



机电转化纤维及自供能可穿戴纺织器件

赵继忠^{1,2}, 陈泉¹, 董凯^{1,2*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400

2. 中国科学院大学纳米科学与技术学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: dongkai@binn.cas.cn

2024-06-17 收稿, 2024-08-26 修回, 2024-09-05 接受, 2024-09-06 网络版发表

国家自然科学基金(22109012)、北京市自然科学基金(L222037)和中央高校基本科研业务费专项资金(E1E46805)资助

摘要 随着智能电子设备的迅猛发展, 人们对柔性、可穿戴的自供能系统的需求日益增长. 机电转化纤维(mechano-electric conversion fibers, MECFs)凭借其卓越的能量转换能力, 成为实现这一目标的关键技术. 本文综合评述了MECFs的基本原理、制备技术、结构分类以及在自供能可穿戴纺织器件中的应用, 并对未来的发展趋势进行了展望. MECFs依赖于摩擦电效应进行能量转换, 该效应主要通过摩擦起电和静电感应两个步骤实现. 制备技术是影响MECFs规模化生产的关键因素, 本文特别介绍了几种常见的制备方法, 包括静电纺丝、纺纱、湿法纺丝和熔融纺丝. 根据编织结构, MECFs可分为一维纤维器件、二维纺织器件和三维纺织器件. 在可穿戴电子设备领域, 能源供应问题一直是限制其发展的瓶颈. MECFs直接将机械能转换为电能, 为解决这一问题提供了创新的解决方案. MECFs还可以以自供能的形式进行传感, 极大地扩展了可穿戴设备的使用场景和应用潜力. MECFs研究正处于快速发展阶段, 未来的研究需要进一步优化材料性能, 提升能量转换效率, 与现有电子系统集成, 实现更智能、更灵活的可穿戴设备.

关键词 机电转化纤维, 可穿戴电子, 摩擦纳米发电机, 智能传感器, 物联网

现如今, 人们的生活越来越离不开移动智能系统、健康监测系统和其他个性化服务, 已有的硬质、庞大和固定的电子设备已经不能满足当下的工作、学习和生活需求^[1-4]. 以人们日常穿着的纤维及纤维织物作为智能电子设备的基础和载体, 开发满足能量收集、能源存储、压力传感、健康监测等功能的可穿戴纺织器件, 是回应柔性人工智能技术、物联网技术和可穿戴传感需求的出色选择^[5]. 纤维具有一系列天然的优势: 第一, 优良的机械柔性, 可以贴合身体曲面; 第二, 纤维织物拥有较大的孔隙率, 提供了优良的透气性和透湿性; 第三, 纤维设计空间广阔, 可以编织和功能化以满足个性化需求^[6].

机电转化纤维(mechano-electric conversion fibers, MECFs)应运而生, 它以纤维或纤维织物为功能单元, 利用摩擦纳米发电效应将施加在MECFs上的机械能(如振动、压力或运动)转化为相应的电信号(电压、电流和转移电荷)^[7], 且电信号的变化与机械刺激相关, 从而实现机械能的收集、利用和传感^[8]. 摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerators, TENGs)是一种新型能量采集手段, 基于摩擦起电和静电平衡两种经典物理效应, 实现电荷在电极之间的转移^[9], 能将微小且不规则的机械能转化为电能, 特别适用于低频无规则(高熵)能源的采集^[9], 例如人体运动、摩擦、滚动、水滴和声音. 自供电和自供电传感是MECFs最突出的两个功能,

引用格式: 赵继忠, 陈泉, 董凯. 机电转化纤维及自供能可穿戴纺织器件. 科学通报, 2025, 70: 2763–2779

Zhao J, Chen X, Dong K. Mechano-electric conversion fiber and self-powered wearable textile devices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2763–2779, doi: 10.1360/TB-2024-0647

因此功率密度和压力灵敏度是评价MECFs整体性能的两个关键指标. 近年来, MECFs的这两个指标取得了长足发展, 极大地拓展了可穿戴设备的实用性和应用范围, MECFs在各种应用场景中, 特别是在与可穿戴系统相关的新兴领域展现出巨大的潜力^[10], 如图1(a), (b)所示.

由于MECFs具有卓越的力学性能和稳定的电学输出能力, 针对MECFs的研究已在工作原理、结构设计、制造工艺、应用场景和未来发展等方面有了许多新的进展. 其中, 在工作原理和结构设计方面, 新型MECFs层出不穷; 在制造工艺方面, 实现大规模生产是推动MECFs走向实际应用的关键一步^[23]; 在应用场景方面, 除了能量收集外, 各种创新性的可穿戴传感和人机交互界面(human machine interface, HMI)功能方兴未艾^[24]. 此外, 与光电器件、储能器件等设备联合使用的新型纺织系统也值得注意. 本文介绍了MECFs在上述方面最新的研究进展, 同时指出了该领域目前面临的主要挑战, 以期为该领域的研究人员了解和解决当前存在的 key 问题提供启发和帮助.

1 机电转化纤维工作原理

TENGs主要依靠摩擦起电和静电平衡两种物理效应耦合工作. 具体来说, 当两种材料接触并分离时, 电子倾向于迁移至那些更易于接受电子的材料表面, 这一现象产生了电极间的电压差, 即摩擦起电. 这一过程的微观机制可以通过电子云势阱模型得到进一步的阐释. 如图2所示, 该模型展示了原子间电子云如何相互作用^[6]. 起初, 两个原子保持一定的距离, 它们的电子云各自独立. 随后, 随着原子间距的缩小, 电子云开始重叠, 使得电子得以从一个原子跳跃到另一个原子, 从而建立起电位差. 如果两个电极之间接入负载或处于短路状态, 感应电势差会驱动电子通过外电路在两个电极之间流动, 从而实现机械能到电能的转换.

TENGs有多种运作方式, 主要分为垂直接触-分离式、水平滑动式、单电极式以及独立摩擦电层式4种. 其中, 垂直接触-分离式是最为基础的工作方式, 将两片涂有金属层的聚合物薄膜正对放置, 通过两片薄膜的靠近和远离改变内部电场分布, 驱动电极上的电子在外电路中流动. 该模式具有很强的通用性, 也是MECFs最常见的设计. Ning等人^[25]使用聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)和尼龙作为壳层, 以双螺旋形式分别缠在可拉伸镀银纤维芯层表面作为两个摩擦电极,

制备了螺旋纤维应变传感器. 外界应力作用将改变正负摩擦电极的间距, 从而产生电信号输出, 适用于能源回收和微小应变测量, 如图3(a)所示. 水平滑动式在结构上与前者类似, 但运动方向从垂直改为平面内滑移, 适用于监测位移、角度变化和加速度等物理量. 如图3(b)所示, Cheng等人^[26]报道的纺织品由高输出直流摩擦供电织物和小型化能源管理模块组成, 用于可穿戴和移动电子设备的连续供电. 单电极式TENGs则是去掉了其中一个薄膜及其上的电极, 剩余电极与“地”(参考电势)相连, 当外部物体与之接触时, 会在电极与地之间建立电势差. 这种设计在结构上更为简洁, 尽管产生的电量可能减半, 但其灵活性更高, 有效地克服了空间约束. 如图3(c)所示, Zhang等人^[27]开发的智能自供电救生衣系统集成6个具有高灵敏度、可拉伸性和灵活性的同轴芯壳结构摩擦电纤维传感器. 通过深度学习辅助数据分析, 建立了穿戴者动作与状况之间的强关联, 实现了100%的卓越识别准确率. 这项开创性的工作为推进救援行动中的水下智能可穿戴设备提供了新方法. 独立摩擦电层式TENGs则不需要接地, 所有的电极都能自由移动. Pu等人^[28]开发的水平滑动织物TENG由袖子上的滑动织物和腋下的定子织物组成. 如图3(d)所示, 滑动织物有一系列平行的光栅段, 而定子织物则沉积有一对叉指电极, 可在手臂摆动时产生输出. 每种工作模式都有其独特之处, 能够适应不同的操作环境, 从而实现在各种场合和形式下机械能的有效收集.

2 纤维与可穿戴器件制备

2.1 纤维制备工艺

2.1.1 静电纺丝

静电纺丝制备的MECFs通常分为两种, 一种为非织造无纺布, 另一种则是同轴静电纺纱线. Li等人^[29]的工作是前者的代表, 他们致力于利用静电纺丝制备触觉传感器, 通过同步电纺丝-异戊二烯嵌段共聚物和电喷雾氟化二氧化硅纳米颗粒, 借助无额外黏合剂的共溶剂焊接效应在纤维之间生成原位锚定接点, 开发了一种具有全方位超弹性、透气性和超疏水性的微纤维膜. 静电纺丝还可以与微结构结合, 从而提高器件的灵敏度. 典型代表是Yu等人^[19]报道的工作, 该研究报道的TENG由超柔性微锥阵列聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)和铜电极作为基本摩擦单元, 能

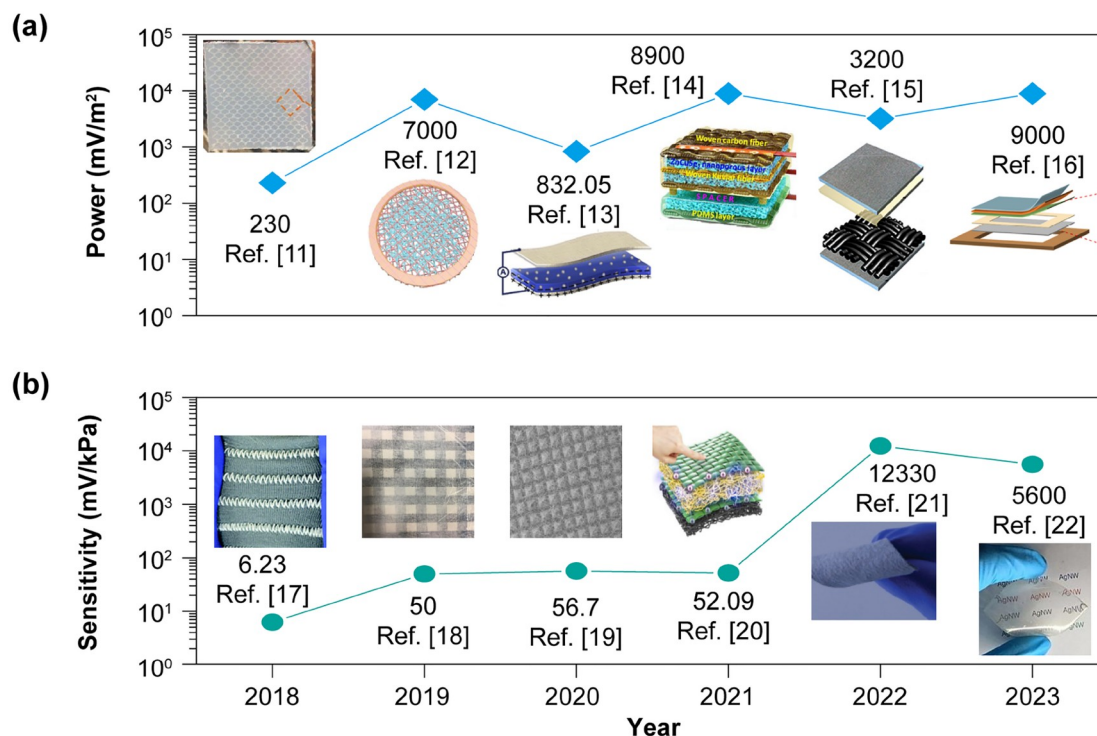


图 1 (网络版彩色)近年来纤维材料演变的趋势。(a) 功率密度的发展现状^[11-16]; (b) 压力灵敏度的发展现状^[17-22]

