAO Lu, LEI Peng, GU Long, LIU Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240927.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PVDF/SBS柔性复合纤维薄膜压电-摩擦电纳米发电机

Piezoelectric/triboelectric nanogenerator based on PVDF/SBS flexible composite fiber film

复合材料学报. 2023, 40(7): 4022–4029 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220915.007>

PVDF/PPy柔性直流纳米发电机的制备与性能

Preparation and performance of PVDF/PPy flexible DC nano-generator

复合材料学报. 2024, 41(6): 2980–2990 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231122.001>

自供电电致变色器件研究进展

Research process in self-powered electrochromic devices

复合材料学报. 2021, 38(6): 1724–1733 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210210.007>

基于还原-冷压制备的Janus湿气诱导水伏发电GO-rGO复合材料

Janus moisture induced hydrovoltaic electricity GO-rGO composite material via reduction and tableting method

复合材料学报. 2023, 40(12): 6630–6638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230323.001>

纳米纤维素基传感器的制备及其应用研究进展

Research progress in preparation and application of nanocellulose-based sensors

复合材料学报. 2022, 39(3): 969–980 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211115.003>

基于纤维素纳米晶体的多功能传感器的应用研究

Application research of multi-functional sensor based on cellulose nanocrystals

复合材料学报. 2024, 41(7): 3483–3493 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231215.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

摩擦纳米发电机输出性能提升策略的研究进展



分享本文

鲍艳^{*1}, 朱孝锋¹, 高璐¹, 雷鹏¹, 顾陇^{*2}, 刘超¹

(1. 陕西科技大学 轻工科学与工程学院 (柔性电子学院), 西安 710021; 2. 西安电子科技大学 先进材料与纳米科技学院, 西安 710126)

摘要: 摩擦纳米发电机 (TENG) 是一类能将机械能转换为电能的电子设备, 具有材料种类丰富、器件结构简单以及易于集成等特点, 在蓝色能源收集、微/纳能源、自驱动传感等方面展示出广泛的应用前景。然而, 如何提高 TENG 的输出性能一直是科学界关注的焦点。基于此, 本文在查阅大量文献的基础上, 从 TENG 的工作原理出发, 分析了摩擦电材料、摩擦层结构和器件结构对 TENG 输出性能的影响, 并总结了提升 TENG 输出性能的有效策略, 最后对 TENG 今后的发展趋势进行了展望。

关键词: 摩擦纳米发电机; 摩擦层; 器件结构; 自供电; 传感器

中图分类号: O631.2; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)06-2958-13

Research progress on strategies for enhancing the output performance of triboelectric nanogenerator

BAO Yan^{*1}, ZHU Xiaofeng¹, GAO Lu¹, LEI Peng¹, GU Long^{*2}, LIU Chao¹

(1. College of Bioresources Chemistry and Materials Engineering (College of Flexible Electronics), Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. School of Advanced Materials and Nanotechnology, Xidian University, Xi'an 710126, China)

Abstract: Triboelectric nanogenerator (TENG) is an electronic device, that exchanges mechanical energy into electrical energy. TENG has presented a wide range of potential applications, such as blue energy harvesting, micro/nano energy sources, and self-powered sensing, owing to abundant material, simple structures, and ease of integration. However, enhancing the output performance of TENG has remained a focal point of scientific interest. Hence, insulting many studies, this work has analyzed the influence of triboelectric materials, friction layer structures, and device structures on TENG output performance according to the working principle of TENG. Meanwhile, the enhancement strategies of TENG output performance are summarized. Finally, the future development of TENG is concluded.

Keywords: triboelectric nanogenerator; friction layer; device structure; self-powered; sensors

全球经济和工业水平的迅猛发展, 促使能源需求急剧增长。传统能源如石油、煤炭和天然气等被过度开发, 在生产、转化过程中产生大量二氧化碳, 其引发的气候问题已日益威胁全球生态安全^[1]。截至 2024 年 3 月 13 日, 全球已经有超过 150 多个国家、数百家大型跨国企业先后宣布了

碳中和目标。碳中和是指在规定时间内, 二氧化碳的人为移除抵消人为排放, 达到相对“零排放”。当前, 中国已将减碳列入国家重要发展目标, 力争于 2030 年前达到碳排放峰值, 2060 年前实现碳中和^[2]。

人类活动导致的二氧化碳排放主要来源于化

收稿日期: 2024-07-16; 修回日期: 2024-09-06; 录用日期: 2024-09-21; 网络首发时间: 2024-09-27 14:24:35

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240927.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (22078188); 咸阳市科技计划项目 (2021ZDZX-GY-0007)

National Natural Science Foundation of China (22078188); Xianyang City Science and Technology Plan Project (2021ZDZX-GY-0007)

通信作者: 鲍艳, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为有机无机纳米复合材料及功能性皮革化学品 E-mail: baoyan@sust.edu.cn;

顾陇, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为柔性电子器件的开发和自供能系统构建 E-mail: lgu@xidian.edu.cn

引用格式: 鲍艳, 朱孝锋, 高璐, 等. 摩擦纳米发电机输出性能提升策略的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 2958-2970.

BAO Yan, ZHU Xiaofeng, GAO Lu, et al. Research progress on strategies for enhancing the output performance of triboelectric nanogenerator[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 2958-2970(in Chinese).

石燃料消耗。发展新能源,实现能源转型,降低化石能源消耗,构建绿色低碳的能源体系,是降低二氧化碳排放、实现全球碳中和的重要举措之一。2012年王中林院士团队首次研制出摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator, TENG)^[3],其根据两种材料得失电子能力的不同,利用摩擦起电和静电感应原理,在接触分离过程中实现电子在外电路中的流动。它可以将人体运动产生的动能^[4-5]、风能^[6-7]、海洋能^[8-9]等微小机械能高效转化为电能。相较于传统能源,具有绿色可持续、材料简单、结构简单、长续航、微型化等优点。TENG不仅在能源采集方面展现出巨大的价值,还具有自驱动传感的潜力,因此在智能可穿戴等领域也备受关注。然而,TENG的输出性能相对较低,如何提高TENG的输出性能一直是科学界重点关注方向。

基于此,本文从TENG的工作原理出发,归纳分析了摩擦电材料、摩擦层结构设计和器件结构设计对TENG输出性能的影响,并总结了提升TENG输出性能的有效策略,最后对TENG今后的发展趋势进行了展望,以期对相关领域研究人员提供借鉴。

1 TENG的工作原理

TENG的工作原理主要是基于接触起电和静电感应。具体来讲,当两个不同材质的物体接触时,由于它们电子亲和能的不同导致其中一个物体的原子会夺取另一个物体的表面原子的电子,这就是接触起电。而当一个带电体接近另一个带电体时,会在它们之间产生静电场,这就是静电感应。在TENG中,当两个不同材质的物体接触并分离时,会发生接触起电和静电感应,导致电荷发生转移和积累,形成电位差,从而驱动外部电路中的电荷发生流动,形成电流。当两种材质的物体再次相互靠近时,两个电极之间的电位差也会随之逐渐消失,直到两者完全接触时降低为零。随着接触和分离的不断发生,TENG表面的电荷密度会逐渐达到饱和,电学输出也会趋于稳定^[3]。其具体工作原理示意如图1。

由上述原理可知,TENG主要由摩擦层和电极材料所组成。其中,摩擦层材料决定了得失电子的能力;摩擦层的结构直接影响摩擦电荷的迁移和储存;而器件构型直接决定TENG的能量采集方式,因此,摩擦层材料、摩擦层结构和器件

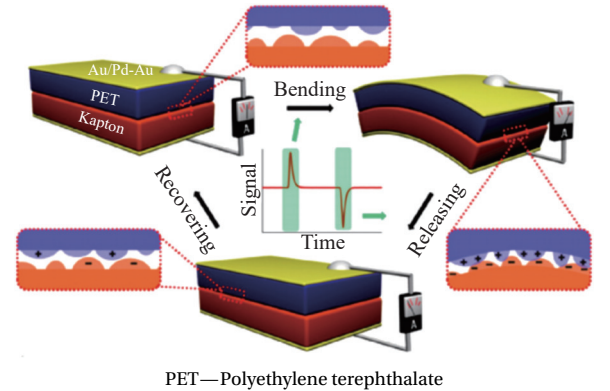


图1 摩擦纳米发电机(TENG)的工作原理^[3]

Fig. 1 Working principle of triboelectric nanogenerator (TENG)^[3]

