

## 激光与光电子学进展

## 纤维/纱线基摩擦纳米发电机的制造与集成

王哲山<sup>1</sup>, 孙刘平<sup>1</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 胡建臣<sup>1,3\*\*</sup>, 张克勤<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>苏州大学纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215123;<sup>2</sup>现代丝绸国家工程实验室(苏州), 江苏 苏州 215123;<sup>3</sup>南通纺织丝绸产业技术研究院, 江苏 南通 226300

**摘要** 随着对可持续、可穿戴、清洁能源需求的增长,摩擦纳米发电机(TENG)引起了人们广泛的关注。基于纺织品的摩擦纳米发电机(T-TENG)具有轻薄柔软、穿着舒适的优点,一直是设计研究的焦点。由于纤维和纱线是纺织品的基本单位,纤维/纱线基 TENG 可以通过后续加工处理制备成不同结构的织物或集成在其他织物中,充分保留织物结构本身的优势,因此设计和开发具有优异性能的纤维/纱线基 TENG 被认为是制造 T-TENG 根本解决方案之一。本文介绍了 TENG 的基本原理、纤维/纱线基 TENG 制造技术,并对纤维/纱线基 TENG 的集成策略进行了综述,最后对制备纤维/纱线基 TENG 提出了展望并总结了面临的挑战。

**关键词** 摩擦纳米发电机; 纤维; 纱线; 智能纺织品

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231002

## Fiber/Yarn Based Triboelectric Nanogenerator: Fabrication and Integration

Wang Zheshan<sup>1</sup>, Sun Liuping<sup>1</sup>, Wang Yan<sup>1</sup>, Hu Jianchen<sup>1,3\*\*</sup>, Zhang Keqin<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu, China;<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Modern Silk, Suzhou 215123, Jiangsu, China;<sup>3</sup>Nantong Textile & Silk Industrial Technology Research Institute, Nantong 226300, Jiangsu, China

**Abstract** With the growing demand for sustainable, wearable, and clean energy, triboelectric nanogenerator (TENG) has attracted wide attention. Textile-based triboelectric nanogenerator (T-TENG) has the advantages of lightweight, soft, and comfortable wearing, and has been the focus of design and research. Since fiber and yarn are the basic units of textiles, fiber/yarn-based TENG can be prepared into fabrics with different structures or integrated into other fabrics through subsequent processing, which can fully retain the advantages of fabric structure itself. Therefore, the design and development of fiber/yarn-based TENG with excellent performance is considered to be one of the fundamental solutions for the manufacture of T-TENG. This paper introduces the basic principles of TENG, fiber/yarn-based TENG manufacturing technology, and the integrated strategy of fiber/yarn-based TENG. Finally, the challenges and prospects for the preparation of fiber/yarn-based TENG are presented.

**Key words** triboelectric nanogenerator; fiber; yarn; smart textiles

## 1 引言

近几十年来,可穿戴和便携式电子设备发展迅速,由于这些电子设备通常由电池供电,而传统电池的体积和重量阻碍了集成可穿戴电子设备的实现<sup>[1-3]</sup>。因此,直接从周围环境中采集电能是解决上述问题切实有效的一种方法。人体可能是可穿戴电子产品的有效电源。日常生活中,一个 68 kg 的成年人的脚步或手臂

运动,可以分别提供大约 67 W 和 60 W 的动能<sup>[4]</sup>。这些能量只要有效获取一部分就足以驱动多种便携式设备。摩擦纳米发电机(TENG)是一种新型能源采集技术,它通过接触起电和静电感应耦合效应能够将分布式机械能转化为电能,具有开发为新型能源器件的潜力<sup>[5-6]</sup>。利用柔性材料可制备出高柔软度的 TENG,具有信号输出高、材料多样、环境友好等优点,在智能可穿戴设备中具有广阔的应用前景<sup>[7-9]</sup>。

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-05-21; 录用日期: 2023-05-24; 网络首发日期: 2023-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51873134)、江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA540002)、南通市科技计划项目(JC2021043)

通信作者: \*kqzhang@suda.edu.cn; \*\*hujianchen@suda.edu.cn

与柔性膜材料相比,由纺织纤维或纱线加工而成的织物具有丰富的孔隙结构因而具有优异的透气性。并且织物由众多柔性纤维构成,其能够承受多种复杂机械变形的同时还具有良好的柔软性,可以适应人类运动的不规则性和不连续性,因此更适合用于可穿戴设备<sup>[10-11]</sup>。基于纺织品的摩擦纳米发电机(T-TENG)近年来发展迅速<sup>[7]</sup>。T-TENG主要有两种设计策略。第一种是在现有纺织品中添加摩擦电材料,如通过静电纺丝、吹纺或涂层将摩擦电材料集成在导电织物上<sup>[12]</sup>。然而,以这种方式引入的导电或摩擦电材料会影响纺织品穿着的舒适性。多层结构也使得整个系统体积大、刚性强、不易携带<sup>[13]</sup>。第二种方法是由一维结构设计制备摩擦电纤维或纱线,再通过织造,加工成二维或三维结构<sup>[14-16]</sup>。从一维到二维的设计方法赋予了T-TENG设计的高自由度,大大提高了成品的灵活性<sup>[17]</sup>。由摩擦电纤维或纱线设计和编织的T-TENG具有良好的透气性和变形性,这种方法被认为是制造T-TENG的最佳解决方案<sup>[18-19]</sup>。因此,设计和制造性能优异的纤维或纱线基TENG是问题的关键。本篇综述介绍了

TENG的基本工作原理,以及纤维/纱线基摩擦纳米发电机制造的不同策略、构造结构。接下来,总结了将纤维/纱线基摩擦纳米发电机集成到织物或纺织品中的方法。最后,对纤维/纱线基摩擦纳米发电机的制造和开发进行了未来展望,分析了其关键方向和挑战。

## 2 摩擦纳米发电机的基本工作原理

TENG工作原理是基于摩擦起电效应和静电感应效应,当具有不同电子亲和力的两种材料之间摩擦接触时将动能转化为电能<sup>[20]</sup>。当一种材料与另一种材料摩擦接触时,正负电荷分离并从一种材料转移到另一种材料,具有较高电子亲和力的材料表面将带负电,而另一个表面将带正电。这种电荷分离会相应地在材料的上下电极上产生周期性感应电势差。当电极通过负载连接时,自由电子将在电极之间不断地来回流动,以平衡感应电势差,并保持电极之间的静电平衡,从而产生电流输出。根据摩擦电材料和电极的不同配置及其相对运动方式,TENG的基本工作模式可分为四种,如图1<sup>[21]</sup>所示。

