

纤维基摩擦纳米发电机的构建及其在可穿戴技术领域研究进展

许子傲^a, 吴雅梦^a, 郭浩^a, 俞建勇^b, 丁彬^{b*}, 李召岭^{a,b*}

(东华大学 a. 上海市现代纺织前沿科学研究基地, 纺织学院; b. 纺织科技创新中心, 上海 201620)

摘要: 可穿戴技术为人们提供了便捷化与个性化的健康监测、医疗辅助、运动娱乐等服务, 显著提高生活质量。目前, 可穿戴设备的能量供给仍然依赖化学电池或外接电源, 造成明显的使用不便。从外界环境中收集能量以满足可穿戴设备的能量需求是一种有前途的解决方案。摩擦纳米发电机(TENG)是一种新兴的微型能源装置, 因其能够有效地收集和利用人体与环境中的微纳能量实现直接为可穿戴设备供电或实现自供能传感, 并以高瞬时电输出、低成本与灵活的特性而受到广泛关注。金属、聚合物薄膜、橡胶等材料被广泛用于TENG的制备中, 但致密的结构使得它们在长时间穿戴时易造成人体不适。以纤维材料制备的TENG具有输出功率高、透气性好、形状适应性、材料选择广泛的优势, 在可穿戴能源器件、自供能传感、人机交互以及空气过滤等领域应用广泛。介绍了纤维基TENG的构筑及可穿戴器件的应用研究进展, 最后对其现有的挑战与发展前景进行总结与展望, 为纤维基TENG的发展提供参考。

关键词: 摩擦纳米发电机; 纤维材料; 能源器件; 自供能传感; 人机交互; 空气过滤

中图分类号: TM919

文献标志码: A

文章编号: 2097-2911-(2023)03-0071-15

Research Progress in the Fabrication and Wearable Applications of Fiber-based Triboelectric Nanogenerators

XUZiao^a, WU Yameng^a, GUO Hao^a, YU Jianyong^b, DING Bin^{b*}, LI Zhaoling^{a,b*}

(a. Shanghai Frontiers Science Center of Advanced Textiles, College of Textiles; b. Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Wearable technology provides people with convenient and personalized health monitoring, medical assistance, sports, and entertainment services, significantly improving the quality of life. Currently, the energy supply of wearable devices still relies on chemical batteries or external power sources, causing obvious inconvenience. Harvesting energy from the external environment to meet the energy needs of wearable devices is a promising solution. The triboelectric nanogenerator (TENG) has gained extensive attention due to its high transient electrical output, low cost, and flexibility, with significant advantages in harvesting low-frequency and irregular human motion energy. Materials such as metal, polymer film, and rubber are widely used in the fabrication of TENGs. However, their dense structure can cause discomfort when worn for extended periods. TENGs prepared with fiber materials exhibit advantages such as high output power, excellent air permeability, shape adaptability, and a wide selection of materials. These features make them widely applicable in the fields of wear-

基金项目: 国家自然科学基金(52373054, 52073051), 上海市自然科学基金(23ZR1400900)。

作者简介: 许子傲, 男, 博士研究生, 研究方向为半导体纤维和智能织物, E-mail: 781779210@qq.com。

通信作者: 李召岭, 男, 研究员, 研究方向为智能纤维和生物质纤维的制备及应用, E-mail: zli@dhu.edu.cn。丁彬, 男, 研究员, 研究方向为功能纳米纤维材料的制备及应用, E-mail: binding@dhu.edu.cn。

able energy devices, self-supplied sensing, human-computer interaction, and air filtration. The research progress on the construction of fiber-based TENG and its applications are introduced. Finally, the existing challenges and prospects of its development are summarized and envisioned.

Keywords: triboelectric nanogenerator; fiber materials; energy devices; self-powered sensing; human-machine interaction; air filtration

随着电子器件小型化与柔性化的趋势,提高人们对智能化生活的追求,可穿戴设备发展迅速,使得可穿戴设备极大的丰富了人们的数字生活,运动手环、智能手表等可穿戴电子设备被广泛应用,但穿着舒适性差、续航时间短仍是这些设备目前难以解决的问题^[1]。目前,大部分可穿戴设备使用化学电池或外接电源作为能量来源。一方面,电池续航能力有限,频繁的充放电及电池的刚性限制了可穿戴设备的穿着便利性和舒适性;另一方面,电池生产和报废所产生的污染问题也给环境带来了更大的负担^[2-3]。收集人体或环境中的能量来满足可穿戴设备的供电或传感需求是一项前途的解决方案。在各种收集人体能量的能源设备中,摩擦纳米发电机(TENG)以其重量轻、功率密度高、能量来源广等特点脱颖而出^[4-5],能够持续的从自然和人类活动中获得可再生能源,如人体运动^[6-7],波浪^[8-9],风^[10-11],声波^[12-13],雨^[14-15]等。

TENG是一种利用摩擦起电和静电耦合效应,将外界能量转化为电能的能源装置,一般由至少两种不同摩擦带电性质的材料构建^[16-17]。TENG构建材料来源广泛,如聚合物薄膜^[18-19],橡胶^[20],水凝胶^[21]等材料均得到广泛报道,而这些材料虽有输出性能高、柔性好等优势,但透气性及热湿舒适性差等问题限制了其在可穿戴领域的发展,长期穿戴容易造成人体不适。由纤维材料的织物、纤维膜等纺织品,具有高孔隙带来的高透气透湿性^[22],并且纤维材料良好的形状适应性,使得以纤维基 TENG 具有优异的可穿戴性能^[23]。此外,纤维材料满足材料选择和结构设计的多样性从而有能力实现高输出,如构建粗糙表面^[24-25],极性基团修饰^[26-27],引入电荷捕获层^[28-29]等。纺织品的加工能够依托现有成熟纺织工业

体系,能够容易实现批量化生产,具有较好的工业化前景。

纤维基 TENG 在可穿戴能源器件、自驱动传感系统、人机交互系统、空气过滤等应用领域展现出了显著的发展潜力及在可穿戴器件领域的应用前景,近年来得到了研究人员的广泛关注。本综述重点概括了纤维基 TENG 的制备与其在可穿戴器件领域的应用现状,同时介绍了纤维基 TENG 在能源器件、自供能传感、人机交互、过滤材料等领域的应用现状。最后,对于该领域目前的研究现状与未来需要解决的问题进行了总结与展望,为纤维基 TENG 的发展及其在可穿戴技术领域的发展提供参考。

1 纤维基 TENG 的构建

1.1 摩擦材料选择与摩擦起电序列

TENG 的构建材料选择非常广泛,而不同材料摩擦带电能力不同,相互接触后产生的感应电荷量也不同。因此,合理的选择构建材料对于 TENG 的输出性能提高非常关键^[30]。摩擦产生的感应电荷量取决于每种材料的极性。为更直观的体现不同材料间摩擦带电的性能,通常将每种摩擦材料的摩擦带电性质具体量化,并以序列形式表现出来。在这个摩擦电序列中,相差越远的两种材料,在接触时产生的电荷转移量越大。LIU 等人^[31]提出了一种通用的标准化策略,来量化摩擦电荷密度(TECD)在真空条件下以接触分离式的 TENG,通过真空条件下抑制空气击穿效应,得到更接近能够反应材料固有属性。经标准化测试所得摩擦起电序列如图 1 所示。

