

# 摩擦纳米发电机基础研究和技术创新进展

蒲雄, 王杰, 王中林\*

中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400

**摘要** 摩擦纳米发电机(TENG)是一项新兴的实现机电能量转换的平台技术,在人工智能、物联网和高熵能源等多个领域都有巨大的应用潜力。近10年来,通过世界范围内的广泛努力,TENG的相关研究取得了长足的进步。综述了TENG在基础研究和技术创新2个方面的代表性进展;讨论了提高TENG输出性能的最新策略和方法;总结了TENG在不同领域的应用研究进展,并对TENG研究面临的挑战和机遇进行展望。

**关键词** 摩擦纳米发电机;电子转移;微纳能源;自驱动;蓝色能源

## 1 概述

摩擦电纳米发电机(TENG)自2012年首次报道以来,就引起了广泛关注<sup>[1]</sup>。TENG通过耦合接触起电和静电感应效应,可以将各种类型的机械能转换为电能,包括水波能、风能、振动能、身体运动能量等<sup>[2]</sup>。相比于传统技术,TENG对低频(<5 Hz)机械能收集有更出色的性能<sup>[3]</sup>;同时,TENG方便根据不用应用场景进行合理的结构设计和材料选择<sup>[4]</sup>。由于接触起电是一种普适效应,TENG可以用固相、液相甚至气相的介电材料、半导体材料或电解质材料实现,以适应不同的应用需求<sup>[5]</sup>。TENG

的潜在应用包括:(1)作为电子器件的电源器件,有效地收集环境机械能量,或者通过与储能器件集成,实现可以自充电的电源系统,通过实现能源自给的电源系统,TENG有望解决电子设备长时程供电困难、维护成本高的瓶颈问题<sup>[6]</sup>;(2)作为一种机电换能机制,TENG可以将微弱的各类机械信号(力、形变、运动等)转换为电信号,实现自驱动或主动式的传感技术<sup>[7]</sup>;(3)TENG具有输出电压高的特点,近来的研究甚至可以实现高达10 kV的电压输出<sup>[8]</sup>,因此,TENG可以应用为经济、安全、可靠的高压电源;(4)TENG可有效地收集低频水波能量,将自然界海洋环境中无时无刻存在的水波能量收集

收稿日期:2023-07-20;修回日期:2023-09-07

作者简介:蒲雄,研究员,研究方向为柔性能源与柔性电子材料,电子信箱:puxiong@binn.cas.cn;王中林(通信作者),中国科学院院士,研究员,研究方向为纳米能源,电子信箱:zlwang@binn.cas.cn

引用格式:蒲雄,王杰,王中林.摩擦纳米发电机基础研究和技术创新进展[J].科技导报,2023,41(19):29-42;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.003

利用,实现海洋蓝色能源<sup>[9]</sup>,助力“双碳”重大战略目标的实现<sup>[10]</sup>。此外,TENG的广泛研究也推动了相关的基础科学研究进展,比如接触起电的物理模型、摩擦伏特新物理效应、接触电致催化效应等,这些发现也必然进一步促进TENG的新应用技术研究。

近年来,TENG已发展成一个国内外广泛研究的前沿领域,并且是一个具有显著多学科交叉创新特征的领域。以Web of Science数据库为数据源,统计发现,2012—2022年,TENG相关研究论文逐年递增(图1)。从事相关研究的机构和研究者人数也越来越多,截至2022年底,通过发表文章可查询到已有83个国家和地区、1500多个机构从事TENG的研究<sup>[11-14]</sup>。

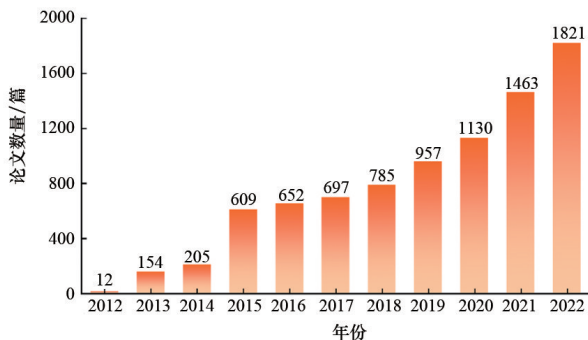


图1 2012—2022年发表的TENG相关的SCI论文统计

## 2 TENG 基础研究进展

TENG将机械能转换为电能通常涉及到2个过程:一是2个物体接触时在表面产生静电荷,称为接触起电过程;二是2个带电物体相对运动时在外电路产生感生电流,即静电感应过程。虽然,这个简单的物理图像可以理解TENG的工作原理,但实际上全面的理论描述可能要复杂得多,TENG的研究也推动了相关的基础科学的发展,而且也促使了一些新的物理效应的发现。

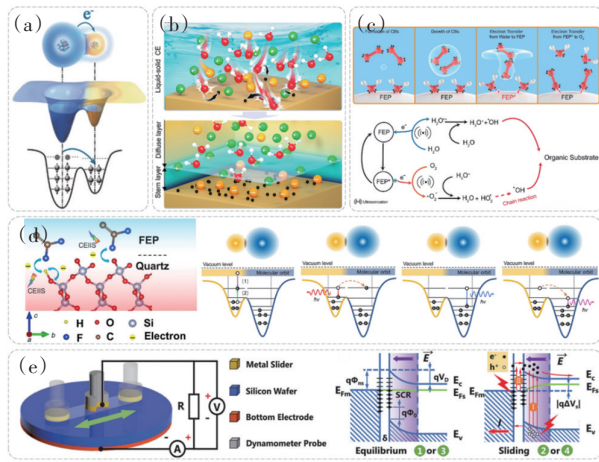
### 2.1 接触起电的电子转移模型

早在2600多年前就已发现摩擦起电的现象,但起电过程的科学解释仍然不全面。由于这种效应存在于几乎所有的固相、液相或气相材料中,但接触表面起电是产生于离子、电子,还是材料物质

在界面上的转移,长时间以来没有被统一接受的物理描述或模型。Wang等<sup>[15-16]</sup>报道的系统研究支持电子转移是固体、液体或气体界面带电过程的主要机制。有力支持这一结论的代表性实验示例如下。在金属-介电材料界面,Zhou等<sup>[17]</sup>利用开尔文探针力显微镜(KPFM)研究表明,介电材料表面上产生的电荷的极性可以通过施加到金属尖端的偏置电压来调节。通过偏置电压可以将金属的有效费米能级调节到高于介电材料的空表面态能级,介电材料表面将接受来自金属的电子而带负电;相反地,将金属的有效费米能级调节到低于介电材料的空表面态能级后,介电材料表面将带正电。Lin等<sup>[18]</sup>通过KPFM研究还表明,2种材料在不同温度下的接触起电规律也与电子转移机制一致。另一个有力的证据是,被束缚在介电材料表面态的电荷在高温下耗散,且耗散规律符合电子-热离子发射原理,因此证明介电材料表面起电过程是电子转移主导的<sup>[19]</sup>。基于这些实验证据,Xu等<sup>[19]</sup>提出了一个通用的接触起电模型(图2(a))。对于许多分子结构或电子结构明确的材料,可以用能带图来解释起电现象。然而,也有大量的材料难以用能带图来描述。因此,可以采用原子间相互作用势简化模型来解释起电过程<sup>[15,19]</sup>。当2个表面接触时,2种材料的2个原子必须足够近才能开始电子转移,并且距离必须在势阱的排斥区内,并得到了KPFM研究<sup>[20]</sup>和量子力学建模<sup>[21]</sup>的有力支持。分离后,转移的电子将以静电荷的形式被捕获在表面或缺陷状态。

