DOI: 10.3901/JME.2021.15.177

CNT/PDMS 介电层微结构成型及 摩擦纳米发电机制备*

肖 渊 刘进超 吕晓来 李红英 代 阳
(西安工程大学机电工程学院 西安 710048)

摘要: 针对目前摩擦纳米发电机介电层表面微结构制作方法存在工艺流程复杂,成本高的问题,提出在聚二甲基硅氧烷(PDMS)中掺杂碳纳米管(CNT)提高介电常数,并以砂纸为模板快速在 PDMS 表面成型微结构,实现微结构 CNT/PDMS 弹性体膜摩擦纳米发电机介电层的制备。研究不同目数砂纸下 PDMS 表面微结构、CNT 掺杂质量分数及载荷作用对摩擦纳米发电机性能输出的影响,测试发电机输出功率及耐久性。结果表明:表面微结构制作方法可增加介电层表面积提高发电机输出电压及电流,800 目砂纸成型微结构时,摩擦纳米发电机输出最大;掺杂 CNT 可提高介电层电容值,CNT 质量分数为 1%时,电容值达到最大 24.2 pF;制备的摩擦纳米发电机可产生最大瞬时功率密度 $1.23 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$,且经 10 000 次工作循环,表现出较好的耐久性。

关键词: 摩擦纳米发电机;介电层;砂纸模板;微结构;CNT

中图分类号: TS852

Preparation of Triboelectric Nanogenerators with CNT-Containing and Micro-structure PDMS Composite Films

XIAO Yuan LIU Jinchao LÜ Xiaolai LI Hongying DAI Yang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048)

Abstract: Due to the complex and high-cost fabrication process of the dielectric layer surface microstructure of Triboelectric Nanogenerators, in this paper, a novel method is proposed to obtain the dielectric layer by applying microstructural carbon nanotubes (CNT)/polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer membrane triboelectric nanogenerators. Carbon nanotubes are doped in polydimethylsiloxane to increase the dielectric constant, and the microstructure is rapidly formed on the surface of PDMS with sandpaper as template. The experiments are conducted to investigate the influence of the mesh of sandpaper template, CNT doping content, and the effect of load on the output performance of the triboelectric nanogenerators. In addition, we measure the output power and durability of the generator. The results demonstrate the following three aspects. First, the surface microstructure manufacturing method could increase the surface area of dielectric layer to improve the output of the generators. When the microstructure is generated with 800 mesh sandpaper, the output of the Triboelectric Nanogenerators reaches a maximum. Second, doping CNT can increase the capacitance of dielectric layer. The capacitance reaches a maximum of 24.2 pF with 1% CNT. Third, the Triboelectric Nanogenerators with a surface area of $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ could produce a maximum instantaneous power density of $1.23 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, and good durability after 1 000 working cycles is shown.

Key words: triboelectric nanogenerators; dielectric layer; sandpaper template; micro-structure; CNT

0 前言

能量收集技术是一种新型能源利用技术,通过

将周围环境中存在的其他形式能量转化为电能并储存在能量储存器件中,再传递给传感器节点等低功耗电子器件,实现能量持续供给。该技术具有重复性强、应用范围广、环保性高等优点,是一项颇具发展潜力的能量利用技术,在物联网、无线模块及智能可穿戴等领域有着广泛的应用前景^[1]。

* 西安市现代智能纺织装备重点实验室(2019220614SYS021CG043)资助项目。20200814收到初稿,20210411收到修改稿

目前常见的能量收集方式有压电、电磁感应、摩擦起电及热释电等^[2-5]。其中,压电式^[2]具有体积小、机电耦合系数高等优点;电磁^[3]及热释电^[4]输出功率大,具有较好能量转换效率。上述方法不同程度存在寿命短、工艺复杂等不足之处。摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerators, TENG)^[5]利用摩擦起电和静电感应原理,通过两种电性不同的材料接触摩擦,可感应出正负电荷,通过导线与外电路连接实现电荷流动以提供能量,该方法具有制作简单、可持续性强等优点,因而得到广泛应用^[6]。按照材料的相互作用方式,常见的 TENG 有垂直接触分离式^[7]、水平滑动式^[8]、单电极式^[9]及独立层式^[10]。其中垂直接触分离式由两种电性不同的介电层通过在其背面制作电极并引出导线构成,结构简单、使用寿命长。为提高垂直接触分离模式 TENG 介电层表面电荷密度^[11]进而提高其输出功率,国内外学者针对介电层的改性方法进行了深入研究,温涛等^[12]采用渗法实现 CNT 与管壁分离,再将室温硫化硅胶(RTV)和 CNT 混炼制得混合物(SCM),通过翻模法制得一体式介电层。KIM 等^[13]通过静态法培养木醋杆菌,经裂解得到纯细菌纤维素,再经溶解、干燥等处理,通过硝化法制备的细菌纳米纤维素膜功率密度有显著提升。UDDIN 等^[14]采用化学刻蚀法在多孔硅模具沉积纳米银颗粒以构造微图案,再通过模板法制得微图案化介电层。上述涉及的改性方法工艺周期长且成本较高。因此,研究一种介电层工艺简单、低成本的改性方法进而提高 TENG 的电容值成为研究焦点。