纤维材料的来源广泛,包括从天然原料加工所得的天然纤维到人工合成的各种合成纤维,种类繁多,结构与性质多样。摩擦材料的选择与纤

维特性相结合,是得到高性能、多场景应用的纤维基 TENG 的高效途径。

天然纤维包括植物纤维与动物纤维,植物纤维以棉、麻等天然纤维素纤维为主,因纤维素的良好摩擦带电能力与化学改性潜力^[32-33],以及较为成熟的加工和低廉的成本^[34]成为可穿戴 TENG 的优良选择。动物纤维主要以蛋白质为主,大量酰胺键的存在使其具有良好的摩擦带电能力,并且毛纤维表面特殊鳞片层为其带来了在高湿度下稳定输出的能力^[35-36]。

无机纤维以其极佳的耐候性与稳定性,在极端环境下具有能够保持稳定工作的能力,以陶瓷、玻璃、碳等材料构成。玻璃纤维是常用的摩

擦材料,具有良好的摩擦电极性,并且能够根据玻璃纤维的材料组成调整摩擦电极性^[37]。碳纤维是一种具有极佳机械与导电性能的高性能纤维,既能够作为摩擦材料或电极材料,也能够作为储能材料设计能源-储能一体化器件。

再生纤维的主要成分与天然纤维类似,为蛋白质、纤维素和多糖等,因其可降解及穿着舒适等优势得到了广泛关注。其中,再生丝素纤维通过在纺丝过程中调节丝素蛋白分子链的聚集态结构和取向,能够得到接近天然蚕丝的性能,并且容易实现功能化,具有较好的应用前景。此外,如壳聚糖纤维、海藻酸盐纤维等具有良好生物相容性的再生纤维具有在可植入 TENG 领域

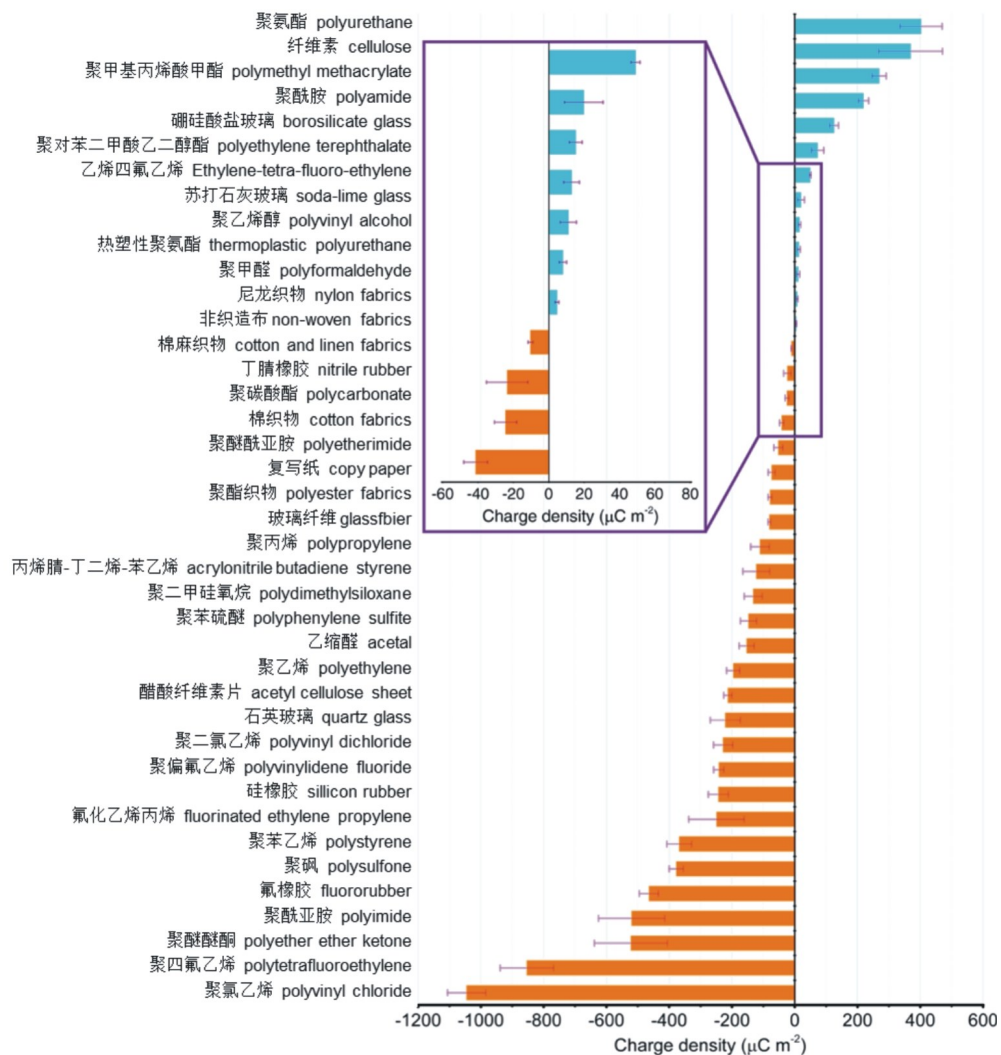


图1 真空条件下测试所得的摩擦起电序列. 已授权转载^[31], 版权所有, 2022, Springer Nature.

Fig.1 Triboelectric series obtained under vacuum conditions. Reprinted with permission^[31], Copyright 2022, Springer Nature.

的应用前景。

合成纤维种类众多,摩擦带电性质相差较大,通常与纤维中官能团的种类与数量相关。LI 等人^[38]经测试得到的在摩擦过程中,各官能团得电子能力强弱顺序为 $\text{CH}_3 < \text{H} < \text{OH} < \text{Cl} < \text{F}$ 。常用于 TENG 领域纤维材料的有含氟的聚四氟乙烯 (PTFE) 纤维、聚偏氟乙烯 (PVDF) 纤维,含氯的聚氯乙烯 (PVC) 纤维、含酰胺基的聚酰胺纤维 (PA)、含腈基的聚丙烯腈纤维 (PAN) 等。此外,一些具有特殊性能的纤维如芳纶、聚酰亚胺纤维等也有较好的摩擦带电性能,能够用于高冲击与耐高温领域^[39-40]。

总而言之,合理的材料选择是有效提高 TENG 的输出性能,拓展应用场景及成本控制最直接的方法。目前,多种纤维材料如 PTFE、PA、PAN 等均已实现大规模工业化生产,又兼具高摩擦电活性,成为纤维基 TENG 的重要摩擦构建材料。

1.2 四种基本工作模式

简而言之,摩擦起电在材料表面提供了一个静态的极化电荷,当机械触发静电感应时,会引起电势的变化,进而驱动机械能转化为电能。当两种不同材料的表面发生物理接触时,会在两个接触面上产生摩擦电荷,一旦两个接触面分离,就会形成电位差,电流,其中产生的动态电流基于麦克斯韦位移电流^[41]。基于摩擦起电的工作

原理,TENG 具有四种不同的工作模式,如图 2 所示,包括垂直接触分离 (CS) 模式、水平滑动 (LS) 模式、单电极 (SE) 模式和独立层 (FT) 模式。

1.2.1 垂直-接触分离型

垂直接触-分离模式是 TENG 最为常见的一种工作模式,具有瞬时输出性能高,设计难度低等优势。如图 2(a) 所示,该模式通常是由两种不同的介电材料垂直相对放置,中间保留一定的空隙。在外力作用下,两种材料相互接触,此时根据它们各自的极性产生相反的电荷。外力消失后,两层分离,自由电子从一个电极流向另一个电极,以平衡电位差,从而产生交流输出。