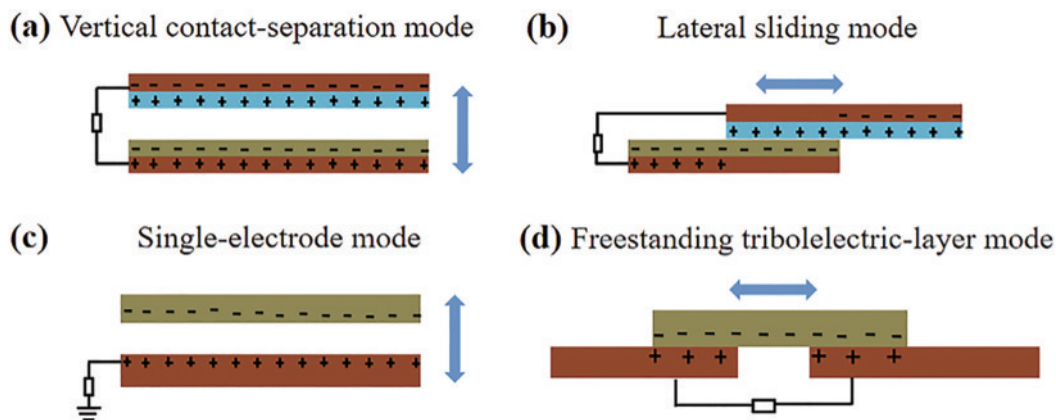


图1 摩擦纳米发电机的工作原理模型<sup>[21]</sup>。(a)垂直接触-分离模式摩擦纳米发电机;(b)横向滑动模式摩擦纳米发电机;(c)单电极模式摩擦纳米发电机;(d)独立层模式摩擦纳米发电机

Fig. 1 Working principle model of triboelectric nanogenerator<sup>[21]</sup>. (a) Triboelectric nanogenerator in vertical contact-separation mode; (b) lateral sliding mode triboelectric nanogenerator; (c) single-electrode mode triboelectric nanogenerator; (d) triboelectric nanogenerator with freestanding triboelectric-layer mode

### 2.1 垂直接触-分离模式

两种不同电负性的摩擦电材料之间相互摩擦接触将导致两种材料之间发生电荷转移,从而产生两个电荷相反的表面。随着两种材料的分离,两个电极之间的电位差增大。靠近正极表面电极的电势大于靠近负极表面的电极的电势。为了平衡电势,电子将从电势较低的电极流向电势较高的电极,直到电势差消失[图1(a)]。当这两种材料相互靠近时,电势差又会消失,因为电极中的电子数量超过了摩擦电材料表面电荷,因此这些多余的电子必须回流。

### 2.2 水平滑动模式

水平滑动模式主要基于旋转或平移运动产生的摩擦。接触两种材料不会分离,而是以不同的有效接

触面积移动,如图1(b)所示。在摩擦滑动过程中,在两个摩擦层之间的表面上产生摩擦电荷,从而在两个电极之间产生电势差。此时,电势差根据有效接触面积发生周期性的变化,并在该过程中产生交流电。为了在滑动过程中产生不同的有效接触面积,研究中广泛使用网格状电极。

### 2.3 单电极模式

单电极模式只需要一个电极与摩擦层。当带电物体接近或者离开摩擦层时,电子便会在电极与大地之间流动,重复该动作即可输出交流电[图1(c)]。这一模式中不需要使用导线连接两个电极便可以实现电子的无障碍自由移动,适宜收集作用力方向与方式具有随意性的机械能,在实际使用中限制条件最少。但电



势变化均发生在一个电极上,所以该模式输出功率低于其他模式。

### 2.4 独立层模式

物体和物体接触时通常都会带电,这种静电荷会在表面保留一段时间。如果在摩擦电材料背部做一对对称的电极,并且电极的大小和两者之间的间隙距离与运动物体的大小在同一尺度,那么带电物体在两个电极之间来回移动时就会使得电子在两个电极之间流动,以平衡电势差的变化,电子在电极之间的来回流动会产生功率输出,如图 1(d)所示。与单电极模式相比,独立层模式两个电极都有电位变化,没有屏蔽效应,因此输出性能更好。由于带电物体可以不直接与摩擦电材料表面接触,因此该模式能源转换效率高、输出性能稳定、器件使用寿命长。

## 3 纤维/纱线基摩擦纳米发电机的制造

制造纤维/纱线基摩擦纳米发电机的关键是在纤维/纱线一维结构中构建导电层和摩擦电层。考虑到所制备产品的舒适性和机械性能,柔性可拉伸材料通常用于纤维/纱线基摩擦纳米发电机的制造<sup>[22]</sup>。基于

接触分离模式的纤维/纱线基摩擦纳米发电机其制造过程相对复杂。相比之下,单电极模式的纤维/纱线基摩擦纳米发电机的制造过程主要是构造导电芯层和外层的摩擦电层,其结构相对简单,具有使用传统纺织技术进行大规模制造的潜力<sup>[23-24]</sup>。近年来,各种技术已被用于制造纤维/纱线基摩擦纳米发电机,如:纺织工艺(纺纱、包缠、编织、静电纺等)、涂层、工业挤压、热拉伸和注射技术等。

### 3.1 纺纱工艺制备纤维/纱线基 TENG

纺纱是将纤维制成纱或线的过程,其成熟的工艺有利于复合纱的大规模生产<sup>[15, 25]</sup>。因此,纺纱为纤维/纱线基摩擦纳米发电机的批量化生产提供了巨大的机遇。Yu 等<sup>[26]</sup>提出了一种以不锈钢纤维为芯纱,聚氨酯纤维为外壳的纱线基摩擦纳米发电机[图 2(a)]。通过该方法制备出柔软、有弹性且耐磨的摩擦电纱线,并且该制造程序适用于工业化大量生产。同时,不同的纺织材料具有不同的摩擦电性能和电子亲和力,在选材上具有一定的灵活性。通过加捻可以增强纤维间内聚力,使纤维制品具有优异的机械耐久性。但是纱线在加捻后如果不进行后处理则很难获得稳定的结构<sup>[27]</sup>。

