http://pmse.scu.edu.cn

钛酸钡纳米颗粒/氟橡胶复合多层摩擦纳米发电机

胡光凯[1], 刘梦娇[2], 张 欣[2], 俞 彬[2], 黄 涛[2], 俞 昊[2]

(1. 贵州工程应用技术学院 机械工程学院, 贵州 毕节 551700; 2. 东华大学 先进纤维材料全国重点实验 材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 摩擦纳米发电机(TENG)能够俘获周边环境中低频、无序、碎片化高熵能量并将其转化为电能,但目前主要聚焦于提升摩擦材料表面电荷的累积量,无法充分利用摩擦层的整体体积,且其增效周期也较短。文中分别以氟橡胶(FKM)和聚酰亚胺(PI)作为电负性摩擦材料基体和中间层,通过在基体中添加高介电钛酸钡纳米颗粒(BT 颗粒)来提高电输出性能。引入的 PI 中间层作为电荷捕获层和存储层,可在减缓电荷从陷阱逸出速率的同时降低逸出电荷与电极上相反电荷相结合的几率。添加适量 BT 颗粒可以提高复合膜的介电常数,增大对应 TENG 工作过程中的表面电荷密度,当其质量分数为 1.5% 时,转移电荷密度、短路电流密度和输出电压分别为 66 μC/m^2,8.0 mA/m^2 和 275 V,较 BT 颗粒添加前分别提高 164%,208% 和 175%。根据 TENG 器件的本征电容特性,深入分析了 BT 介电颗粒对电输出性能的增强机制。为高性能电负性摩擦材料的设计与制备提供了新参考。

关键词: 摩擦纳米发电机;氟橡胶;介电增强;中间层

中图分类号: TB332 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)05-0129-10

在“双碳”重大战略背景下,开发更多的可再生能源,构建更加高效的能源转化技术至关重要[1]。摩擦纳米发电机(TENG)作为一种新兴的能源转换技术,具有器件结构简单、材料适用广泛、轻质和成本低廉等显著特点,能够俘获周边环境中低频、无序和碎片化高熵能量,并将其转化为电能[1]。TENG 输出性能的高低决定了其实用化的前景。一般而言,可从摩擦材料的角度出发,根据相应的摩擦电序列[2],选择电正/负性较强的材料,以提高 TENG 的输出性能。氟橡胶(FKM)是一种高含氟量的聚合物,其共聚单体有偏氟乙烯(VDF)和六氟丙烯(HFP),与常见的摩擦材料(聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚乳酸(PLA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等)相比,具有更强的电负性,可在工作过程中得到更高的表面电荷密度。同时,FKM 还具有使用温度范围宽、长效稳定性和耐磨性优异等优势,可应对更加复杂的工况。然而,目前将其作为摩擦材料应用于 TENG 中鲜有报道,亟待深入研究。

此外,可从表面微结构构筑[3]、表面官能化[4]及表面电荷注入[5]等方面对摩擦材料进行改性,进一步提升 TENG 的输出性能。然而,上述手段均聚焦于提升表面电荷的累积量,无法充分利用摩擦层的整体体积,其增效周期也较短。对此,可在摩擦材料基体中进一步复合功能填料(碳纳米管(CNT)[6]、氧化石墨烯(GO)[7]、MXene[8]等),利用其对电荷的捕获能力及形成的微电容等效应,实现摩擦电输出性能的提升。其中,加入碳系填料后摩擦材料整体的导电性会增加,会为捕获的电荷提供更多的迁移通

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0070

收稿日期: 2025-05-12

基金项目: 毕节市科学技术局 贵州工程应用技术学院联合基金项目(毕科联合[2025]128); 贵州省基础研究计划(自然科学)资助项目(黔科合基础 QN[2025]270); 国家自然科学基金资助项目(52373240, 52203309); 上海“启明星”项目(23QA1400100); 上海“扬帆”项目(22YF1400400)

通讯联系人: 胡光凯, 主要从事清洁能源的催化转化与利用研究, E-mail: hugkai@163.com;
张欣, 主要从事纳米能源的收集与转化研究, E-mail: zhangxin9658@163.com

路,造成复合摩擦层中的部分电荷与背电极上的电荷中和,在一定程度上减弱电输出性能。引入高介电填料不仅不会对摩擦材料的导电性产生显著影响,有效隔绝上述中和效应,而且还能进一步提升摩擦材料的介电常数,进而提高其存储电荷的能力[9]。