1.2.2 水平滑动型

横向滑动模式是基于外力作用下,滑动摩擦起电和平面电荷分离过程的耦合。上下两层并非完全分离,而是通过滑动产生不同的有效接触面积,如图 2(b) 所示。滑动过程在两层中产生摩擦电荷,两个电极之间的电位差允许电子流动。由于有效接触面积的周期性变化,这个过程产生交流输出。然后反向运动产生电子的反向运动,直到静电平衡。

1.2.3 单电极模式型

在单电极配置中,只有一个输出节点,如图 2(c) 所示。单电极模式可以在横向滑动和接触分离配置下工作。由于另一接触层是自由移动的,单电极模式具有更高的运动自由度,使其具

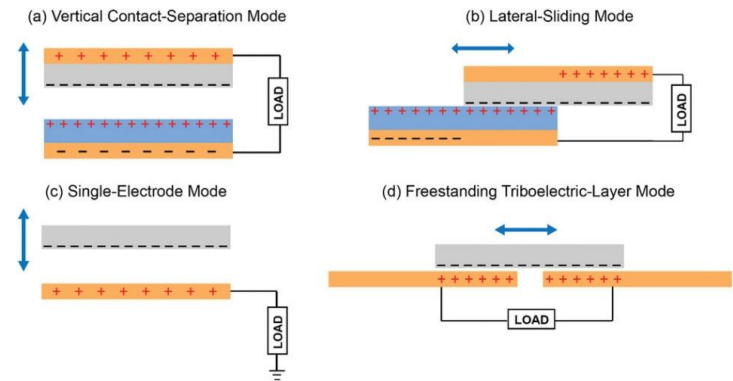


图 2 TENG 的四种工作模式: (a)垂直-接触分离型; (b)水平滑动型; (c)单电极模式型; (d)独立层模式型。

已授权转载^[41], 版权所有, 2018, John Wiley and Sons.

Fig.2 Four working modes of TENG. a) Vertical CS mode. b) LS mode. c) SE mode. d) FT mode.

Reprinted with permission^[41], Copyright 2018, John Wiley and Sons.

有工作自由的优势,但其输出性能低于其他模式。可移动层的周期性接触-分离产生电势差,导致电极与地面之间的电子流动。

1.2.4 独立层模式型

独立层模式与单电极模式类似,但该模式使用一对对称电极,如图2(d)所示。在工作过程中,当自由运动的物体改变位置时,摩擦材料在两个电极间往复运动,由不对称电荷分布引起电输出。独立层模式可以在非接触滑动模式下工作,能够减少摩擦损伤,增加了使用寿命和效率^[42]。

以纤维材料构建的 TENG 能够实现四种基本工作模式,通过人体运动或环境因素实现持续的循环工作,并且能够根据需求选择进行灵活的设计,如从纱线、纤维膜、织物等结构出发,表现出较好的普适性。

2 纤维基摩擦纳米发电机的构建

随着智能可穿戴技术的发展,应用场景的多变性要求可穿戴器件必须具有一定的柔韧性,尤其是收集人体数据的各类传感器,需要跟随人体运动在各种形变的条件下工作。能够实现高柔性、稳定输出的摩擦电活性材料众多,如聚合物薄膜,橡胶等,但致密的结构却难以满足人体的热湿舒适性,长久的与皮肤接触甚至会导致炎症

的出现^[43]。纤维材料具有优秀的透气性能与形变性能,在与人体长期接触的应用场景下具有显著优势。根据结构维度的不同,纤维材料可以分为一维、二维和三维纤维材料,如图3所示,一定程度上也反应了纺织品的基本装配顺序。

2.1 一维纤维材料

一维材料主要指在宏观尺度上长径比非常大,在长度方向可以无限延伸的材料。一维纤维材料主要包括纤维和纱线。一维纤维材料具有非常高的纵横比与极佳的柔性,在适应人体组织与动作方面具有更高的灵活性^[45]。

2.1.1 纤维

纤维是纺织品的基本结构单元,直径从纳米到毫米不等,其形态多样,材料选择广泛。纤维材料也是构建 TENG 的最常用材料之一,但纤维尺寸小,稳定性差,往往通过各种方式加工为纱线或织物以满足应用场景的具体需求。此外,纤维的性能很大程度上决定纺织品整体性能,针对纺织品的改性也常从纤维尺度进行设计。构建 TENG 的纤维材料来源广泛,而纤维成型与加工方法的多样性、通用性,大大降低了制备 TENG 的难度。单纤维形式的 TENG 是以自身内部多级结构间互相接触而实现,往往在设计时使内部具有间隙或空心填充活动组件的复合纤维,如 HAN 等人^[46]设计的集成摩擦纳米发电机、超级电容器和压力传感器的同轴复合纱线。纱线内核是纤维型超级电容器,外护套为单电极模式的纤维 TENG,用于能量收集,外摩擦层和内层构成自供电压力传感器,能够收集人体运动能量实现自供能传感与供电。

2.1.2 纱线

纱线是由短纤维或长丝束通过纺纱加工而成的二维纤维材料,通常具有一定的捻度,结构相对单纤维稳定。纱线的材料组成与结构会很大程度上影响摩擦效率,合理的纱线结构设计能够有效提高摩擦电性能,因此,近年来以包芯纱、膨体纱等传统花式纱线为灵感的 TENG 也得到了广泛报道。例如,包芯纱通常是以棉、粘纤

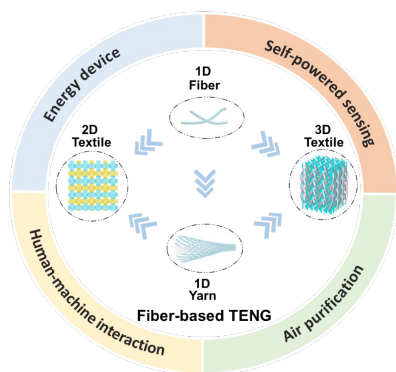


图3 纤维基 TENG 的构建. 已授权转载^[44], 版权所有, 2020, Springer Nature.

Fig.3 Construction of fiber-based TENG. Reproduced with permission^[44], Copyright 2020, Springer Nature.

等短纤维纱线包覆长丝制备,而以纳米纤维为外层的纳米纤维包芯纱能够利用外层纳米纤维比表面积大的优势,构建具有高输出性能的TENG^[47]。YE等人^[48]报道了通过共轭静电纺丝的方法,制备了一种以静电纺丝纳米纤维包覆导电芯纱的纳米纤维包芯纱,能够以单电极模式工作,与人体皮肤进行交互,并且能够在交替循环中对电容进行连续充电。由于纳米纤维赋予的高粗糙度与高比表面积,以纳米纤维包芯纱线制备的智能传感织物表现出一定的感知和区分与不同材料接触时产生的瞬态机械刺激能力。

2.2 二维纤维材料

相对于一维纤维材料,以纤维或纱线按一定规律排布构建的二维纤维材料更容易实现构建、增大接触面积等有利于提高摩擦效率的策略。二维纤维材料可以根据纤维或纱线的分布方式进行分类,包括机织物、针织物及非织造布等。

2.2.1 织物

织物具有极佳的透气性、柔韧性与形状适应性,在长时间穿戴情况下也能保持人体舒适。织物基TENG具有材料来源广泛、结构设计灵活等优势,并且能够与服用织物相结合。材料选择方面可以通过选择不同摩擦带电性质的纱线织造织物,提高输出性能。其次,可以根据人体不同部位产生运动能量的不同,灵活选择如收集足部、腋下等高输出部位的能量^[5]。除设计时选择摩擦带电性能差别较大的纱线,利用不同织物结构与织物组织能够有效控制TENG的输出性能^[25,49],对织物的组织结构进行设计也是研究的热点,如针织空气层结构^[50]、附加摩擦层^[51]等。