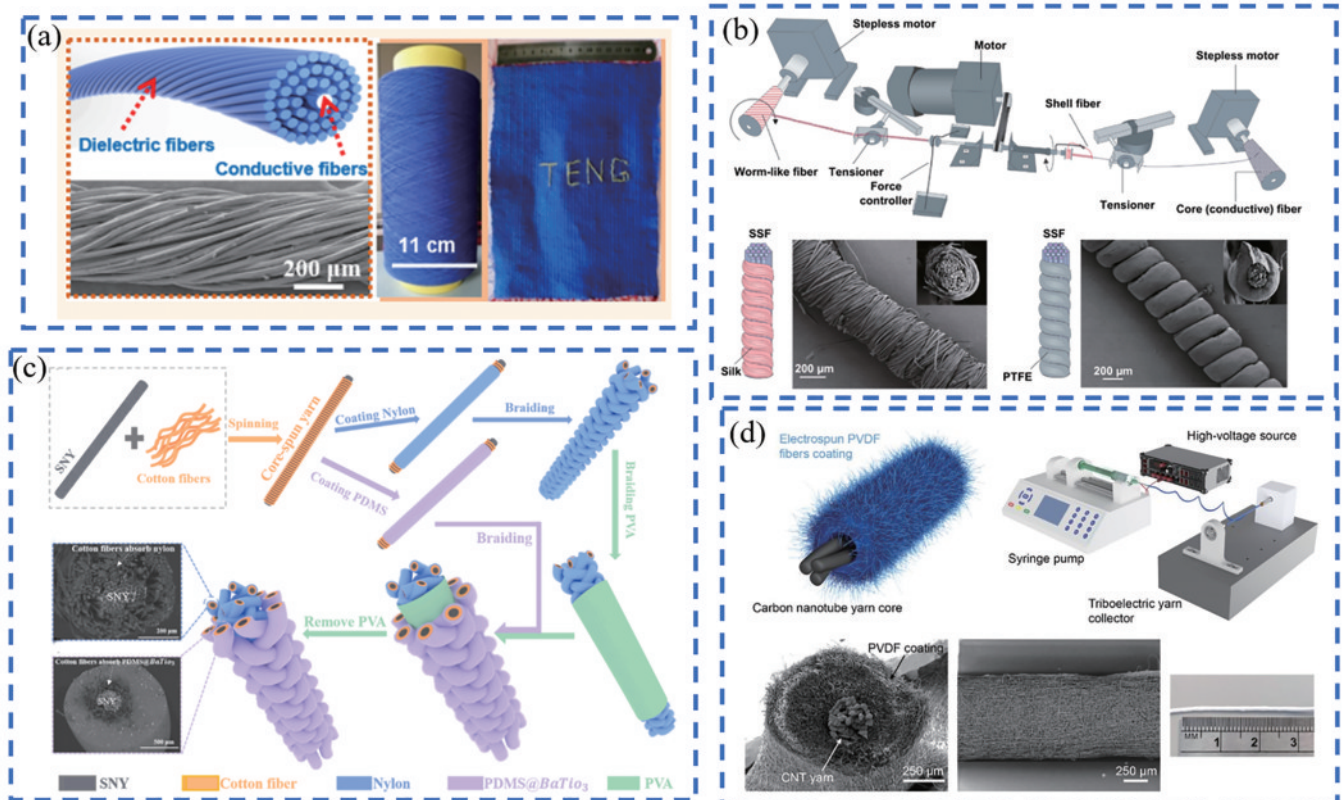


图 2 纺织技术制备的纤维/纱线基 TENG。(a) 聚氨酯纤维与不锈钢纤维纺成的核壳结构摩擦电纳米发电机<sup>[26]</sup>;(b) 将蚕丝或聚四氟乙烯纤维缠绕在不锈钢纤维束上而制成的摩擦纳米发电机<sup>[29]</sup>;(c) 采用尼龙和 PDMS 作为摩擦电材料的中空编织管状纱线<sup>[30]</sup>;(d) 在碳纳米管纱线上静电纺 PVDF 纳米纤维<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Fiber/yarn-based TENG prepared by textile technology. (a) A core-shell triboelectric nanogenerator with polyurethane fiber and stainless steel fiber<sup>[26]</sup>; (b) triboelectric nanogenerators made by winding silk or teflon fibres around bundles of stainless steel fibres<sup>[29]</sup>; (c) hollow braided tubular yarn using nylon and PDMS as triboelectric materials<sup>[30]</sup>; (d) electrospinning PVDF nanofibers on carbon nanotube yarn lines<sup>[14]</sup>

包缠纱是把部分纤维或整根纱或长丝包缠在芯纱上制成的特种结构纱线。缠绕角度和密度可以通过改变芯纱的输出速度和外层旋转缠绕速度之间的比率来调整<sup>[28]</sup>。独特的螺旋结构使获得的纱线具有高机械强度和优异的可变形性能。在 Ye 等<sup>[29]</sup>的研究中,采用蚕丝、聚四氟乙烯纤维和不锈钢纤维作为起始材料,将蚕丝或聚四氟乙烯纤维缠绕在不锈钢纤维束上制成摩擦电纱线[图 2(b)],制造的摩擦电纱线可以承受后续机械化加工和长期使用。

编织技术也可用于将导电纱线封装在摩擦电纱线中,其中商用高速编织机是最常用的设备。Gao 等<sup>[30]</sup>报道了一种采用尼龙和聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为摩擦电材料的中空编织管状纱线[图 2(c)]。首先,将棉纤维卷绕在镀银尼龙上作为芯纱,然后分别涂上尼龙和掺杂有钛酸钡纳米粒子的 PDMS。将涂有尼龙涂层的纱线编织成柔性线并编织上一层聚乙烯醇(PVA)。然后,将 PDMS 涂层纱线与 PVA 尼龙涂层纱线编织在一起,形成三明治结构。最后,PVA 溶解并在 PDMS 和尼龙之间产生间隙。在变形下,PDMS 和尼龙纱线会相互接触分离产生摩擦电效应。与加捻和包缠相比,由于外层纱线的正交结构,编织技术在提高所得纱线的机械性能(如坚固性和耐磨性能)方面具有优势,可有效防止复合纱线退捻。此外,编织构造的互锁纹理还会增加摩擦表面的粗糙度,对提高纱线的电输出起到积极作用。

高压静电纺丝技术是利用高压静电场对高分子溶液的击穿作用来制备微米纤维材料的方法,其基本原理是在喷射装置和接收装置间施加上万伏的静电场,从纺丝液的锥体端部形成射流,并在电场中拉伸,最终在接收装置上形成无纺状态的纳米纤维。静电纺丝系统通常由高压发生器、喷嘴尖端和收集器组成。最近的研究工作证明了静电纺丝技术在纱线基摩擦纳米发电机制造中的潜力,摩擦层可以通过电纺丝技术通过一步或两步工艺构建。两步工艺包括制造纳米静电纺丝纤维垫,然后将获得的纤维垫包裹在芯电极上<sup>[14, 24]</sup>。一步法是通过使用静电纺丝直接缠绕在芯电极周围并形成芯鞘复合纱。Busolo 等<sup>[14]</sup>使用静电纺丝将聚偏二氟乙烯(PVDF)纳米纤维包裹在碳纳米管(CNT)纱线上[图 2(d)]。它采用旋转收集装置,使 PVDF 纳米纤维包裹在 CNT 纱线上形成核壳结构。纱线表现出高耐磨性,可承受超过 1200 次摩擦循环。并且水洗测试表明涂层没有损坏,摩擦电性能没有下降,证明了其高耐洗性和耐久性。静电纺丝技术的优点是可以方便地调整所得到纱线的形态和性能。宏观上,可以通过改变沉积时间和收集器的转速来调节摩擦层的厚度和纳米纤维的排列,同时也可以通过改变聚合物浓度和聚合物溶液的溶剂类型来调节静电纺纤维的直径和表面形貌。此外,在纳米尺度上,聚合物结晶度和静电纺丝纳米纤维的纤维表面化学性质可以通