基于此,本文以 FKM 作为电负性摩擦材料基体,以高介电的钛酸钡纳米颗粒($BaTiO_3$,BT 颗粒)作为增强填料,采用刮涂法制备了 BT 颗粒均匀掺杂的 BT/FKM 复合材料。系统研究了中间层引入、BT 颗粒掺杂量和工作频率对器件摩擦电输出性能的影响。进一步探究了中间层引入和介电粒子掺杂对电输出性能的提升机制。为 FKM 基摩擦电材料的组分调控、掺杂改性、形貌构筑和结构优化提供了理论参考。

1 实验部分

1.1 实验原料

BT 颗粒:纯度为 99.9%,平均粒径为 400 nm,体积密度为 1.33 g/cm^3,晶相结构为四方相,宁波雨木新材料有限公司;无水乙醇、丙酮、N,N-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;FKM:G-801 型,东莞鸿永翔塑胶原料厂;聚对苯二甲酸乙二酯(PET)薄膜、铜(Cu)胶带:美国 3M 有限公司;聚酰亚胺(PI)胶带:杭州优必胜胶带有限公司;导电布:涤纶,SY-NF35D-C,PET/Cu+Ni,上海克林莱塑料有限公司。

1.2 BT/FKM 复合膜的制备

1.2.1 BT/FKM 混合液的制备:先将 DMF 和丙酮以 6∶4 的质量比复配,加入一定质量的 BT 颗粒超声分散 30 min(超声功率为 660 W)后得到均匀分散液。再称取一定质量的 FKM 溶解于另一 DMF 和丙酮的复配溶剂中(FKM 的质量分数为 25%),溶解温度为 50 ℃。最后将 BT 分散液加入 FKM 溶液中,继续超声分散 60 min(超声功率为 660 W)后得到均匀分散的 BT/FKM 混合液,记作 xBT/FKM(x 表示混合液中 BT 颗粒占 FKM 的质量分数,x = 0,0.5%,1.0%,1.5% 和 2.0%)。

1.2.2 BT/FKM 复合膜的制备:以 PET 膜为基底,将上述 BT/FKM 混合液滴加在基底上,刮涂铸膜后将其转移至真空烘箱中,于 60 ℃放置 12 h,使溶剂完全挥发。最后,利用无水乙醇浸泡将基底和膜分离,经干燥后得到厚度为 100 nm 的 BT/FKM 复合膜。制备流程如 Fig.1 所示。

1.3 TENG 器件的组装

取一块 PET 膜(90 mm×60 mm×0.1 mm)作为基底,沿其长边中线对折裁剪待用。在其中一块表面依次黏贴 Cu(30 mm×30 mm×0.05 mm)、PI(30 mm×30 mm×0.05 mm)和 BT/FKM 复合膜(30 mm×30 mm×0.1 mm)。在另一块表面黏贴导电布(30 mm×30 mm×0.05 mm),其同时作为电极层和摩擦层。最

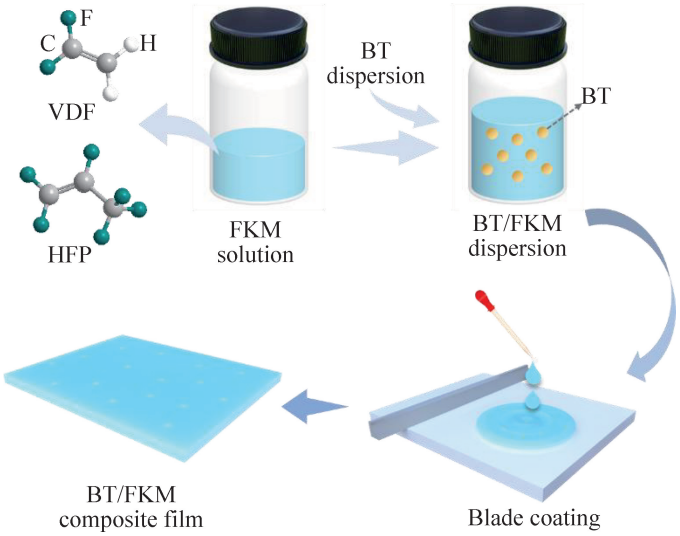


Fig. 1 Schematic preparation process of the BT/FKM composite film

后封装得到 BT/FKM 复合膜基 TENG,记作 BF-TENG。另以纯 FKM 膜为电负性摩擦材料,采用与 BF-TENG 相同的组装方法得到纯 FKM 膜基 TENG(分有 PI 和无 PI 2 种)。