2.2.2 纤维膜

通过熔喷、针刺及静电纺丝等方法可以将纤维直接加工为纤维膜,其具有比表面积大,尺寸可调等优势。在纤维膜材料中,纤维间存在大量孔隙,粗糙度较高,能够在接触摩擦时提供更多的接触面积,无需再进行构建粗糙表面等增强摩擦效率的处理^[52]。以静电纺丝制备的纳米纤维膜,不仅因其纳米尺度的纤维分布而具有高粗糙

度、高孔隙率等特性,并且能够实现定向排列、多纤维形态(如空心、核壳、多孔)等特殊结构,提高纳米纤维膜的有效摩擦接触面积和透气性,具有较高的表面电荷密度^[2]。

2.3 三维纤维材料

三维纤维材料是指在除织物或纤维膜的二维平面外,还有在厚度方向的纱线或结构,可以根据结构分为三维织物及三维纤维膜。三维纤维材料在厚度方向增加的多层纤维分布能够创造更多的接触分离空间,还可以实现纤维之间从点到线再到表面的逐级接触响应,提高了压力传感的灵敏度和响应速度^[53]。

2.3.1 三维织物

三维织物中厚度方向的增强能够改善纺织品的抗冲击性能,克服了传统二维平面织物及复合材料存在抗冲击性能差、层间强度低的缺点,广泛用于航空航天,汽车与建筑等领域^[54]。根据制备方式的不同,三维织物可以分为三维机织物,三维针织物,三维编织物和三维非织造布^[53]。三维织物厚度方向的增强使得其容易实现压缩回弹,适合用于构建接触-分离式的TENG。相比普通的二维纤维材料,三维织物虽然柔性与形状适应性相对较弱,但具有更好的抗冲击性能,压缩回弹性能,适用于发电鞋垫、发电地毯等领域。

2.3.2 三维纤维膜

三维纤维膜是由纤维在三维网络上分布或交织而成的三维结构,纤维之间存在复杂的空隙和通道。通过纺丝及后处理,能够得到稳定的由纤维构成的三维网络结构,常见的形式有三维纳米纤维膜,三维纤维气凝胶等。相比二维纤维材料,三维结构赋予其内部更高的比表面积,良好的互连网络,在内部有着更大的接触面积和电荷存储能力^[55],在TENG领域有着较好的应用潜力。

3 纤维基TENG的在可穿戴领域的应用

纤维基TENG能够将持续但难以收集的人体的运动、呼吸、脉搏波等生理行为中的机械能转化为电能,并能在长久的穿戴中保持人体舒适

性,其既可以集成到衣服和配饰中,也可以直接置于人体皮肤表面甚至体内植入。近年来,纤维基 TENG 在可穿戴领域得到了广泛报道,具有显著的发展潜力与应用前景。

3.1 能源器件

相比其他可穿戴能源器件,TENG 的一项明显优势是可以高效的将人体运动能量与机械振动等低频、不规则的机械能转化为电能,并能够为小型电子器件供电。纤维基材料具有轻质、透

气与可变形性,将纤维基 TENG 与日常服饰结合,在满足多场景需求的同时,在穿着舒适度方面有着显著的优势。CAO 等人^[56]开发了一种全纺织基 TENG,实现了环境声波能量、风能和人体运动能量的收集。通过设计 TENG 与电路的连接,能够实现对电容器的充电以及小型电子产品的直接供电。CHEN 等人^[57]设计了一种直流织物基 TENG (F-TENG),能够利用静电击穿现象收集能量(图 4(a)-(d)),同时避免了因整流器等

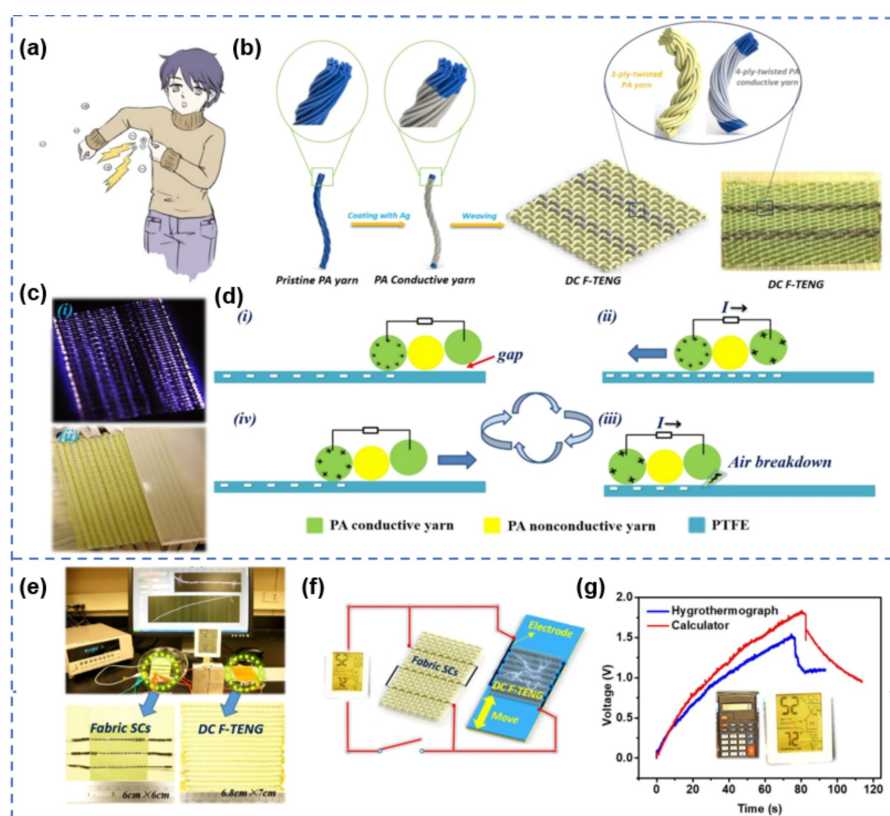


图4 直流 F-TENG 的制造过程、工作机理与应用演示。(a)日常生活中衣服静电击穿的现象;(b)直流 F-TENG 的制备过程;(c)接触滑动运动时直流 F-TENG 和聚四氟乙烯薄膜之间空气击穿的照片;(d)直流 F-TENG 的工作原理图;(e)用直流 F-TENG (6.8 cm × 7 cm)充电织物超级电容器(SC)(6 cm × 6 cm)为湿度计供电;(f)由直流 F-TENG 和织物 SCs 集成的自充电纺织品电路图;(g)直流 F-TENG 对织物(3 个串联)的充电曲线。插图是由织物 SC 供电的一个计算器(左)和一个湿度计(右)。已授权转载^[57], 版权所有, 2020, American Chemical Society.

Fig.4 Schematic illustration, fabrication process, and working mechanism of the direct current (DC) F-TENG. (a) Phenomenon of electrostatic breakdown of clothes in our daily life. (b) Fabrication process and schematic illustration of the DC F-TENG. (c) Photographs of the air break between the DC F-TENG and the PTFE film during contact-sliding motion. (d) Schematic diagrams of the working principles of the DC F-TENG. (e) Demonstration of charging the fabric SC (6 cm × 6 cm) by DC F-TENG (6.8 cm × 7 cm) to power a hygrometograph. (f) Circuit diagram of the self-charging textile integrated by the DC F-TENG and fabric SCs. (g) Charging curves of fabric SCs (three in series) by DC F-TENG.