过调节电压极性和相对湿度来定制。

### 3.2 涂层技术制备纤维或纱线基 TENG

涂层技术可分为浸涂、滴铸、刷印<sup>[31]</sup>、水热生长<sup>[32]</sup>和电化学聚合<sup>[33]</sup>。涂层是制造单电极模式纤维/纱线基 TENG 最常用的技术,其结构简单,由内部导电材料和外部封装层组成。Chen 等<sup>[34]</sup>报道了一种用于运动能量收集和自供电可穿戴传感器的 3D 双面互锁织物 TENG (3DFIF-TENG)[图 3(a)]。以三股棉纱和涂有硅橡胶的镀银锦纶复合纱编织双罗纹织物。这种编织结构具有两种工作模式:1)由外部摩擦电材料触发的接触分离模式;2)棉纱与锦纶复合纱在织物拉伸或变形过程中的接触与分离。这种新颖的结构使其具有很高的灵敏度,并具有作为压力传感器和触觉传感器的潜力。Ning 等<sup>[35]</sup>使用三步法制造具有高弹性和小直径的纤维基 TENG[图 3(b)]。首先,将银纳米线(Ag NWs)附着在预拉伸的氨纶上。接着引入碳纳米管涂层以提高导电性,PDMS 随后封装复合纤维以形成同轴结构。这种 TENG 纤维直径为 0.63 mm,可达到超过 140% 的拉伸应变。由于操作方便、微结构设计灵活以及电输出性能优异,涂层是制造纤维或纱线基 TENG 最广泛使用的方法。然而,涂层也存在舒适性低、成品率低等问题,因此需要更多策略来满足纤维/纱线基 TENG 大规模生产。

### 3.3 注射技术制备纤维/纱线基 TENG

当使用导电液体材料(液态金属、导电油墨、导电水凝胶、离子液体等)作为纱线的导电材料时,通常使用注射器或注射泵将液体导电材料注射到聚合物管中。Yang 等<sup>[36]</sup>报道了一种高拉伸性液态金属基 TENG[图 4(a)]。这种纤维状 TENG 使用液态金属作为可拉伸电极,PDMS 作为外部材料。首先,用硅橡胶混合物覆盖已均匀喷洒脱模剂的铁丝。在自然固化后,从铁丝上剥离硅橡胶,获得具有中空结构固化的纤维状硅橡胶。在获得纤维形式的中空硅橡胶之后密封两端,然后将液态金属注入中空区域。由于电极由液态金属电极构成,该 TENG 表现出与 PDMS (300%) 一样的高应变。编织的 6 cm × 3 cm 织物  $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $Q_{sc}$  和平均功率密度分别为 354.5 V、15.6  $\mu$ A、123.2 nC 和 8.43 mW/m<sup>2</sup>。Jing 等<sup>[37]</sup>通过将预固化液体凝胶注射到透明硅树脂中空纤维中,然后进行光交联,制造了具有有机凝胶电极的纤维状 TENG [图 4(b)]。由于液体具有流动性,预固化的液体状有机凝胶电极可以很容易地用注射器转移到中空纤维中,这意味着该方法制备的摩擦电纤维可以实现大规模生产。使用液体导电材料充当电极也面临着日常穿戴过程中液体导电材料泄漏的问题,影响了纤维基 TENG 后续使用的耐久性和安全性。

### 3.4 同轴微挤压技术制备纤维/纱线基 TENG

为了解决纤维基 TENG 的连续制造问题并实现其大规模生产,研究人员开发了同轴微挤压工艺,其中



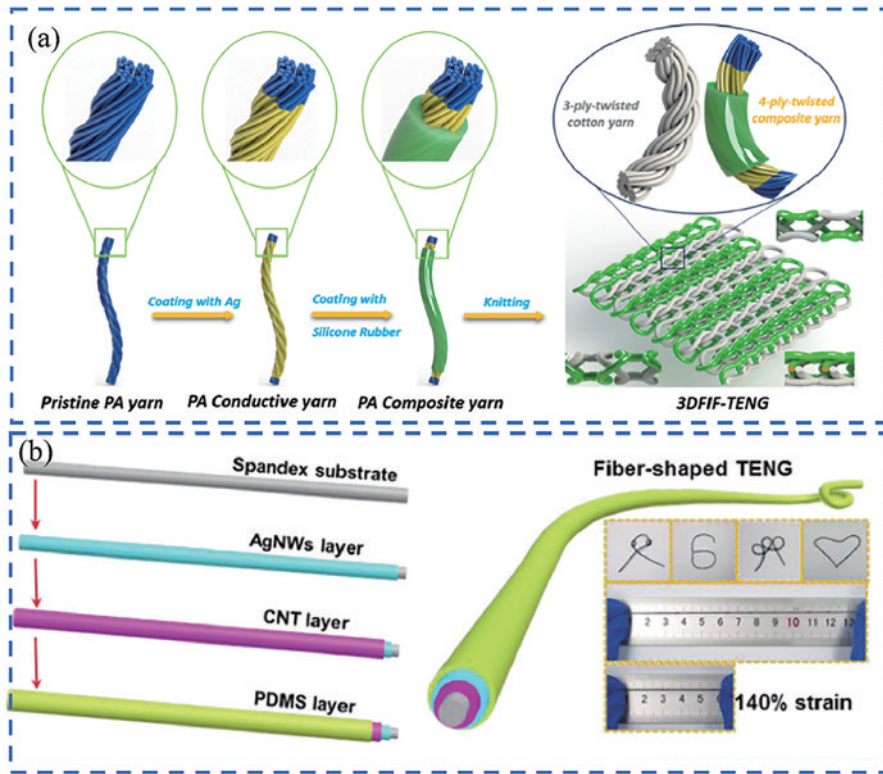


图3 涂层法制备的纤维/纱线基 TENG。(a)利用涂有硅橡胶的镀银锦纶复合纱为纱线编织双罗纹织物<sup>[34]</sup>;(b)在氨纶纤维上涂覆 AgNWs、CNT 和 PDMS 制成的纤维状 TENG<sup>[35]</sup>