结构均是影响TENG输出性能的关键。

2 摩擦电材料对TENG输出性能的影响

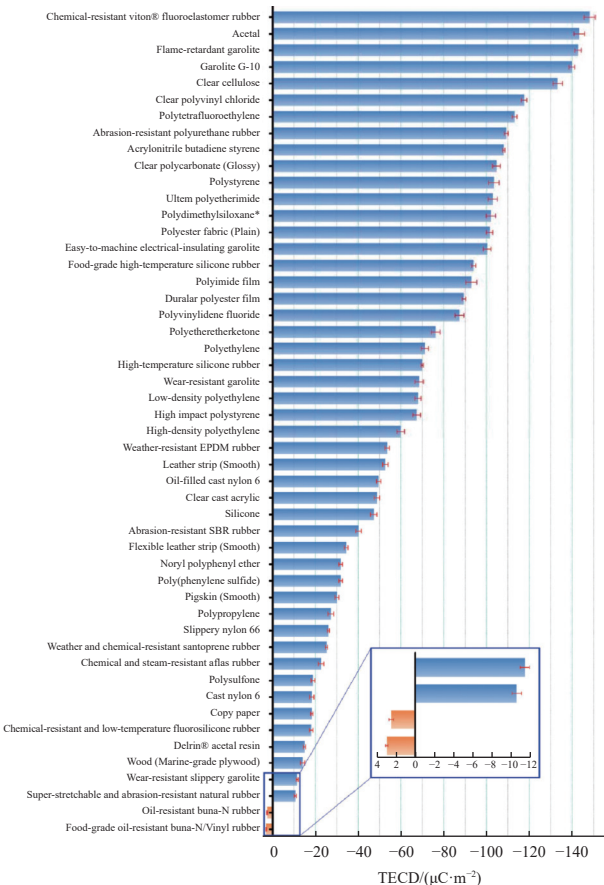
TENG的输出性能高度依赖于所采用的摩擦电材料。研究发现,无论是聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[10]、聚偏氟乙烯(PVDF)^[11]、聚酰亚胺(PI)^[12]、聚四氟乙烯(PTFE)^[13]、氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)^[14]、聚乙烯醇(PVA)^[15]、纤维素^[16]、纺织品^[17]、毛发^[18]、皮肤^[19]等有机材料,还是TiO₂^[20]、SiO₂^[21]、BaTiO₃^[22]、ZnSnO₃^[23]、MoS₂^[24]、石墨烯^[25]等无机填料,都具有一定的摩擦电效应。为了深入了解摩擦电材料的摩擦电性,Zou等^[26]对一些常见的摩擦电材料进行了定性排序,如图2所示。根据TENG的工作原理,选择两种得失电子能力差异越大的材料作为正负摩擦层构建摩擦纳米发电机,其输出功率越大。因此,为了获得优异的输出性能,现有研究常常将不同的摩擦电材料进行复合或对其进行表面改性,以提升材料的表面电荷密度。

2.1 摩擦电材料的复合

根据摩擦电材料化学组成的不同,目前常见的摩擦电复合材料主要有两类:有机-有机复合和有机-无机复合。

2.1.1 有机-有机复合材料

有机-有机复合是将不同高介电常数的有机材料集合于一体,通过可达到提高复合材料的介电常数,改变材料的表面粗糙度等的效果,以增强材料的表面电荷密度,提高TENG的输出性能。Candido等^[27]将丝素蛋白和聚乙烯醇(PVA)共混形成的有机-有机复合材料作为正摩擦层,如图3(a)所示,利用PVA中的丝素蛋白增大表面粗糙度,并形成界面极化,增强材料的电荷存储能力,提

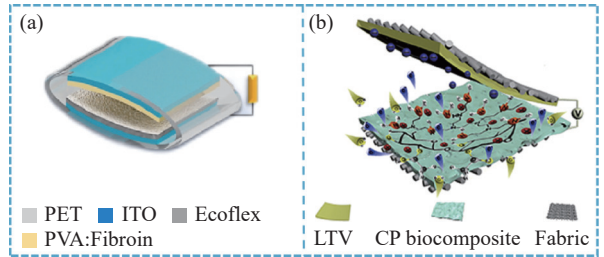


TECD—Triboelectric charge density; EPDM—Ethylene-propylene-diene monomer; SBR—Styrene butadiene rubber

图2 常见材料的摩擦电序列^[26]

Fig. 2 Triboelectric sequence of common materials^[26]

高表面电荷密度。所形成的 TENG 开路电压、短路电流和功率密度分别可达 172 V、8.5 μA 和 $1.304 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，每周期运行可充电 320 nC，能使 56 个商业 LED 灯发光。类似地，Bai 等^[28] 采用多孔醋酸纤维素 (CA) 和聚乙烯亚胺 (PEI) 形成的有机-



ITO—Indium tin oxid; LTV—Low-temperature vulcanized silicone rubber; CP—Biocomposites

图3 (a) 聚乙烯醇 (PVA):Fibroin 复合材料制备 TENG 的示意图^[27]；(b) 醋酸纤维素-聚乙烯亚胺 (CA-PEI) 复合材料制备 TENG 的示意图^[28]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of TENG from poly(vinyl alcohol) (PVA):Fibroin composite^[27]；(b) Schematic diagram of TENG from cellulose acetate -polyethyleneimine (CA-PEI) composite^[28]

有机复合材料作为负摩擦层，如图 3(b) 所示，通过 PEI 的引入增强 CA 的供电子能力，增加接触分离过程中的电荷转移量，进而提高材料表面电荷密度。结果表明，相较原始 CA-TENG 的开路电压 294.5 V 和短路电流 3.5 μA ，CP-TENG 的开路电压和短路电流分别提升到 478 V 和 6.3 μA 。

由上可知，有机-有机复合无论是作为正摩擦层还是负摩擦层，均可提高材料的介电常数，增强材料的得失电子能力，从而提高表面电荷密度。此外，由于有机材料和有机材料的复合不易出现团聚现象，因此所制备的 TENG 具有良好的稳定性。然而，相较无机材料，有机材料的摩擦电性一般相对较弱，因此，有机-有机复合摩擦电材料所制备的 TENG 输出性能提升有限。

2.1.2 有机-无机复合材料

有机-无机复合是通过掺杂、浸渍、共混等方法将有机材料与无机材料进行复合，从而增大材料的表面电荷密度、电导率和电荷捕获能力，提高 TENG 的输出性能。Cheon 等^[29] 利用静电纺丝技术将聚四氟乙烯 (PVDF) 与银纳米线 (AgNWs) 复合作为 TENG 的负摩擦层，如图 4(a) 所示，TENG 的表面电位从 -230 mV 提升到 -450 mV，开路电压和短路电流分别从 156 V 和 7.5 μA 增加到 240 V 和 12.5 μA ，表明 AgNWs 的加入增强了 PVDF 的电荷捕获能力，输出性能显著提高。与有机-有机复合相同，有机-无机复合作为 TENG 的负摩擦层同样也可以提高 TENG 的输出性能。此外，采用有机-无机复合既作为正摩擦层又作为负摩擦层的研究也有所报道，如 Li 等^[30] 将 PVDF 和 MXene 复合纳米纤维膜作为负摩擦层，TPU 和云母 (Mica) 复合纳米纤维膜作为正摩擦层，如图 4(b)

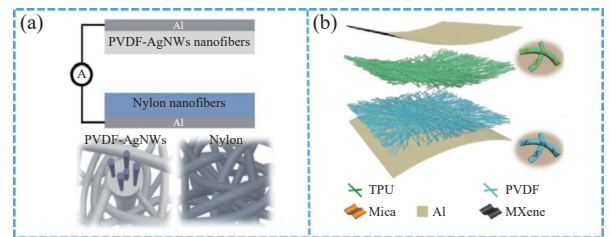


图4 (a) 聚四氟乙烯-银纳米线 (PVDF-AgNWs) 复合材料制备 TENG 的示意图^[29]；(b) 热塑性聚氨酯 (TPU)/Mica、PVDF/Mxene 复合纳米纤维膜制备 TENG 的示意图^[30]

Fig. 4 (a) Schematic diagram of TENG from polyvinylidene fluoride-silver nanowires (PVDF-AgNWs) composite^[29]；(b) Schematic diagram of TENG from thermoplastic polyurethane (TPU)/Mica and PVDF/Mxene composite nanofiber membrane^[30]

所示,利用云母增强 TPU 的正电性,利用 MXene 增强 PVDF 的电荷掠夺能力,从而增大表面电荷密度,使 TENG 的转移电荷从 38.6 nC 显著增大到 82.4 nC。