基于此,本文提出一种低成本介电层改性方法,以普通砂纸为模板, CNT 为掺杂材料,聚二甲基硅氧烷(PDMS)为介电材料,制备不同参数的微结构 CNT/PDMS 介电层,实现垂直接触分离式 TENG 的制备。对微结构形貌、掺杂质量分数及载荷作用下 TENG 的输出电性能影响规律进行研究;并对摩擦发电机负载功率及耐久性进行测试,验证此方法提高 TENG 输出的可行性。

1 垂直接触分离 TENG 电容模型

垂直接触分离式 TENG 的工作原理如图 1 所示。

图 1 垂直接触分离式 TENG 工作原理图

从图 1 可以看出 TENG 工作原理分四个阶段,一是金属电极与介电层接触感应出电荷,二是电极与介电层分离电荷在两电极间流动,三是介电层与电极达到静电平衡,四是电极靠近介电层,电荷在两电极间流动。具体过程:初始位置电极未接触介电层前无电荷产生或转移,当垂直方向的载荷施加在上基底时,电极与介电层接触,由于金属与 PDMS 在摩擦电序列之间差异很大^[15],电极在接触摩擦过程容易失去电子,电子从电极流向介电层,电极带正电,介电层带负电,如图 1a 所示。当电极与介电层分离时,两表面产生电势差驱动电子从下电极通过外电路流向上电极平衡上表面的正电荷,如图 1b 所示。当两接触面恢复至初始位置,上电极表面正电荷被完全中和,下表面感应出等量的正电荷,此时电极与介电层之间静电平衡,无电势差,外电路无电流产生,如图 1c 所示。当两表面再次接触,产生相反的电荷转移,如图 1d 所示。如此周期性接触分离,使电荷在外电路中往复流动,从而产生交流信号。

依据平行板电容器原理,垂直接触分离式 TENG 最大储能和输出取决于介电层电容。根据平行板电容器计算公式

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (1)$$

式中, ϵ_0 、 ϵ_r 、 S 、 d 分别是介电层的真空介电常数、相对介电常数、表面积和极板间距。其储存的能量可以表示为

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \quad (2)$$

式中, C 、 U 分别是电容器电容和两极板之间的电压。

通常,添加导电颗粒可提高介电层电容^[16],常见的电容模型为金属板嵌入式、叠加嵌入式和微粒叠加嵌入式,如图 2 所示。图 2a 为金属板嵌入式模型,根据电学理论,一定厚度的金属板嵌入平行板电容内部,使极板间距减小,器件总电容增加^[17];图 2b 为叠加嵌入式模型,将金属板嵌入 n 层叠加 m 次;图 2c 为微粒叠加嵌入式模型,将金属板替换成导电颗粒。

在图 2a 模型中,设插入金属板厚度为 t 数量为 n ,则器件的总电容可以表示为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d - nt} \quad (3)$$

由式(3)可知,电容随着金属板嵌入数量增加而增加。在图 2b 模型中,设嵌入金属板长度为 l ,厚

度为 t , 嵌入 n 层, 叠加 m 次, 则等效电容可以表示为

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r mlt}{d - nt} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r (S - mlt)}{d} \quad (4)$$

化简得

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_r mlt \left(\frac{1}{d - nt} - \frac{1}{d} \right) \quad (5)$$

图2 垂直接触分离式 TENG 电容模型图

由式(5)得, 电容随着金属板的数量增加而增加。在图 2c 模型中, 用直径为 a 的导电颗粒代替金属板, 其等效电容可以表示为

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} + \varepsilon_0 \varepsilon_r m 4\pi \left(\frac{a}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{d - nt} - \frac{1}{d} \right) \quad (6)$$