Fig 3 Fiber/yarn-based TENG prepared by coating method. (a) Using silvered polyamide composite yarn coated with silicone rubber to weave double rib fabric<sup>[34]</sup>; (b) a fibrous TENG made of spandex fiber is coated with AgNWs, CNT, and PDMS<sup>[35]</sup>

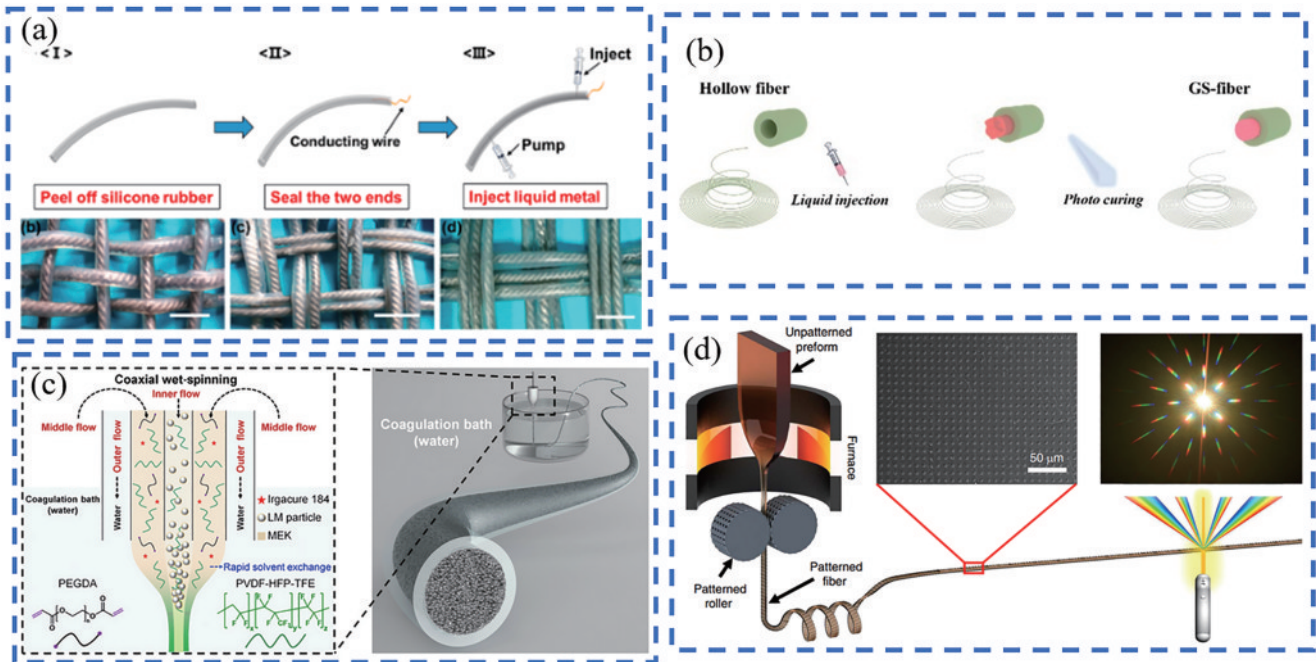


图4 注射、挤压、热拉伸法制备纤维/纱线基 TENG。(a)以液态金属为电极的可拉伸纤维状 TENG<sup>[36]</sup>;(b)将聚合物溶液注入中空纤维中的凝胶电极纤维 TENG<sup>[37]</sup>;(c)采用同轴湿法纺丝工艺制备的皮芯结构纤维状 TENG<sup>[38]</sup>;(d)通过热拉伸制造表面带有图案的纤维状 TENG<sup>[40]</sup>

Fig. 4 Preparation of fiber/yarn-based TENG by injection, extrusion, and hot drawing. (a) Stretchable fibrous TENG with liquid metal as electrode<sup>[36]</sup>; (b) polymer solution was injected into the gel electrode fiber TENG in the hollow fiber<sup>[37]</sup>; (c) fibrous TENG with core-skin structure prepared by coaxial wet spinning process<sup>[38]</sup>; (d) fabrication of a fibrous TENG with a patterned surface by thermal stretching<sup>[40]</sup>

导电材料和绝缘材料同时挤压,分别形成芯电极和摩擦电鞘层。Zheng 等<sup>[38]</sup>报道了一种连续制备超弹性皮芯超细纤维的共轴湿法纺丝工艺。使用内径、中径和外径分别为 400、1950、3000  $\mu\text{m}$  的三轴湿纺针。从三个通道中相应地挤出三种溶液[图 4(c)],连续制造了具有可拉伸、高导电性且导电稳定的液态金属皮芯纤维。所纺纤维可以很容易地编织成手套或织物,充当优秀的焦耳加热器、电热变色显示器和自供电可穿戴传感器以监测人体活动。利用同轴微挤压技术制备的连续性,所获得的纤维基 TENG 理论上有望被制造成无限长度。

### 3.5 利用热拉伸技术制备纤维/纱线基 TENG

热拉伸是在材料的玻璃化转变点以上温度施加高应力,将大块的预制体拉长成细纤维的过程<sup>[39]</sup>。热拉伸制造摩擦电纱线通常分为两种模式:1)拉制预制棒以形成管状结构作为纤维/纱线基 TENG 的护套,然后加入芯电极;2)直接拉制复合预制棒制造芯-鞘结构的复合纤维。炉温分布、预制棒的进料速度和纤维的拉拔速度是拉丝过程中的主要因素,决定了拉伸比和所得纤维的尺寸。热拉伸工艺适用于多种材料,包括聚合物、金属、半导体甚至液体。此外,除了在拉丝过程中按比例缩小外,纤维的横截面结构与预制棒一致,具有复杂结构的纤维可以只需在宏观预制棒上构建相应的结构即可实现。因此,使用这种方法可以可靠地制造数百公里长,具有复杂结构的长丝。在 Wang 等<sup>[40]</sup>的工作中,他们使用 PVDF 作为包层材料,以碳填充聚乙烯作为电极,并利用表面带有图案的热压辊作为模板,在拉制的长丝上平滑地重复热压表面图案,形成连续、表面带有图案的纤维基 TENG[图 4(d)]。与具有平滑表面的长丝相比,表面图案的构造显著增加了纤维基 TENG 的电输出,从 2.1 V、160 nA 增加到 4.8 V、500 nA。