Figure 1 (Color online) The trend of the evolution of fiber materials in recent years. (a) The current state of the development of power density^[11-16], (b) the current state of the development of pressure sensitivity^[17-22]

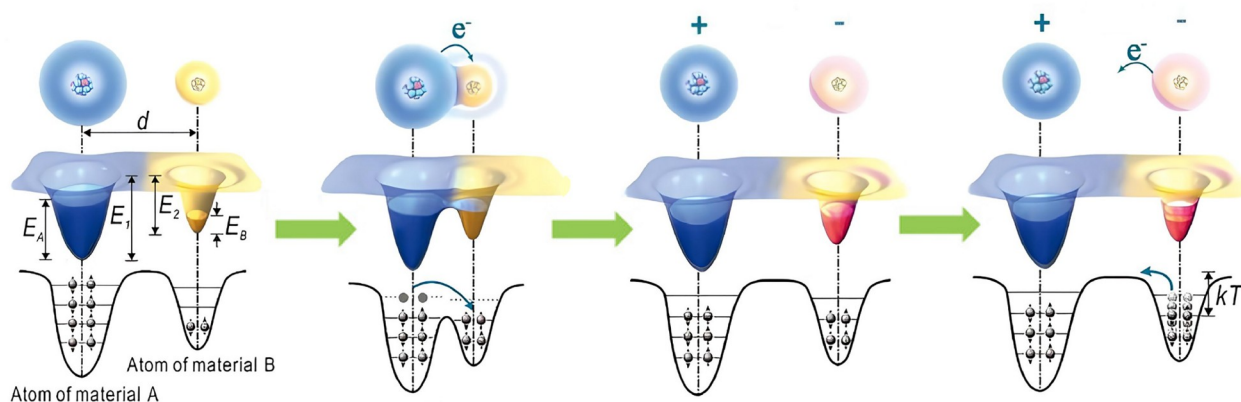


图 2 (网络版彩色)电子转移过程的电子云势阱模型^[6]. Copyright © 2023, Wiley

Figure 2 (Color online) The electron cloud potential model for the electron transfer process^[6]. Copyright © 2023, Wiley

够与人体皮肤超柔性和贴合性接触, 实现自供电的微弱生理信号监测, 并且可以轻松地排列成1×3阵列, 模仿中医中的三指脉诊. Wang等人^[30]的工作则是同轴静电纺的代表, 聚偏二氟乙烯-三氟乙烯(polyvinylidene fluoride-co-trifluoroethylene, PVDF-TrFE)和尼龙66纳米纤维通过同轴共轭电纺丝和导电黏合剂涂层工艺结

合成同轴纱线, 非常适合捕捉身体运动信号.

2.1.2 湿法纺丝

Zhang等人^[31]报道了湿法纺丝制备的热塑性聚氨酯(thermoplastic polyurethanes, TPU)/银片(Ag FKs)复合导电纤维, 以水性聚氨酯(WPU)作为薄黏合层, 涂覆液态金属, 获得TPU/Ag FKs/WPU/LM纤维. 该纤维显

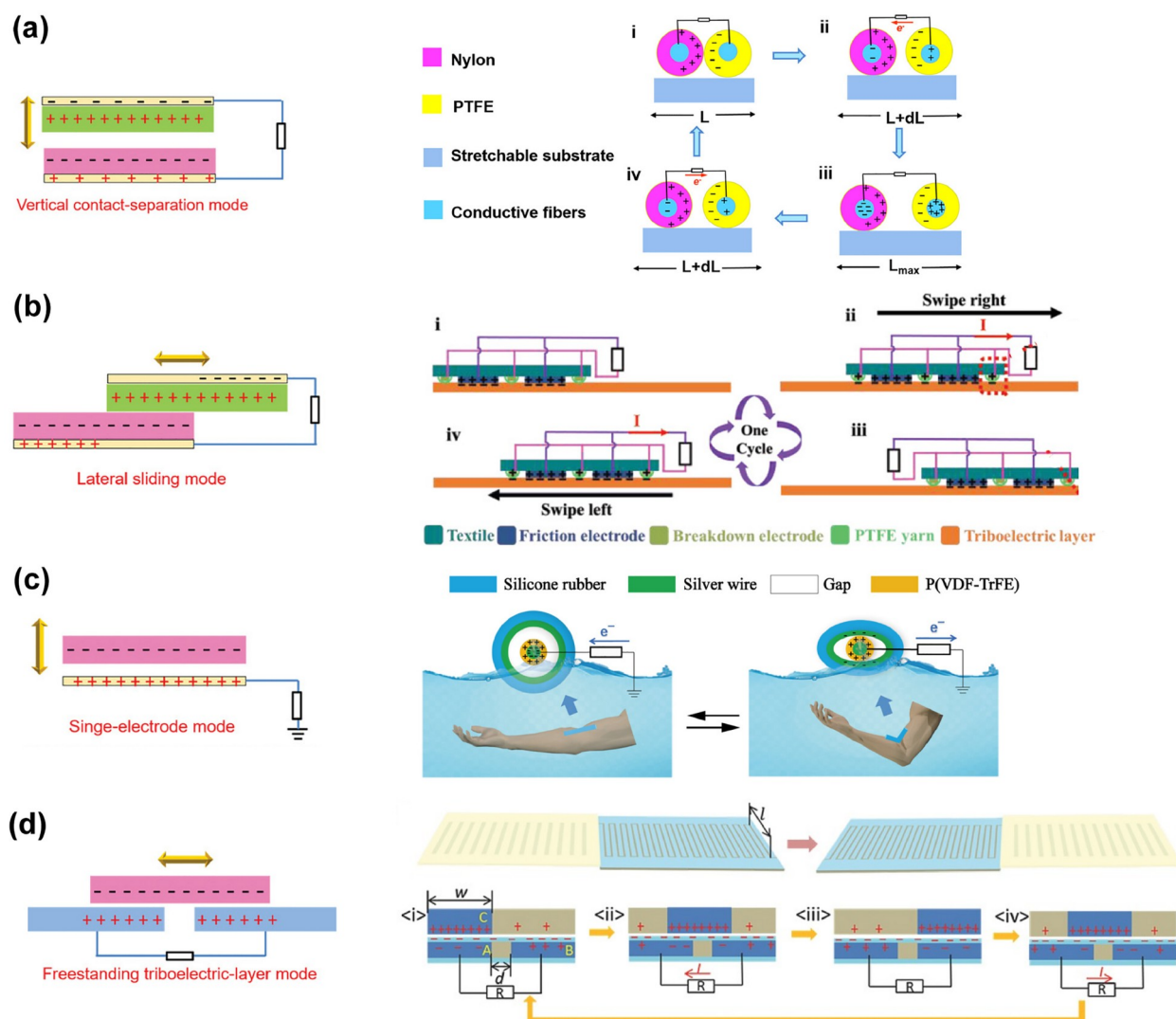


图3 (网络版彩色)TENGs的4种工作模式。(a) 垂直接触-分离模式^[25]。Copyright © 2022, America Chemical Society。(b) 水平滑动模式^[26]。Copyright © 2022, Wiley。(c) 单电极模式^[27]。Copyright © 2024, Wiley。(d) 独立摩擦电层模式^[28]。Copyright © 2016, Wiley

Figure 3 (Color online) The four working modes of TENGs. (a) Vertical contact-separation mode^[25]。Copyright © 2022, America Chemical Society。(b) Lateral sliding mode^[26]。Copyright © 2022, Wiley。(c) Single-electrode mode^[27]。Copyright © 2024, Wiley。(d) Freestanding triboelectric-layer mode^[28]。Copyright © 2016, Wiley

示出卓越的伸长率(约600%应变)、电导率(约2 Ω/cm)和在70%拉伸应变下可逆的响应。Yu等人^[32]将均匀的Ecoflex溶液通过注射器注入鞘针,并以6 mL/h的速率用泵输送,使Ecoflex溶液附着在导电纤维上,然后将涂覆有Ecoflex的纤维拉入60°C的热水浴中,使Ecoflex溶液迅速固化,最终制得TENG,能够同时实现稳定的可逆应变和出色的电输出性能。

2.1.3 热拉纤维和熔融纺丝

热拉纤维通过加热并拉伸预制棒来生产光纤。热拉丝过程中,预制棒被放置在一个加热炉中,并通过拉

丝塔轮进行拉伸从而获得所需的直径、形状和长度。在这种塑性变形中,聚合物纤维在受控的条件下被拉伸,以增加其分子链的排列顺序,不仅增强了纤维的机械强度,也有利于优化其摩擦电性能。Hasan等人^[33]合成MXene、制备纳米复合膜、将膜固化成预制件,最后从预制件中热拉伸数十米长的纤维。MXene的加入显著提高了纤维的极化和TENGs性能,展示了织物TENGs在能量收集和自供电传感方面的潜力。熔融纺是另一种制造纤维的方法,主要用于大规模制造聚酯、尼龙和其他合成纤维。原料聚合物被加热到熔点形成

熔体, 然后通过喷嘴喷出并快速冷却固化成细丝。Xiong等人^[34]开发了一种连续且可扩展的工艺流程, 包括熔融纺丝、卷对卷浸涂、多轴缠绕和机械编织, 用于制备可进行能量收集和机器学习辅助人体运动监测的石墨烯纺织品TENGs, 并使用机器学习算法分析感应信号, 为潜在的运动捕捉/监测、识别和智能体育相关应用提供了一个出色的可穿戴数字平台。