其中, 颗粒表面积为 $4\pi \left(\frac{a}{2} \right)^2$, 由式(6)可得, 添加金属纳米颗粒即增大 m 、 n 可提高介电层电容。联立式(2)、(6)得

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{2d} + \frac{1}{2} \pi \varepsilon_0 \varepsilon_r m (aU)^2 \left(\frac{1}{d - nt} - \frac{1}{d} \right) \quad (7)$$

式(7)中可得, 介电层表面积、极板间距、两极板电压和金属纳米粒子直径不变时, 提高导电粒子数量可提高 TENG 输出功率。

2 TENG 制备

TENG 制备包括微结构 CNT/PDMS 介电层的制备及 TENG 的装配。以 PDMS 为介电材料, 砂纸为模板, CNT 为掺杂材料, 通过称量、搅拌、混炼、超声、涂覆、固化、剥离、装配等工艺制备成型 TENG。制备过程中, 砂纸目数和掺杂 CNT 颗粒质

量分数对 TENG 的输出会产生重要影响。

2.1 微结构 CNT/PDMS 介电层制备

微结构 CNT/PDMS 介电层的制备过程主要分为: 微结构 PDMS 介电层的制备和微结构 CNT/PDMS 介电层的制备。制备过程用到的材料及仪器如表 1 所示。

表 1 制备过程使用的主要材料和仪器

名称	分子式	型号	纯度(%)	生产厂家
PDMS	(C ₂ H ₆ OSi) _n	—	—	Sylgard 184 DC
聚酰亚胺胶带	(C ₄ N ₂ O ₄ R) _n	—	—	埃瑞克绝缘制品
碳纳米管	C	—	99.9	临沂烯康
砂纸	—	—	—	DALIBAO
模具	—	—	—	鑫铭远金属材料
球磨仪	—	MM400	—	佛卡斯
超声清洗器	—	KQ2200DE	—	通隆精密机械
烘箱	—	DGG-9036A	—	岛韩实业

微结构 PDMS 介电层的制备过程, 如图 3 所示。

图3 微结构 PDMS 介电层制备过程图

微结构 PDMS 介电层的制备主要由三步组成: 一是组装模具, 二是 PDMS 涂覆固化, 三是剥离 PDMS。具体制备步骤: 首先将砂纸连同聚酰亚胺胶带粘附在装夹模具上, 如图 3a 所示; 然后将 PDMS 和固化剂按质量比为 10:1 搅拌混合, 在超声清洗器中超声 20 min 以除去搅拌时混入的空气, 取出涂敷在模板上, 在烘箱内以 70℃ 固化 2 小时, 如图 3b 所示; 最后直接剥离制得微结构 PDMS 介电层, 如图 3c 所示。

微结构 CNT/PDMS 介电层的制备过程, 如图 4 所示。

图4 微结构 CNT/PDMS 介电层制备过程图

微结构 CNT/PDMS 介电层的制备主要由四部分组成: 一是搅拌混合 CNT 和 PDMS, 二是混炼, 三是混合体涂覆固化, 四是剥离混合体。具体制备步骤: 首先, 如图 4a 称量并搅拌 CNT 和 PDMS; 然后, 如图 4b 使用球磨仪混炼 CNT 和 PDMS 的混合物; 然后, 如图 4c 将混合体涂敷在模板上并在烘箱内固化; 最后, 如图 4d 直接剥离固化的混合物制得微结构 CNT/PDMS 介电层。

通过图 3、4 所示制备工艺, 制得介电层样品如图 5 所示。

图 5 介电层实物图

图 5 为介电层实物图, 图 5a 为微结构 PDMS 介电层, 整体呈无色透明状, 图 5b 为微结构 CNT/PDMS 介电层, 整体呈黑色。两者表面具有微结构, 背面光滑, 整体尺寸长 3 cm, 宽 2 cm, 厚度 0.05 cm。

2.2 介电层的表征

为了研究制备的介电层微结构形貌, 利用扫描电子显微镜(Nova 400 Nano SEM)对微结构形貌进行观察, 得到微观照片如图 6 所示。

图 6 不同目数模板 PDMS 表面微结构 SEM 图

从图 6 中可以看出, 利用砂纸制备的 PDMS 表面微结构均呈不规则孔洞结构, 孔洞结构增大了介电层表面积。随着砂纸目数的增加, 孔洞的致密程度逐渐增加, 但孔洞的直径逐渐减小。