1.4　测试与表征

1.4.1　微观结构表征:使用扫描电子显微镜(SEM,SU-8010 型,日本 HITACHI 有限公司)表征 BT 颗粒的表面形貌、FKM 膜和 BT/FKM 复合膜的表面和截面形貌。直接将 BT 颗粒样品黏贴于导电胶上,清洗干燥后的膜样品裁剪后黏贴于导电胶上,测试前对样品进行喷金处理。测试时的加速电压为 3 kV。

1.4.2　介电性能测试:使用宽频介电阻抗谱仪(Concept 40 型,德国 Navocontrol 科技公司)测试 FKM 膜和 BT/FKM 复合膜的介电常数。测试温度为室温,测试频率范围为 10^2 ~ 10^6 Hz。

1.4.3　电输出性能测试:使用线性马达驱动 TENG 进行特定的接触-分离运动。使用静电计(6514 型,美国 Keithley 仪器公司)采集 TENG 的转移电荷量和输出电流,使用示波器(104 MXs-B 型,美国 Teledyne LeCroy 公司,探头阻抗为 100 MΩ)采集 TENG 的输出电压。该部分测试均在恒温(20 ± 2 ℃)及恒湿(25% ±5%)的环境中完成。

2　结果与讨论

2.1　形貌结构表征

BT 颗粒及其不同添加量时 BT/FKM 复合膜的

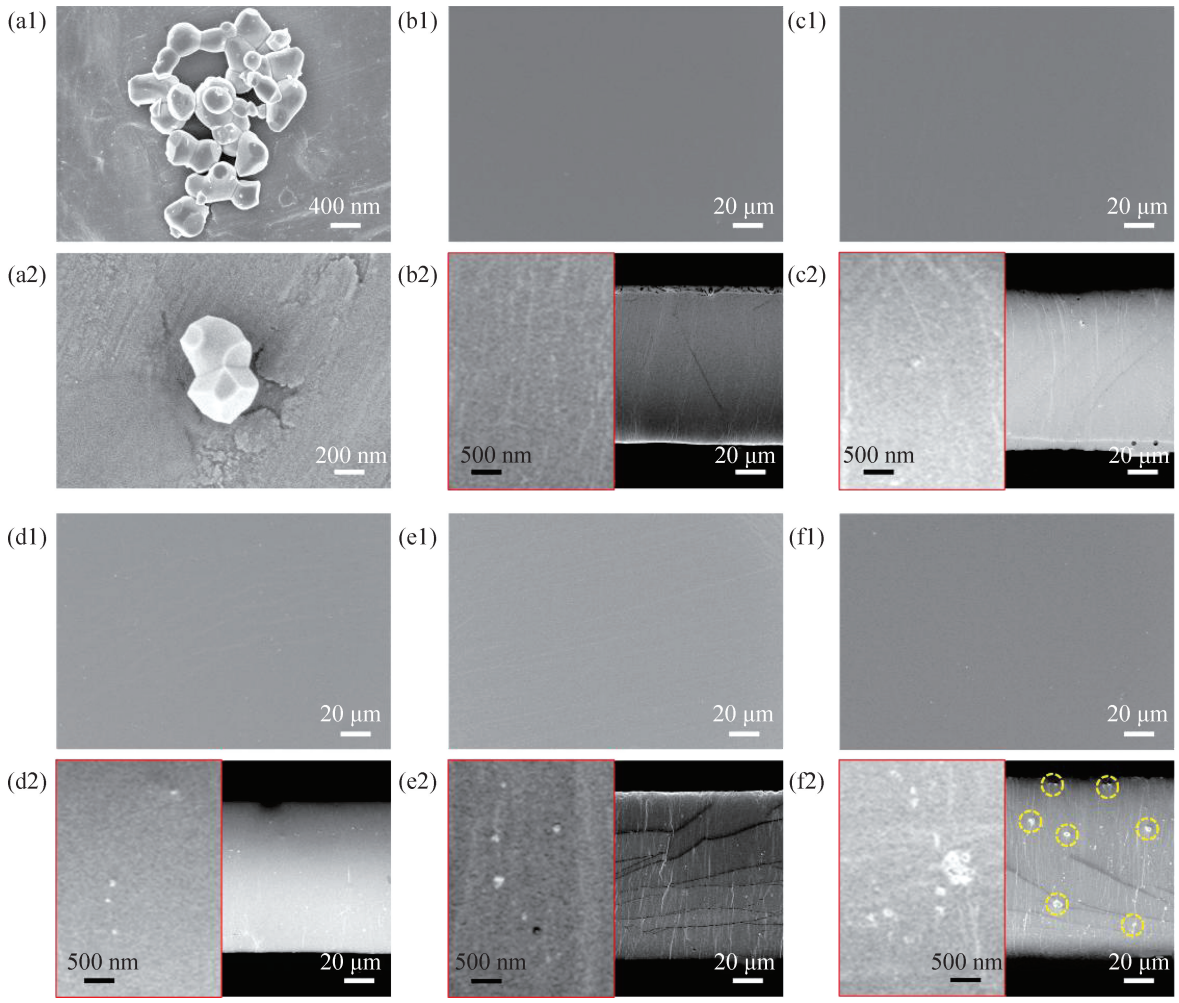


Fig. 2　Morphologic characterizations: SEM images of BT at (a1) low and (a2) high magnification. The (b1, c1, d1, e1, and f1) surface and (b2, c2, d2, e2, and f2) cross-sectional morphologies of BT/FKM composite films with different BT mass fractions of (b1 and b2) 0%, (c1 and c2) 0.5%, (d1 and d2) 1.0%, (e1 and e2) 1.5% and (f1 and f2) 2.0%