2.1.4 纺纱

纺纱常用将浸涂、湿法纺丝或熔融纺丝所得的纤维进一步缠绕在轴心纱线上形成多股复合结构。Shang等人^[35]通过液体流纺丝技术生产了基于剪切增稠流体的分级包裹芯纺纱线, 用于抗冲击和智能监测, 展现出保护性、灵敏度、灵活性、透气性和可洗性的多重优势。即使在经过10000次循环摩擦后, 该纱线仍然保持皮肤友好性, 没有破损和泄漏, 其空气渗透性高达189 mm/s。不同性质的纱线进行缠绕也是纺纱的重要形式。Abir等人^[36]提出通过force spinning (FS)方法可以制备PVDF和TPU纳米纤维的全纳米纤维基TENGs, 用于能量收集和生物力学传感应用。分散在TPU纤维膜表面的金界面产生的开路电压 V_{oc} 最大为254 V, 短路电流 I_{sc} 为86 μ A, 分别相比无Au颗粒时提高了112%和87%。

2.1.5 3D打印

智能纺织品可以通过3D打印方便地制造, 无需传统纺织品复杂的编织过程。Tong等人^[37]报道了一种典型的3D打印技术, 用于在平面、旋转和非平面基板上将TENG纤维打印成可拉伸的膜状、网状和中空3D结构。3D打印的TENG纤维以弹性Cu纤维为芯线, 包覆硅胶摩擦层, 能够作为应变传感器用于器官和人体活动监测。Chen等人^[38]向PDMS预聚物分别添加石墨烯和PTFE颗粒, 从而来调控PDMS浆料的流变行为和功能, 开发了一种3D打印PDMS浆料的方法来制备具有导电芯-绝缘鞘的同心可拉伸弹性纤维, 用于电子皮肤模仿人类触觉。

综上所述, 静电纺丝适合生产具有高比表面积的纳米纤维, 但生产效率较低; 湿法纺丝适用于难以熔融的聚合物, 但成本较高; 热拉伸是提高纤维性能的有效后处理方法, 但需要精确控制; 熔融纺丝是大规模生产合成纤维的主要方法, 但受限于可熔融材料; 纺纱是传统的纺织工艺, 适用于短纤维; 3D打印提供了设计灵活性, 但生产速度和材料选择有限。除了本文介绍的静电纺丝、湿法纺丝、热拉伸、熔融纺丝、纺纱和3D打印

等工艺外, 还有溶液干法纺丝、反应纺丝、电化学纺丝和相分离纺丝等工艺, 也在MECFs的制备当中有一席之地, 对不同工艺的深入了解对于材料科学和纺织工程领域的发展至关重要。

2.2 MECFs纱线及其编织器件结构

2.2.1 一维MECFs纱线材料

一维MECFs纱线材料的结构通常较为简单, 常被用于进一步编织成为平面或立体织物器件。一般来说, 常见的一维MECFs纱线材料设计芯线为导电材料, 在其外部包覆自供电材料形成芯-鞘复合结构, 这一复合纱线可以在另一根轴线上缠绕, 或是和另一材料的复合纱线形成绞线。Zhao等人^[39]采用同心核心-壳结构, 基于硅胶的核心和外管, 通过如图4所示的制备工艺, 将导电纱线作为电极包裹在硅胶基底周围制备了柔性TENG用于振动监测。它能够准确响应较宽的振动频率范围(0.1~100 Hz), 与商业振动传感器相比, 检测误差仅为0.32%。Zhong等人^[40]探索了双绞线结构的TENG, 使用商品棉线、PTFE水性悬浮液和碳纳米管(carbon nano-tube, CNT)制备了用于监测人体生理和生物力学信号的智能服装。一维MECFs纱线也可以直接缝纫在商用织物上作为器件使用。Xu等人^[41]则制备了一种新型的血管支架状TENG, 并展示了该TENG可以在一个动作中实现单电极模式和接触-分离模式两种模式的累积, 产生更高的电输出。该器件最外侧为PDMS纤维编织的空心管状结构作为介电和保护层; 中间为聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene glycol terephthalate, PET)支撑骨架, PET骨架上涂覆有Ag浆料作为静电感应层; 其内层则由尼龙6纤维紧密缠绕在细铜线上, 形成接触-分离模式的一个电极。该TENG成功应用于智能鞋垫, 用于人类行走监测, 包括步数记录和脚部损伤警报。

2.2.2 二维MECFs编织器件

鉴于一维智能纱线基纺织品的电输出面积受限, 且在结构和尺寸稳定性方面存在不足, 研究者将这些纱线通过编织、机织或针织技术转化为二维智能纺织品, 以此增强其整体电性能和稳定性。二维纺织产品主要通过机织和针织两大工艺制造而成。机织物的组织结构可根据平纹、斜纹、缎纹等不同类型进行分类; 针织工艺则细分为经编和纬编。机织物的制作是将经纱与纬纱以垂直交错的方式编织而成; 相比之下, 针织物则是通过织针将纱线或长丝编织成圈状结构, 然后

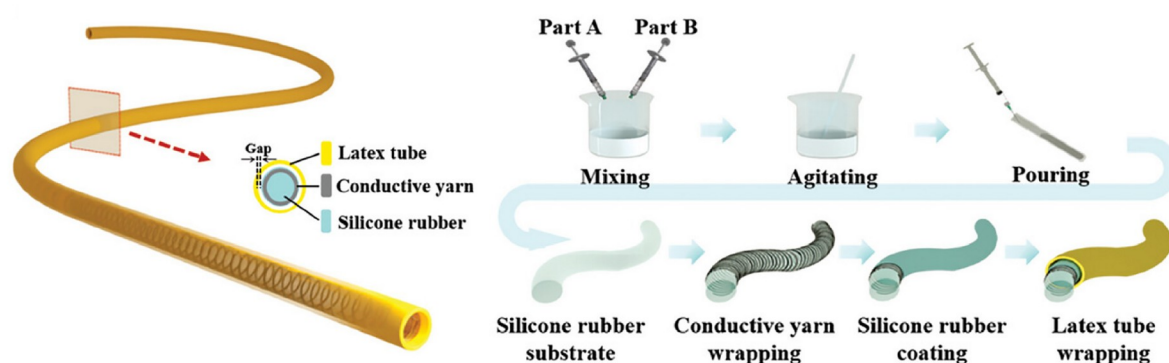


图4 (网络版彩色)一维同心核心-壳结构纤维TENGs的结构与制备示意图^[39]. Copyright © 2023, Wiley
 Figure 4 (Color online) Structure and fabrication schematic of one-dimensional core-shell fiber TENGs^[39]. Copyright © 2023, Wiley

将这些线圈相互串联起来形成织物. 此外, 还存在一种通过非织造技术生产的非织造织物, 这种织物通过机械手段、化学处理、粘接或热加工等方式将多层纤维或纱线结合在一起, 制造成无需传统编织过程的无纺布.

就机织物而言, 平纹织物是最常见的MECFs功能织物结构. 平纹织物的处理方式有两种, 一种是在现有的平纹织物表面涂覆或沉积MECFs功能材料, 另一种则是将MECF纱线以机织方式织造. Feng等人^[15]的工作是前者的代表, 通过化学接枝CNT和聚乙烯亚胺(polyethyleneimine, PEI)来丰富商用平纹织物表面的层状结构和酰胺键, 从而增强织物的摩擦电性能; 改性织物基TENG完全可洗, 且展示出卓越的鲁棒性和长期稳定性. Gang等人^[42]介绍了一种灵活的防水双模式纺织基TENG, 使用激光切割和无电电镀(electroless plating, ELD)技术制备TENG的叉指电极, 通过化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)将聚对二甲苯涂覆到薄膜表面作为摩擦电层, 如图5(a)所示. 与此同时, Ma等人^[43]的工作则体现了将MECF以机织方式织造的思路. 他们通过电纺丝技术制造了超轻型单电极摩擦电纱线, 该纱线为螺旋状的纳米-微米核-壳纤维束, 如图5(b)所示. 与传统纺织技术兼容, 可以编织成高密度的平纹织物, 用于收集生物力学能量, 也适用于监测来自人类或昆虫的微小信号.

针织结构也是二维纺织器件常见的类型. Gunawardhana等人^[44]使用3种不同表面加工工艺, 包括纱线涂层、浸涂和丝网印刷技术, 制备了针织物TENG并比较了三者输出性能的优劣. 结果表明, 以如图5(c)所示的纱线涂层工艺在测试中表现最为优异. Somkuwar和

Kumar^[45]则细致讨论了3种增强TENG输出的方式: 使用纹理化纱线、修改纺织品材料和不同的针织结构. 摩擦电性能与表面形态、粗糙度和介电性质相关. 聚丙烯和尼龙纱线上的卷曲和针织织物的3D配置比其编织对应物具有更高的粗糙度, 从而提供了更大的接触面积. 与编织TENG相比, 尼龙/聚丙烯针织面料之间更高的接触面积使得电压、电流和功率密度分别增加了240.55%、64.96%和460%. Zhou等人^[46]利用低熔点合金、导线和热缩管制备的纤维TENG具有出色的可重构特性, 可以在许多不同的应用场景中来回切换, 不仅可以智能地用作自供电的触觉和机械传感器、灾后救援工作中的自供电夹板, 还可以实现齿轮和导程螺杆的裂纹检测.

2.2.3 三维MECFs编织器件

为了增强自供电纺织品的性能, 包括提高功率密度、压力感应精度、表面积以及结构的完整性, 可以将传统的二维智能纺织品升级为三维结构. Dong等人^[47]将导电银纱线分别用PTFE和尼龙66包裹, 通过直接将两种纱线编织成管状结构来织造TENG. 其中两种纱线在初始或放松状态下保持分开, 在拉伸或压缩状态下保持接触. 这一TENG被证明是舒适、透气和柔软的, 可无缝集成在以嵌花技术制备的针织裤上收集膝盖弯曲能量. Wu等人^[48]致力于开发具有可控结构、适用直径和多响应能量收集工作模式的全纤维3D纱线TENG. 该团队开发了一种具有类似DNA双螺旋结构的3D编织可拉伸分层互锁花式纱线TENG, 如图6(a)所示, 并系统地研究了该TENG的几何和机械行为, 并将其用于多功能能量收集和自供电生物力学传感. Dong等人^[49]通过三维五向编织结构设计的TENG可用于供电