为了研究 CNT 填充至 PDMS 中的结构状态, 利用扫描电子显微镜对制备的介电层横截面进行观察, 得到微观照片如图 7 所示。

从图 7 中可以看出 CNT 在 PDMS 中呈团聚式分布, 和 PDMS 具有较好的界面结合状态。

对制备的微结构 CNT/PDMS 介电层进行拉伸

及弯折实验,如图 8 所示。

图 7 CNT 填充至 PDMS 中结构状态

从图 8 中可以看出制备成型的微结构 CNT/PDMS 介电层柔韧性较好,可以进行一定程度拉伸和弯折。

图 8 微结构 CNT/PDMS 介电层拉伸弯折测试图

2.3 TENG 的装配

在上节制备的微结构 CNT/PDMS 介电层基础上,本节对 TENG 进行装配, TENG 主要由聚对苯二甲酸乙二酯(PET)保护片、金属电极、微结构 CNT/PDMS 介电层组成,如图 9a 所示。具体装配工艺流程为: 首先将微结构 CNT/PDMS 介电层光滑面粘贴于下电极,然后将其固定于 PET 上。分别从上下电极引出导线以连接外部负载,最后将上电极面和介电层面对相对放置,得到实物照片如图 9b 所示。

图 9 TENG 示意图及实物图

由图 9b 可以看出, TENG 电极表面光泽平整,整体尺寸长、宽分别为 30 mm, 20 mm。

3 TENG 输出影响因素研究

TENG 输出主要由介电层作用面大小、介电常数及外界载荷共同作用决定。本节针对砂纸目数、掺杂质量分数及外界载荷作用对 TENG 的影响进行研究。

3.1 砂纸目数对 TENG 输出影响

设定 CNT 掺杂质量分数为 0%, 驱动往复电动机推力为 14 N, 频率为 3 Hz, 依次对目数为 P-0、P-80、P-150、P-240、P-800、P-1500、P-2500 下制备的 TENG 进行试验测试, 得到其开路电压和短路电流图, 如图 10 所示。

图 10 不同目数下 TENG 开路电压和短路电流

由图 10 可知, TENG 的输出开路电压和短路电流均随着砂纸目数的增加呈先增加后减小的趋势, 无微结构的输出峰峰值电压为 4 V、电流为 2.5 μA , 均为最小, 随着砂纸目数的增加, TENG 电压和电流也在增大, 当目数达到 800 时开路电压和短路电流均达到最大值, 其峰峰值开路电压为 14.5 V, 峰峰值短路电流为 42 μA , 而后当目数进一步增大时电压和电流开始减小。

为进一步研究制备的微结构对介电层表面积影响, 测量并计算了上述 6 组砂纸制备的微结构 PDMS 介电层上表面面积, 结果如图 11 所示。

由图 11 可知, 孔洞状微结构增大了介电层表面积, 提高了介电层电荷积累量, 从而提高了 TENG 的输出。砂纸的目数由砂砾密集度和砂砾直径决定, 随着目数增加, 砂砾密集度逐渐增大但直径逐渐减小, 制备的介电层表面积先增大后减小, 在目数为 800 时, 介电层表面积达到最大, TENG 输出达到最大值。

图 11 不同砂纸目数下介电层微结构表面面积

3.2 掺杂质量分数对 TENG 输出影响

以 800 目砂纸制作微结构, 驱动往复电动机推力为 14 N, 频率 3 Hz, 依次对 CNT 掺杂质量分数为 0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.3%、1.5%、1.8%、2.4% 的 TENG 进行实验测试, 得到其开路电压和短路电流如图 12 所示。

图 12 不同 CNT 掺杂下 TENG 开路电压和短路电流

由图 12 可知, 当 CNT 掺杂量从 0% 增大到 1% 时, TENG 开路电压和短路电流均逐渐增大, 在 1% 时达到最大值, 其峰峰值开路电压为 32 V, 峰峰值短路电流为 62 μA 。当超过 1% 时, 开路电压和短路