### 2.2 液固界面起电的双电层模型

在液固界面,水滴在介电材料表面滑动产生的摩擦电荷也被证明是主要由电子转移贡献的,因为介电材料表面的大多数电荷也按照电子-热离子发射规律耗散,只有一小部分残留的“粘性”电荷可以归因于离子吸附<sup>[22]</sup>。这一发现使得对液固界面双电层(EDL)的形成产生了新的认识,Lin等<sup>[16]</sup>提出了一个两步模型。如图2(b)所示,该模型同时考虑了电子转移和离子吸附。在第1步中,液体与固体表面接触,溶液中的一些分子和离子(包括H<sub>2</sub>O、阳离子、阴离子等),将由于热运动和来自液体的压力作用而撞击固体表面。在撞击过程中,由



(a) 接触起电的电子转移模型:电子云和势能陷阱模型示意图;  
 (b) 液固界面起电的双电层模型及其形成的“两步”过程;  
 (c) 接触电催化机制:超声波处理过程中接触电催化现象及降解机制;(d) 界面电子跃迁诱导光发射的能量图:原子级全氟乙烯丙烯共聚物(FEP)与石英界面以及电子跃迁和相关光子发射的物理过程示意图;(e) 摩擦伏特器件示意图及能带结构图

图2 TENG基础研究进展

于原子的电子云重叠,电子将在固体原子和液体原子之间转移,同时电离反应也可能发生。脱离固体表面的断裂分子成为液体中自由迁移的离子,因此,在表面上将同时产生电子和离子。在第2步中,由于液体流动或湍流,靠近固体表面的液体分子脱离界面。分离后,如果电子的能量波动低于能量势垒,则转移到表面的大部分电子将留在表面上。接着,液体中的带相反电荷的离子将通过静电相互作用被吸引,进而向带电表面迁移,形成双电层。

### 2.3 接触电催化

Wang等<sup>[23]</sup>研究发现水与介电材料界面的电子交换过程可诱导水溶液中甲基橙的降解。该进展不仅有助于理解电子转移主导的接触起电机理,而且有望发展出有前景的新催化技术,即接触电致催化。如图2(c)<sup>[23]</sup>所示,接触电催化(CEC)利用接触起电诱导的表面极化电子来加速化学反应。超声波引起的空化气泡不仅可以产生多次接触分离,还可以通过降低各种活性物质生成的能垒来促进电子转移。在接触起电过程中,原始介电粉末和水之间转移的电子可用于直接催化反应,而无需使用传统催化剂。通过在介电粉末上引入微纳米结构以

增加接触面积或通过化学修饰作为提高表面电荷密度的手段,可以进一步提高催化效率。接触电催化是一种通用技术,对各种介电材料(如聚四氟乙烯、尼龙和橡胶)有效。这种催化原理极大地扩展了催化材料的选择范围,也使得催化过程和装置更简易、成本更低。

### 2.4 接触起电的界面光谱

Li等<sup>[24]</sup>研究表明,在2个介电材料表面之间的接触起电过程中检测到了光发射。这一结果不仅有力地支持了电子转移主导接触起电的观点,而且还发现光发射携带了界面原子电子能量的指纹信息,因此有望发展出新的光谱检测技术,即接触起电的界面光谱(CEIPES)。如图2(d)<sup>[24]</sup>所示,光子发射证明电子在接触起电过程中在界面处从一种材料中的一个原子转移到另一种材料中的另一个原子。使用3种可能的物理过程来理解接触起电中转移的电子电荷引起的光子发射:(1)接触起电诱导电子通过发射光子跃迁到一个原子中的较低能级;(2)通过能量共振转移到另一个原子的激发态,然后跃迁到该原子的较低能级;(3)在另一个原子中跃迁到更低的能级,然后由光子跃迁到更低的能级。当来自不同材料的原子彼此靠近时,能量共振转移而产生CEIPES。这为界面接触起电相对应的光谱学铺平了道路,也有望对理解固体、液体和气体之间的相互作用产生深远影响。

### 2.5 摩擦伏特效应

Zhang等<sup>[25]</sup>研究发现,当使用半导体材料作为摩擦材料时,可以产生直流电输出,这使得摩擦伏特这一新的物理效应被发现。如图2(e)<sup>[25]</sup>所示,摩擦伏特效应是指金属与半导体或半导体与半导体之间相对滑动时,在滑动界面处机械能激发非平衡电子空穴对,电子空穴对随之被内建电场分离,对外做电功,在外电路输出直流电的效应。摩擦伏特效应可类比于光伏效应,不同的是能量激发源是机械能,而光伏是光子能量激发电子空穴对。摩擦伏特效应被发现存在于金属-半导体相对滑动的肖特基界面<sup>[26]</sup>、P-N半导体的相对滑动界面<sup>[27]</sup>,甚至存在于液体和半导体之间的滑动界面<sup>[28]</sup>。对于机械能激发电子空穴对的物理描述,有主张是摩擦产生

的局部热效应引起的,但通常热效应的声子能量较低,不足以激发电子;有主张是表面接触时,原子间不断的成键—断键过程,类比于机械化学过程,释放的原子间键合能量激发了电子。Meng等<sup>[29]</sup>研究发现,即便在接触分离运动模式下,也能产生直流电,这一方面在很大程度上排除了热效应的可能性,另一方面也避免了机械磨损效应,提高了摩擦伏特器件的耐久性。此外,当使用低掺杂的GaN作为摩擦伏特材料时,发现输出电压可以高达上百伏<sup>[30]</sup>,说明在GaN表面积累的静电荷所导致的界面电场也参与了电子空穴对的分离过程。界面电场远高于扩散导致的内建电场,从而极大地提高了输出电压。总之,摩擦伏特效应是一个新物理效应,仍需要更深入的机制和应用研究。

## 2.6 动生麦克斯韦方程组

TENG发电的第2个过程是带电介质在机械运动下产生感应电流。如图3所示,这种感应电流的基本原理是麦克斯韦位移电流,它不是由移动的自由电荷传输产生的传导电流,而是由时变电场引起的<sup>[31-33]</sup>。接触起电使介电材料表面带静电荷,进一步地,带电表面的机械运动会使这些静电荷的电场随时间变化,从而产生位移电流。这种位移电流不同于由外部施加电场( $\mathbf{E}$ )引起的介质极化( $\mathbf{P}$ ),而是与表面静电荷的极化( $\mathbf{P}_s$ )有关。 $\mathbf{P}$ 取决于所施加的电场,但 $\mathbf{P}_s$ 是机械运动驱动的。因此,为了清楚地显示其物理意义并计算TENG的电输出,Wang等<sup>[31]</sup>在位移矢量中添加了极化项 $\mathbf{P}_s$ ,麦克斯韦位移电流( $\mathbf{J}_D$ )可以重写为

$$\mathbf{J}_D = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t} \quad (1)$$