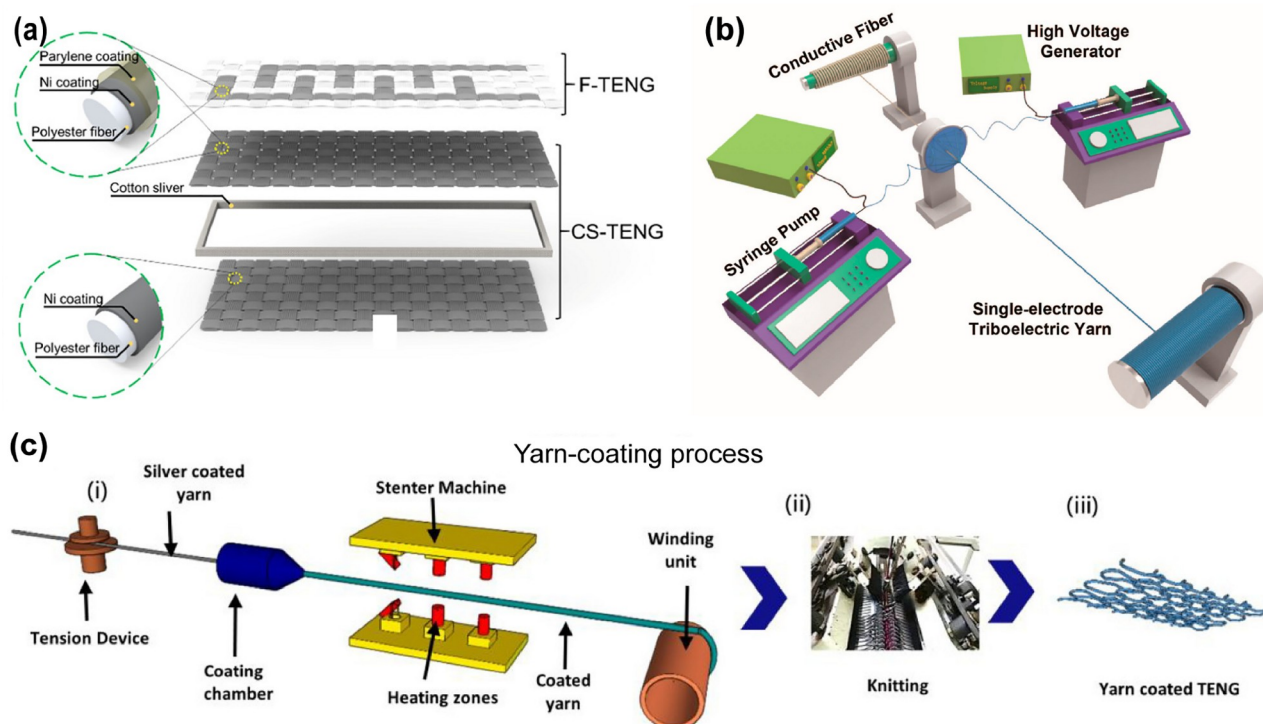


图 5 (网络版彩色)二维MECF的结构。(a) 制备的双模式TENGs的示意图^[42]。Copyright © 2021, America Chemical Society. (b) 超轻型单电极摩擦电纱线制备过程的示意图^[43]。Copyright © 2020, America Chemical Society. (c) 纱线的涂层过程^[44]。Copyright © 2020, America Chemical Society

Figure 5 (Color online) The structure of two-dimensional MECFs. (a) Schematic diagram of the fabricated dual-mode TENGs^[42]. Copyright © 2021, America Chemical Society. (b) Schematic illustration of SETY fabrication processing^[43]. Copyright © 2020, America Chemical Society. (c) Yarn-coating process^[44]. Copyright © 2020, America Chemical Society

和传感。在高速编绳机中,使用PDMS涂层能量纱线作为编织纱线,基于四步矩形编织技术进行编织,如图6(b)所示。在编织过程中,通过编织纱线和轴向纱线在X和Y方向上的周期性行进和列进运动实现规律性交织,具有高灵活性、高压缩回弹性、增强的功率输出、改善的压力敏感性、出色的工作耐久性和可机洗性。

3 自供能可穿戴纺织器件应用领域

3.1 能源供给

在当今的物联网时代,微型传感器和智能可穿戴电子设备的移动性、广泛部署和低能耗特性使得便携式和分布式能源供应成为关键。将自供电智能纺织品整合到可穿戴电子产品中,能够高效地转换和利用人体或环境中的多种能量来源,特别是生物机械能,从而显著增强可穿戴设备的续航力。

3.1.1 人体能量回收

MECFs通常能够响应微小的动态机械运动,这意

味着人体运动产生的能量,如走路、跳跃或肌肉收缩,可以被MECFs纤维回收并转换为电能。Xiong等人^[50]提出可洗涤的、亲肤的织物TENG,用疏水的纤维素油酸酯纳米粒子封装的黑磷作为协同电子捕获涂层,通过手轻微(约5 N)和低频率(约4 Hz)的触摸,可以获得相当高的输出(约250~880 V,约0.48~1.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$),足以为发光二极管和数字手表供电。Paosangthong等人^[51]开发的纺织品TENG可以从多个方向移动中收集能量。正负摩擦电材料的编织条带形成棋盘状图案,具有匹配的周期性,能够在2 Hz的机械振荡、5 N的接触力和50 M Ω 的负载电阻下产生62 V的均方根(root mean square, RMS)开路电压、1.77 μA 的RMS短路电流和34.8 μW 的最大RMS功率,相当于5.43 mW/m²的最大RMS功率密度。

将MECFs纱线制造成织物的典型工作是Guan等人^[52]开发的编织结构TENG,由商业不锈钢纱线包裹静电纺丝尼龙66纳米纤维和PVDF纳米纤维制成。该TENG的开路电压、短路电流和最大瞬时功率密度分

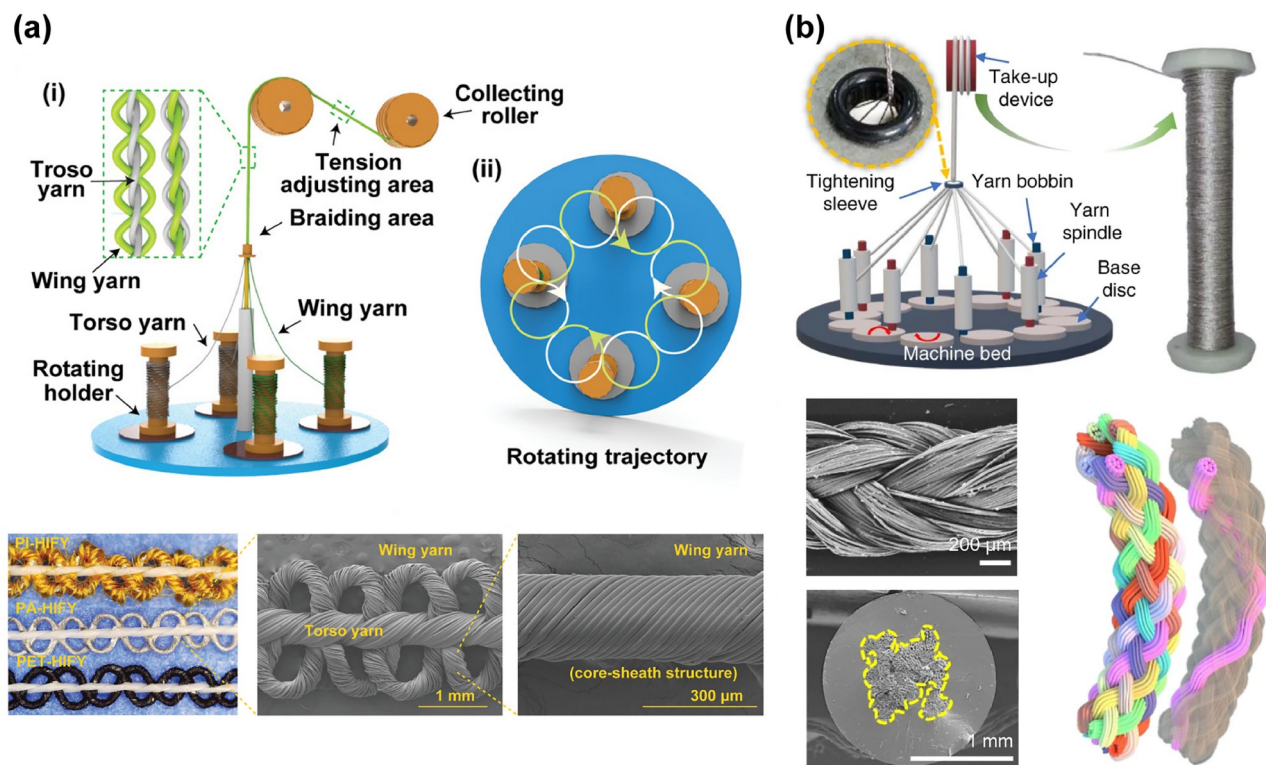


图6 (网络版彩色)三维MECF的结构。(a) 用于自供电智能健身系统的三维编织层次互锁花式纱线^[48]。Copyright © 2022, Wiley. (b) PDMS涂层能量纱线的结构设计分析^[49]。Copyright © 2020, Springer Nature

Figure 6 (Color online) The structure of three-dimensional MECFs. (a) 3D braided hierarchical interlocked fancy-yarn for self-powered smart fitness systems^[48]. Copyright © 2022, Wiley. (b) Structural design analysis of the PDMS-coated energy yarn^[49]. Copyright © 2020, Springer Nature

别可达到166 V、8.5 μA 和93 mW/m^2 。Feng等人^[53]引入热拉伸过程来生产与工业织布机兼容的TENG。该TENG具有简单的核-壳结构，其中50 μm 薄的金属(钨)丝作为电极，聚合物包层在外部产生摩擦电。聚合物包层和金属芯纤维的直径已减小到约350 μm ，单根纤维的长度已扩大到亚公里。

静电纺丝制备平面非织造MECFs的典型是Huang等人^[54]的工作，他们报道的TENG用乙基纤维素与尼龙66共电纺作为摩擦电正材料，将MXene片层掺入PVDF纳米纤维作为摩擦电负材料。这种设计在100 $\text{M}\Omega$ 负载电阻下达到了290 mW/m^2 的功率密度。Mi等人^[55]报道了高度多孔的纤维素纳米纤维/PEI气凝胶薄膜与PVDF纳米纤维垫组成的新型TENG。与由一层PVDF组成的TENG相比，由纤维素纳米纤维/PEI气凝胶与四层PVDF组成的TENG在输出电压和功率密度值上分别提高了18.3和97.6倍，在106 Ω 的负载电阻下，峰值输出功率密度达到了13.3 W/m^2 。

3.1.2 环境能量捕获

环境中充满了各种低频的雨滴拍打和机械振动等高熵低品质能量。Ye等人^[56]报道了一种全织物TENG，疏水表面具有157°的静态接触角，并且显示出优异的耐酸耐碱特性和加热下的疏水自修复性能。水滴TENG的输出电压比传统的单电极TENG提高了7倍，并且实现了2.9%的总能量转换效率。Seung等人^[57]则将注意力投向为汽车提供替代动力解决方案，开发了一种新颖的基于轮胎的TENG。这项技术创新性地将TENG完全整合在轮胎内部，轮胎的外层采用涂PDMS的银纺织品，而内层则使用尼龙编织品作为轮胎的胎体材料，该TENG展示出大约225 V的最大输出电压和42 μA 的电流，以及在最佳负载下0.5 mW 的输出功率。

捕捉环境噪声并将之转化为电能也是TENGs的重要应用。Chen等人^[12]提出了一种新型电纺PVDF纳米纤维TENG，用于高效声能收集和自供能多功能传感。这种TENG可以在20~1000 Hz的频率范围内稳定工作。在

170 Hz的声频和115 dB的声压下, TENG可以分别提供400 V的开路电压和175 μA 的短路电流, 瞬时最大功率密度达到7 W/m^2 . Yu等人^[58]采用纳米多孔PVDF空心纤维和PDMS阀门模仿耳膜的结构, 结合了压电和摩擦电的特性, 使得该TENG在117.6 dB和150 Hz的声音刺激下, 能够达到105.5 V和16.7 μA 的最优输出, 并具有0.92 W/m^2 的功率密度.