微观形貌如 Fig.2 所示。从 Fig.2(a1)和 Fig.2(a2)中可以看出,BT 颗粒为纳米尺度,其尺寸约为 300 nm。对比 BT/FKM 复合膜的表面形貌(Fig.2(b1, c1, d1, e1, f1))可知,在 BT 颗粒质量分数变化范围内(0~2.0%),所有膜均表面光滑、无凸起颗粒,这表明添加的 BT 颗粒均分布在复合膜内部。

对比 BT/FKM 复合膜的截面形貌(Fig.2(b2, c2, d2, e2, f2)),与其表面形貌相比,出现了不同的形貌结构,即 BT 颗粒质量分数在 0~1.5% 范围内,BT 颗粒均匀分布在复合膜内部。当 BT 颗粒质量分数超过 1.5%时,由于 BT 颗粒的纳米效应,其在复合膜内部出现明显的团聚(如 Fig.2(f2)中黄色虚线框所示)。而 BT 颗粒在复合膜内部分布状态的差异性将对 TENG 的输出性能产生影响,具体讨论将在 2.4 部分展开。

2.2 BF-TENG 的工作机理

在 BF-TENG 的器件结构中,以 PET 为支撑基底,导电布既充当电正性摩擦材料,又充当电极。电负性摩擦层为制备的 BT/FKM 复合膜,其与电极之间引入中间层 PI,电极为 Cu 层(Fig.3(a))。BF-TENG 的工作机理如 Fig.3(b)所示,具体可分为 4 个阶段[10]。在第 1 阶段,器件的电正性摩擦层(导电布)和电负性摩擦层(BT/FKM 复合膜)完全重合。二者接触时产生摩擦起电效应,在电负性差异的驱动下,接触界面上产生等量的正负电荷,BT/FKM 层表面的负电荷会不断向 PI 层内部迁移并储存,器件整体处于平衡状态(Fig.3(b1))。随后,两摩擦层开始分离,由此产生的电势差驱动感应电荷在外电路进行移动并产生电流(Fig.3(b2))。当分离距离最大时,达到第 3 阶段,此时器件处于电荷平衡状态(Fig.3(b3))。最后,两摩擦层逐步靠近再次打破平衡,产生相反的电势差驱使电荷重新进行排布,从而在外电路形成反方向的电流(Fig.3(b4)),直至正负摩擦层再次重合(Fig.3(b1))。至此,器件完成 1 次工作循环,由此往复,其在外电路中输出交流电信号。利用有限元分析模拟 2 摩擦层距离最远时的电势分布,如 Fig.3(c)所示。

以纯 FKM 膜为电负性摩擦材料,探究 PI 中间层对 TENG 输出性能的影响,如 Fig.4(a~c)所示。从图中可以看出,引入 PI 中间层后,TENG 的转移电