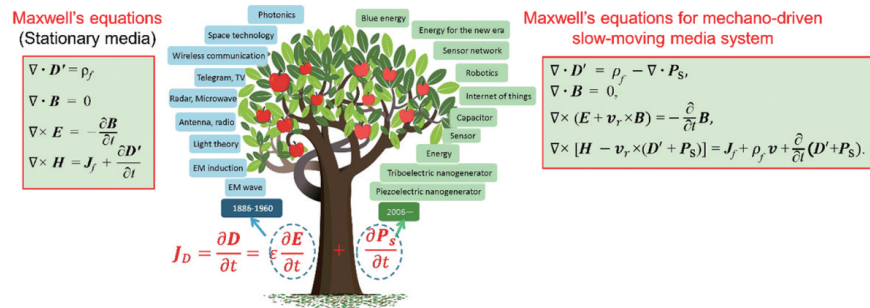


图3 动生麦克斯韦方程组

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{P}_s \quad (2)$$

式中, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, $\varepsilon$ 为介电常数, $t$ 为时间, $\frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t}$ 为由机械运动或外部应变场引起的,新添加的麦克斯韦位移电流的第2项 $\frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t}$ 对应于TENG在传感和能量收集等应用的理论基础。进一步地,对于以变速运动的介质系统(例如非惯性系统),对麦克斯韦方程组进行了如下扩展,以描述其电磁行为<sup>[33-35]</sup>

$$\nabla \cdot \mathbf{D}' = \rho_f - \nabla \cdot \mathbf{P}_s \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \mathbf{v}_r \times \mathbf{B}) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \quad (5)$$

$$\nabla \times [\mathbf{H} - \mathbf{v}_r \times (\mathbf{D}' + \mathbf{P}_s)] = \mathbf{J}_f + \rho_f \mathbf{v} + \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{D}' + \mathbf{P}_s) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{D}'$ 为相对静止介质系统中的电位移矢量; $\rho_f$ 为自由电荷密度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\rho_f \mathbf{v}$ 表示以一定速度 $\mathbf{v}$ 运动的自由电荷所产生的局部电流, $\mathbf{v}(r, t)$ 为介质的运动速度,是时间和空间的函数, $\mathbf{v}_r$ 为电荷相对于电路的运动速度; $\mathbf{J}_f$ 为外部施加振荡电流; $\frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t}$ 为感生位移电流。

该方程组为机械运动驱动的、在任意速度场下缓慢移动的介质的一般麦克斯韦方程,即动生麦克斯韦方程组。这些方程描述了随加速度运动系统的机械、电学和磁学性质之间的耦合,且基于以下假设:(1)速度随时间变化,且远小于光速( $v \ll c$ );(2)近似忽略了相对论效应。由于机械运动或形变,介质的边界是随时间变化的,例如其形状和体

积可以在任意速度场下变化。也就是说,这些方程是针对非惯性系统推导的,而不是针对惯性系统中匀速直线运动的介质。由于输入的机械能与电和磁耦合,它不满足洛伦兹协变。然而,从工程应用的角度来看,这些方程不仅适用于固体/软物质形式的带电介质,而且适用于液体或流体带电介质。

### 3 高性能摩擦纳米发电机

高性能 TENG 的快速研发极大地促进了该研究领域的发展,吸引了更多的研究人员投身于微纳能源与传感领域的研究,形成了良性循环。TENG 的功率密度与电荷密度的平方成正比,因此提高材料的表面电荷密度可以极大地提高 TENG 的输出功率密度。考虑到 TENG 中主要的电荷产生和电荷消散过程,Wang 等<sup>[36]</sup>提出了 TENG 的最大电荷密度限制方程,即 TENG 的最大表面电荷密度( $\sigma_{\max}$ )受限于摩擦起电( $\sigma_{\text{triboelectrification}}$ )、空气击穿( $\sigma_{\text{air breakdown}}$ )和介质击穿( $\sigma_{\text{dielectric breakdown}}$ )三者对应的最小电荷密度

$$\sigma_{\max} = (\sigma_{\text{triboelectrification}}; \sigma_{\text{air breakdown}}; \sigma_{\text{dielectric breakdown}})_{\min} \quad (7)$$

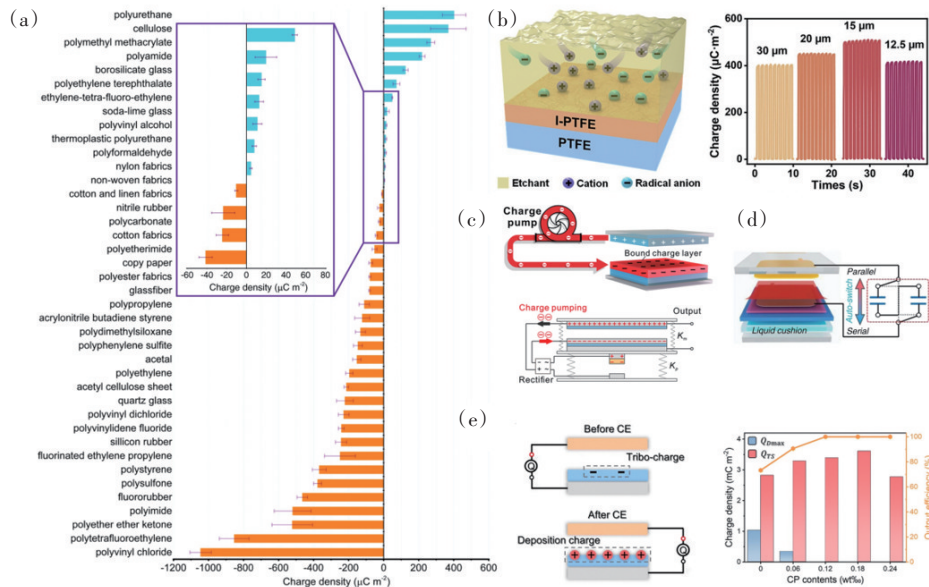
而 TENG 电荷密度的提升主要围绕如何突破

上述公式中对电荷密度限制最低的因素。

#### 3.1 材料创新进展

摩擦电序列是常用于描述材料摩擦起电性能优劣的工具之一,但是传统的摩擦电序列是通过材料两两之间摩擦起电的电荷极性进行的排序,没有考虑摩擦起电转移的电荷量,应用于 TENG 的材料选择时具有一定的局限性。Zou 等<sup>[37]</sup>基于受控的实验平台和环境报道了一个量化的摩擦电序列,由于在该序列中同时考虑了转移电荷的极性和数量,因此对于 TENG 的材料选择可以提供很好的参考。在此基础上,Liu 等<sup>[38]</sup>结合 TENG 技术和真空环境报道了一个全新的摩擦电序列,在尽可能避免空气击穿和环境因素的情况下,该序列一定程度上可以反映材料的固有属性,并且有助于了解各种材料的最大摩擦电荷密度(图 4(a))。

此外,通过物理修饰在摩擦材料表面制备微纳结构来增加实际接触面积,或者通过化学修饰在摩擦材料表面引入容易得失电子的官能团,是一种理论上可以有效提高任何材料摩擦电性能的简单、直接的方法。Liu 等<sup>[39]</sup>采用反复流变锻造技术可以获得具有优异机械性能和良好透光率的电介质薄



(a) 真空条件下材料摩擦起电性能排序;(b) 使用自由基离子转移补偿电晕极化后 FEP 膜的电荷耗散来提高 TENG 的性能;(c) 利用电荷泵浦策略提高 TENG 的性能;(d) 自激励提高电荷泵浦策略的电荷累积速率;(e) 调节薄膜的载流子陷阱状态实现了 100% 的电荷输出效率

图 4 TENG 的起电材料与电荷激励策略

膜,由于表面官能团的组成、结晶度和介电常数的有效调节,该方法制备的氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)薄膜可以保持  $510 \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$  的高电荷密度。该团队通过使用自由基离子转移来补偿电晕极化后 FEP 膜的电荷耗散,在接触分离模式 TENG(CS-TENG)和滑动模式 TENG(S-TENG)中分别实现了  $525 \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $1237 \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$  的高输出电荷密度(图 4(b))<sup>[40]</sup>。因此,在实际器件制备时,应综合考虑材料的包括起电性能在内的多项性能指标。首先,应选择摩擦电序列中起电性能差异尽量大的 2 种材料;其次,选择表面修饰方案时,需要综合考虑耐磨鲁棒性能、表面亲疏水性能、起电能力、介电常数、厚度等参数指标,介电常数高、厚度薄的介电材料也有利于获得高的电学输出,表面疏水性则有利于减小环境湿度影响;最后,如果需要实现高弹性、透光性等多功能性时,也可以设计特定功能介电聚合物来实现。