3.2 运动传感和生理监测

近年来, 可穿戴智能纺织品因其广泛的覆盖范围和持久的监测能力, 正成为实现精准预防的个性化医疗服务的关键工具.

3.2.1 姿态监测

在织造织物这一方面, Chen等人^[59]设计了一种3D双面互锁织物TENG, 作为自供电的、可拉伸的、无基底的可穿戴MECF传感器, 用于检测手臂弯曲程度、压力传感和能量收集, 为智能义肢提供了一个有希望的发展方向. Khan等人^[60]在银导电纤维外层涂覆PDMS制备了纤维TENG, 通过自主研发的涂层技术, 结合连续的卷对卷制造工艺, 成功实现了带有PDMS涂层的银纤维的连续生产, 且制造出超过300 m长的纤维, 验证了TENG纤维生产的可行性. 研究者还将自供电传感器纤维集成到包括用于心肺复苏感应的手套、用于呼吸感应的腰带等各种医疗保健物品和用于评估踢球和拳击冲击力的足球鞋和拳击手套等可穿戴运动用品中.

静电纺丝非织造布方面也有大量工作. Chen等人^[61]展示了一种基于聚磺酰胺和PTFE非织造布耐酸耐碱TENG. 经过7 d的强酸和强碱溶液处理后, TENG的织物形态、直径、拉伸性能和输出不受影响, 因此被设计集成到防护装备中, 如防护服和手套, 在高酸、高碱危害环境中实时监测工作人员的安全, 并在检测到危险时及时告警, 防止事故发生. Peng等人^[62]开发了一种基于全纳米纤维TENG的透气、生物可降解、抗菌且自供电的电子皮肤. 这种电子皮肤是通过在聚乳酸-羟基乙酸共聚物和聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)之间夹入银纳米线制造而成, 能够实现全身生理信号和关节运动的实时、自供电监测. Liu等人^[13]介绍了一种基于PDMS/PVDF复合膜的纳米皱纹图案化柔性编织结构TENG, 实现了832.05 mW/m^2 的瞬时最大功率密度. 该技术具有多适应性、与各类服装兼容的特点, 展示了在可穿戴电子设备的机械能收集、压力传感和人机界面方面的应用潜力.

3.2.2 压力传感

压力传感是MECFs的重要应用. Shen等人^[63]设计了一种使用生物可降解和羧甲基壳聚糖-丝素薄膜的TENG. 基于该TENG的人机界面被设计用于实时跟踪书写步骤, 且用红色突出显示笔画, 从而评估字母书写的准确性, 如图7(a)所示. 这项技术有望成为书法练习和纠错的有效工具. Zhao等人^[64]利用与纺织工业兼容的机器编织技术, 使用铜涂层聚丙烯腈(polyacrylonitrile, PAN)纱线制造了压力传感器, 研究了材料设计、机械环境和制造方法等因素对传感器灵敏度、线性度、饱和趋势和可洗性的影响, 并展示了在不同情况下检测握持姿势的能力. Xu等人^[21]介绍了一种基于溶液吹纺技术制备的全纤维大面积可定制的TENG, 由PVDF/MXene和导电纺织品组成, 具备良好的可定制性、透气性、疏水性和可洗涤性, 在超过16 kPa的检测范围内表现出高达12.33 V/kPa的灵敏度. 在最大施加压力下, 其产生的电压、电流和电荷分别为108 V、38 μA 和35 nC, 具备自供电触觉传感能力, 可用于压力映射和滑动传感, 如图7(b)所示.

3.2.3 生理监测

生理监测功能在保障用户健康方面发挥了无可替代的重要作用. Zhao等人^[65]开发了基于预拉伸Ecoflex纤维、喷涂多壁碳纳米管、电化学合成聚苯胺、酶修饰的可拉伸TENG. 该TENG能够集成到智能服装中, 实时检测汗液中的葡萄糖、肌酐和乳酸含量, 响应分别可达103%、125%和38%, 展示了在生物传感和无线通信领域的应用潜力. Lin等人^[66]提出了一种基于鞘芯纤维动态稳定模型的技术方法, 利用纳米纤维屈曲实现了微屈曲纤维敏感响应. 其制造工艺与现代编织技术相容, 显著提升了传感器的灵敏度, 在10°曲率范围内, 该纤维展现出高弯曲因子(大于21.8%)以及在微弯曲下的强韧性, 可监测人体微弱的生理信号, 包括脉搏、呼吸、心跳和肌肉用力等, 特别适用于监测上肢肌肉力量, 用于康复和训练.

3.3 人机交互与物联网

智能可穿戴纺织品透气舒适、与人体无缝贴合, 能够广泛地监测环境中各种类型的信号, 包括机械力、温度变化以及声音等, 为人们提供了一种全新的交互界面, 实现了智能化的互动.

3.3.1 声音识别与交互

声音识别是人机交互的重要途径. Kovalska等

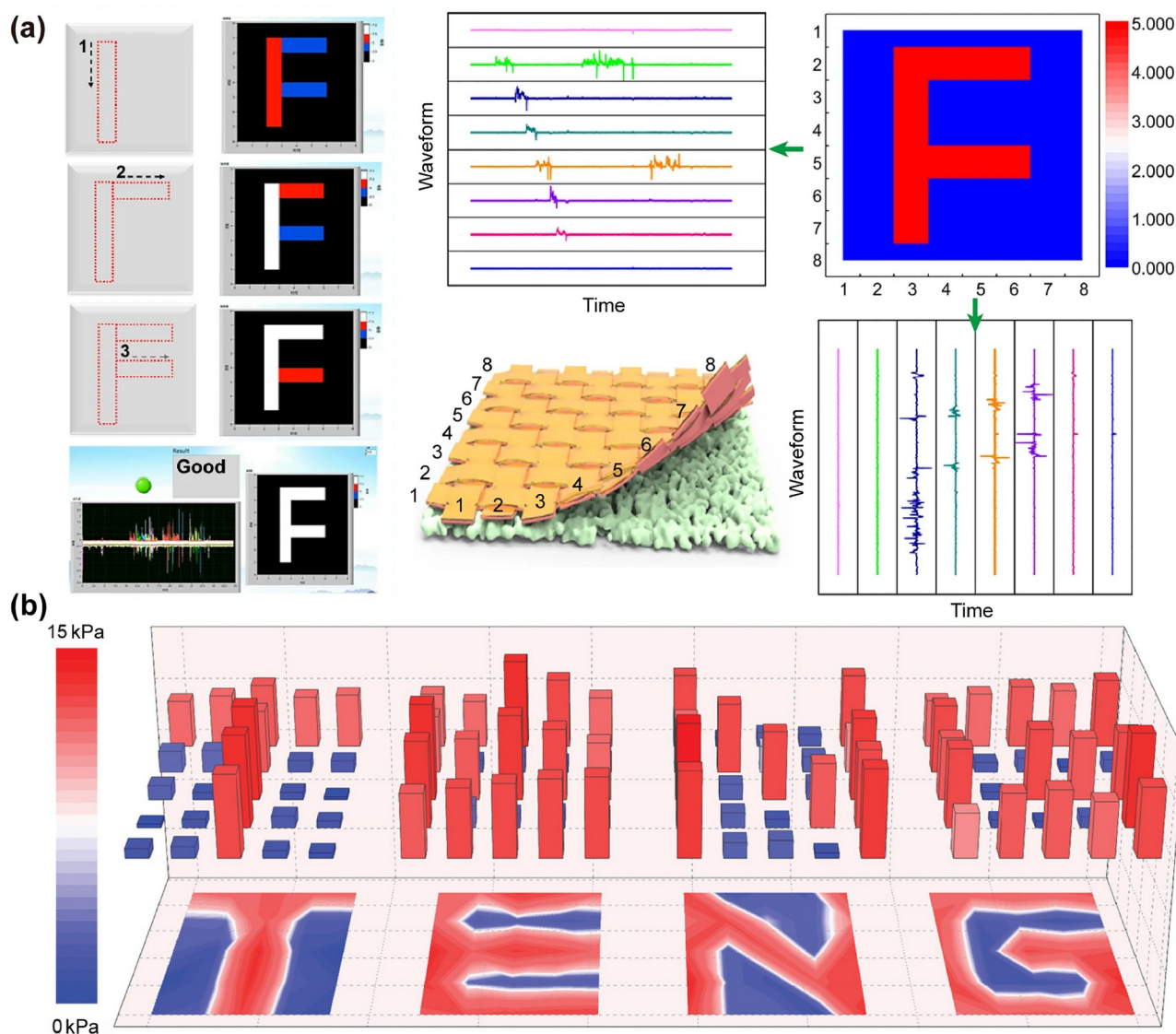


图7 (网络版彩色)MECFs用于压力检测。(a) 用于手写识别的TENG的实时跟踪测量过程^[63]。Copyright © 2022, Springer Nature。(b) 使用字母“T”、“E”、“N”和“G”时, 5×5阵列的输出电压及其电压分布图^[21]。Copyright © 2022, Wiley

Figure 7 (Color online) MECFs for pressure sensing. (a) Schematic of the handwriting recognition TENG for HMI^[63]。Copyright © 2022, Springer Nature。(b) Output voltage and voltage mapping of the 5 × 5 arrays using the letters “T”, “E”, “N” and “G”^[21]。Copyright © 2022, Wiley

人^[67]利用CVD合成多层石墨烯, 将其转移到聚酯纤维上, 然后通过浸涂法在多层石墨烯上覆盖不同浓度的蜂蜡溶液。该设备能够感应10–200 Hz频率范围内的声音。此外, 由于摩擦电层的动态分子相互作用和疏水性质, 该设备具有固有的热自愈、防水和自清洁特性, 确保其在弯曲和潮湿环境中正常工作。Li等人^[68]报道了一种多孔声学谐振器增强型TENG, 它结合了一个穿孔板谐振器和一个压力差声学接收器, 产生了创纪录的8.9 W/m²的高功率密度。高信噪比和精确的高频响应