有机-无机复合由于在材料界面容易形成电子空穴,因此可提高材料的电荷捕获能力。此外,有机-无机复合往往会导致材料表面粗糙度增加,这也有助于增大正负摩擦层间的有效接触面积,提高表面电荷密度。但是,无机材料在与有机材料的复合过程中常存在无机材料分布不均、团聚等问题,导致表面电荷分布不均匀,影响 TENG 的输出稳定性。无机材料的加入还会提高摩擦层的硬度,这也是影响 TENG 的一个因素。

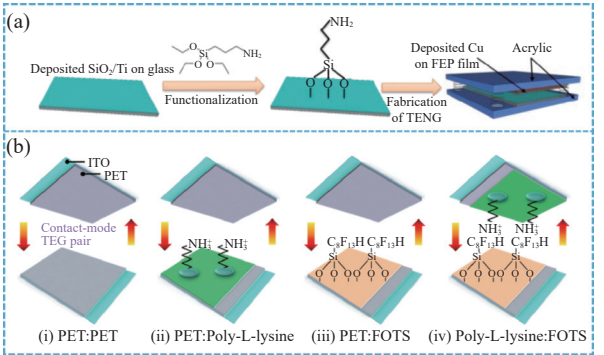
2.2 摩擦电材料的表面改性

对摩擦电材料进行合理改性,如表面官能团修饰^[31]提高材料的得失电子能力、构建表面微纳结构^[32]增大摩擦层有效接面积、外部电荷注入^[33]直接提高材料表面电荷密度等方法,是提升 TENG 的输出性能有效策略。

2.2.1 表面官能团修饰

已有研究表明,材料表面电势与材料表面官能团密切相关^[34-35]。因此,在摩擦电材料表面引入三氟甲基(—CF₃)^[36]、氟基(—F)^[37]、氰基(—CN)^[38]、硝基(—NO₂)^[39]等吸电子基团或羟基(—OH)^[40]、氨基(—NH₂)^[41]、烷氧基(—OR)^[42]等供电子基团,可以有效调节材料表面电势,提高 TENG 的输出性能。Wang 等^[43]通过在摩擦电材料表面引入—NH₂,如图 5(a)所示, TENG 的转移电荷密度、开路电压和短路电流分别从 34 μC/m²、150 V 和 0.7 mA 提高到 51 μC/m²、240 V 和 1.75 mA。进一步地,Shin 等^[40]在负摩擦层引入—CF₃提高吸电子能力,在正摩擦层引入—NH₂提高给电子能力,如图 5(b)所示,使 TENG 的开路电压和短路电流分别从 4 V 和 2.6 mA 提升到 330 V 和 270 mA。

相较仅引入—NH₂, TENG 的输出性能大幅提升,表明官能团的引入直接影响着摩擦层电荷的转移,而且不会破坏材料本身特性。然而,材料表面一旦出现磨损,官能团引入带来的 TENG 输出性能效益就会降低。因此开发 TENG 耐磨材料、改进官能团修饰技术,以提高 TENG 输出性能稳定性和耐久性也是开发高性能 TENG 应该关注的方向之一。



FEP—Fluorinated ethylene propylene; TEG—Triboelectric generators; FOTS—Trichloro(1H, 1H, 2H, 2H- perfluorooctyl) silane

图 5 (a) 摩擦电材料表面引入—NH₂ 的示意图^[43]; (b) 摩擦电材料表面引入—NH₂ 和—CF₃ 的示意图^[40]

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the friction electric material surface introduction —NH₂^[43]; (b) Schematic diagram of the friction electric material surface introduction —NH₂ and —CF₃^[40]

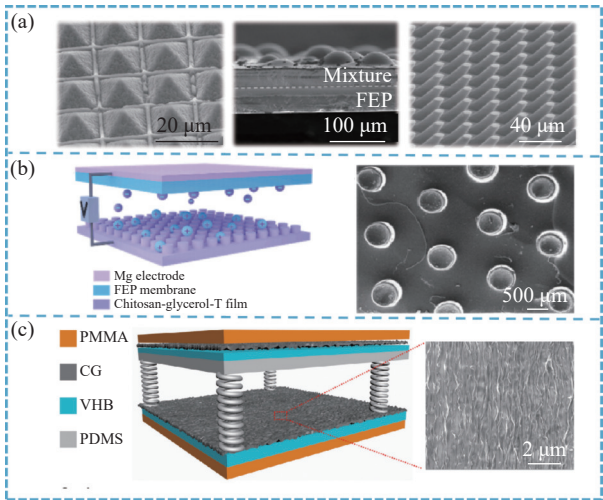
2.2.2 表面微纳结构

表面电荷密度除与材料组成有关外,还受到正负摩擦层有效接触面积的影响。摩擦层有效接触面积越大, TENG 的输出性能越高。因此,为提升 TENG 的输出性能,目前常用模板法^[44]、静电纺丝^[45]、激光光刻^[46]和离子刻蚀^[47]等方法在摩擦电材料表面构筑金字塔^[48]、半球^[49]、微柱^[50]等微纳结构,如图 6(a)所示。Gao 等^[51]采用倒模法在摩擦层表面构筑了圆柱微结构,如图 6(b)所示,相较原始 TENG,其输出性能显著提升。Chen 等^[52]通过预拉伸法获得了具有表面褶皱结构的摩擦层,如图 6(c)所示,发现表面褶皱 TENG 产生的开路电压、短路电流和功率密度分别为 83.0 V、25.78 μA 和 0.025 W/m²,是平面 TENG 的 20 倍。

除微纳结构的形貌外,微纳结构的尺寸和排列对 TENG 的输出性能也有着明显的影响,然而,在实际操作过程中微纳结构的精度难以控制,且在实际应用过程中微纳结构的稳定性也比较差,导致 TENG 的输出稳定性不佳,限制了该方法的应用。但如果利用耐磨有机材料形成形状记忆类表面微纳结构,则可能是一种不错的选择。

2.2.3 外部电荷注入

外部电荷注入是将外部电荷直接作用于材料表面,从而提高表面电荷密度的一种方法。外部电荷注入包括离子注入^[53]、电荷注入^[54]和电荷泵^[55]等策略。Fan 等^[56]通过离子注入打破聚四氟乙烯化学链,并与链上的自由基结合形成新的化学键和化学基团(极性键和不饱和键),如图 7(a)所示,



PMMA—Polymethylmethacrylate; CG—Crumpled graphene; VHB—Very high bond; PDMS—Polydimethylsiloxane

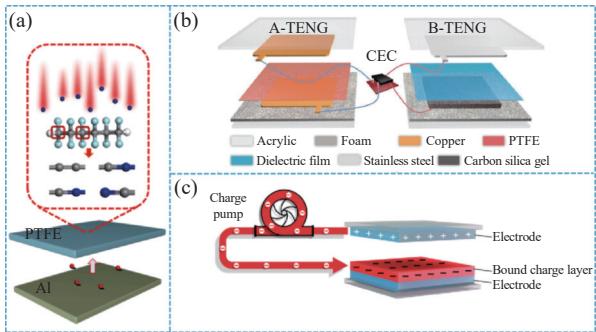
图6 (a) MXene/Ecoflex 复合材料、聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 和碳纳米管/聚二甲基硅氧烷复合材料 (CNT/PDMS) 的金字塔^[48]、半球^[49]和微柱^[50]结构; (b) 全氟乙烯丙烯共聚物 (FEP) 的圆柱微结构^[51]; (c) PDMS 的表面褶皱结构^[52]

Fig. 6 (a) The MXene/Ecoflex composite, polydimethylsiloxane (PDMS), and carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite (CNT/PDMS) exhibit pyramid^[48], hemisphere^[49] and microcolumn^[50] structure, respectively; (b) Cylindrical microstructures of fluorinated ethylene propylene copolymer (FEP)^[51]; (c) Surface wrinkle structure of PDMS^[52]

从而将其转化为极性聚合物，增强电负性和电子密度，聚合物极性键的增加也使其介电常数增加了一倍，能量存储密度和表面累积电荷容量增加，离子注入后的 TENG 开路电压增强了 4~6 倍，电荷密度增加了 4~8 倍。Wu 等^[57]利用半波电荷激励电路实现电荷的定向积累产生高电场，诱导空气电离，实现在介电材料表面的定向电荷注入，如图 7(b) 所示。通过这种电荷注入技术，聚酰亚胺薄膜的输出电荷密度最高达 880 μC/m²，氟化乙烯丙烯薄膜在注入正电荷和负电荷后，输出电荷密度从 35 μC/m² 分别提高到 266 和 380 μC/m²。Xu 等^[58]将浮动层结构与电荷泵相结合，通过电荷泵将电荷泵入浮动层以增大表面电荷密度，如图 7(c) 所示。电荷泵的加入使得 TENG 的峰值开路电压达到 1 290 V，短路电流为 2.88 mA。