### 3.2 电荷泵浦激励

为了突破 TENG 输出性能受限于摩擦起电产生的电荷密度,Xu 等<sup>[41]</sup>和 Cheng 等<sup>[42]</sup>于 2018 年先后报道了一种采用电荷泵浦策略来提高 TENG 中电荷累积速率的方法(图 4(c)),即采用一个 TENG 作为高压电源(泵 TENG)与另外一个可变电容器(主 TENG)并联,在其运动过程中,泵 TENG 利用自身产生的高电压输出为主 TENG 提供源源不断的电荷,主 TENG 作为平行板电容器在其接触分离的过程中利用电容容值大小发生改变对外输出交流电。由于利用了 TENG 的高电压输出和平行板电容器大的电容值,采用电荷泵浦策略在大气条件中实现了高达  $10^{20} \mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$  的输出电荷密度。Liu 等<sup>[43]</sup>提出了一种自激励电路的策略,进一步提高 TENG 的电荷累积速率(图 4(d))。自激励电路可以在 TENG 接触分离的过程中自行改变电容器的串并联方式,输出电荷呈指数增长的趋势,该策略成功地将  $5 \mu\text{m}$  Kapton 薄膜的电荷密度提高到  $1.25 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。通过碳/硅胶电极进一步提高 TENG 接触效率, $4 \mu\text{m}$  聚酰亚胺(PI)薄膜的有效表面电荷密度可以提升  $2.38 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。通过调控介质薄膜厚度和介电常

数,Li 等<sup>[44]</sup>以及 Wu 等<sup>[45]</sup>分别利用  $9 \mu\text{m}$  聚偏氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))薄膜以及  $7 \mu\text{m}$  锆钛酸铅-聚偏氟乙烯(PZT-PVDF)薄膜,实现了  $2.2 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$  及  $3.53 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$  的高输出电荷密度。Wu 等<sup>[46]</sup>通过调节介电聚合物薄膜的载流子陷阱状态使电荷捕获效应失效,从而实现了 100% 的实际输出效率,输出电荷密度达到了  $4.13 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 4(e))。

### 3.3 抑制/利用空气击穿

电荷激励策略可以极大地提升 TENG 的电荷累积速率,突破摩擦起电对 TENG 输出性能的限制,但其电荷输出仍受限于空气击穿。一方面,可以采用超薄以及超高介电常数薄膜,采用高真空的环境,调节气氛和气压,添加界面液体润滑剂等方式在一定程度上抑制空气击穿,从而实现超高输出电荷密度;另一方面,也可以利用空气击穿来发电。

Liu 等<sup>[47]</sup>基于摩擦起电和静电击穿效应制作了一种新型直流摩擦纳米发电机(DC-TENG)(图 5(a)),利用电荷收集电极和摩擦介质层之间形成的强电场来电离空气,从而在外部电路中产生直流输出。通过采用双介质层优化摩擦起电过程,或者通过调节环境因素如温度、气氛和气压等策略优化静电击穿过程,可以进一步提高 DC-TENG 的电荷输出。Zhao 等<sup>[48]</sup>采用微结构电极设计,将 DC-TENG 的输出电荷密度提高到  $5.4 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 5(b)),随后通过材料选择将输出电荷密度提高至  $8.8 \text{mC}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[49]</sup>。Dai 等<sup>[50]</sup>发现 DC-TENG 存在有害击穿,限制了其性能的提升。Zhang 等<sup>[51]</sup>系统揭示了 DC-TENG 中的 3 种放电域,构建了“水桶模型”来解释 3 个击穿域之间的联系,并通过抑制第 2 域击穿,可以在很宽的负载范围内将 DC-TENG 的输出功率提高 1 个数量级(图 5(c))。此外,Shan 等<sup>[52]</sup>设计了一种双介质击穿 TENG,当滑块周期性地左右滑动时,两侧电极与 PA 以及 PTFE 之间发生电晕放电,从而在外部回路产生信号输出(图 5(d))。通过摩擦起电、静电感应和静电放电的耦合,Zeng 等<sup>[53]</sup>提出了另外一种放电 TENG,通过 2 个摩擦介质层之间的气隙放电,利用背电极通过静电感应对外产生输出(图 5(e))。

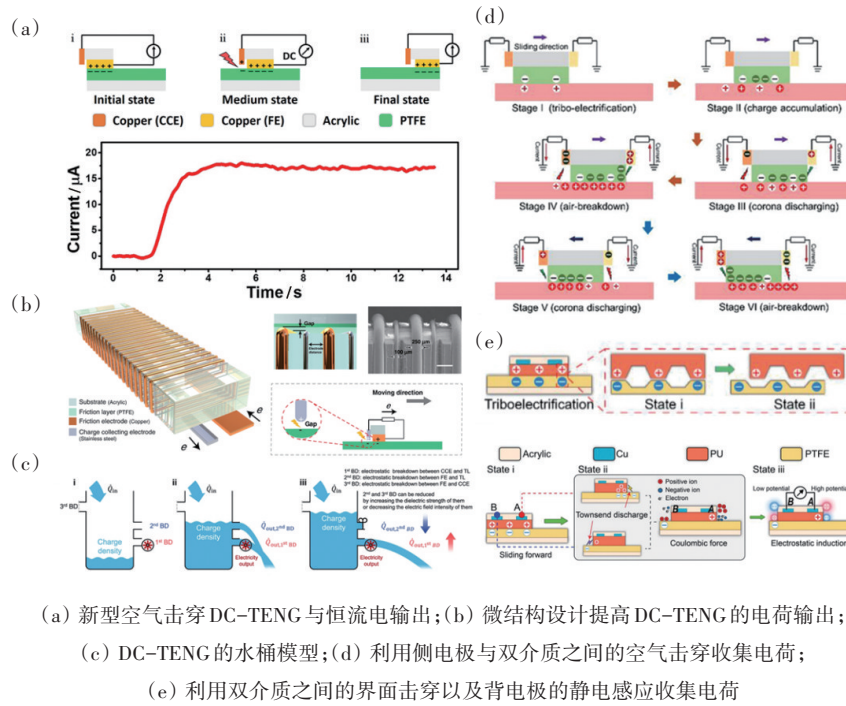


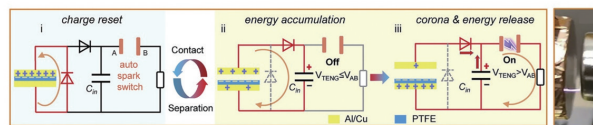
图5 利用空气击穿效应的直流TENG

### 3.4 电源管理

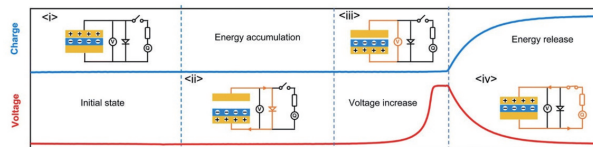
电源管理电路可以将TENG输出的高电压和低电流转换成电子器件需要的低电压和恒定的电流输出,提高TENG输出的电能到电子器件获得的电能之间的能量转换效率,同时为电子器件提供持续、稳定的供能。通常,TENG的电源管理电路需要考虑2个问题:(1)如何从TENG中获得更多的能量;(2)针对TENG的能量特征设计高效的降压电路。