的信号, 使得音乐和人类语音的高质量恢复成为可能, 在机器学习的帮助下实现了自供电的声纹识别和情绪识别, 准确率超过90%。

3.3.2 姿态识别与交互

随着虚拟现实技术应用加深, 人们越来越习惯于依靠身体姿势来与虚拟空间互动。Wen等人^[69]认识到当前手语识别智能手套不能用于识别一个完整的句子, 开发了基于传感手套、深度学习模块和虚拟现实等部分的手语识别和通信系统, 通过将句子信号分成单词

单元,再利用深度学习模型对所有单词元素进行识别,反向重建和识别整个句子,平均准确率达到86.67%。手语识别结果投射到虚拟空间,可被转换成文本和音频形式,使手语使用者能够与非手语使用者进行远程双向交流。Jiang等人^[70]报道了一种可拉伸、可洗涤且超薄的类皮肤TENG,用于收集人体运动能量并作为高灵敏度的自供能触觉传感器。通过优化材料选择和结构设计,该TENG具有可拉伸性(约800%)、超薄(约89 μm)和轻量级(约0.23 g)的优点,可以不干扰接触地贴合在人体皮肤上。

3.3.3 物联网应用

物联网已成为当下的研究热点。Wang等人^[71]以液态金属/聚合物核壳纤维结构作为TENG纺织品的基本单元,液态金属泵入均匀的超细聚合物空心纤维中制造TENG,其作为自供电传感器在家居控制方面展现出了巨大的潜力。由于通用制造过程的优势,聚合物空心纤维可以被任何具有各种功能或颜色的纤维所替代。Pandey等人^[72]注意到,将无机材料掺杂到聚合物基质中,可以显著提高复合材料的机械和摩擦电性能,但良好的分散性和长期稳定性仍然是一个挑战。因此,他们引入Nafion方法,为 BaTiO_3 在PVDF基质中提供了极佳的分散性,制备了新型 BaTiO_3 NPs/PVDF复合纳米纤维基TENG,可作为智能控制系统的自供电人机界面,用于设计智能街道系统和控制智能家居系统中的家用电器。

3.4 多功能耦合

3.4.1 发光多功能耦合纤维

发光是可穿戴设备的重要功能,用于照明、节能、在黑暗中的识别和操作,以及保证夜间活动的安全。MECFs是极具前景的电源供应和自供电传感器。Li等人^[73]受荧光小菇(*mycena chlorophos*)启发,提出了一种自发光和能量收集的摩擦电纤维。它由导线包裹在弹性荧光摩擦电复合材料中组成,可以编织成大面积高延展性(>100%应变)的纺织品。在短暂的日光暴露(5 min)后,其能够持续发出持久的可见光(50 mcd/ m^2 ,持续超过120 min)。Yang等人^[74]指出,大多数双模态纤维电子学是多种传感机制的简单叠加,无法在机制上实现协同。因此,该团队提出耦合了机械发光(光学传感)/摩擦电(电气传感)两种机制的自供电光电子协同纤维传感器,具有内置螺旋的鞘-芯结构,其中鞘层是光学活性复合材料,芯层是电活性材料。实现了工业级连续

制造和回收过程,在人机交互、虚拟现实以及独特的水下传感、救援和信息交互中得到应用演示,如图8(a)所示。

3.4.2 能量采集与储存集成纤维

作为能量采集装置的MECFs与能量储存器件集成将打造更具有实用价值的能量回收系统。超级电容器是能量存储的代表性器件,TENGs与超级电容器协同工作将有利于能量的高效存储。Deka等人^[14]报道的多功能TENG能够产生8.9 W/ m^2 的功率密度和84%的能量转换效率。超级电容器采用聚酯固体聚合物电解质作为负电极,提供1.93 Wh/kg的能量密度和39.23 W/kg的功率密度。Zhu等人^[75]报道的超级电容器正极采用PEDOT:PSS碳纤维,负极则由碳纳米管膜/ Fe_2O_3 / MoS_2 构成。硅橡胶涂层作为摩擦层,形成了单电极结构。该超级电容器展示出213.3 mF/ cm^2 的面电容密度,并在5000个循环后展示出92%的优异稳定性。编织TENG展示出150 V的开路电压、6 μA 的短路电流和900 mW/ cm^2 的高功率密度。MECFs可以集成更多传感功能。Han等人^[76]开发的多功能同轴能量纤维由全纤维形状TENG、超级电容器和压力传感器组成。内芯是纤维状超级电容器,用于能量存储;外鞘是一个单电极模式的纤维状TENG,用于能量收集。纤维状超级电容器展示出13.42 mF/cm的电容密度、约96.6%的保持率。纤维状TENG展示出最大2.5 μW 的功率,可以为电子手表和温度传感器供电。压力传感器具有1.003 V/kPa的灵敏度,可以轻松监测实时手指运动并用作触觉界面。

3.4.3 其他应用领域

Yang等人^[77]通过静电纺丝技术制备了一种具有微纳米复合结构的自供电过滤器,它由聚丁二酸丁二醇酯纳米纤维/PAN纳米纤维/聚苯乙烯纳米纤维组成。接触起电后,纤维膜对 $\text{PM}_{0.3}$ 的过滤效率可达98%以上,在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为23000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的恶劣环境下,压降约为50 Pa,不影响正常呼吸,如图8(b)所示。过滤器口罩在日常生活环境中能保持48 h以上 $\text{PM}_{0.3}$ 的高过滤效率(99.4%)。Cheng等人^[78]报道了一种新型的阻燃型纺织基TENG,它结合了阻燃导电棉布、PTFE涂层棉布和分隔器,以低成本、环保的方式开发。即使在17个不同位置被燃烧后,仍然保持了初始输出的49.2%,在220°C下暴露时,也保留了34.48%的电输出。此外,该TENG成功地作为消防员的能量收集器和自供能传感器,用于森林自救和火警系统。

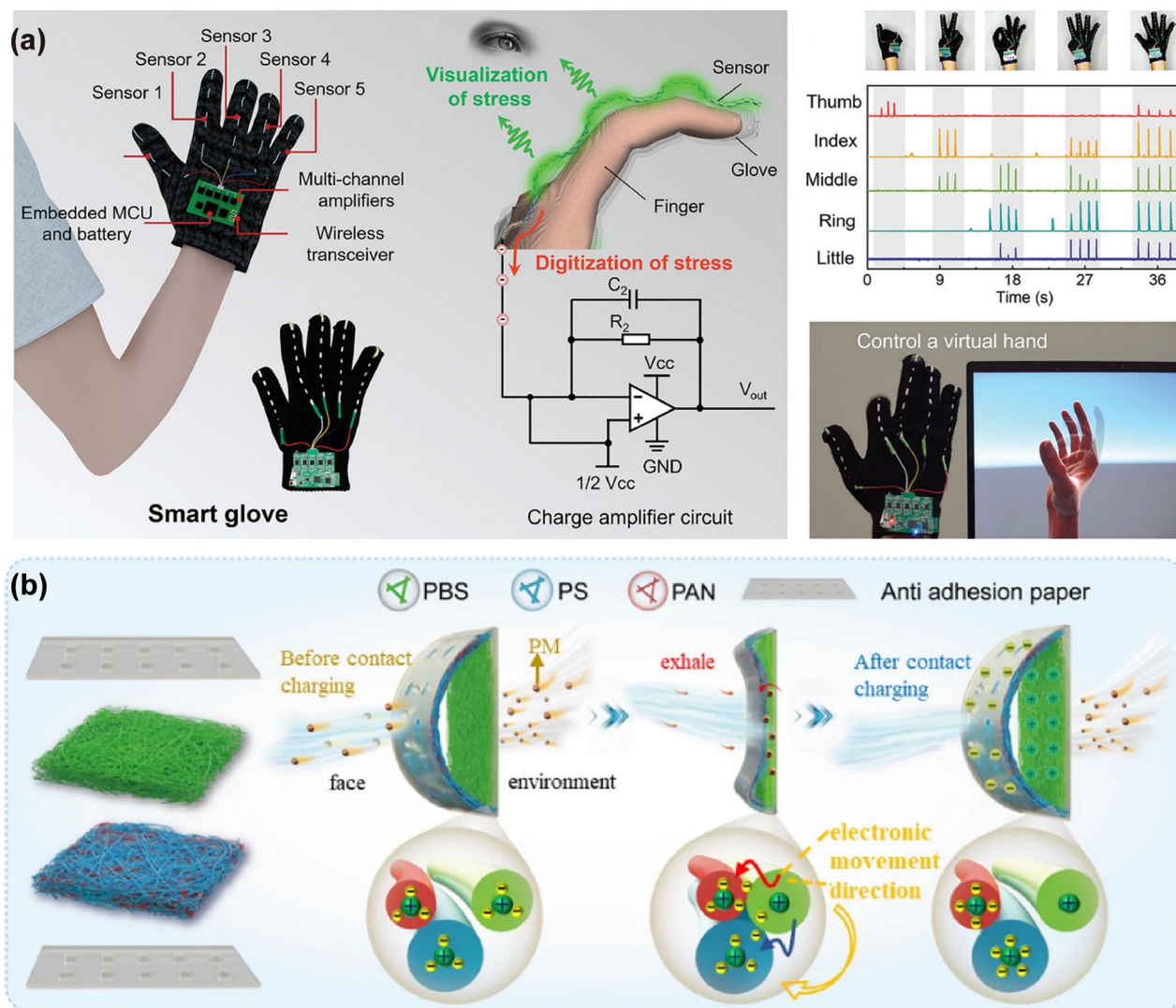


图8 (网络版彩色)多功能MECFs自供电传感。(a) 纤维TENG被编织进智能数据手套中,用于HMI展示^[74]。Copyright © 2021, Wiley。(b) 自供电过滤面罩的示意图及其自供电工作原理^[77]。Copyright © 2023, Springer Nature

Figure 8 (Color online) Multifunctional self-powered sensing by MECFs. (a) The SOEFS was knitted into a smart data glove for HMI^[74]。Copyright © 2021, Wiley。(b) Schematic diagram of the self-powered filter mask and self-powered principle^[77]。Copyright © 2023, Springer Nature

4 总结与展望

MECFs作为新兴的智能纤维,已经在可穿戴电子设备领域展现出巨大的潜力。本文概述了MECFs的概念,并深入探讨了其能量转换机制;进一步提供了关于如何设计此类纺织品的概述,涵盖了结构设计、制备工艺和主要应用场景等方面。然而,尽管MECFs在理论和实验上都取得了一定的成果,但在实际应用中仍面临着如下挑战。