Reproduced with permission^[57], Copyright 2020, American Chemical Society.

电子元件对穿戴性能的影响。如图4((c)-(g))所示,一个小尺寸的直流织物 TENG(1.5 cm × 3.5 cm)可以点亮416个串行连接的发光二极管(LED),并可以持续提供直流输出,为计算器或湿度计供电。

3.2 自供能传感

传感器小型化的发展趋势使得其平均功耗随之降低,能够以非常低的功率水平运行。通过结合收集能量的组件,构建成一个无需外部电源的可持续工作自供电传感系统,根据触发或外界变化自行产生电信号如自供电压力传感器,自供电电化学传感器等。以人体运动为例,通过收集人体特定部位的活动,如心脏的持续跳动,走路双

脚往复等运动能量,将产生的电信号转化为可读的信息,能够在无需外部供电的情况下实现长期的无感健康监测。WEI 等人^[58]报道了一种基于全纺织结构的自供电多传感网络组成的步态识别系统(图5(a)),该自供电传感器具有1.5 V·kPa⁻¹的响应灵敏度,并且具有优异的透气性和良好的透湿性(图5(b)-(c)),并且能够对包括帕金森步态在内的五种畸形步态进行分析(图5(d))。HE 等人^[59]通过浸涂聚乙烯亚胺(PEI)溶液喷涂到 PEDOT:PSS 功能化的纺织品表面,构成自供能气体传感器。PEI 涂层作为摩擦电层,随着 CO₂ 的吸收形成氨基甲酸酯层,形成 CO₂-PEI 络合物,改变 PEI 层的电负性,从而通过不同

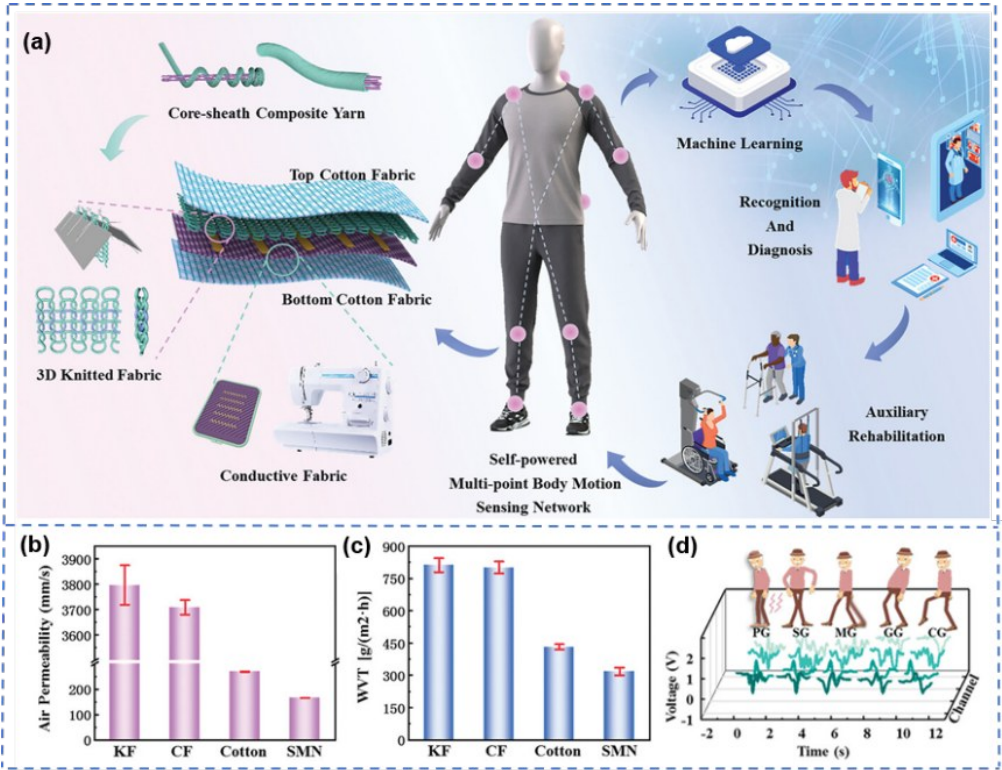


图5 高度集成的织物基步态识别系统。(a)基于纺织品的自供能多点身体运动传感网络结构设计及高度集成步态识别系统原理图;(b)TENG 织物的高透气性与(c)高透湿性;(d)帕金森步态(PG)、剪刀步态(SG)、拖地步态(MG)、臀大肌步态(GG)、跨阈步态(CG)五种步态变形的图谱及典型多通道传感信号。已授权转载^[58], 版权所有, 2023, John Wiley and Sons.

Fig.5 Schematics illustration of highly integrated gait recognition system. a) Structural design of textile-based self-powered multi-point body motion sensing network (SMN) and schematics diagram of highly integrated gait recognition system. b) Air permeability and c) moisture permeability of different fabrics and SMN, respectively. (d) Maps and typical multi-channel sensing signals of five deformed gaits, including Parkinson's gait (PG), scissors gait (SG), mopping gait (MG), gluteus maximus gait (GG), and cross-threshold gait (CG). Reproduced with permission^[58], Copyright 2023, John Wiley and Sons.

浓度下 TENG 的转移电荷变化检测 CO_2 浓度。

3.3 人机交互

通过收集与处理 TENG 在接触与非接触的情况下产生的电信号,并且通过结构设计使得与不同组件的交互能够产生不同的摩擦电信号,如形状各不相同的数字或字母。然后通过对电信号的分析实时的实现人机交互功能,如密码通信,自供电警报器等。例如,YI 等人^[60]设计了一

种三明治结构的全纤维基 TENG(图 6(a)-(g)),并通过集成大面积不同字母形状的 TENG 制作了一种自供电可穿戴键盘,该键盘不仅可以跟踪和记录电生理信号,还可以利用 Haar 小波识别个体的打字特征(图 6(h)-(k)),实现无电源的密码输入。CHEN 等人^[61]设计了一种基于摩擦电子刺绣的自供电、全织物数字键盘,能够收集能量并实现人机交互。该织物基数字键盘能根据每个