转盘式TENG由于输出能量高、电流频率高的特点,选择与之阻抗相匹配的变压器就可以实现高的能量转换效率。大多数的TENG由于工作频率低,输出电流小,匹配阻抗非常大,常用的变压器很难对TENG的输出能量进行有效的管理,因此采用电感、电容以及续流二极管所组成的LC电路作为TENG的降压电路是一个很好的选择。如何实现TENG更高的能量输出循环,并设计与之相匹配的降压电路,是近几年研究人员关注的重点。以CS-TENG为例,其能量输出循环具有显著的不对称性,分开过程的电压明显高于接触过程的电压。根据半波电路连接方式的不同,CS-TENG可以产生高电压低电荷(HV-LQ)的能量输出循环和高电荷低

电压(LV-HQ)的能量输出循环。Wang等<sup>[6]</sup>利用大面积、大分离距离的CS-TENG实现了具有HV-LQ特征的能量输出循环(图6(a)),并通过优化空气开关以及电感设计,实现了 $110 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 的输出能量密度。Gao等<sup>[54]</sup>提出可以利用接触时CS-TENG形成的固有电容来简化电源管理电路的设计,同时降低反复试错的成本,通过利用半波电路抑制了CS-TENG分离时产生的空气击穿现象,实现了具有LV-HQ特征的能量输出循环(图6(b)),并利用具有低漏电流的薄膜电容器和小漏磁的磁屏蔽电感组成的LC电路,获得了 $100 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 的输出能量密度。此外,电源管理电路中的开关也是该领域的研



(a) 高电压低电荷输出的能量循环过程



(b) 低电压高电荷输出的能量循环过程

图6 TENG的电源管理策略

究重点,不同的工作模式及能量特征会使得 TENG 对开关产生不同的需求。具有高电压特征的 TENG 往往选用空气开关,具有固定运动模式的可以选择机械开关,而可以实现无源控制的 SCR (silicon controlled rectifier, 可控硅) 晶闸管则可以满足大多数能量密度较低的 TENG 的电源管理需求。总之, TENG 高效电源管理电路的设计将极大地推动 TENG 走向广泛的实际应用。

## 4 技术创新与应用进展

基于 TENG 的独特优势,近几年关于 TENG 的相关技术研究和创新不断取得进步,尤其是在微纳能源、自驱动传感、蓝色能源和高压电源等方面取得了许多创新性的成果。

### 4.1 微纳能源

TENG 具有尺寸小、质量轻、易于小型化、灵活性高等独特的优势,可以将生物体和环境中广泛存在的机械能转换为电能,从而为微小型电子器件提供持续不断的电能。目前, TENG 在微纳能源方面的应用主要包括植入式电子器件的供能、柔性可穿戴电子器件的供能,以及环境物联网电子器件的供能。TENG 结合封装材料和技术,能将肌肉运动的能量转换成电能,实现具备稳定工作性能的可植入式 TENG,并成功驱动心脏起搏器等电子器件。Ouyang 等<sup>[55]</sup>提出了一种基于 TENG 的植入式共生心脏起搏器,它主要由植入式 TENG、电源管理模块以及心脏起搏器 3 个单元组成,通过收集心脏跳动的能量,为起搏器自身提供电能,实现了单次心脏跳动产生的电能可以驱动心脏起搏器工作一次,并在大型哺乳动物体内成功实现了能量收集、存储和使用。Hinchet 等<sup>[56]</sup>提出了一种基于 TENG 的超声能量收集技术,为解决植入式医疗电子器件的可靠电力输送提供了可能。基于柔性和可变形材料的 TENG 具备形状自适应性,为可穿戴电子器件的供能提供了解决方案。Wang 等<sup>[57]</sup>制备了硅胶基 TENG,将其置于鞋内,可收集人体运动能量为电子器件持续供能。此外, Liu 等<sup>[47]</sup>利用摩擦起电结合静电击穿效应,设计了直流电输出的 DC-TENG,在

不需要整流桥和能量存储单元的前提下可以为电子手表供电,为机械能的高效收集提供了新的思路。海量传感器是物联网发展的基石,其广泛分布对电能的需求提出了新的挑战。TENG 能够高效收集环境中各种形式的机械能,为环境物联网电子器件的供能提供解决方案。例如,通过收集环境风能实现实时环境检测与保护<sup>[58]</sup>、自驱动电化学重金属治理和有机污染物降解<sup>[59]</sup>等。此外,兔毛<sup>[60]</sup>、金属玻璃<sup>[61]</sup>等材料的使用,进一步提升了 TENG 作为微纳能源的输出性能和耐久性,有望实现电子器件长期的自供能。未来基于 TENG 实现电子器件的自驱动化可以摆脱电源的制约,是物联网发展微小集成化、无线移动化、功能智能化的重要技术支撑。

### 4.2 自驱动传感

基于 TENG 的自供电传感器可以在没有外部电源的情况下获取物体的运动状态和周围环境信息并将其转换为电信号,实现主动式的传感,而且基于 TENG 的传感器具有低成本、多形态、易安装、精度高等优点,在矢量传感器、可穿戴设备、生物医疗、人机交互、化学和环境监测、智慧交通和智慧城市、智能机器人等研究领域显示出潜在的应用前景。矢量传感器是基于 TENG 的机械运动实现信号监测,例如,直线或旋转运动监测、多维运动及加速度监测、压力传感器和液位监测等,对推动摩擦电式传感器在物理量监测的发展具有重要意义。基于 TENG 的可穿戴传感器可直接穿戴或集成到用户的服饰中,制备成智能头盔、智能手环、智能鞋、电子皮肤等可穿戴设备,用以俘获人体运动中的能量,实现人体信息如行走、奔跑、手势、触觉和感知等信息监测。Zu 等<sup>[62]</sup>通过 3D 打印多角度的 TENG 组成的柔性曲面传感阵列,可以实现对头部撞击的实时监测(图 7(a))。在生物医疗领域, TENG 不仅可以放置在耳蜗或者皮肤表面,监测低频脉搏或者关节和肌肉轻微运动,还能植入到体内作为主动传感器,监测心率等生理和病理特征。在人机交互应用中,通过将 TENG 集成在指尖、眼镜、键盘等上面,已经实现了多点触觉轨迹映射、无线家电遥控、智能安全系统建立等功能。此外, TENG 可实现轮胎状况监控、驾驶员行为监测分析、智能

控制、边球判断和落点分布智能分析,推进其在智慧交通和智慧城市等方面的应用。 TENG 在机器人领域的应用主要集中在自驱动传感和高压驱动方面,例如,设计可拉伸摩擦电-光智能皮肤,实现机器人手的多维触觉和手势感测;将摩擦皮肤集成到软体机械手中,提升软体机器人执行各种主动感知和交互任务的能力;构建智能机器人应用中外部助听器的电子听觉系统。 Xu 等<sup>[63]</sup>使用 TENG 和压电技术的耦合,开发出了一款自驱动轻量化原位监测翼面气流分离程度的新型失速传感系统,可以实现失速监测的数字化,可视化与阵列化感知(图 7 (b))。在产业转化方面,已有多家初创企业在诸如自驱动智能鞋、智能安全防护键盘,以及医疗康复监测等方面实现了应用转化。