第一,MECFs无法为手机等某些大功率电子设备供电。为此,需要在保持轻便的同时,通过增加有效工

作面积或整合多种自供电发电机来提高电力供应。一方面,可以通过材料改性、引入微结构和创新编织结构来提高接触效率;另一方面,还需开发柔性电路管理系统,并设计相匹配的储能单元、集成整流器和稳压器以确保电输出效果。

第二,MECFs的研究需更加注重实用性和多功能性。目前大多数研究集中在单一功能的MECFs上,而对多功能集成纤维材料的研究相对较少,这往往不能满足当代多样化的需求。未来,MECFs不仅要能够实现能量转换,还应该具备数据传输、生物传感等多重功能。

第三, 目前制造的MECFs与日常生活中的纤维仍存在差距。自供电可穿戴智能纺织品的需求, 如高灵敏度、自洁功能、自愈合能力和生物相容性等, 促使研究者改进功能材料与基底材料的耐水性、透气性、色彩多样性和柔软度, 以提升智能纺织品的普及度和接受度。在追求功能性的同时, 应从材料选择和制造方法入手, 努力生产出具有优良机械性能、舒适性和实用性的纤维。

第四, 绿色和大规模生产仍然困难。绿色环保的材料设计理念已经成为未来研究的重要方向, 研究者需要在保证材料性能的同时, 考虑材料的生命周期和环

境影响, 开发出可回收、可降解的MECFs。与此同时, 工业化、规模化生产是MECFs从实验室走向商业化的关键环节, 需要探索与工业兼容、成本低廉、绿色可持续的生产方法。

总而言之, 现有的问题和挑战意味着MECFs这一研究领域仍然有许多亟待阐释的物理和化学机制、生产制备的改进和优化空间以及满足现实应用需求等诸多研究问题。纤维和织物是人类生活的必需品, 与人们的生活紧密相连, MECFs及可穿戴传感器必将为健康监测、动作捕捉、身份识别、智能家居等领域带来蓬勃活力, 将为可穿戴电子设备的发展作出重要贡献。

参考文献

- 1 Dong K, Lü T M, Sheng F F, et al. Advances in smart textiles oriented to personalized healthcare (in Chinese). *J Textile Res*, 2024, 45: 240–249 [董凯, 吕天梅, 盛非凡, 等. 面向个性化健康医疗的智能纺织品研究进展. *纺织学报*, 2024, 45: 240–249]
- 2 Guo J H, Wang Y, Xu D Y, et al. Conductive microfibers from microfluidics for flexible electronics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1653–1665 [郭佳慧, 汪雨, 许冬雨, 等. 导电微纤维的微流控制备及其在柔性电子领域的应用. *科学通报*, 2023, 68: 1653–1665]
- 3 Wang K L, Hu X R, Sun K, et al. Flexible display integrated pyroelectric self-powered floating touch sensor array (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 2958–2964 [王凯伦, 胡潇然, 孙阔, 等. 柔性显示一体集成的热释电自供能悬浮触控传感阵列. *科学通报*, 2022, 67: 2958–2964]
- 4 Wang W J, Zheng L M, Cheng H Y, et al. Applications and progress of machine learning in wearable intelligent sensing systems (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 4630–4641 [王文君, 郑丽敏, 程泓宇, 等. 机器学习在可穿戴智能传感系统中的应用与进展. *科学通报*, 2023, 68: 4630–4641]
- 5 Dong K, Peng X, Cheng R, et al. Advances in high-performance autonomous energy and self-powered sensing textiles with novel 3D fabric structures. *Adv Mater*, 2022, 34: 2109355
- 6 Ning C, Zheng G, Dong K. Emerging self-powered autonomous sensing triboelectric fibers toward future wearable human-computer interaction devices. *Adv Sens Res*, 2023, 2: 2200044
- 7 Liu L, Chang D, Gao C. A review of multifunctional nanocomposite fibers: Design, preparation and applications. *Adv Fiber Mater*, 2023, 6: 68–105
- 8 Lv X, Liu Y, Yu J, et al. Smart fibers for self-powered electronic skins. *Adv Fiber Mater*, 2022, 5: 401–428
- 9 Luo J, Gao W, Wang Z L. The triboelectric nanogenerator as an innovative technology toward intelligent sports. *Adv Mater*, 2021, 33: 2004178
- 10 Gunawardhana K R S D, Wanasekara N D, Dharmasena R D I G. Towards truly wearable systems: Optimizing and scaling up wearable triboelectric nanogenerators. *iScience*, 2020, 23: 101360
- 11 Dong K, Wu Z, Deng J, et al. A stretchable yarn embedded triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and multifunctional pressure sensing. *Adv Mater*, 2018, 30: 1804944
- 12 Chen F, Wu Y, Ding Z, et al. A novel triboelectric nanogenerator based on electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers for effective acoustic energy harvesting and self-powered multifunctional sensing. *Nano Energy*, 2019, 56: 241–251
- 13 Liu L, Yang X, Zhao L, et al. Nanowrinkle-patterned flexible woven triboelectric nanogenerator toward self-powered wearable electronics. *Nano Energy*, 2020, 73: 104797
- 14 Deka B K, Hazarika A, Kwak M J, et al. Triboelectric nanogenerator-integrated structural supercapacitor with *in situ* MXene-dispersed N-doped Zn–Cu selenide nanostructured woven carbon fiber for energy harvesting and storage. *Energy Storage Mater*, 2021, 43: 402–410
- 15 Feng P Y, Xia Z, Sun B, et al. Enhancing the performance of fabric-based triboelectric nanogenerators by structural and chemical modification. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 16916–16927
- 16 Zhu G, Zhou Y, Si Z, et al. A multi-hole resonator enhanced acoustic energy harvester for ultra-high electrical output and machine-learning-assisted intelligent voice sensing. *Nano Energy*, 2023, 108: 108237
- 17 Shin Y E, Lee J E, Park Y, et al. Sewing machine stitching of polyvinylidene fluoride fibers: Programmable textile patterns for wearable triboelectric sensors. *J Mater Chem A*, 2018, 6: 22879–22888
- 18 Huang T, Zhang J, Yu B, et al. Fabric texture design for boosting the performance of a knitted washable textile triboelectric nanogenerator as

- wearable power. *Nano Energy*, 2019, 58: 375–383
- 19 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. *Nano Energy*, 2020, 69: 104437
- 20 Wang Y, Zhu M, Wei X, et al. A dual-mode electronic skin textile for pressure and temperature sensing. *Chem Eng J*, 2021, 425: 130599
- 21 Xu H, Tao J, Liu Y, et al. Fully fibrous large-area tailorable triboelectric nanogenerator based on solution blow spinning technology for energy harvesting and self-powered sensing. *Small*, 2022, 18: e2202477
- 22 Lei Y, Yang J, Xiong Y, et al. Surface engineering AgNW transparent conductive films for triboelectric nanogenerator and self-powered pressure sensor. *Chem Eng J*, 2023, 462: 142170
- 23 Chen G, Li Y, Bick M, et al. Smart textiles for electricity generation. *Chem Rev*, 2020, 120: 3668–3720
- 24 Xiao R, Yu G, Xu B B, et al. Fiber surface/interfacial engineering on wearable electronics. *Small*, 2021, 17: e2102903
- 25 Ning C, Cheng R, Jiang Y, et al. Helical fiber strain sensors based on triboelectric nanogenerators for self-powered human respiratory monitoring. *ACS Nano*, 2022, 16: 2811–2821
- 26 Cheng R, Ning C, Chen P, et al. Enhanced output of on-body direct-current power textiles by efficient energy management for sustainable working of mobile electronics. *Adv Energy Mater*, 2022, 12: 2201532
- 27 Zhang Y, Li C, Wei C, et al. An intelligent self-powered life jacket system integrating multiple triboelectric fiber sensors for drowning rescue. *InfoMat*, 2024, 6: e12534
- 28 Pu X, Song W, Liu M, et al. Wearable power-textiles by integrating fabric triboelectric nanogenerators and fiber-shaped dye-sensitized solar cells. *Adv Energy Mater*, 2016, 6: 1601048
- 29 Li Y, Xiao S, Zhang X, et al. Silk inspired *in-situ* interlocked superelastic microfibers for permeable stretchable triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2022, 98: 107347
- 30 Wang Y, Chu L, Meng S, et al. Scalable and ultra-sensitive nanofibers coaxial yarn-woven triboelectric nanogenerator textile sensors for real-time gait analysis. *Adv Sci*, 2024, 11: 2401436
- 31 Zhang Y, Zhang D, Chen Y, et al. Liquid metal enabled elastic conductive fibers for self-powered wearable sensors. *Adv Mater Technologies*, 2023, 8: 2202030
- 32 Yu B, Long J, Huang T, et al. Core–sheath fiber-based triboelectric nanogenerators for energy harvesting and self-powered straight-arm sit-up sensing. *ACS Omega*, 2023, 8: 31427–31435
- 33 Hasan M M, Sadeque M S B, Albasar I I, et al. Scalable fabrication of MXene-PVDF nanocomposite triboelectric fibers via thermal drawing. *Small*, 2023, 19: e2206107
- 34 Xiong Y, Luo L, Yang J, et al. Scalable spinning, winding, and knitting graphene textile TENG for energy harvesting and human motion recognition. *Nano Energy*, 2023, 107: 108137
- 35 Shang L, Wu Z, Li X, et al. A breathable and highly impact-resistant shear-thickened fluid (STF) based TENG via hierarchical liquid-flow spinning for intelligent protection. *Nano Energy*, 2023, 118: 108955
- 36 Abir S S H, Sadaf M U K, Saha S K, et al. Nanofiber-based substrate for a triboelectric nanogenerator: High-performance flexible energy fiber mats. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 60401–60412
- 37 Tong Y, Feng Z, Kim J, et al. 3D printed stretchable triboelectric nanogenerator fibers and devices. *Nano Energy*, 2020, 75: 104973
- 38 Chen Y, Deng Z, Ouyang R, et al. 3D printed stretchable smart fibers and textiles for self-powered e-skin. *Nano Energy*, 2021, 84: 105866
- 39 Zhao C, Du T, Ge B, et al. Coaxial flexible fiber-shaped triboelectric nanogenerator assisted by deep learning for self-powered vibration monitoring. *Small*, 2024, 20: e2307680
- 40 Zhong J, Zhang Y, Zhong Q, et al. Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication. *ACS Nano*, 2014, 8: 6273–6280
- 41 Xu S, Nie W, Sun J, et al. Multi-mode and durable fiber triboelectric nanogenerator for power and sensor enabled by Hookean vascular stent structure. *Chem Eng J*, 2023, 472: 145088
- 42 Gang X, Guo Z H, Cong Z, et al. Textile triboelectric nanogenerators simultaneously harvesting multiple “high-entropy” kinetic energies. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 20145–20152
- 43 Ma L, Zhou M, Wu R, et al. Continuous and scalable manufacture of hybridized nano-micro triboelectric yarns for energy harvesting and signal sensing. *ACS Nano*, 2020, 14: 4716–4726
- 44 Gunawardhana K R S, Wanasekara N D, Wijayantha K G, et al. Scalable textile manufacturing methods for fabricating triboelectric nanogenerators with balanced electrical and wearable properties. *ACS Appl Electron Mater*, 2022, 4: 678–688
- 45 Somkuwar V U, Kumar B. Influence of the fabric topology on the performance of a textile-based triboelectric nanogenerator for self-powered monitoring. *ACS Appl Polym Mater*, 2023, 5: 2323–2335
- 46 Zhou L, Liu D, Ren L, et al. Reconfigurable fiber triboelectric nanogenerator for self-powered defect detection. *ACS Nano*, 2022, 16: 7721–7731
- 47 Dong S, Xu F, Sheng Y, et al. Seamlessly knitted stretchable comfortable textile triboelectric nanogenerators for E-textile power sources. *Nano*