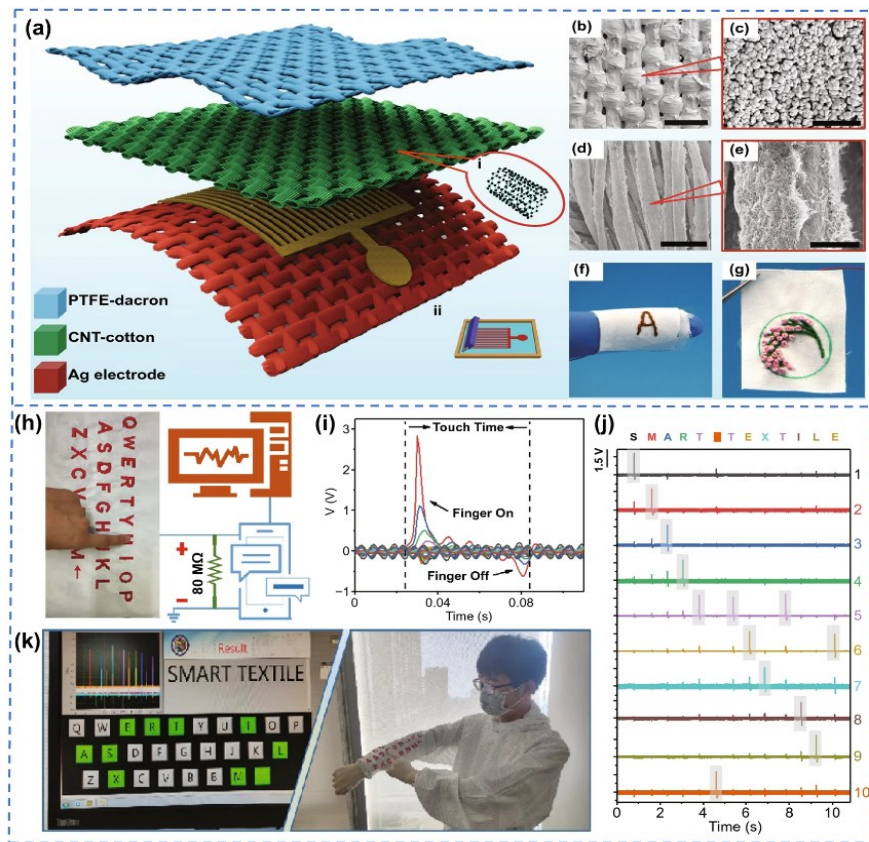


图6 实现传感与人机交互的全纤维基 TENG。(a)全纤维基 TENG 的结构设计;(b-g)在不同的放大倍率下,织物上涂覆的 PTFE 和碳纳米管的形貌的 SEM 图像。比例尺为:(b)300 μm ,(c)1 μm ,(d)20 μm 和(e)5 μm ;(f)手指弯曲与(g)刺绣形式的照片展示;(h)可穿戴式自供电键盘与终端设备的工作原理图;(i)手指敲击单个键盘时的电压信号图;(j)连续输入“SMART TEXTILE”字符串的信号输出波形;(k)实时按键跟踪和记录的人机交互键盘系统。已授权转载^[60],版权所有,2021, Springer Nature。

Fig.6 All-fiber constructed TENG for sensing and human-computer interaction. (a) Schematic diagram of the fiber-based TENG. (b-g) SEM images of the morphology of PTFE and CNT coated on the fabric at different magnification. The scale bars are 300 μm for (b), 1 μm for (c), 20 μm for (d), and 5 μm for (e). Photographs showing that the F-TENG is (f) under finger bending, or (g) the form of embroidery. (h) Schematic diagram of a SPWK working with a terminal device. (i) A diagram of a voltage signal when a finger strikes a single keypad. (j) Signal output waveform by continuously typing the string of "SMART TEXTILE" that is recorded in real time without uncomfortable delay. (k) Photograph showing the SPWK system for the real-time keystroke tracing and recording. Reproduced with permission^[60], Copyright 2021, Springer Nature.

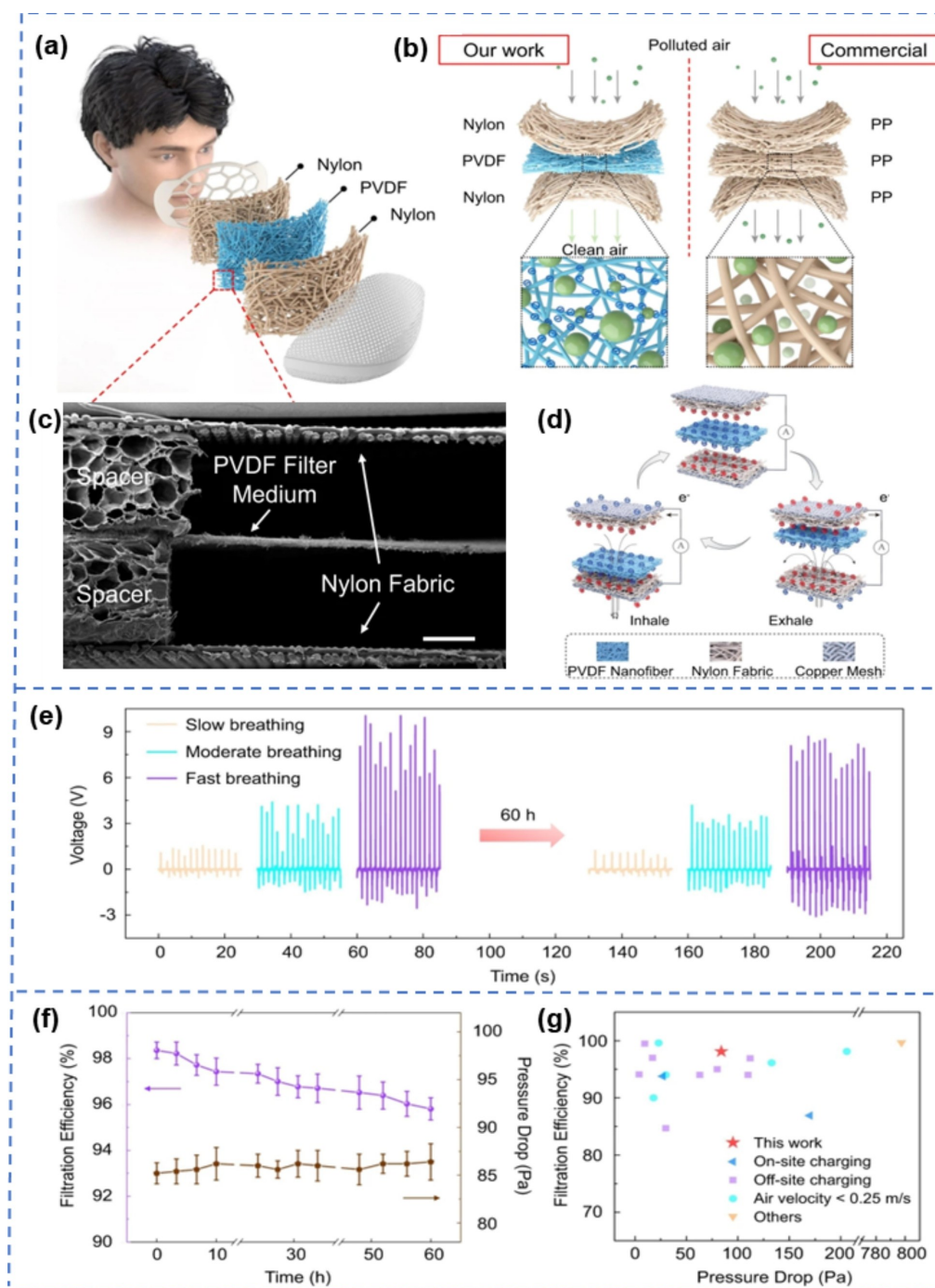


图7 (a)自充电过滤膜(SAF)示意图;(b)与外科口罩中的PP/PP(或PP/PE)相比,自充电过滤口罩使用的PVDF/尼龙对(左)增强颗粒捕获能力。放大的插图显示摩擦起电设计对细颗粒的高效静电吸附;(c)自充电口罩的截面SEM图像。比例尺:500 μm ; (d)自供电过滤膜的工作原理图;(e)60小时以上摩擦起电稳定性测试;(f)过滤效率和压降的耐久性评价;(g)与此前报道的过滤器件的性能比较。已授权转载^[63], 版权所有, 2022, Springer Nature.

Fig.7 (a) Schematic diagram of the proposed self-charging air-filtering (SAF) mask. (b) Enhanced particle capture capacity with the PVDF/nylon pair (left) employed in the SAF compared with the PP/PP (or PP/PE) pair (right) in a surgical mask.