外部电荷注入是提升 TENG 输出性能的有效手段，但注入的电荷易耗散，影响 TENG 输出稳定性和耐久性，且技术要求高、成本高。这也是研究者在提高 TENG 输出性能方面要着力突破的一个难题。

由上可知，表面官能团改性通过改变摩擦电材料的化学组成，提高了摩擦电材料的得失电子



PTFE—Polytetrafluoroethylene; CEC—Charge excitation circuit

图7 (a) 离子注入聚四氟乙烯形成 TENG 的示意图^[56]; (b) 正电荷注入聚酰亚胺形成 TENG 的示意图^[57]; (c) 浮动层结构与电荷泵结合的 TENG 示意图^[58]

Fig. 7 (a) Schematic diagram of ion implantation of polytetrafluoroethylene to form TENG^[56]; (b) Schematic diagram of positive charge injection into polyimide to form TENG^[57]; (c) Schematic diagram of TENG with floating layer structure bound to the charge pump^[58]

能力；表面微纳结构的构建可增大正负摩擦层间的有效接触面积，从而提升电荷传输能力；外部电荷注入一方面增加了电荷密度，另一方面改变了材料的极化程度。因此，上述 3 种表面改性策略均可有效提升 TENG 的输出性能。但是，材料表面改性往往受限于技术、成本等因素，存在输出稳定性差的问题，因此寻求简单高效的表面改性方法是今后研究的重点。

3 摩擦层结构对 TENG 输出性能的影响

TENG 输出性能在很大程度上与摩擦电气化过程中摩擦层所产生的电荷量有关。根据接触起电效应和表面电荷的渗流效应^[59]，可以将电荷在摩擦层中的转移过程分为电荷转移、电荷传输和电荷存储。将摩擦层进行功能分区，性能放大，合理构建摩擦层结构，如在摩擦层中引入电荷掠夺层^[60]、电荷存储层^[61]、电荷传输层^[62]等，可有效提高正负摩擦层的表面电荷密度，是提高 TENG 输出性能的有效手段。

3.1 电荷掠夺层

构建电荷掠夺层是提高摩擦层表面电荷密度的有效策略，通过在摩擦层表面引入电负性相差较大的材料，使得正负摩擦层转移的电荷量增大，进而提高表面电荷密度。Wang 等^[63]制备了一种高输出性能的新型涂层液-固 TENG，通过引入强电荷掠夺能力的改性丙烯酸树脂涂层，避免了氟污染的同时，大大提高了 TENG 的输出性能。如图 8(a) 所示，与缺乏涂层结构的 TENG 相比，新

型液滴 TENG 的开路电压增加了 20 倍，短路电流增加了 40 倍，电荷转移增加了 10 倍。Zheng 等^[64]在导电织物上构建了含有聚(偏氟乙烯)-六氟丙烯共聚物和钛酸钡纳米颗粒的介电调制多孔复合涂层，构建了如图 8(b) 所示的织物 TENG，涂层作为电荷掠夺层大大提高了织物的电荷掠夺能力，其开路电压、短路电流和转移电荷量分别达 261 V、1.5 μ A 和 12.7 nC。

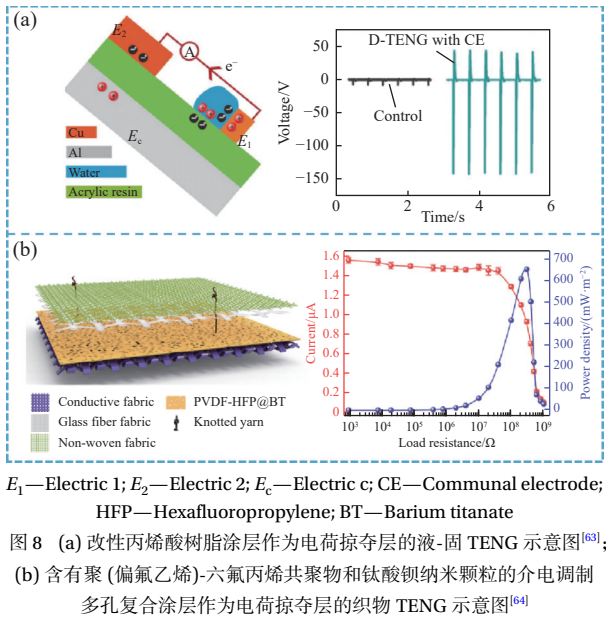
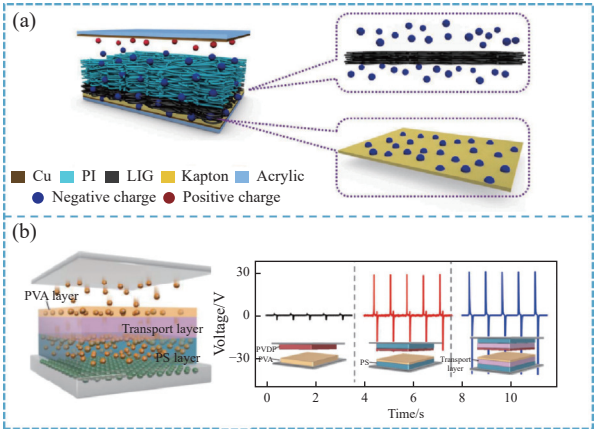


图 8 (a) 改性丙烯酸树脂涂层作为电荷掠夺层的液-固 TENG 示意图^[63]; (b) 含有聚(偏氟乙烯)-六氟丙烯共聚物和钛酸钡纳米颗粒的介电调制多孔复合涂层作为电荷掠夺层的织物 TENG 示意图^[64]

Fig. 8 (a) Schematic diagram of liquid-solid TENG of modified acrylic resin coating as charge plunder layer^[63]; (b) Schematic diagram of fabric TENG with dielectric modulation porous composite coating containing poly(vinylidene fluoride)-hexafluoropropylene copolymer and barium titanate nanoparticles as charge scavenging layer^[64]

3.2 电荷传输层

表面电荷由渗流效应往材料深部迁移，电荷传输层迁移电荷运往材料更深利存储，大大减小了表面电荷易消散的问题。Yan 等^[65]通过在聚酰亚胺 (PI) 纳米纤维膜下引入了激光诱导的石墨烯层为电荷传输层的 TENG，如图 9(a) 所示，显著放大了摩擦电荷的迁移效率，从而提高了电荷的存储能力。多层结构的 TENG 的短路电流和开路电压为与单层结构的 TENG 相比，分别大 1.91 倍和 1.76 倍。Cui 等^[66]设计了一种由 PVA 为电荷掠夺层、PVA+PS 为电荷传输层和聚苯乙烯 (PS) 为电荷存储层依次堆叠而成的多层复合结构 TENG，如图 9(b) 所示，将摩擦层功能分区，性能放大，相较原始 TENG，显著提高了电荷的迁移率，其摩擦电荷密度从 0.97 nC/cm² 增加到 16 nC/cm²。



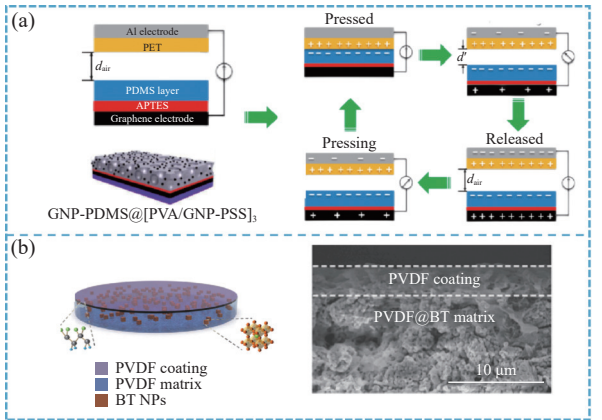
PI—Polyimide; LIG—Laser-induced graphene; PS—Polystyrene

图 9 (a) 石墨烯作为电荷传输层的 TENG 示意图^[65]; (b) PVA+PS 为电荷传输层的多层复合结构 TENG^[66]

Fig. 9 (A) Schematic diagram of TENG of graphene as charge transport layer^[65]; (b) PVA + PS is a multilayer composite structure TENG of charge transport layer^[66]