电流均逐渐减小。

为了分析 TENG 的电容变化, 测量了上述 10 组不同 CNT 掺杂质量分数的微结构 CNT/PDMS 介电层电容, 结果如图 13 所示。

图 13 微结构 CNT/PDMS 介电层电容

由图 13 可知, 曲线图的变化趋势与图 11 的趋势具有一致性, 在 1% 的 CNT 掺杂质量分数时, 制备的微结构 CNT/PDMS 介电层电容最大。

为进一步分析电容变化原因, 测量了上述 10 组不同 CNT 掺杂质量分数的微结构 CNT/PDMS 介电层在 $10^{-2} \sim 10^6$ 频率下宽频介电谱, 得到 10 组介电常数和介电损耗变化如图 14 所示。

图 14 微结构 CNT/PDMS 介电层介电常数及介电损耗

由图 14 可知, 添加 CNT 导电材料使得 PDMS 介电层的介电常数逐渐增加, 同时其介电损耗也随之增加, 尽管较高的介电常数可以增加介电层储存电荷的能力, 但同时介电损耗也越大, 导致较高的漏电使电荷的有效储存量减小^[18], 因此电容最大在 1% CNT 掺杂质量分数处取得, 为 24.2 pF。

3.3 载荷作用对 TENG 输出影响

设置 CNT 掺杂质量分数为 1%, 800 目砂纸制作微结构, 分别对 14 N 载荷下, 0.5 Hz、1 Hz、1.5 Hz、2 Hz、2.5 Hz、3 Hz、3.5 Hz、4 Hz 作用频率以及 3 Hz 频率下, 9.8 N、11.76 N、13.72 N、15.68 N、17.64 N、19.6 N 作用大小对 TENG 的输出影响进行研究, 得到载荷频率、载荷大小与输出电压关系图, 如图 15 所示。

图 15 载荷频率及大小与 TENG 开路电压的关系图

从图 15 可以看出, TENG 开路电压均随载荷频率和载荷大小的增加呈现先增加后缓慢增加的趋势。图 15a 中, 频率在 2.5~3.0 Hz 时开路电压增长较快, 频率为 3 Hz 的 TENG 开路电压可达 32 V, 当频率在 3 Hz 以上时电压变化趋势不大。图 15b 中, 大小在 9.8~13.72 N 时开路电压增长较快, 大小为 13.72 N 的 TENG 开路电压可达 31 V, 当载荷在 15.68 N 以上时电压变化趋势不大。

4 功率及耐久性试验

为了对制备的 TENG 功率密度及耐久性进行测试, 搭建测试平台如图 16 所示。主要由: 往复电动

机(DIY-37GB330)、调速器、示波器(RIGOL DS107 型)、stanford 低噪声电流前置放大器(SR570 型)等组成。其中, 调速器控制推杆产生力 9.8~19.6 N、频率 0~4 Hz; 低噪声电流前置放大器用来测试 TENG 短路电流; 示波器用于观测并储存 TENG 产生的开路电压和短路电流图像。

图 16 测试平台

利用构建的测试平台选用 CNT 掺杂质量分数为 1%, 800 目砂纸制作微结构, 设定往复电动机推力为 14 N, 频率为 3 Hz, 使用 $1 \sim 10^5 \Omega$ 不同负载电阻带载测试输出开路电压和短路电流, 以匹配最优阻抗并计算输出功率, 得到峰值电压、峰值电流及输出功率与阻抗关系如图 17 所示。

图 17 不同负载下 TENG 输出峰值电压、电流及功率

从图 17 中可以看出在的 $8\text{ k}\Omega$ 负载下最大输出功率为 $7.4\times 10^{-7}\text{ W}$, 计算得到尺寸为 $30\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的 TENG 输出功率密度为 $1.23\times 10^{-3}\text{ W/m}^3$ 。

为了测试 TENG 耐久性, 选用 CNT 掺杂质量分数为 1%, 800 目砂纸制作微结构, 载荷频率为 3 Hz, 大小为 14 N 的试验条件下, 驱动 TENG 工作 10 000 次, 测试其开路电压, 结果如图 18 所示。

图 18 TENG 工作 10 000 次开路电压

图 18 中可以看出, TENG 在工作 10 000 次循环内, 输出峰值开路电压始终在 $20\sim 34\text{ V}$ 之间变化, 表明具有较好的稳定性。

5 结论

(1) 提出了在 PDMS 中掺杂 CNT, 并以砂纸为模板快速在 PDMS 表面成型微结构, 制备微结构 CNT/PDMS 介电层的方法完成了一种基于微结构 CNT/PDMS 介电层的 TENG 制备。