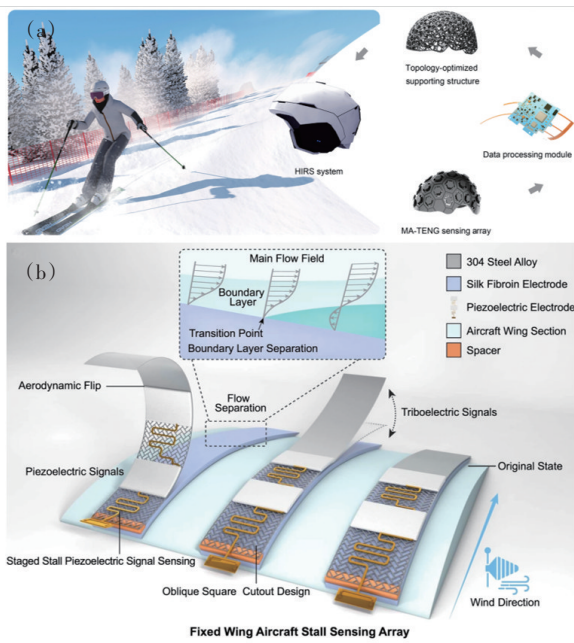
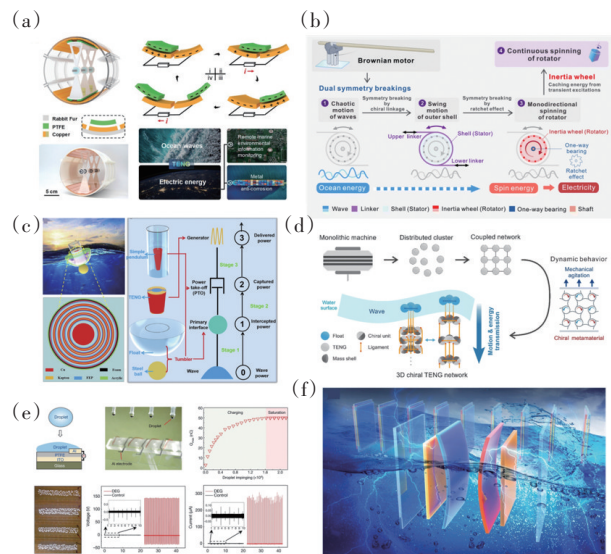


图 7 TENG 作为自驱动传感器在智能头盔(a)和飞行器失速预警(b)中的应用

### 4.3 蓝色能源

蓝色能源技术是利用封装密闭的 TENG 单元组成发电网络,使其分布于海面及水下,将海洋能转换为电能。目前, TENG 在波浪能收集方面已取得一定的进展。在器件设计方面,主要分为密闭防水结构和液固界面摩擦结构。例如, Pang 等<sup>[64]</sup>在摆动结构中加入兔毛作为柔性摩擦层,可以在降低阻力的同时,提高能量转换效率至 23.6%(图 8(a))。

Qiu 等<sup>[65]</sup>受布朗电极启发设计的非对称性结构的 TENG 网络单元,可以将不规则的波浪激励转换为内部动子的单向旋转,并利用惯性轮缓存来自每个瞬态激励的能量,高效提取不规则的水波能(图 8 (b))。 Zhang 等<sup>[66]</sup>利用单摆结构的 TENG,通过共振效应收集全方位以及频率变化的水波能量(图 8 (c))。经过各种结构上的优化,在海洋能收集方面最终实现了  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$  的超高功率密度,在低频水波驱动下,产生  $34.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$  的功率密度。为了收集较大范围的海洋蓝色能源,可以构建 TENG 的网络,例如, Li 等<sup>[67]</sup>基于三维电极-小球结构发电单元,构建了 18 个单元的示范网络,平均功率密度达到了  $2.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ ,可用于自驱动传感和无线信号传输,在此基础上,通过三维手性网络的设计,使得不平衡单元之间具有手性连接,这赋予网络灵活性、水中的超弹性和吸波行为(图 8(d))。在固液 TENG 方面, Xu 等<sup>[13]</sup>通过液固接触从冲击水滴中收集能量,一个  $100 \mu\text{L}$  的水滴从 15 cm 的高度撞击到器件表面,即可产生 140 V 的电压、 $200 \mu\text{A}$  的电流(图 8 (e))。利用相反的动态双电层设计的 TENG, Liang 等<sup>[68]</sup>在不规则水浪下,实现了  $60 \mu\text{A}$  的电流输出和



(a) 软接触摆状结构的 TENG; (b) 受布朗电机启发设计的非对称性结构的 TENG; (c) 单摆结构的 TENG 用于全方位海洋能收集; (d) 三维手性连接的 TENG 网络用于收集海洋能; (e) 液固 TENG 用于收集水滴能; (f) 动态双电层的液固 TENG 阵列用于收集水波能

图 8 TENG 在收集蓝色能源方面的应用

60 V 的电压输出(图 8(f))。而为了最大限度地综合利用各种能源形式或能源技术,提高能量转化效率,TENG 还可与太阳能电池、风力涡轮等其他的能源收集方式结合收集复合能源,并设计与之相匹配的电源管理电路,最终实现 TENG 在海洋环境自驱动系统中的广泛应用,例如,基于 TENG 的自供电海上航标灯已经进入现场海试阶段。

#### 4.4 高压电源

TENG 具有高电压、低电流的输出特性,因此作为新型高压电源具有前所未有的便携性和安全性。此外,体积小、低成本等突出优点也使其在高压电源领域中具有巨大潜力。目前,利用 TENG 的高压已成功实现了汽车尾气过滤处理和室内外空气净化、高电压过程驱动(例如静电纺丝、电子场发射和微等离子体等)<sup>[69]</sup>。Guo 等<sup>[70]</sup>最近报道 TENG 产生的超高电压可以使空气分子在碳钎纤维电极发生局部电离,从而产生负空气离子用以净化空气。使用手掌大小的器件,一次滑动即可产生  $1 \times 10^{13}$  个负空气离子,使颗粒物( $PM_{2.5}$ )可从  $999 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  迅速减少至接近 0。摩擦电空气净化系统因其具有零耗材、低功耗、高净化效率等特有优势,已经成功实现了产业化。此外,Li 等<sup>[71]</sup>通过 TENG 的高压实现对农作物的电刺激,以缩短其发芽周期,加速植物幼苗的生长。在微风驱动下,毛发构型的 TENG 可以持续输出  $\sim 3$  kV 的稳定高压,使得豌豆发芽速度和产量显著提高约 26.3% 和 17.9%。该研究成果展示了一种用于作物生长的自驱动电刺激系统的创新概念,在未来农业领域中有着巨大的应用潜力。

## 5 展望

TENG 基础研究和应用研究 2 个方面都激发了全球范围的广泛兴趣和持续创新。TENG 的研究领域在短短 10 年的时间里得到了巨大发展,预计在未来的 10 年里,其发展也将远超预期,尤其是考虑到 TENG 在清洁能源、智能电子产品、传感器、医疗电子、物联网等领域都具有巨大的应用潜力<sup>[5]</sup>。在未来研究中,可能需要格外关注以下方面。

1) TENG 基础研究至关重要。基础理论的研

究是发展 TENG 新材料、新器件和新应用的前提。如何在微观尺寸表征界面的电荷转移是长久以来的关键科学问题,这也是 TENG 领域的基础研究挑战。近来,TENG 研究领域发展了一些新的方法来研究这一基础问题,例如,利用多种外场调控手段(热、磁、光等)观测表面电荷转移现象,在固液、固固、固气等界面定量分析论证了电子转移模型。未来,仍需要发展更直接的探测方法,以获得有力的实验证据。TENG 基础研究使得一系列基础问题的理解更深入或导致一些新的物理效应的发现,例如,接触起电的电子转移模型、接触电双电层模型、接触电界面光谱、摩擦伏特新效应、接触电催化新效应等。一方面,这些基础问题仍需更深入地研究,以实现基础理论到实际应用的全链条研究,例如,在摩擦伏特效应的电子激发机制研究基础上,通过能带工程提高摩擦伏特材料和器件的性能,进一步解决摩擦伏特器件的实用性、耐久性等工程问题;另一方面,TENG 领域也期待更多基础理论的新突破,例如机械-电-磁三者在非惯性介质系统的耦合及潜在的基础应用研究。