3.3 电荷存储层

电荷存储层的加入可有效增强摩擦层的电荷存储能力，提高表面电荷密度。Menge 等^[67]通过分层沉积法在 PDMS 下插入了石墨烯纳米片 (GNP) 电荷存储层，构筑了具有强电荷存储能力的多层复合结构的 TENG，如图 10(a) 所示，其开路电压和短路电流高达 270.2 V 和 0.44 μ A，分别是原始 PDMS 的 8.7 和 3.5 倍。Zheng 等^[68]采用热压旋涂法构筑了具有电荷掠夺层和电荷存储层的 PVDF@80BT/PVDF 分层结构的双层复合 TENG，其中，



d_{air} —Optimal gap between triboelectric layers; d' —Optimal distance between triboelectric layers; APTES—3-aminopropyltriethoxysilane; PSS—Poly(4-styrene-sulfonic acid); NPs—Nanoparticles

图 10 (a) 石墨烯纳米片 (GNP) 为电荷存储层的 TENG 示意图^[67]; (b) 80BT/PVDF 为电荷存储层的 TENG 示意图^[68]

Fig. 10 (a) Graphene nanoplatelets (GNP) for the charge storage layer of the TENG diagram^[67]; (b) Schematic diagram of a TENG with 80BT/PVDF serving as the charge storage layer^[68]

80BT/PVDF 层的插入大大提高了摩擦层的电荷存储能力, 如图 10(b) 所示, 相较原始 TENG, 分层结构摩擦层的设计使得 TENG 的短路电流密度和最大瞬时功率密度分别提高了 4.1 倍和 23.1 倍。

相较摩擦电材料的表面改性而言, 摩擦层结构的构建具有操作简单, 输出性能提升幅度大的优势。目前研究中, 构建更加合理有效的摩擦层结构, 如插入电荷存储层的双层结构、中间层为电荷转移层的多层复合结构等, 可有效增强电荷迁移率和电荷存储能力, 提高 TENG 的输出性能。但相关摩擦层表面电荷的产生、转移和存储过程的理论研究还并不明确。

4 器件结构设计对 TENG 输出性能的影响

目前, TENG 的工作模式主要有 4 类^[69]: 接触分离模式、横向滑动模式、单电极模式和独立模式。在其基本工作模式的基础上, 设计更加合理、更加复杂的器件结构也是提高 TENG 输出性能的有效手段, 且可以满足不同场景下对不同类型能量采集和驱动传感的需求。

4.1 接触分离模式

接触分离模式的 TENG 是由两种具有不同摩擦电极性的材料和位于其背面的电极组成, 如图 11(a) 所示。在外部压力下, 由于接触起电效应, 两种材料相互接触从而产生表面电荷, 接触分离式的 TENG 可以更便捷地感应压力的变化。Cui 等^[66] 开发了一种具有多间隙结构摩擦层的 TENG, 如图 12(a) 所示, 由于这些间隙的存在,

在摩擦层之间产生了更多的接触, 因此具有更大的电荷密度和更多的输出电荷。在一个驱动周期内, 普通 TENG 产生 2 个电流脉冲, 输出电荷量为 0.23 nC/cm², 而多间隙结构摩擦层 TENG 产生约 14 个电流脉冲, 输出电荷量为 294 nC/cm²。这种器件结构的设计使得 TENG 相较于传统模式, 能在一个驱动周期中产生额外的多个电流脉冲, 极大地提高了电荷的转移量, 为提高接触分离模式 TENG 的输出性能提供了一种新策略。Liu 等^[70] 提出了一种双模式 TENG (DM-TENG), 可以有效地从液滴 TENG (D-TENG) 中收集液-固表面的静电能, 并从接触分离 TENG 中收集振动悬臂梁的弹性势能, 如图 12(b) 所示。在小液滴的触发下, 柔性悬臂梁可以轻松地进行多次大振幅振动, 从而实现接触分离 TENG 的倍频增多放大, 结合顶部电极设计, 充分利用液固界面的电荷, 单滴就可达到 158 nC 的电荷转移量。DM-TENG 的能量转换效率是 D-TENG 的 2.66 倍。这种设计方法将液-固 TENG 本要浪费的重力势能转化为弹性势能, 再通过接触分离 TENG 对弹性势能进行转化为电能, 即减小了器件的损耗, 又提高了 TENG 的能量转化率, 这为 TENG 多模式集成提高 TENG 能量转化率提供了一种新思路。

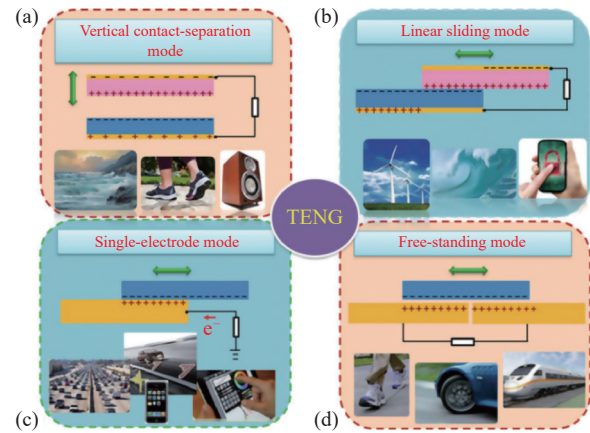
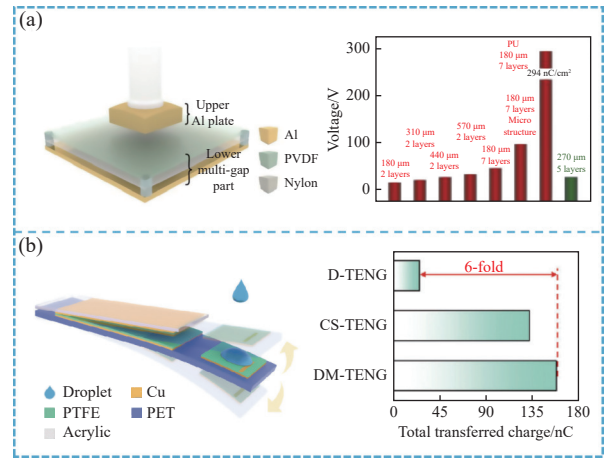


图 11 TENG 的 4 种工作模式: (a) 接触分离模式; (b) 横向滑动模式; (c) 单电极模式; (d) 独立摩擦模式^[69]

Fig. 11 Four working modes of TENG: (a) Contact separation mode; (b) Lateral sliding mode; (c) Single electrode mode; (d) Independent friction mode^[69]



D-TENG—Droplet TENG; CS—Contact-separation; DM—Dual-mode

图 12 (a) 基于接触分离模式的多间隙结构 TENG 示意图^[66]; (b) 基于接触分离模式和单电极模式的固-液双模式 TENG 示意图^[70]

Fig. 12 (a) Schematic of multi-gap structure TENG based on contact separation mode^[66]; (b) Schematic of solid-liquid dual-mode TENG based on contact separation mode and single-electrode mode^[70]

4.2 横向滑动式

横向滑动模式的 TENG 结构与接触分离式相似, 都是通过摩擦电材料间的接触分离产生电荷。

如图 11(b) 所示, 但不同之处在于接触分离式需要两种材料在垂直方向上分开, 而横向滑动式则需要两种材料在平面方向上分开。横向滑动式的优点在于工作频率可以很高, 且更适用于检测平面运动。如 Li 等^[71] 通过细分接触单元构建了一种恒压的直流三元介质 TENG, 如图 13(a) 所示。通过对摩擦单元进行细分, 大大增加了周期内的脉数, 优化后的 DC-TENG 实现了平均功率密度为 8.77 W/m^2 , 这为旋转 DC-TENG 创造了新的记录也为三元介质 TENG 提供了一种提升输出性能的新方法。Jeong 等^[72] 以尼龙微纤维束为摩擦层, 构建了刷式结构的 TENG, 如图 13(b) 所示。通过将传统模块式结构设计成刷式结构, 该 TENG 表现出良好的弹性和灵活性, 同时有效增大了摩擦层的接触面积, 其开路电压和短路电流分别提高到 1.6 kV 和 $200\text{ }\mu\text{A}$ 。这为 TENG 在软接触方面的应用提供了新思路。

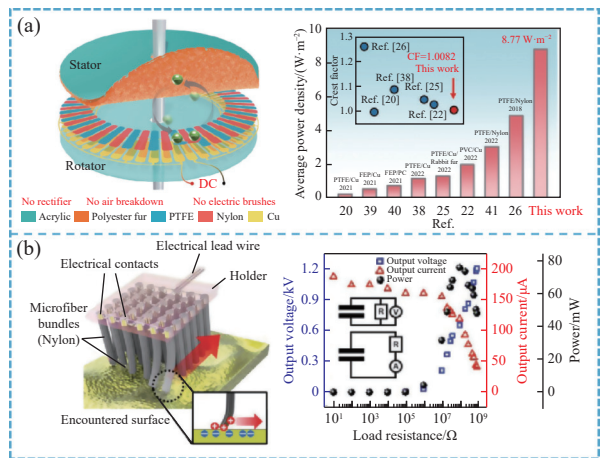


图 13 (a) 基于横向滑动模式的三元介质 TENG 示意图^[71]; (b) 基于横向滑动模式的刷式 TENG 示意图^[72]