The zoomed-in illustrations indicate the efficient electrostatic adsorption for fine particles with the SAF design. (c) Crosssectional SEM image of the SAF. Scale bar: 500 μm . (d) Triboelectric charge-generation mechanism of the SAF. (e) Charge stability test over 60 hours. (f) Durability evaluation of the filtration efficiency and pressure drop. Reproduced with permission^[63], Copyright 2022, Springer Nature.

数字捕获信号的电压峰值和形状的差异的区别,识别并实现人机交互。

3.4 空气过滤

不同材料间通过摩擦起电吸引灰尘,纸屑等微小物质的现象在生活中非常常见,利用这一现象,基于 TENG 的高效过滤系统得到了广泛研究。基于摩擦电气化,利用不同纤维材料间摩擦电现象实现增强静电过滤技术,通常与纤维过滤原理同时作用,确保了高效和高过滤效率,并提供了基于 TENG 自供电能力的多功能优势^[62]。PENG 等人^[63]利用静电纺 PVDF 纳米纤维薄膜与尼龙织物之间的摩擦电效应,设计了一种自充电空气过滤器口罩。该口罩通过将 PVDF 过滤介质与两个摩擦电层(即尼龙织物)复合(图 7(a)),通过呼吸作用使正负摩擦层不断接触分离产生静电电荷(图 7(b)-(d)),其有效寿命长达 60 小时(包括 30 小时的佩带,图 7(e)-(f),对 0.3 μm 颗粒的最低过滤效率为 95.8%,与使用外部电源输送电荷或在低空气速度下进行测试的口罩相比,依然具有明显的过滤效率和透气性优势(图 7(g))。此外, TENG 可以产生与呼吸气流相对应的响应电信号,能够识别不同强度、长度和频率的人类呼吸,在高效过滤的基础上,结合自供电传感实现呼吸监测及人机交互的智能化过滤系统也是未来的研究重点。例如, HE 等人^[64]提出了一种以 PAN 和 PVDF 纳米纤维膜为过滤材料的具有呼吸监测功能 TENG 面罩。该面罩在 0.3-5 μm 颗粒过滤效率达到 99% 的同时,能够监测多种呼吸指标,如吸入时间、呼出时间及其比值(IER),实现不同运动强度下呼吸信号的持续监测。

4 结论与展望

纤维材料具有轻质、透气透湿与高柔性等特点,在人体皮肤和外界环境之间能够高效传热传湿,相比于其他材料更适合长时间穿戴,是制备 TENG 的一种理想材料,近年来得到了研究者的广泛关注。纤维材料价格相对低廉,材料来源

广泛,并且现有纺织工业体系相对成熟。因此,在设计与制备 TENG 的过程中需要尽量满足现有纺织加工需求,融入纺织与服装加工体系中,能够显著降低成本并易于实现大规模工业化生产。近年来,随着研究人员的不断努力,该领域的发展十分迅速,但仍有一些不足,未来需要得到更多的关注:

(1)受其工作原理的约束, TENG 在持续工作中不可避免的会受到变形与磨损。纤维基 TENG 如何在形变过程中保持稳定输出是一个重大挑战,尤其是多次水洗后的输出性能。因此,选择合适的结构设计对保证输出的稳定性是非常关键的。

(2)纤维基 TENG 与物联网、人工智能等系统的有效结合也是未来研究的重点,尤其是自供电系统需要通过电路设计及信号传输模块的组合,将实时信号传输并通过算法转化为可读数据,是满足可视化、实时化自供电系统的重要条件。

(3)目前纤维基 TENG 的商用产品较少且缺少标准化评估体系。一方面,纤维基 TENG 的能量输出还需要较大的提升以满足对于可穿戴能源系统的需求。另一方面,纤维基 TENG 的输出性能也有较大的悬殊,为了规范与指导相关企业与研究机构在该领域的开发,需要在未来建立相关的标准化评估体系。

参考文献:

- [1]LV X, LIU Y, YU J, et al. Smart fibers for self-powered electronic skins[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2023, 5(2): 401-428.
- [2]BABU A, AAZEM I, WALDEN R, et al. Electrospun nanofiber based TENGs for wearable electronics and self-powered sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139060.
- [3]CHANG A, UY C, XIAO X, et al. Self-powered environmental monitoring via a triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2022, 98: 107282.

- [4]BULATHSINGHALA R L, DING W, DHARMASENA R D I G. Triboelectric nanogenerators for wearable sensing applications: a system level analysis[J]. *Nano Energy*, 2023, 116: 108792.
- [5]ZOU Y, RAVEENDRAN V, CHEN J. Wearable triboelectric nanogenerators for biomechanical energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2020, 77: 105303.
- [6]GOSWAMI S, SANTOS A DOS, NANDY S, et al. Human- motion interactive energy harvester based on polyaniline functionalized textile fibers following metal/polymer mechano- responsive charge transfer mechanism[J]. *Nano Energy*, 2019, 60: 794-801.
- [7]LOU M, ABDALLA I, ZHU 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.
- [8]RODRIGUES C, RAMOS M, ESTEVES R, et al. Integrated study of triboelectric nanogenerator for ocean wave energy harvesting: performance assessment in realistic sea conditions[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105890.
- [9]WANG Z L, JIANG T, XU L. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks[J]. *Nano Energy*, 2017, 39: 9-23.
- [10]ZHAO Z, WEI B, WANG Y, et al. An array of flag-type triboelectric nanogenerators for harvesting wind energy[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12: 721.
- [11]REN X, FAN H, WANG C, et al. Wind energy harvester based on coaxial rotatory freestanding triboelectric nanogenerators for self-powered water splitting[J]. *Nano Energy*, 2018, 50: 562-570.
- [12]LIU J, LIU M, SUN C, et al. Triboelectric hydrophone for underwater detection of low-frequency sounds[J]. *Nano Energy*, 2022, 99: 107428.
- [13]SHAO H, WANG H, CAO Y, et al. Efficient conversion of sound noise into electric energy using electrospun polyacrylonitrile membranes[J]. *Nano Energy*, 2020, 75: 104956.
- [14]ZENG Y, LUO Y, LU Y, et al. Self-powered rain droplet sensor based on a liquid-solid triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2022, 98: 107316.
- [15]XU C, FU X, LI C, et al. Raindrop energy-powered autonomous wireless hyetometer based on liquid- solid contact electrification[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8: 30.
- [16]KIM W G, KIM D W, TCHO I W, et al. Triboelectric nanogenerator: structure, mechanism, and applications[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 258-287.
- [17]CHOI D, LEE Y, LIN Z H, et al. Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(12): 11087-11219.
- [18]LU Z, JIA C, YANG X, et al. A flexible TENG based on micro-structure film for speed skating techniques monitoring and biomechanical energy harvesting[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12: 1576.
- [19]LI W, LU L, KOTTAPALLI A G P, et al. Bioinspired sweat- resistant wearable triboelectric nanogenerator for movement monitoring during exercise[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107018.
- [20]HOU X, ZHONG J, YANG C, et al. A high-performance, single-electrode and stretchable piezo-triboelectric hybrid patch for omnidirectional biomechanical energy harvesting and motion monitoring[J]. *Journal of Materiomics*, 2022: 8(5): 958-966.
- [21]QI J, WANG A C, YANG W, et al. Hydrogel-based hierarchically wrinkled stretchable nanofibrous membrane for high performance wearable triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2020, 67: 104206.
- [22]CAI Y W, ZHANG X N, WANG G G, et al. A flexible ultra-sensitive triboelectric tactile sensor of wrinkled PDMS/MXene composite films for