## 4 纤维/纱线基 TENG 集成策略

单个纤维/纱线基 TENG 面临低功率输出和小检测面积的挑战<sup>[41]</sup>。在实际应用中纤维/纱线基 TENG 通常集成在织物或纺织品中。加工而成的 T-TENG 比纤维/纱线基 TENG 的摩擦面积更大可以更好地响应微小的局部变形、提高输出性能。此外,T-TENG 由于其多孔结构,可保持优异的透气性和舒适性<sup>[42]</sup>。

机织是纺织中最常见的一种方法。机织物结构简单、性能稳定且优良,因此可普遍用于制备 T-TENG。除了利用纱线,一些薄膜和条状 TENG 也可用这种方法编织。机织纺织品可以实现各种结构设计,包括基本结构(平纹、斜纹和缎纹)和衍生结构(蜂巢组织、条格组织等)。Somkuwar 等<sup>[43]</sup>通过利用聚四氟乙烯(PTFE)纱线与锦纶 6 纱线编织了 1/1 平纹组织、2/2 方平组织、3/1 斜纹组织和 5/1 斜纹组织,基于其相应的电性能来分析每种编织结构[图 5(a)]。研究表明,

较高的浮线长度增加了正负摩擦电材料之间的接触面积,从而使输出电压增加。通过利用制备的 T-TENG 设备对电容器进行充电验证了其产生和存储能量到电荷存储单元的能力。机织物其本身的结构也决定了其挺括性好、弹性差,手感及柔软性不如针织物。

针织是另一种常见的编织方式。在针织工艺中,可以用一根纱线制作出大面积的织物,因此通过针织制作的 T-TENG 不需要复杂的布线,与机织物相比针织物在柔软度、弹性、延伸性以及透气性和舒适性方面都优于机织物,因此更适合作为智能纺织品。受生物重叠结构的启发,Niu 等<sup>[44]</sup>开发了一种基于仿生鳞片编织的 TENG(BSK-TENG)[图 5(b)]。他们使用了三种纱线:聚四氟乙烯 PTFE 纱线、尼龙纱线和镀银尼龙纱线来制作 BSK-TENG。BSK-TENG 采用三层结构,由高速横机一次性编织而成。上层由 PTFE 纱线制成,以形成鳞片摩擦层。中间层和底层分别用尼龙和镀银尼龙导电纱线作为另一种摩擦电材料和电极编织的纬平针结构。BSK-TENG 没有垂直间隔,保持了针织面料的柔韧性和耐磨性。只需按下 BSK-TENG,这种自供电传感器便可通过蓝牙低功耗地向智能手机中的应用程序发送无线信号。

缝纫包括用手或使用刺绣机将纤维/纱线基 TENG 直接缝合到其他织物上。在缝纫过程中,可以根据应用程序对缝合图案进行编程,因此缝纫与其他集成过程相比,在结构和设计灵活性方面具有巨大的优势。Chen 等<sup>[45]</sup>报道了一种用于刺绣能量收集和传感的超细耐用纱线。通过对 5 根直径为 50  $\mu\text{m}$  的聚氨酯包覆的铜线进行加捻,制成了具有超薄涂层的 5 股铜线(直径为 150  $\mu\text{m}$ )。这种纱线结构使其具有很高强度的同时保持了良好的灵活性,可以直接用商用绣花机绣出不同的图案[图 5(c)]。刺绣织物可以放置在人体的不同位置以收集能量和捕捉动作。利用缝纫技术可以很方便地将纤维/纱线基 TENG 集成到织物中,但是对于制备的纤维/纱线基 TENG 耐磨性和强力要求比较高。

除了纺织常用的机织、针织、缝纫等加工手段以外,三维编织也可用于集成 T-TENG。Dong 等<sup>[46]</sup>使用四步矩形编织工艺来创建三维五向编织结构[图 5(d)],该三维五向编织结构以八根镀银尼龙导电纱编织的线作为轴向线,以 PDMS 包覆的八根编织导电纱作为编织纱线。三维结构的 TENG(3DB-TENG)中菱形编织支撑框架和轴向芯柱之间形成了众多空间,框架-柱结构创造了丰富的接触-分离空间,赋予了 3DB-TENG 良好的透气性、显著的压缩弹性、优异的功率输出和出色的压力敏感性,甚至具有收集振动能量和微小重量检测的能力。开发的 3DB-TENG 作为一种具有高功率输出和高压力灵敏性的电子纺织品,在可穿戴电源、无线运动监控和多功能人机接口等领域具有广阔的应用前景。但是编织结构制得的织物存在着织物厚度过