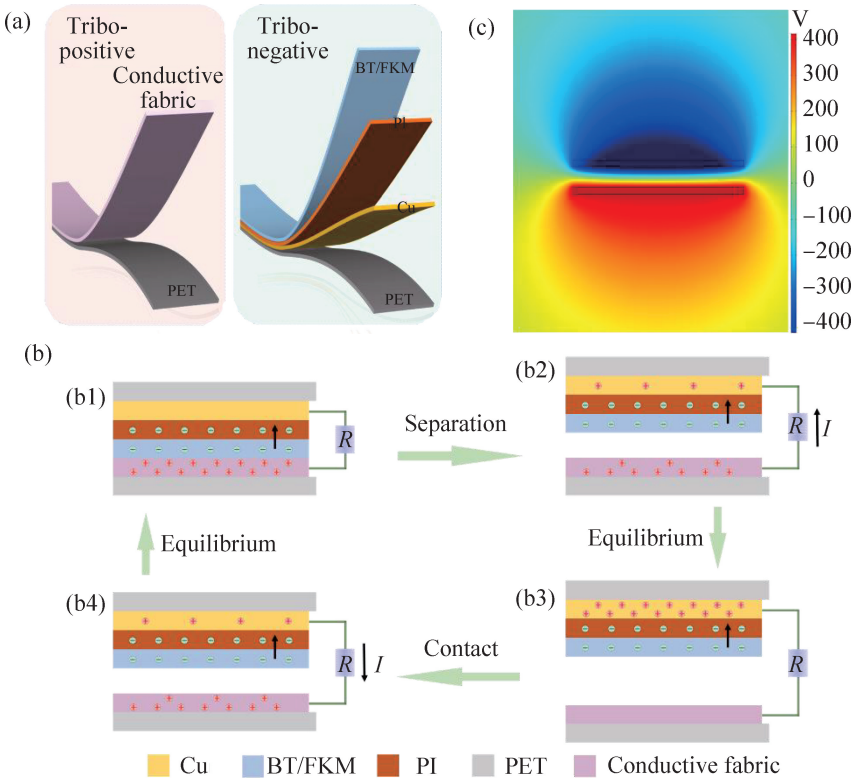


Fig. 3 (a) Schematic diagram of the structural composition, (b) working principle and (c) simulated potential distribution of BF-TENG

荷密度、短路电流密度和输出电压分别为 25 μC/m^2,2.6 mA/m^2 和 100 V,较引入前分别提高了 90%(13 μC/m^2),63%(1.6 mA/m^2)和 43%(70 V),这表明,PI 中间层的引入有助于提高电输出性能。如 Fig.4(d)所示,一般而言,FKM 摩擦层表面的摩擦电荷(蓝色小球)通常被捕获在其浅陷阱中,且容易与电极上的感应电荷(黄色小球)中和。而当 FKM 膜与电极之间添加 PI 中间层后,其能诱导摩擦电荷不断向中间层迁移并储存在深陷阱中[11],从而在一定程度上减缓电荷从陷阱中逸出的速率,降低逸出电荷与感应电荷相结合的几率,得到更高的输出性能。因此,后续性能测试均在含有 PI 中间层的条件下进行。

2.3　BT 介电颗粒对输出性能的增强及作用机制

介电常数是摩擦材料的重要本征特性之一,可以通过增强其内部的电荷捕获能力来提升摩擦电输出性能[10]。Fig.5 为 BT 颗粒添加量对 BF-TENG 电输出性能的影响。从图中可以看出,相较于未添加 BT 颗粒(质量分数为 0%),添加 BT 颗粒的 BF-TENG 的电输出性能均有所提高,呈先增后减的趋势。当 BT 颗粒质量分数为 1.5%时,BF-TENG 的转移电荷密度、短路电流密度和输出电压分别为 66 μC/m^2,8.0 mA/m^2 和 275 V,较未添加 BT 颗粒的 BF-TENG 相应指标分别提高 160%(25 μC/m^2),208%(2.6 mA/m^2)和 175%(100 V)。这主要是因为引入的高介电 BT 颗粒提高了 BT/FKM 复合膜的介