2) 高性能 TENG 是关键。高性能的 TENG 需要材料、器件和电路 3 个方面的合力研究。对基于静电感应效应的 TENG,提高静电荷密度是提高机电转换的根本。通过介电聚合物材料的改性,可以增加捕获静电荷的势能陷阱位点、提高静电荷的稳定性;电荷泵浦也已经被证明是提高静电荷密度的重要方法;而电路管理则是调理 TENG 输出、将 TENG 电学输出高效利用的关键。如前所述,摩擦电材料表面电荷密度受限于静电击穿等物理极限,如何突破极限获得更高电荷密度和电输出功率是未来的挑战。此外,在静电感应效应之外,合理利用放电效应也是提高 TENG 输出的有效方式。如何规模化制备高性能摩擦电材料和器件,也是领域需要深入的关键工程问题。

3) TENG 应用研究要多点突破。TENG 的应用领域非常广泛,作为微纳能源器件、自驱动传感器、高压电源和蓝色能源在各个领域都有巨大的潜力。但是,对于不同的应用领域,研究的重点会有差异。作为微纳能源器件,提高输出功率是核

心,器件的小型化、柔性化、多功能化、可植入化在特定的应用场景需要针对性地设计;作为自驱动传感器件,传感性能的灵敏度、可重复性是关键,考虑到TENG独特的机电换能机制,需要探索传统力敏传感器件所力不能及的应用需求;作为高压电源,TENG已经在静电除尘、空气净化等方面取得实际应用,而对于TENG驱动的高压电子器件,仍需要探索合适的、解决市场或技术痛点的应用场景;作为蓝色能源,TENG的潜在影响是巨大的,目前已在基于TENG的自供能航标关键技术上取得重要突破,为TENG技术在海洋物联网节点稳定供能领域的实际应用奠定了重要基础,未来的重点是工程化或规模化的应用验证或示范,以及多能源体系的复合。尽管,TENG已有一些产业转化的突破,未来在各应用领域需要重点考虑相比于竞争技术的优势,以便差异化竞争,找准应用突破口。总之,TENG的应用研究取得了极大的发展,而且可以预期未来在多个领域实现应用突破。

### 参考文献(References)

- [1] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328–334.
- [2] Lin Z M, Zhang B B, Guo H Y, et al. Super-robust and frequency-multiplied triboelectric nanogenerator for efficient harvesting water and wind energy[J]. *Nano Energy*, 2019, 64: 103908.
- [3] Shi B, Liu Z, Zheng Q, et al. Body-integrated self-powered system for wearable and implantable applications[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(5): 6017–6024.
- [4] Liu W, Wang Z, Hu C. Advanced designs for output improvement of triboelectric nanogenerator system[J]. *Materials Today*, 2021, 45: 93–119.
- [5] Wang Z L. Triboelectric nanogenerator (TENG)—Sparking an energy and sensor revolution[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137.
- [6] Wang Z, Liu W, He W, et al. Ultrahigh electricity generation from low-frequency mechanical energy by efficient energy management[J]. *Joule*, 2021, 5(2): 441–55.
- [7] Jin T, Sun Z, Li L, et al. Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5381.
- [8] Liu J, Zhou L, Gao Y, et al. Achieving ultra-high voltage ( $\approx 10$  kV) triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(21): 2300410.
- [9] Khan U, Kim S W. Triboelectric nanogenerators for blue energy harvesting[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(7): 6429–6432.
- [10] Chen B, Wang Z L. Toward a new era of sustainable energy: Advanced triboelectric nanogenerator for harvesting high entropy energy[J]. *Small*, 2022, 18(43): e2107034.
- [11] Jiang F, Thangavel G, Zhou X, et al. Ferroelectric modulation in flexible lead-free perovskite schottky direct-current nanogenerator for capsule-like magnetic suspension sensor[J]. *Advanced Materials*, 2023: e2302815.
- [12] Jin H, Yoon S G, Lee W H, et al. Identification of water-infiltration-induced electrical energy generation by ionovoltaic effect in porous CuO nanowire films[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(10): 3432–3438.
- [13] Xu W, Zheng H, Liu Y, et al. A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density[J]. *Nature*, 2020, 578(7795): 392–396.
- [14] Zhang Q, Liang Q, Nandakumar D K, et al. Shadow enhanced self-charging power system for wave and solar energy harvesting from the ocean[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 616.
- [15] Wang Z L, Wang A C. On the origin of contact-electrification[J]. *Materials Today*, 2019, 30: 34–51.
- [16] Lin S, Chen X, Wang Z L. Contact electrification at the liquid-solid interface[J]. *Chemical Reviews*, 2021, 122(5): 5209–5232.
- [17] Zhou Y S, Wang S, Yang Y, et al. Manipulating nanoscale contact electrification by an applied electric field [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1567–1572.
- [18] Lin S, Xu L, Xu C, et al. Electron transfer in nanoscale contact electrification: Effect of temperature in the metal-dielectric case[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(17): e1808197.
- [19] Xu C, Zi Y, Wang A C, et al. On the electron-transfer mechanism in the contact-electrification effect[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): e1706790.
- [20] Zhou Y S, Liu Y, Zhu G, et al. In situ quantitative study of nanoscale triboelectrification and patterning[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(6): 2771–2776.
- [21] Willatzen M, Wang Z L. Theory of contact electrification: Optical transitions in two-level systems[J]. *Nano Energy*, 2018, 52: 517–523.
- [22] Lin S, Xu L, Chi Wang A, et al. Quantifying electron-