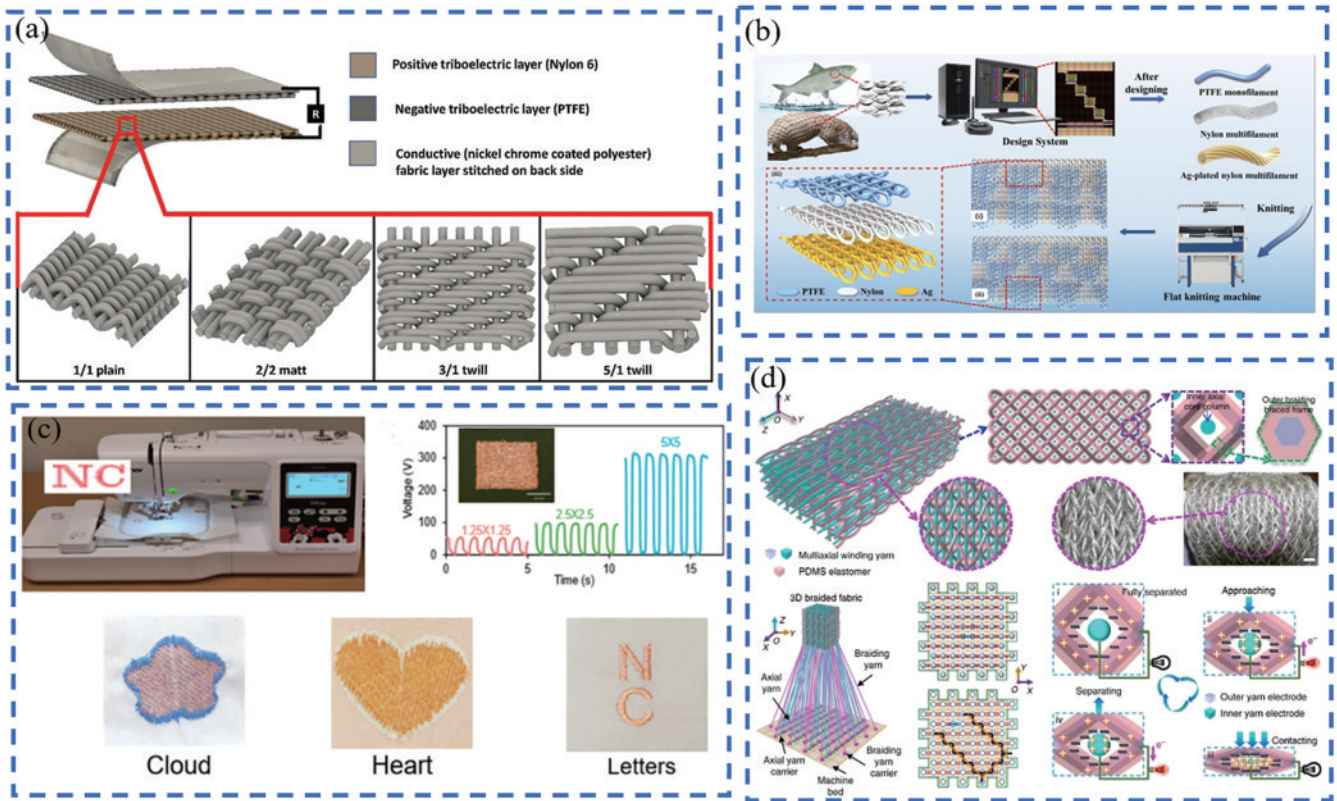


图 5 各种纤维/纱线基 TENG 的集成策略。(a) 利用机织工艺编织不同组织的织物<sup>[43]</sup>；(b) 利用针织工艺编织的鳞片状 TENG<sup>[44]</sup>；(c) 使用刺绣工艺制备不同图案的 TENG 织物<sup>[45]</sup>；(d) 三维五向编织结构的 TENG<sup>[46]</sup>

Fig. 5 Integration strategies of various fiber/yarn-based TENG. (a) Fabrics with different weaves woven using woven processes<sup>[43]</sup>；(b) scaly TENG woven using knitting process<sup>[44]</sup>；(c) TENG fabrics with different patterns prepared using embroidery process<sup>[45]</sup>；(d) TENG of three-dimensional five-way braided structure<sup>[46]</sup>

大、柔软性差的缺点, 适合用于制造地毯、鞋垫等, 这限制了编织结构 TENG 的应用方向。

## 5 结束语

纤维/纱线基 TENG 的制备工艺实现了传统纱线与 TENG 的结合。由于纤维/纱线基 TENG 可以方便地集成到智能织物或纺织品中, 在可穿戴电源、自供电传感、人体健康监测、人工智能等方面显示出广阔的应用前景。然而, 尽管近年来纤维/纱线基 TENG 的制造发展迅速, 但也面临一些挑战。

1) 大规模制造仍然很棘手。一些研究已经实现了摩擦电纱线和纺织 TENG 的连续化生产。然而, 其中大部分仍然是实验室规模, 这极大地限制了生产效率。现有的大部分加工方法存在着纱线直径过大和连续生产长度有限的限制。这些问题影响织造效率和实用性。

2) 材料选择相对固定。导电材料和摩擦起电材料很难在不影响纱线柔软度的情况下整合到纱线中。纱线的柔软度会影响织物的机械性能, 从而直接影响织物的耐用性和耐磨性。并且, 纱线的柔软度还会影响面料的视觉、触觉风格, 以及人体穿着的舒适性。

3) 需要开发制造方法来生产纤维/纱线基

TENG, 以进一步提高功率输出, 尤其是输出电流和功率密度。目前, 优化方法从两个角度考虑: ①在纤维上创建纳米/微结构以增加接触面积; ②调节纤维的介电常数, 这可以通过化学改性(等离子体处理和化学光栅)或掺杂纳米颗粒(氟化材料和驻极体颗粒)来改变摩擦材料来实现。

4) 制备的纱线基 TENG 易受外部环境的干扰, 例如湿度、温度等。环境的变化会改变摩擦电性能, 导致其电信号输出不稳定。因此, 高稳定性纤维/纱线基摩擦纳米发电机仍需要大量研究。

5) 纤维/纱线基 TENG 与其他材料相互接触时较小的接触面积, 限制其电荷数量的产生, 并且通过编织加工成大面积织物后, 由于纤维或纱线之间相互遮掩也会限制与其他摩擦材料相互摩擦接触时电荷的产生。因此, 与膜材料相比往往表现出较低的输出性能。如何增大 T-TENG 接触面积进一步提高 T-TENG 输出性能仍需进一步探索。

## 参 考 文 献

[1] 肖登, 万生鹏, 尹玺, 等. 基于弯曲光纤传感头的脉搏采集系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0506006.  
Xiao D, Wan S P, Yin X, et al. Pulse acquisition system