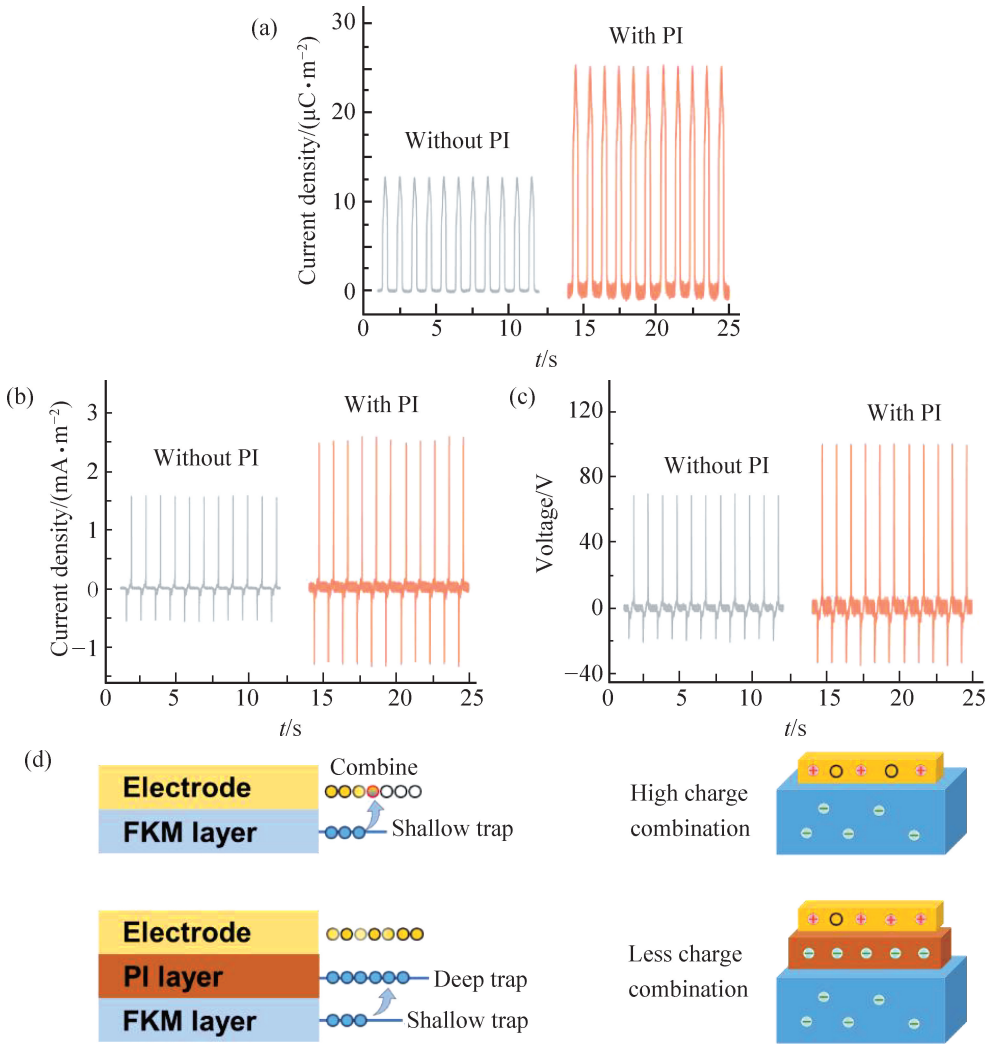


Fig. 4　(a) Transferred charge density, (b) short-circuit current density, and (c) output voltage of the TENG with/without PI interlayer incorporated; (d) enhancement mechanism of the PI interlayer