Fig. 13 (a) Schematic diagram of ternary medium TENG based on lateral sliding mode^[71]; (b) Brush TENG diagram based on lateral sliding mode^[72]

4.3 单电极模式

单电极模式的 TENG 只有一个电极和一个摩擦层, 它将外部物体 (如皮肤) 作为另一个摩擦层与自身进行相互作用, 如图 11(c) 所示, 因此单电极模式的 TENG 可以检测外部对象的运动, 可作为触摸传感器进行使用。另外, 由于单电极模式的 TENG 本身结构简单, 可以和其他设备进行集成, 因此相较于其他类型具有更广阔的应用前景。Wu 等^[73] 提出了一种结合外部电荷泵方法的液固摩擦纳米发电机 (ECP-LS-TENG), 如图 14(a) 所示。

与传统的 LS-TENG 相比, 该 ECP-LS-TENG 中添加了电荷存储电容器来存储泵浦发电机的输出电荷。然后, 通过落下的液滴的扩展和收缩过程形成电荷提取电容器, 而电荷存储和提取电容器之间的充电和放电过程可以产生位移短路电流输出给外部电路。 $50\text{ }\mu\text{L}$ 液滴就能使得 TENG 峰值功率密度达到 231.8 W/m^2 , 超过迄今为止最高研究记录 1.43 倍。He 等^[74] 以螺旋弹簧为内支撑层、ZnS: Cu/PDMS 复合材料为外摩擦层, 制备了一种柔性、可拉伸纱线, 再通过编织, 获得了能够进行生物能量采集并可实现自供电人体运动监测的 TENG 织物, 如图 14(b) 所示, 将不同功能的纱线结合编制成织物, 外部可以与纱线接触时 TENG 为单电极模式工作, 不同纱线直接接触时 TENG 为接触分离模式工作, 这为多功能 TENG 创新提供了一种新思路。

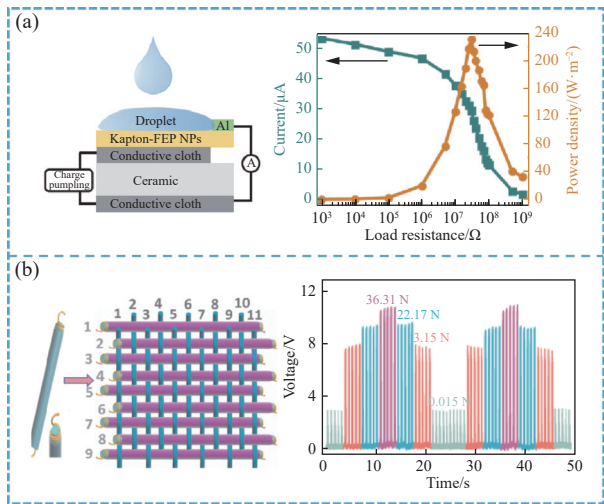


图 14 (a) 基于单电极模式的电荷泵固-液 TENG 示意图^[73]; (b) 基于单电极模式和接触分离模式的纱线织物多功能 TENG 示意图^[74]

Fig. 14 (a) Solid-liquid TENG based on single-electrode mode^[73]; (b) Multifunctional TENG of yarn fabric based on single-electrode mode and contact separation mode^[74]

4.4 独立摩擦模式

独立摩擦模式的 TENG 固定了两个电极, 外部物体可以在两个电极间自由移动, 如图 11(d) 所示。由于物体可以与电极部分分离, 因此独立摩擦式 TENG 适用于检测移动物体的运动。Paosangthong 等^[75] 通过电极和交替摩擦电材料的对称与周期性排列, 如图 15(a) 所示, 实现了 TENG 输出性能的提升。与传统栅状结构和编织结构的 TENG 相比, 它突破了只在一个运动方向上工作的限制, 且这种新的器件结构设计让编织

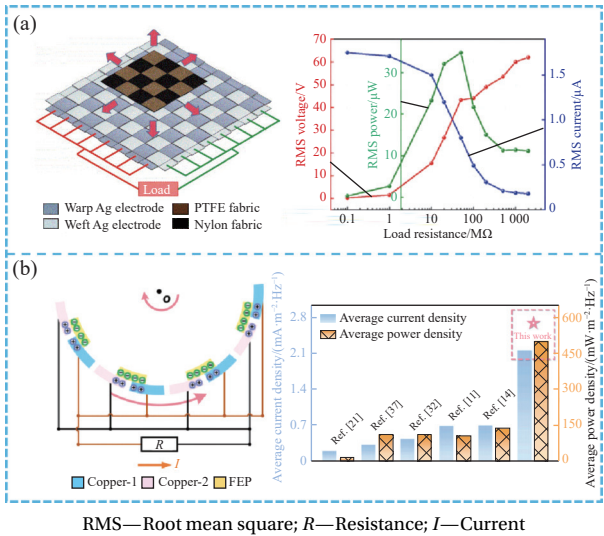


图 15 (a) 基于独立摩擦模式的编织结构 TENG 示意图^[75]; (b) 基于独立摩擦模式的加速电荷转移策略的 TENG 示意图^[76]

Fig. 15 (a) Illustrates the schematic diagram of a woven-structure TENG based on the independent friction mode^[75]; (b) Schematic diagram of a TENG with an accelerated charge transfer strategy employing the independent friction mode^[76]

的 TENG 能从全平面运动方向上获取能量，扩大了 TENG 的能量采集能力，其开路电压、短路电流和功率分别可达 62.9 V、1.77 μ A 和 34.8 μ W。大大提高了 TENG 的应用空间，这为独立摩擦模式的 TENG 全向收集能量提供了一种新策略。Sun 等^[76] 采用磁场调制和双向旋转的方法创立了一种高性能独立摩擦模式的 ACT-TENG，如图 15(b) 所示，与传统的独立摩擦模式 TENG 相比，ACT-TENG 的电荷转移率提高了 4 倍，输出功率显著提高了 14.6 倍。平均功率密度为 0.499 W/m²，该策略通过有效加速材料之间的电荷转移，保留原始电荷密度的同时，显著增强了 TENG 的输出性能，为构建高输出性能的独立摩擦模式 TENG 提供了一种新思路。

TENG 的器件结构影响着 TENG 的输出性能，也关系着 TENG 的实际应用。以 TENG 的 4 种基本工作模式为基础，根据各模式的工作特点，合理设计 TENG 的器件结构，如刷式结构、纱线结构、织物结构、双螺旋结构等，可有效增大接触面积，提高 TENG 的能量收集能力，且多模式的集成有利于拓宽 TENG 的应用范围。

5 总结和展望

综上所述，高输出性能的摩擦纳米发电机 (TENG) 在可穿戴设备、智能物联网、自驱动系统

和能源收集等领域具有广阔的应用前景。目前，影响 TENG 输出性能的主要因素有摩擦电材料、摩擦层结构和器件结构，通过摩擦电材料复合、表面官能团引入、表面微纳结构构建、外部电荷注入、摩擦层结构设计等方式均可提高 TENG 的输出性能，但不同方法各有其优缺点，如表 1 所示。同时，TENG 的发展也还存在着诸如以下的一些难点，需要在后续研究中进行攻克。

(1) 摩擦电材料是 TENG 输出性能的重要影响因素，研究人员通过物理化学等修饰方法改变材料的摩擦电性，如材料复合、构建表面微纳结构和表面官能团修饰等方法可有效提升 TENG 输出性能，然而目前的相关理论研究还不足以对摩擦电材料与 TENG 输出性能进行量化的精密匹配，这还需要理论的进一步深入与大量实验分析共同推进，也是提高 TENG 输出性能，拓展 TENG 应用范围的具有开创性的巨大挑战。此外，目前 TENG 的应用大多在模拟条件下进行，应用场景较为简单，在复杂环境如汗液、极冷、极热、酸碱苛刻化学环境下 TENG 的耐久性和稳定性难以保证，如何去保持材料微纳结构、化学结构在复杂环境下的长效性和稳定性，仍然是一个巨大的挑战。