- based on curved optical fiber sensor head[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0506006.
- [2] 杨翔文, 罗彬彬, 吴德操, 等. 基于夹层多模光纤干涉计的可穿戴呼吸传感器[J]. *光学学报*, 2023, 43(3): 0306002.
- Yang X W, Luo B B, Wu D C, et al. Wearable respiratory sensor based on sandwich multimode fiber interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(3): 0306002.
- [3] 方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏度光纤温度和应变传感器[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106004.
- Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106004.
- [4] Qi Y, McAlpine M C. Nanotechnology-enabled flexible and biocompatible energy harvesting[J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3(9): 1275-1285.
- [5] Shi Q F, Zhang Z X, Chen T, et al. Minimalist and multi-functional human machine interface (HMI) using a flexible wearable triboelectric patch[J]. *Nano Energy*, 2019, 62: 355-366.
- [6] Yao L Q, Zhou Z, Zhang Z, et al. Dyeing-inspired sustainable and low-cost modified cellulose-based TENG for energy harvesting and sensing[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(12): 3909-3919.
- [7] Peng X, Dong K, Ye C Y, et al. A breathable, biodegradable, antibacterial, and self-powered electronic skin based on all-nanofiber triboelectric nanogenerators[J]. *Science Advances*, 2020, 6(26): eaba9624.
- [8] Zhao G R, Zhang Y W, Shi N, et al. Transparent and stretchable triboelectric nanogenerator for self-powered tactile sensing[J]. *Nano Energy*, 2019, 59: 302-310.
- [9] Peng Y, Wang Z S, Shao Y F, et al. A review of recent development of wearable triboelectric nanogenerators aiming at human clothing for energy conversion[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 508.
- [10] Qiu Q, Zhu M M, Li Z L, et al. Highly flexible, breathable, tailorable and washable power generation fabrics for wearable electronics[J]. *Nano Energy*, 2019, 58: 750-758.
- [11] Sala de Medeiros M, Chanci D, Moreno C, et al. Waterproof, breathable, and antibacterial self-powered e-textiles based on omniphobic triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(42): 1904350.
- [12] Chen Y, Ling Y L, Yin R. Fiber/yarn-based triboelectric nanogenerators (TENGs): fabrication strategy, structure, and application[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9716.
- [13] Xiong J Q, Cui P, Chen X L, et al. Skin-touch-actuated textile-based triboelectric nanogenerator with black phosphorus for durable biomechanical energy harvesting[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4280.
- [14] Busolo T, Szewczyk P K, Nair M, et al. Triboelectric yarns with electrospun functional polymer coatings for highly durable and washable smart textile applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(14): 16876-16886.
- [15] Dong S S, Xu F, Sheng Y L, et al. Seamlessly knitted stretchable comfortable textile triboelectric nanogenerators for E-textile power sources[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105327.
- [16] Liu J M, Gu L, Cui N Y, et al. Core-shell fiber-based 2D woven triboelectric nanogenerator for effective motion energy harvesting[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 1-10.
- [17] Cui X J, Wu H G, Wang R. Fibrous triboelectric nanogenerators: fabrication, integration, and application[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(30): 15881-15905.
- [18] Xiong Y, Luo L, Yang J H, et al. Scalable spinning, winding, and knitting graphene textile TENG for energy harvesting and human motion recognition[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108137.
- [19] Wu R H, Liu S, Lin Z F, et al. Industrial fabrication of 3D braided stretchable hierarchical interlocked fancy-yarn triboelectric nanogenerator for self-powered smart fitness system[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(31): 2201288.
- [20] Walden R, Aazem I, Babu A, et al. Textile-triboelectric nanogenerators (T-TENGs) for wearable energy harvesting devices[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138741.
- [21] Zhang D Z, Wang D Y, Xu Z Y, et al. Diversiform sensors and sensing systems driven by triboelectric and piezoelectric nanogenerators[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 427: 213597.
- [22] Ginnaram S, Chen Y T, Lai Y C. Solid-state intrinsically-superstretchable multifunctional nanogenerator fiber for biomechanical and ambient electromagnetic energy harvesting and self-powered sensing[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107035.
- [23] Ma L Y, Wu R H, Liu S, et al. A machine-fabricated 3D honeycomb-structured flame-retardant triboelectric fabric for fire escape and rescue[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(38): 2003897.
- [24] Ma L Y, Zhou M J, Wu R H, et al. Continuous and scalable manufacture of hybridized nano-micro triboelectric yarns for energy harvesting and signal sensing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4): 4716-4726.
- [25] Yu A F, Wang W, Li Z B, et al. Large-scale smart carpet for self-powered fall detection[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(2): 1900978.
- [26] Yu A F, Pu X, Wen R M, et al. Core-shell-yarn-based triboelectric nanogenerator textiles as power cloths[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(12): 12764-12771.
- [27] Zhang D W, Yang W F, Gong W, et al. Abrasion resistant/waterproof stretchable triboelectric yarns based on Fermat spirals[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(26): 2100782.
- [28] Lou M N, Abdalla I, Zhu M M, et al. Highly wearable, breathable, and washable sensing textile for human motion and pulse monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(17): 19965-19973.



- [29] Ye C, Dong S J, Ren J, et al. Ultrastable and high-performance silk energy harvesting textiles[J]. *Nano-Micro Letters*, 2019, 12(1): 1-15.
- [30] Gao Y Y, Li Z H, Xu B G, et al. Scalable core-spun coating yarn-based triboelectric nanogenerators with hierarchical structure for wearable energy harvesting and sensing via continuous manufacturing[J]. *Nano Energy*, 2022, 91: 106672.
- [31] Zhang C, Zhang L, Bao B, et al. Customizing triboelectric nanogenerator on everyday clothes by screen-printing technology for biomechanical energy harvesting and human-interactive applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(4): 2201138.
- [32] Ko W B, Choi D S, Lee C H, et al. Hierarchically nanostructured 1D conductive bundle yarn-based triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(47): 1704434.
- [33] Zhao T M, Li J L, Zeng H, et al. Self-powered wearable sensing-textiles for real-time detecting environmental atmosphere and body motion based on surface-triboelectric coupling effect[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(40): 405504.
- [34] Chen C Y, Chen L J, Wu Z Y, et al. 3D double-faced interlock fabric triboelectric nanogenerator for bio-motion energy harvesting and as self-powered stretching and 3D tactile sensors[J]. *Materials Today*, 2020, 32: 84-93.
- [35] Ning C, Dong K, Cheng R W, et al. Flexible and stretchable fiber-shaped triboelectric nanogenerators for biomechanical monitoring and human-interactive sensing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(4): 2006679.
- [36] Yang Y Q, Sun N, Wen Z, et al. Liquid-metal-based super-stretchable and structure-designable triboelectric nanogenerator for wearable electronics[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 2027-2034.
- [37] Jing T T, Xu B G, Yang Y J. Organogel electrode based continuous fiber with large-scale production for stretchable triboelectric nanogenerator textiles[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105867.
- [38] Zheng L J, Zhu M M, Wu B H, et al. Conductance-stable liquid metal sheath-core microfibers for stretchy smart fabrics and self-powered sensing[J]. *Science Advances*, 2021, 7(22): eabg4041.
- [39] Hasan M M, Bin Sadeque M S, Albasar I, et al. Scalable fabrication of MXene-PVDF nanocomposite triboelectric fibers via thermal drawing[J]. *Small*, 2023, 19(6): 2206107.
- [40] Wang Z, Wu T T, Wang Z X, et al. Designer patterned functional fibers via direct imprinting in thermal drawing [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3842.
- [41] 孙萌萌, 葛益娴, 沈令闻, 等. 基于电弧放电优化的光纤法珀湿度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1006002.
- Sun M M, Ge Y X, Shen L W, et al. Optical fiber fabry-perot humidity sensor based on arc discharge optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1006002.
- [42] Zhang X J, Tang S S, Ma R, et al. High-performance multimodal smart textile for artificial sensation and health monitoring[J]. *Nano Energy*, 2022, 103: 107778.
- [43] Somkuwar V U, Pragma A, Kumar B. Structurally engineered textile-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting application[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(12): 5177-5189.
- [44] Niu L, Peng X, Chen L J, et al. Industrial production of bionic scales knitting fabric-based triboelectric nanogenerator for outdoor rescue and human protection[J]. *Nano Energy*, 2022, 97: 107168.
- [45] Chen Y, Chen E D, Wang Z H, et al. Flexible, durable, and washable triboelectric yarn and embroidery for self-powered sensing and human-machine interaction [J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107929.
- [46] Dong K, Peng X A, An J E, et al. Shape adaptable and highly resilient 3D braided triboelectric nanogenerators as e-textiles for power and sensing[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2868.