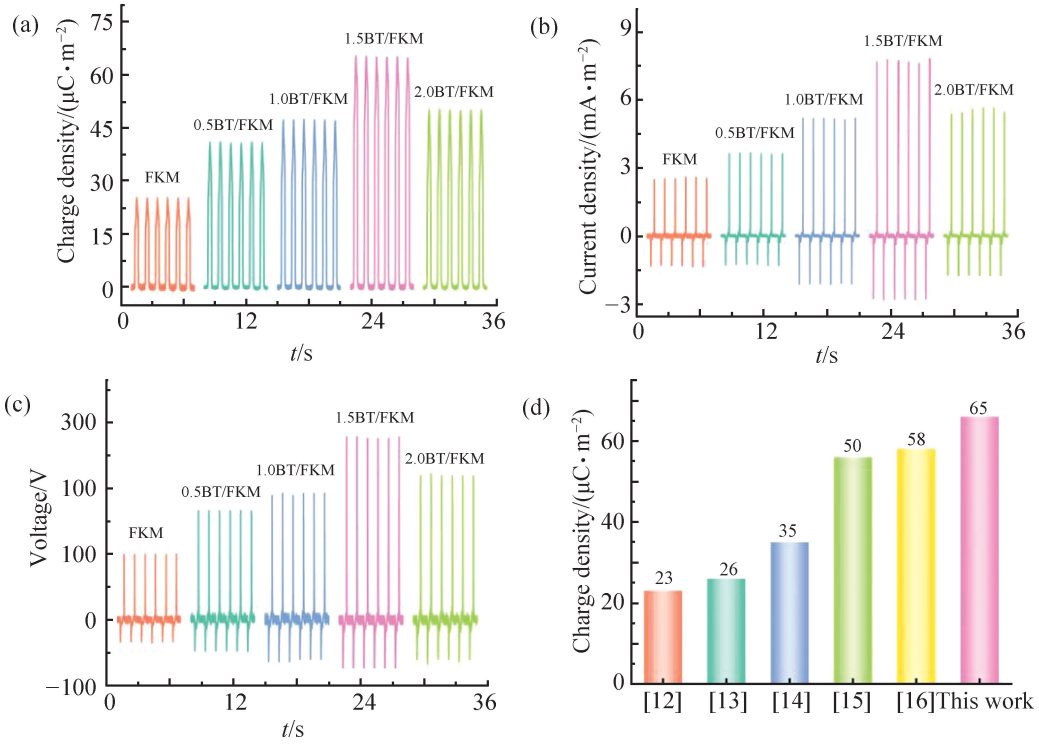


Fig. 5 (a) Transferred charge density, (b) short-circuit current density, and (c) output voltage of the BF-TENG with different BT mass fractions; (d) comparison with the charge density of the reported TENG

电常数,从而增大了其工作过程中的表面电荷密度[9]。以转移电荷密度为例,BF-TENG 的测试结果较已报道文献的相应测试值有明显优势(Fig.5(d))[12~16]。此外,当 BT 颗粒质量分数超过 1.5%时,结合 Fig.2(f2)中 2.0BT/FKM 复合膜截面形貌所知,BF-TENG 电输出性能下降的原因是由于过量 BT 颗粒在复合膜内部发生团聚,使得 BT/FKM 摩擦材料的介电性能受到抑制。

为了探究 BT 添加量对 BT/FKM 复合膜介电性能的影响,测试了不同 BT 添加量下 BT/FKM 复合膜的介电常数和介电损耗。从 Fig.6(a)中可以看出,在相同测试频率不同 BT 添加量条件下,添加 BT 颗粒之后,所有 BT/FKM 复合膜的介电常数相比于纯 FKM 膜均显著提升,且当 BT 添加量为 1.5%时达到最大,这与前文所提到的输出性能变化趋势相吻合,证实 BF-TENG 输出性能的优化来源于 BT 颗粒带来的介电增强效应。然而,当 BT 颗粒添加量增加至 2.0%时,BT 粒子的团聚作用激增,在一定程度上削弱了 BT/FKM 复合膜介电常数的增幅及相应的摩擦电增益作用。

BT/FKM 复合膜介电常数的数值与测试频率呈负相关的关系,在同一 BT 添加量不同测试频率条件下,随着测试频率的增加,所有 BT/FKM 复合膜的介电常数均呈现下降趋势,且 BT 颗粒添加量越高,复合膜的介电常数下降趋势越明显,这是由于引入的 BT 颗粒会不同程度地影响 FKM 分子结构中可被极化的官能团数量[17],从而导致 BT/FKM 复合膜中 FKM 的分子结构状态产生差异。此外,在 $10^2 \sim 10^6$ Hz 的测试频率范围内,所有 BT/FKM 复合膜的介电损耗都维持在相对较低的水平(<0.25)(Fig.6(b)),因而由介电损耗带来的潜在负面影响在 TENG 实际应用过程中几乎可以忽略。

根据前文的结果可以看出,本文通过在 FKM 中引入高介电的 BT 颗粒对摩擦材料的结构进行设计,进而对其介电常数进行调控,而高介电常数有助于提升摩擦材料的电荷密度,进而增加相应 TENG 器件的输出性能。相应的提升机理可以从 BF-TENG 的器件结构特点出发,根据其近似于平行板电容器的结构特点及其本征电容的特性,建立起如 Fig.6(c)所示的模型进行详细分析和论证。该模型的等效电