(2) TENG 输出开路电压及短路电流随砂纸目数及 CNT 掺杂质量分数的增加呈先增加后减小趋势, 800 目砂纸成型微结构下, TENG 输出最大; CNT 掺杂质量分数为 1% 时, 介电层电容值达到最大; 载荷作用增加使 TENG 开路电压先增大后缓慢增加。

(3) 测试结果表明, TENG 可产生最大瞬时功率密度为 $1.23\times 10^{-3}\text{ W/m}^3$, 且经 10 000 次工作循环, 表现出较好的耐久性。

参 考 文 献

[1] 陈荧, 张志, 白志青, 等. 纺织基摩擦纳米发电机收集人体运动能量的研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2019, 36(2): 113-120.
CHEN Ying, ZHANG Zhi, BAI Zhiqing, et al. Weft-knitted marine yarn fabric and its one-bath dyeing and multi-color production practice[J]. Journal of Textile

Science and Engineering, 2019, 36(2): 113-120.

- [2] MAHIDUR R S, SABARIAH J, MOHD F M S, et al. Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2019, 300: 111634.
- [3] CARNEIRO P, SANTO M P, RODRIGUES A, et al. Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114191.
- [4] LI C C, JIANG F X, LIU C C, et al. Present and future thermoelectric materials toward wearable energy harvesting[J]. Applied Materials Today, 2019, 15: 543-557.
- [5] 张弛, 付贤鹏, 王中林. 摩擦纳米发电机在自驱动微系统研究中的现状与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 89-101.
ZHANG Chi, FU Xianpeng, WANG Zhonglin. Review and prospect of triboelectric nanogenerators in self-powered microsystems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 89-101.
- [6] ZHAO L M, ZHENG Q, OUYANG H, et al. A size-unlimited surface microstructure modification method for achieving high performance triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy, 2016, 28(28): 172-178.
- [7] LIN Z H, XIE Y N, YANG Y, et al. Enhanced triboelectric nanogenerators and triboelectric nanosensor using chemically modified TiO_2 nanomaterials[J]. ACS Nano, 2013, 7(5): 4554-4560.
- [8] XIA X N, LIU G L, GUO H Y, et al. Honeycomb-like three electrodes based triboelectric generator for harvesting energy in full space and as a self-powered vibration alertor[J]. Nano Energy, 2015, 15: 766-775.
- [9] WANG C F, PAN C F, WANG Z L. Electronic skin for closed-loop systems[J]. ACS Nano, 2019, 13(11): 12287-12293.
- [10] WANG S H, XIE Y N, WANG Z L, 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.
- [11] 杨滩旭, 王晓力, 陈平. 摩擦纳米发电机表面织构的优化设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 130-136.
YANG Weixu, WANG Xiaoli, CHEN Ping. Optimal design of surface texture in triboelectric nanogenerators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 130-136.
- [12] 温涛. 摩擦—电磁—压电复合式能量采集器的设计研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

- WEN Tao. Triboelectric-electromagnetic-piezoelectric hybrid generator for high-efficient vibration energy harvesting[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [13] KIM H, YIM E, KIM J, et al. Bacterial nano-cellulose triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2017, 33(Complete): 130-137.
- [14] UDDIN A S, CHUNG G. A self-powered active hydrogen sensor based on a high-performance triboelectric nanogenerator using a wrinkle-micropatterned PDMS film[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(67): 63030-63036.
- [15] DAGDEVIREN C, LI Z, WANG Z L. Energy harvesting from the animal/human body for self-powered electronics[J]. *Annual review of biomedical engineering*, 2017, 19(1): 85-108.
- [16] CHEN J, GUO H Y, HE X M, et al. Enhancing performance of triboelectric nanogenerator by filling high dielectric nanoparticles into sponge PDMS film[J]. *ACS Applied Materials*, 2016, 8(1): 736-744.
- [17] XIA X N, CHEN J, GUO H Y, et al. Embedding variable micro-capacitors in polydimethylsiloxane for enhancing output power of triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Research*, 2017, 10(1): 320-330.
- [18] 夏晓娜. TENG 结构设计和表面电荷最大化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- XIA Xiaona. TENG structure design and mechanism of maximizing surface charges[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
-
- 作者简介: 肖渊(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向能量收集、微滴喷射打印、智能纺织品。
E-mail: xiaoyuanjidian@xpu.edu.cn
- 刘进超, 男, 1995 年出生。主要研究方向为能量收集。
E-mail: Liujinchaowyyxzh@163.com