- [Energy](#), 2020, 78: 105327
- 48 Wu R, Liu S, Lin Z, et al. Industrial fabrication of 3D braided stretchable hierarchical interlocked fancy-yarn triboelectric nanogenerator for self-powered smart fitness system. [Adv Energy Mater](#), 2022, 12: 2201288
 - 49 Dong K, Peng X, An J, et al. Shape adaptable and highly resilient 3D braided triboelectric nanogenerators as e-textiles for power and sensing. [Nat Commun](#), 2020, 11: 2868
 - 50 Xiong J, Cui P, Chen X, et al. Skin-touch-actuated textile-based triboelectric nanogenerator with black phosphorus for durable biomechanical energy harvesting. [Nat Commun](#), 2018, 9: 4280
 - 51 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. [Nano Energy](#), 2022, 92: 106739
 - 52 Guan X, Xu B, Wu M, et al. Breathable, washable and wearable woven-structured triboelectric nanogenerators utilizing electrospun nanofibers for biomechanical energy harvesting and self-powered sensing. [Nano Energy](#), 2021, 80: 105549
 - 53 Feng Z, Yang S, Jia S, et al. Scalable, washable and lightweight triboelectric-energy-generating fibers by the thermal drawing process for industrial loom weaving. [Nano Energy](#), 2020, 74: 104805
 - 54 Huang J, Hao Y, Zhao M, et al. All-fiber-structured triboelectric nanogenerator via one-pot electrospinning for self-powered wearable sensors. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2021, 13: 24774–24784
 - 55 Mi H Y, Jing X, Zheng Q, et al. High-performance flexible triboelectric nanogenerator based on porous aerogels and electrospun nanofibers for energy harvesting and sensitive self-powered sensing. [Nano Energy](#), 2018, 48: 327–336
 - 56 Ye C, Liu D, Peng X, et al. A hydrophobic self-repairing power textile for effective water droplet energy harvesting. [ACS Nano](#), 2021, 15: 18172–18181
 - 57 Seung W, Yoon H, Kim T Y, et al. Dual friction mode textile-based tire cord triboelectric nanogenerator. [Adv Funct Mater](#), 2020, 30: 2002401
 - 58 Yu Z, Chen M, Wang Y, et al. Nanoporous PVDF hollow fiber employed piezo–tribo nanogenerator for effective acoustic harvesting. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2021, 13: 26981–26988
 - 59 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. [Mater Today](#), 2020, 32: 84–93
 - 60 Khan A, Alam T, Rashid M, et al. Roll to roll triboelectric fiber manufacturing for smart-textile self-powered sensor and harvester. [Nano Energy](#), 2023, 111: 108378
 - 61 Chen T, Song W Z, Zhang M, et al. Acid and alkali-resistant fabric-based triboelectric nanogenerator for self-powered intelligent monitoring of protective clothing in highly corrosive environments. [RSC Adv](#), 2023, 13: 11697–11705
 - 62 Peng X, Dong K, Ye C, et al. A breathable, biodegradable, antibacterial, and self-powered electronic skin based on all-nanofiber triboelectric nanogenerators. [Sci Adv](#), 2020, 6: eaba9624
 - 63 Shen S, Yi J, Sun Z, et al. Human machine interface with wearable electronics using biodegradable triboelectric films for calligraphy practice and correction. [Nano-Micro Lett](#), 2022, 14: 225
 - 64 Zhao Z, Huang Q, Yan C, et al. Machine-washable and breathable pressure sensors based on triboelectric nanogenerators enabled by textile technologies. [Nano Energy](#), 2020, 70: 104528
 - 65 Zhao T, Fu Y, Sun C, et al. Wearable biosensors for real-time sweat analysis and body motion capture based on stretchable fiber-based triboelectric nanogenerators. [Biosens Bioelectron](#), 2022, 205: 114115
 - 66 Lin S, Yang W, Zhu X, et al. Triboelectric micro-flexure-sensitive fiber electronics. [Nat Commun](#), 2024, 15: 2374
 - 67 Kovalska E, Lam H T, Saadi Z, et al. Textile beeswax triboelectric nanogenerator as self-powered sound detectors and mechano-acoustic energy harvesters. [Nano Energy](#), 2024, 120: 109109
 - 68 Li C, Xu Z, Xu S, et al. Miniaturized retractable thin-film sensor for wearable multifunctional respiratory monitoring. [Nano Res](#), 2023, 16: 11846–11854
 - 69 Wen F, Zhang Z, He T, et al. AI enabled sign language recognition and VR space bidirectional communication using triboelectric smart glove. [Nat Commun](#), 2021, 12: 5378
 - 70 Jiang Y, Dong K, Li X, et al. Stretchable, washable, and ultrathin triboelectric nanogenerators as skin-like highly sensitive self-powered haptic sensors. [Adv Funct Mater](#), 2020, 31: 2005584
 - 71 Wang W, Yu A, Liu X, et al. Large-scale fabrication of robust textile triboelectric nanogenerators. [Nano Energy](#), 2020, 71: 104605
 - 72 Pandey P, Jung D H, Choi G J, et al. Nafion-mediated barium titanate-polymer composite nanofibers-based triboelectric nanogenerator for self-powered smart street and home control system. [Nano Energy](#), 2023, 107: 108134
 - 73 Li L, Chen Y T, Hsiao Y C, et al. Mycena chlorophos-inspired autoluminescent triboelectric fiber for wearable energy harvesting, self-powered sensing, and as human–device interfaces. [Nano Energy](#), 2022, 94: 106944
 - 74 Yang W, Gong W, Gu W, et al. Self-powered interactive fiber electronics with visual–digital synergies. [Adv Mater](#), 2021, 33: 2104681

- 75 Zhu Z, Bai Y, Wang L, et al. Compatible interface based self-charging fiber for wearable electronic. [Chem Eng J](#), 2024, 490: 151587
- 76 Han J, Xu C, Zhang J, et al. Multifunctional coaxial energy fiber toward energy harvesting, storage, and utilization. [ACS Nano](#), 2021, 15: 1597–1607
- 77 Yang Y, Yang Y, Huang J, et al. Electrospun nanocomposite fibrous membranes for sustainable face mask based on triboelectric nanogenerator with high air filtration efficiency. [Adv Fiber Mater](#), 2023, 5: 1505–1518
- 78 Cheng R, Dong K, Liu L, et al. Flame-retardant textile-based triboelectric nanogenerators for fire protection applications. [ACS Nano](#), 2020, 14: 15853–15863

Summary for “机电转化纤维及自供能可穿戴纺织器件”

Mechano-electric conversion fiber and self-powered wearable textile devices

Jizhong Zhao^{1,2}, Xiao Chen¹ & Kai Dong^{1,2*}

¹ Beijing Institute of Nanoenergy and Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China

² School of Nano Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: dongkai@binn.cas.cn

In today's data and technology-driven era, the rapid evolution and extensive layout of distributed wearable electronic devices has led to an exponential expansion in the demand for flexible and decentralized power systems. This burgeoning need has given rise to mechano-electric conversion fibers (MECFs), which have emerged as a crucial technology due to their wide range of application scenarios and remarkable energy conversion capabilities.

Herein, the fundamental principles, fabrication techniques, structural classifications, and diverse applications of MECFs in self-powered wearable devices are reported comprehensively and deeply. It also offers astute insights into the future development trends. MECFs operate through two primary processes: Contact electrification and electrostatic induction. The contact electrification effect, a phenomenon where specific materials acquire an electrical charge upon contact with a different material, forms the very foundation of MECFs' ability to transform mechanical energy into electrical energy.

The scalable fabrication techniques of MECFs hold the key to their large-scale production and commercial application. This review introduces several common preparation methods in detail. For example, electrospinning utilizes a high electric field to draw charged jet from the polymer solution to prepare micro-nano fibers. Solution spinning is a technology that polymer solution is extruded and solidified through a spinneret to form a fiber. Wet spinning entails the coagulation of extruded fibers in a liquid coagulation bath. In addition, melt spinning needs to melt the polymer at high temperatures, and then extruded through a spinneret to form fibers.

Structurally, MECFs can be classified into one-dimensional fiber devices with high aspect ratios, two-dimensional fabric devices that have braided and plane structures, and three-dimensional fabric devices with volume assembly characteristics. These diverse structural variations meet a wide spectrum of applications and can be customized for specific scenarios and extreme environments.

For low-power wearable electronic devices, the challenge of distributed energy supply has long been a bottleneck hampering its further development. MECFs present an innovative solution by directly converting mechanical energy into electrical energy *in situ*. Moreover, MECFs can be used as active self-powered sensors, which significantly broadens the application scenarios and enhances the development potential of wearable devices.

At present, the research and application of MECFs are in a state of rapid development. Future research directions should focus on further improving material properties and optimizing structural design to enhance energy conversion efficiency. Additionally, integrating MECFs with existing electronic systems to create smarter and more flexible wearable devices is a crucial area for future exploration.

In conclusion, MECFs represent a highly promising avenue for the advancement of self-powered wearable systems. Their unique ability to convert mechanical energy into electrical energy on demand holds significant potential to revolutionize the field of wearable electronics. As research progresses and technology matures, MECFs are expected to play a central role in the evolution of the next-generation of wearable technologies, driving continuous innovation and breakthroughs in this domain.

mechano-electric conversion fiber, wearable electronics, triboelectric nanogenerator, smart sensors, internet of things

doi: [10.1360/TB-2024-0647](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0647)