(2) 对摩擦层结构进行功能分区、性能放大是近年来提高 TENG 的有效策略，这也是对电荷在摩擦层中迁移原理应用的体现，虽然有关电荷在材料中渗透迁移已有部分相关研究，但是关于 TENG 摩擦层中电荷产生、转移和存储的路径与影响因素仍然有待进一步明晰。例如在多层摩擦层结构中，不同功能层材料、不同功能层厚度等因素对电荷在功能层中迁移量、迁移速率是如何影响的，各个功能层如何优化，在功能层中如何通过构建更多的深能级来提高电荷迁移效率等也都是目前提高 TENG 输出性能、丰富 TENG 应用范围的重要关注方向之一。

(3) 器件结构关系着 TENG 的能量转化率和应用场景，现有的 TENG 大多结构简单，但器件结构又决定着 TENG 的应用领域，因此开发多样化的器件结构，如将纱线结构与编织结构相结合制备的单电极模式和接触分类模式集成的多模 TENG 以提高能量转化率，亦或是将摩擦纳米发电与其他发电方式相结合，将可能浪费掉的能量进行重收集，如摩擦电协同太阳能发电，摩擦电与水利

表 1 提升摩擦纳米发电机输出性能不同策略的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different strategies to improve the output performance of friction nanogenerators

策略	方法	优点	缺点	参考文献	
摩擦电材料加工	材料复合	有机-有机复合	有机材料的复合不易出现团聚现象,所制备的TENG具有良好的稳定性	[27-28]	
		有机-无机复合	有机-无机复合可有效调控材料的介电常数,并且可增加材料表面粗糙度,增大正负摩擦层间的有效接触面积	[29-30]	
	材料表面改性	官能团引入	官能团的引入直接增强摩擦层的电荷转移能力,且不会破坏材料本身特性	材料表面出现磨损,官能团引入提高的TENG输出性能效益就会降低	[40, 43]
		构建表面微纳结构	表面微纳结构可增大摩擦层间的有效接触面积,提高表面电荷密度	微纳结构的精度难以控制,且微纳结构易变形受损,影响TENG输出稳定性	[51-52]
		电荷注入	直接将外加电荷作用于材料表面,显著提高电荷密度	注入的电荷易耗散,影响TENG输出稳定性和耐久性,且技术要求高、成本高	[56-58]
	摩擦层结构设计	电荷掠夺层	直接增强摩擦层的电荷掠夺能力,显著增大材料间的电荷转移		[62-63]
电荷传输层		提高电荷迁移率,减小表面电荷消散,有利电荷存储	功能层如何优化的相关理论研究还需进一步明晰	[64-65]	
电荷存储层		增强材料电荷存储能力,显著提高表面电荷密度		[66-67]	
器件结构设计	接触分离模式	输出电压高,对压力变化感应敏感	对正负摩擦层贴合度有一定要求	[66, 70]	
	横向滑动模式	能量转化率高,适用于检测平面运动	摩擦层材料易受损	[71-72]	
	单电极模式	易与其他设备进行集成,相较于其他类型具有更广阔的应用前景	输出性能较其他模式低	[73-74]	
	独立摩擦模式	摩擦层可移动,适用于检测移动物体的运动	摩擦层材料易受损,且对运动频率有一定要求	[75-76]	

发电相结合等,也是拓展 TENG 应用场景应该关注的。

(4) 随着人类社会发展,绿色可持续一直是科学研究追随的主题,TENG 又需要保持一定的耐久性和稳定性,因此开发周期可控的绿色可降解摩擦电材料是十分有必要的,在生物医疗、农业生产等领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 肖先勇,郑子萱."双碳"目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.

XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: Contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Science, 2022, 54(1): 47-59(in Chinese).

[2] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰,碳中和行动方略之探讨 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.

YU Guirui, HAO Tianxiang, ZHU Jianxing. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022,

37(4): 423-434(in Chinese).

[3] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334.

[4] CHEN K, LI Y, YANG G, et al. Fabric-based TENG woven with bio-fabricated superhydrophobic bacterial cellulose fiber for energy harvesting and motion detection[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(45): 2304809.

[5] HAO D, GONG Y, WU J, et al. A self-sensing and self-powered wearable system based on multi-source human motion energy harvesting[J]. Small, 2024, 20(28): 2311036.

[6] SHI B, WANG Q, SU H, et al. Progress in recent research on the design and use of triboelectric nanogenerators for harvesting wind energy[J]. Nano Energy, 2023, 116: 108789.

[7] SUN F, ZHU Y, JIA C, et al. Advances in self-powered sports monitoring sensors based on triboelectric nanogenerators[J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 79: 477-488.

[8] 谭杜娟. 用于海洋能收集的摩擦纳米发电机的结构设计及性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

TAN Dujuan. Structural design and property study of triboelectric nanogenerator for ocean energy harvesting[D]. Chongqing: University of Chongqing, 2022(in Chinese).

[9] SHAN C, HE W, WU H, et al. Dual mode TENG with self-

- voltage multiplying circuit for blue energy harvesting and water wave monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(47): 2305768.
- [10] MAHAPATRA A, AJIMASHA R S, DEEPAK D, et al. Textile-integrated MoS₂-PDMS single electrode triboelectric nanogenerator for vibrational energy harvesting and biomechanical motion sensing[J]. *Nano Energy*, 2023, 116: 108829.
 - [11] ONG D T K, KOAY J S C, SIM M T, et al. High performance composition-tailored PVDF triboelectric nanogenerator enabled by low temperature-induced phase transition[J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108555.
 - [12] 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.
 - [13] HAN G H, LEE S H, GAO J, et al. Sustainable charged composites with amphiphobic surfaces for harsh environment-tolerant non-contact mode triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2023, 112: 108428.
 - [14] WANG Y F, CAO B, YANG Y W, et al. Multi-channel self-powered attitude sensor based on triboelectric nanogenerator and inertia[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108164.
 - [15] SUN X, DONG L, LIU Y, et al. Biomimetic PVA-PVDF-based triboelectric nanogenerator with MXene doping for self-powered water sterilization[J]. *Materials Today Nano*, 2023, 24: 100410.
 - [16] GU L, GERMAN L, LI T, et al. Energy harvesting floor from commercial cellulosic materials for a self-powered wireless transmission sensor system[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(4): 5133-5141.
 - [17] CHEN Z, ZHOU C, XIA W, et al. Strong, flexible and robust aramid nanofibers-based textile-triboelectric nanogenerators for high temperature escape monitoring and multi-functional applications[J]. *Nano Energy*, 2024, 123: 109359.
 - [18] WANG Z, WAN D, CUI X, et al. Wearable electronics powered by triboelectrification between hair and cloth for monitoring body motions[J]. *Energy Technology*, 2022, 10(6): 2200195.
 - [19] MATIN N A, MOHSENIAN R, RAYEGANI A, et al. Skin-contact triboelectric nanogenerator for energy harvesting and motion sensing: Principles, challenges, and perspectives[J]. *Biosensors*, 2023, 13(9): 872.
 - [20] CHEN X, LIU Y, SUN Y, et al. Electron trapping & blocking effect enabled by MXene/TiO₂ intermediate layer for charge regulation of triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2022, 98: 107236.
 - [21] LI W, XIANG Y, ZHANG W, et al. Ordered mesoporous SiO₂ nanoparticles as charge storage sites for enhanced triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108539.
 - [22] XI B, WANG L, YANG B, et al. Boosting output performance of triboelectric nanogenerator based on BaTiO₃: La embedded nanofiber membrane for energy harvesting and wireless power transmission[J]. *Nano Energy*, 2023, 110: 108385.
 - [23] LEE K, HAN H S, RYU J H, et al. Laser-driven formation of ZnSnO₃/CNT heterostructure and its critical role in boosting performance of the triboelectric nanogenerator[J]. *Carbon*, 2023, 212: 118120.
 - [24] SHRESTHA K, SHARMA S, PRADHAN G B, et al. A siloxene/ecoflex nanocomposite-based triboelectric nanogenerator with enhanced charge retention by MoS₂/LIG for self-powered touchless sensor applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(27): 2113005.
 - [25] GIUSEPPINA P, ANTONIO E D R C, ALESSIO L, et al. 2D materials-based electrochemical triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(23): 2211037.
 - [26] ZOU H, ZHANG Y, GUO L, et al. Quantifying the triboelectric series[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1427.
 - [27] CANDIDO I C M, OIVEIRAL G S, RIBEIRO S J L, et al. PVA-silk fibroin bio-based triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2023, 105: 108035.
 - [28] BAI Z, XU Y, ZHANG Z, et al. Highly flexible, porous electroactive biocomposite as attractive tribopositive material for advancing high-performance triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 104884.
 - [29] CHEON S, KANG H, KIM H, et al. High-performance triboelectric nanogenerators based on electrospun polyvinylidene fluoride-silver nanowire composite nanofibers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(2): 1703778.
 - [30] LI W, LU L, YAN F, et al. High-performance triboelectric nanogenerators based on TPU/mica nanofiber with enhanced tribo-positivity[J]. *Nano Energy*, 2023, 114: 108629.
 - [31] XU J, ZOU Y, NASHALIAN A, et al. Leverage surface chemistry for high-performance triboelectric nanogenerators[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 577327.
 - [32] MORADI F, KARIMZADEH F, KHARAZIHA M. Rational micro/nano-structuring for high-performance triboelectric nanogenerator[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170693.
 - [33] WANG S, XIE Y, NIU S, et al. Maximum surface charge density for triboelectric nanogenerators achieved by ionized-air injection: Methodology and theoretical understanding[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(39): 6720-6728.
 - [34] WU C, WANG A C, DING W, et al. Triboelectric nanogene-