- transfer in liquid–solid contact electrification and the formation of electric double–layer[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 399.
- [23] Wang Z, Berbille A, Feng Y, et al. Contact–electro–catalysis for the degradation of organic pollutants using pristine dielectric powders[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 130.
- [24] Li D, Xu C, Liao Y, et al. Interface inter–atomic electron–transition induced photon emission in contact–electrification[J]. *Science Advances*, 2021, 7(39): eabj0349.
- [25] Zhang Z, Jiang D, Zhao J, et al. Tribovoltaic effect on metal–semiconductor interface for direct–current low–impedance triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(9): 1903713.
- [26] Meng J, Guo Z H, Pan C X, et al. Flexible textile direct–current generator based on the tribovoltaic effect at dynamic metal–semiconducting polymer interfaces[J]. *ACS Energy Letters*, 2021, 6(7): 2442–2450.
- [27] Xu R, Zhang Q, Wang J Y, et al. Direct current triboelectric cell by sliding an n–type semiconductor on a p–type semiconductor[J]. *Nano Energy*, 2019, 66: 104185.
- [28] Lin S Q, Chen X Y, Wang Z L. The tribovoltaic effect and electron transfer at a liquid–semiconductor interface [J]. *Nano Energy*, 2020, 76: 105070.
- [29] Meng J, Pan C X, Li L W, et al. Durable flexible direct current generation through the tribovoltaic effect in contact–separation mode[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(12): 5159–5167.
- [30] Wang Z Z, Zhang Z, Chen Y K, et al. Achieving an ultrahigh direct–current voltage of 130 V by semiconductor heterojunction power generation based on the tribovoltaic effect[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(6): 2366–2373.
- [31] Wang Z L. On Maxwell’s displacement current for energy and sensors: The origin of nanogenerators[J]. *Materials Today*, 2017, 20(2): 74–82.
- [32] Wang Z L. On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell’s equations[J]. *Nano Energy*, 2020, 68: 104272.
- [33] Wang Z L. On the expanded Maxwell’s equations for moving charged media system–General theory, mathematical solutions and applications in TENG[J]. *Materials Today*, 2022, 52: 348–363.
- [34] Wang Z L. Maxwell’s equations for a mechano–driven, shape–deformable, charged–media system, slowly moving at an arbitrary velocity field  $v(r, t)$  [J]. *Journal of Physics Communications*, 2022, 6(8): 085013.
- [35] Wang Z L. The expanded Maxwell’s equations for a mechano–driven media system that moves with acceleration[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2023, 37(16): 2350159.
- [36] Wang J, Wu C, Dai Y, et al. Achieving ultrahigh triboelectric charge density for efficient energy harvesting[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 88.
- [37] Zou H, Zhang Y, Guo L, et al. Quantifying the triboelectric series[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1427.
- [38] Liu D, Zhou L, Cui S, et al. Standardized measurement of dielectric materials’ in trinsic triboelectric charge density through the suppression of air breakdown[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 6019.
- [39] Liu Z, Huang Y, Shi Y, et al. Fabrication of triboelectric polymer films via repeated rheological forging for ultrahigh surface charge density[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4083.
- [40] Yang P, Shi Y, Tao X, et al. Radical anion transfer during contact electrification and its compensation for charge loss in triboelectric nanogenerator[J]. *Matter*, 2023, 6: 1295–1311.
- [41] Xu L, Bu T Z, Yang X D, et al. Ultrahigh charge density realized by charge pumping at ambient conditions for triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2018, 49: 625–633.
- [42] Cheng L, Xu Q, Zheng Y, et al. A self–improving triboelectric nanogenerator with improved charge density and increased charge accumulation speed[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3773.
- [43] Liu W, Wang Z, Wang G, et al. Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1426.
- [44] Li Y, Zhao Z, Liu L, et al. Improved output performance of triboelectric nanogenerator by fast accumulation process of surface charges[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11: 2100050.
- [45] Wu H, He W, Shan C, et al. Achieving remarkable charge density via self–polarization of polar high–k material in charge–excitation triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34: 2109918.
- [46] Wu H, Wang J, He W, et al. Ultrahigh output charge density achieved by charge trapping failure of dielectric polymers[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16: 2274–2283.
- [47] Liu D, Yin X, Guo H, et al. A constant current triboelec-

- tric nanogenerator arising from electrostatic breakdown [J]. *Science Advances*, 2019, 5: eaav6437.
- [48] Zhao Z, Dai Y, Liu D, et al. Rationally patterned electrode of direct-current triboelectric nanogenerators for ultrahigh effective surface charge density[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 6186.
- [49] Zhao Z, Zhou L, Li S, et al. Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4686.
- [50] Dai K, Liu D, Yin Y, et al. Transient physical modeling and comprehensive optimal design of air-breakdown direct-current triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2022, 92: 106742.
- [51] Zhang J, Gao Y, Liu D, et al. Discharge domains regulation and dynamic processes of direct-current triboelectric nanogenerator[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3218.
- [52] Shan C, He W, Wu H, et al. A high-performance bidirectional direct current teng by triboelectrification of two dielectrics and local corona discharge[J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12: 2200963.
- [53] Zeng Q, Chen A, Zhang X, et al. A dual-functional triboelectric nanogenerator based on the comprehensive integration and synergetic utilization of triboelectrification, electrostatic induction, and electrostatic discharge to achieve alternating current/direct current convertible outputs[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35: 2208139.
- [54] Gao Y, Liu D, Li Y, et al. Achieving high-efficiency triboelectric nanogenerators by suppressing the electrostatic breakdown effect[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16(5): 2304–2315.
- [55] Ouyang H, Liu Z, Li N, et al. Symbiotic cardiac pacemaker[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1821.
- [56] Hinchet R, Yoon H J, Ryu H, et al. Transcutaneous ultrasound energy harvesting using capacitive triboelectric technology[J]. *Science*, 2019, 365: 491–494.
- [57] Wang J, Li S, Yi F, et al. Sustainably powering wearable electronics solely by biomechanical energy[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12744.
- [58] Hu Y, Li X, Gao Y, et al. A noncontact constant-voltage triboelectric nanogenerator via charge excitation[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8: 2066–2076.
- [59] Zhou L, Liu L, Qiao W, et al. Improving degradation efficiency of organic pollutants through a self-powered alternating current electrocoagulation system[J]. *ACS Nano*, 2021, 15: 19684–19691.
- [60] Han J, Feng Y, Chen P, et al. Wind-driven soft-contact rotary triboelectric nanogenerator based on rabbit fur with high performance and durability for smart farming [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32: 2108580.
- [61] Xia X, Zhou Z, Shang Y, et al. Metallic glass-based triboelectric nanogenerators[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1023.
- [62] Zu L, Wen J, Wang S, et al. Multiangle, self-powered sensor array for monitoring head impacts[J]. *Science Advances*, 2023, 9: eadg5152.
- [63] Xu Z, Cao L N Y, Li C, et al. Digital mapping of surface turbulence status and aerodynamic stall on wings of a flying aircraft[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2792.
- [64] Pang H, Feng Y, An J, et al. Segmented swing-structured fur-based triboelectric nanogenerator for harvesting blue energy toward marine environmental applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31: 2106398.
- [65] Qiu H, Wang H, Xu L, et al. Brownian motor inspired monodirectional continuous spinning triboelectric nanogenerators for extracting energy from irregular gentle water waves[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16: 473–483.
- [66] Zhang C, He L, Zhou L, et al. Active resonance triboelectric nanogenerator for harvesting omnidirectional water-wave energy[J]. *Joule*, 2021, 5: 1613–1623.
- [67] Li X, Xu L, Lin P, et al. Three-dimensional chiral networks of triboelectric nanogenerators inspired by metamaterial's structure[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, doi: 10.1039/D3EE01035J.
- [68] Liang X, Liu S, Lin S, et al. Liquid-solid triboelectric nanogenerator arrays based on dynamic electric-double-layer for harvesting water wave energy[J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13: 2300571.
- [69] Lei R, Shi Y, Ding Y, et al. Sustainable high-voltage source based on triboelectric nanogenerator with a charge accumulation strategy[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13: 2178–2190.
- [70] Guo H, Chen J, Wang L, et al. A highly efficient triboelectric negative air ion generator[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 147–153.
- [71] Li X, Luo J, Han K, et al. Stimulation of ambient energy generated electric field on crop plant growth[J]. *Nature Food*, 2022, 3: 133–142.

## Fundamental research and technological innovation of triboelectric nanogenerators

PU Xiong, WANG Jie, WANG Zhonglin\*

Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China

**Abstract** Triboelectric nanogenerator (TENG) has become an emerging platform technology for achieving mechano-electrical energy conversion, with huge application potentials in a variety of fields. For the past decade, through extensive efforts, significant progress on the research of TENG has been made worldwide, including both fundamental scientific research and application technology of TENGs. Therefore, this article aims to review the representative achievements of TENGs in fundamental findings and technological innovations and look forward to the faster development of TENGs.

**Keywords** triboelectric nanogenerator; electron transfer; micro/nano energy; self-powered; blue energy ●



(责任编辑 王微)