- E-skin[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105663.
- [23]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.
- [24]CHENG R, DONG K, CHEN P, et al. High output direct-current power fabrics based on the air breakdown effect[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(4): 2460-2471.
- [25]SUN J, REN B, HAN S, et al. Amplified performance of charge accumulation and trapping induced by enhancing the dielectric constant via the cyano group of 3D-structured textile for a triboelectric multi - modal sensor[J]. *Small Methods*, 2023, 7: 2300344.
- [26]CHEONG J Y, KOAY J S C, CHEN R, et al. Maximizing the output power density enhancement of solid polymer electrolyte based-triboelectric nanogenerators via contact electrification-induced ionic polarization[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106616.
- [27]ZHANG Z, GONG W, BAI Z, et al. Oxygen-rich polymers as highly effective positive tribomaterials for mechanical energy harvesting[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 12787-12797.
- [28]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.
- [29]KIM Y W, LEE H B, YOON J, et al. 3D customized triboelectric nanogenerator with high performance achieved via charge- trapping effect and strain- mismatching friction[J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107051.
- [30]ZHANG R, OLIN H. Material choices for triboelectric nanogenerators: a critical review[J]. *Eco-Mat*, 2020:e12062.
- [31]LIU D, ZHOU L, CUI S, et al. Standardized measurement of dielectric materials' intrinsic triboelectric charge density through the suppression of air breakdown[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 6019.
- [32]ZHANG M, DU H, LIU K, et al. Fabrication and applications of cellulose- based nanogenerators [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(4): 865-884.
- [33]VATANKHAH E, TADAYON M, RAMAKRISHNA S. Boosted output performance of nanocellulose- based triboelectric nanogenerators via device engineering and surface functionalization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 266: 118120.
- [34]CHEN C, CHEN L, WU Z, 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]CHEN P, AN J, SHU S, et al. Super-durable, low-wear, and high-performance fur-brush triboelectric nanogenerator for wind and water energy harvesting for smart agriculture[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11: 2003066.
- [36]HE L, ZHANG C, ZHANG B, et al. A high-output silk- based triboelectric nanogenerator with durability and humidity resistance[J]. *Nano Energy*, 2023, 108: 108244.
- [37]ZHENG Z, YU D, GUO Y. Dielectric modulated glass fiber fabric-based single electrode triboelectric nanogenerator for efficient biomechanical energy harvesting[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31: 2102431.
- [38]LI S, NIE J, SHI Y, et al. Contributions of different functional groups to contact electrification of polymers[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32: 2001307.
- [39]WANG W, ZHOU J, WANG S, et al. Enhanced kevlar-based triboelectric nanogenerator with anti-impact and sensing performance towards wire-

- less alarm system[J]. Nano Energy, 2022, 91: 106657.
- [40]XING F, OU Z, GAO X, et al. Harvesting electrical energy from high temperature environment by aerogel nano-covered triboelectric yarns[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32: 2205275.
- [41]WU C, WANG A C, DING W, et al. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9 (1): 1802906.
- [42]WANG S, XIE Y, NIU S, et al. Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes[J]. Advanced Materials, 2014, 26(18): 2818-2824.
- [43]DU W, NIE J, REN Z, et al. Inflammation-free and gas-permeable on-skin triboelectric nanogenerator using soluble nanofibers[J]. Nano Energy, 2018, 51: 260-269.
- [44]DONG K, PENG X, AN J, et al. Shape adaptable and highly resilient 3D braided triboelectric nanogenerators as e-textiles for power and sensing[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2868.
- [45]SUN F, JIANG H, WANG H, et al. Soft fiber electronics based on semiconducting polymer[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(8): 4693-4763.
- [46]HAN J, XU C, ZHANG J, et al. Multifunctional coaxial energy fiber toward energy harvesting, storage, and utilization[J]. ACS Nano, 2021, 15 (1): 1597-1607.
- [47]ZHOU M, XU F, MA L, et al. Continuously fabricated nano/micro aligned fiber based waterproof and breathable fabric triboelectric nanogenerators for self-powered sensing systems[J]. Nano Energy, 2022, 104: 107885.
- [48]YE C, YANG S, REN J, et al. Electroassisted core-spun triboelectric nanogenerator fabrics for IntelliSense and artificial intelligence perception [J]. ACS Nano, 2022, 16(3): 4415-4425.
- [49]ZHAO Z, HUANG Q, YAN C, et al. Machine-washable and breathable pressure sensors based on triboelectric nanogenerators enabled by textile technologies[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104528.
- [50]邱宇豪. 空气层添纱摩擦电针织物全成形构筑及电学性能研究[D]. 江南大学, 2023.
- QIU Yuhao. Research on fully-formed construction and electrical properties of air-layer and plating stitch triboelectric knitted fabric[D]. Jiangnan University, 2023.
- [51]NIU L, PENG X, CHEN L, et al. Industrial production of bionic scales knitting fabric-based triboelectric nanogenerator for outdoor rescue and human protection[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107168.
- [52]VARGHESE H, HAKKEEM H M A, CHAUHAN K, et al. A high-performance flexible triboelectric nanogenerator based on cellulose acetate nanofibers and micropatterned PDMS films as mechanical energy harvester and self-powered vibrational sensor[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107339.
- [53]DONG K, PENG X, CHENG R, et al. Advances in high-performance autonomous energy and self-powered sensing textiles with novel 3D fabric structures[J]. Advanced Materials, 2022, 34: 2109355.
- [54]胡慧娜,裴鹏英,胡雨,等. 三维机织物的分类、性能及织造[J]. 纺织导报, 2017, 889(12): 26-30.
- HU Huina, PEI Pengying, HU Yu, et al. Three-dimensional woven fabric: Classification, properties and production[J]. China Textile Leader, 2017, 889(12): 26-30.
- [55]ROY S, MAJI P K, GOH K L. Sustainable design of flexible 3D aerogel from waste PET bottle for wastewater treatment to energy harvesting device[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 413: 127409.
- [56]CAO Y, SHAO H, WANG H, et al. A full-textile

- triboelectric nanogenerator with multisource energy harvesting capability[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 267: 115910.
- [57]CHEN C, GUO H, CHEN L, et al. Direct current fabric triboelectric nanogenerator for biomotion energy harvesting[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4): 4585-4594.
- [58]WEI C, CHENG R, NING C, et al. A self-powered body motion sensing network integrated with multiple triboelectric fabrics for biometric gait recognition and auxiliary rehabilitation training[J].*Advanced Functional Materials*, 2023: 33, 2303562.
- [59]HE T, SHI Q, WANG H, et al. Beyond energy harvesting - multi- functional triboelectric nanosensors on a textile[J]. *Nano Energy*, 2019, 57: 338-352.
- [60]YI J, DONG K, SHEN S, et al. Fully fabric-based triboelectric nanogenerators as self-powered human - machine interactive keyboards[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13(1): 103.
- [61]CHEN Y, CHEN E, WANG Z, et al. Flexible, durable, and washable triboelectric yarn and embroidery for self- powered sensing and human-machine interaction[J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107929.
- [62]VÁZQUEZ-LÓPEZ A, AO X, DEL RÍO SAEZ J S, et al. Triboelectric nanogenerator (TENG) enhanced air filtering and face masks: recent advances[J]. *Nano Energy*, 2023, 114: 108635.
- [63]PENG Z, SHI J, XIAO X, et al. Self-charging electrostatic face masks leveraging triboelectrification for prolonged air filtration[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7835.
- [64]HE H, GUO J, ILLÉS B, et al. Monitoring multi-respiratory indices via a smart nanofibrous mask filter based on a triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106418.

（责任编辑：周莉）