- ator: A foundation of the energy for the new era[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(1): 1802906.
- [35] WANG Z L, WANG A C. On the origin of contact-electrification[J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34-51.
- [36] PENG Z, SONG J, GAO Y, et al. A fluorinated polymer sponge with superhydrophobicity for high-performance biomechanical energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 106021.
- [37] SHI L, KALE V S, TIAN Z, et al. Fluorinated covalent organic framework as a positive tribo-material for high-performance triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(12): 2212891.
- [38] LING Z, LIN F, HUANG X, et al. Influence of molecular structure and material properties on the output performance of liquid-solid triboelectric nanogenerators[J]. *Micromachines*, 2023, 14(10): 1825.
- [39] YAO C, YIN X, YU Y, et al. Chemically functionalized natural cellulose materials for effective triboelectric nanogenerator development[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(30): 1700794.
- [40] SHIN S H, KWON Y H, KIM Y H, et al. Triboelectric charging sequence induced by surface functionalization as a method to fabricate high performance triboelectric generators[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4621-4627.
- [41] YUAN H, ZHANG J, RENCUS L S, et al. The engineering of molecular packing in amino acid crystals for the enhanced triboelectric effect[J]. *Nano Energy*, 2023, 110: 108375.
- [42] THAKUR D, SEO S, HYUN J. Three-dimensional triboelectric nanogenerator with carboxymethylated cellulose nanofiber and perfluoroalkoxy films[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 123: 220-229.
- [43] WANG S, ZI Y, ZHOU Y S, et al. Molecular surface functionalization to enhance the power output of triboelectric nanogenerators[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(10): 3728-3734.
- [44] 周亮. 基于仿生结构及可重构材料的摩擦纳米发电机设计与传感应用研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
ZHOU Liang. Design and sensing applications of triboelectric nanogenerators based on biomimetic structure and reconfigurable materials[D]. Jilin: Jilin University, 2022(in Chinese).
- [45] 岳欧阳. 基于生物质胶原的多功能柔性电子传感材料的构建及性能研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
YUE Ouyang. Preparation and exploration of multifunctional collagen-based flexible electronic sensing materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Technology, 2022(in Chinese).
- [46] MUTHU M, PANDEY R, WANG X, et al. Enhancement of triboelectric nanogenerator output performance by laser 3D-surface pattern method for energy harvesting application[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105205.
- [47] SHANG W, GU G Q, YANG F, et al. A sliding-mode triboelectric nanogenerator with chemical group grated structure by shadow mask reactive ion etching[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 8796-8803.
- [48] ZHANG S, RANS S M S, BHATTA T, et al. 3D printed smart glove with pyramidal MXene/Ecoflex composite-based toroidal triboelectric nanogenerators for wearable human-machine interaction applications[J]. *Nano Energy*, 2023, 106: 108110.
- [49] 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.
- [50] PINMING C, WONGWIRIYAPAN W, RATTANAMAI S, et al. Carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite micropillar arrays using non-lithographic silicon nanowires as a template for performance enhancement of triboelectric nanogenerators[J]. *Nanotechnology*, 2020, 32(9): 095303.
- [51] GAO C, TONG W, LIU S, et al. Fully degradable chitosan-based triboelectric nanogenerators applying in disposable medical products for information transfer[J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108876.
- [52] CHEN H, XU Y, ZHANG J, et al. Enhanced stretchable graphene-based triboelectric nanogenerator via control of surface nanostructure[J]. *Nano Energy*, 2019, 58: 304-311.
- [53] GAO M, KIM S B, LI Y, et al. Triboelectric nanogenerator with enhanced output and durability based on Si-DLC films[J]. *Nano Energy*, 2023, 105: 107997.
- [54] PARK S H, LEE J, KONG D S, et al. Laminating structure for interlayer corona discharge treatment toward ion-based nanogenerators[J]. *Small Methods*, 2023, 7(6): 2300097.
- [55] XIAO Z, LUO Y, YUAN H, et al. Coupling charge pump and BUCK circuits to efficiently enhance the output performance of triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2023, 115: 108749.
- [56] FAN Y, LI S, TAO X, et al. Negative triboelectric polymers with ultrahigh charge density induced by ion implantation[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106574.
- [57] WU H, FU S, HE W, et al. Improving and quantifying surface charge density via charge injection enabled by air breakdown[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(35): 2203884.
- [58] XU L, BU T Z, YANG X D, et al. Ultrahigh charge density realized by charge pumping at ambient conditions for triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2018, 49: 625-633.
- [59] SEIFOLLAHI Z, ASHRAFIZADEH S N. Ionic-size depen-

- dent electroosmotic flow in ion-selective biomimetic nanochannels[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2022, 216: 112545.
- [60] CHAI B, SHI K, ZOU H, et al. Conductive interlayer modulated ferroelectric nanocomposites for high performance triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2022, 91: 106668.
- [61] JIANG H, LEI H, WEN Z, et al. Charge-trapping-blocking layer for enhanced triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 105011.
- [62] 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.
- [63] WANG H, FENG M, WANG W, et al. Fluorine-free coating-based droplet triboelectric nanogenerators for highly efficient energy harvesting[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(8): 4727-4738.
- [64] ZHENG Z, MA X, LU M, et al. High-performance all-textile triboelectric nanogenerator toward intelligent sports sensing and biomechanical energy harvesting[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(8): 10746-10755.
- [65] YAN J, WANG H, WANG X, et al. High-performance triboelectric nanogenerators with laser-induced graphene pattern for efficient charge transfer[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 661: 160034.
- [66] CUI N, LIU J, LEI Y, et al. High-performance triboelectric nanogenerator with a rationally designed friction layer structure[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2018, 1(6): 2891-2897.
- [67] MENGE H G, KIM J O, PARK Y T. Enhanced triboelectric performance of modified PDMS nanocomposite multilayered nanogenerators[J]. *Materials*, 2020, 13(18): 4156.
- [68] ZHENG Z, XIA J, WANG B, et al. Hierarchically designed nanocomposites for triboelectric nanogenerator toward biomechanical energy harvester and smart home system[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107047.
- [69] LAI M, DU B, GUO H, et al. Enhancing the output charge density of TENG via building longitudinal paths of electrostatic charges in the contacting layers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(2): 2158-2165.
- [70] LIU D, YANG P, GAO Y, et al. A dual-mode triboelectric nanogenerator for efficiently harvesting droplet energy[J]. *Small*, 2024, 20(31): 2400698.
- [71] LI Q, HU Y, YANG Q, et al. A robust constant-voltage DC triboelectric nanogenerator using the ternary dielectric triboelectrification effect[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(2): 2202921.
- [72] JEONG J, JEON S, MA X, et al. A sustainable and flexible microbrush-faced triboelectric generator for portable/wearable applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(39): 2102530.
- [73] WU P, YANG P, LIU Z, et al. Boosting the output of liquid-solid triboelectric nanogenerator by an external charge-pumping strategy[J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(16): 2303912.
- [74] HE M, DU W, FENG Y, et al. Flexible and stretchable triboelectric nanogenerator fabric for biomechanical energy harvesting and self-powered dual-mode human motion monitoring[J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106058.
- [75] PAOSANGTHONG W, WAGIH M, TORAH R, et al. Textile-based triboelectric nanogenerator with alternating positive and negative freestanding woven structure for harvesting sliding energy in all directions[J]. *Nano Energy*, 2022, 92: 106739.
- [76] SUN Y, YU Y, GAO Q, et al. Enhancing performance of triboelectric nanogenerator by accelerating the charge transfer strategy[J]. *Nano Energy*, 2024, 121: 109194.