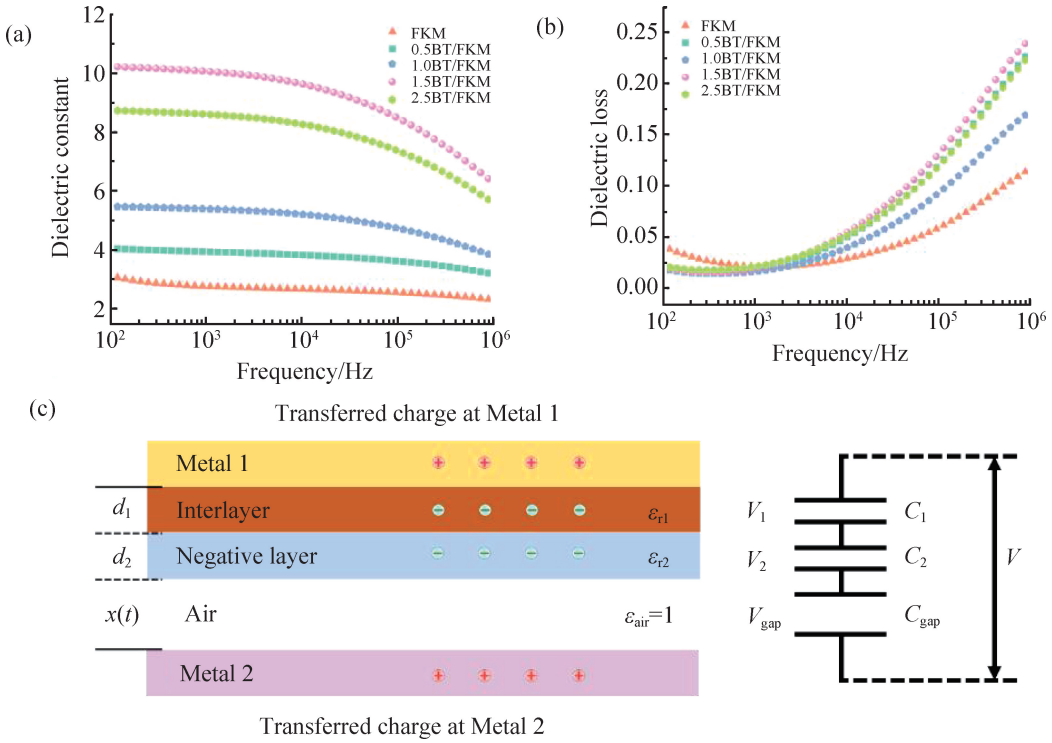


Fig. 6　Effect of different BT additions on (a) dielectric constant and (b) dielectric loss of BT/FKM composite films; (c) enhancement mechanism of BF-TENG by BT addition

路图为相互串联的 3 个电容,分别对应 PI 中间层、电负性摩擦层、摩擦层间的空气间隙层。此时,整个平行板电容器模型(即 BF-TENG 器件)的摩擦电势(V)可由上述等效电路结构推导得出,如式(1)所示[18]

$$V=-Q\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_{gap}}\right)+V_{OC}=-\frac{Q}{S\varepsilon_0}\left(\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}}+\frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}+x(t)\right)+\frac{\sigma x(t)}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

此外,BF-TENG 中的另一项关键指标转移电荷密度(σ')也与中间层相对介电常数(ε_{r1})和负摩擦层相对介电常数(ε_{r2})密切相关[19],如式(2)所示

$$\sigma'=\frac{\sigma x(t)}{\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}}+\frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}+x(t)} \tag{2}$$

式中:Q——两电极间的转移电荷量,C;C_1,C_2 及 C_{gap}——分别为 PI 中间层、电负性摩擦层及摩擦层间空气间隙层的电容,F;V_{OC}——开路电压,伏特(V);S——有效接触面积,m^2;ε_0,ε_{r1},ε_{r2}——分别为真空介电常数、PI 中间层和电负性摩擦层的相对介电常数,无量纲;d_1,d_2——分别为 PI 中间层和电负性摩擦层的厚度,m;$x(t)$——摩擦层空气间隙层的间距,m;σ——摩擦层的表面电荷密度,C/m^2。

根据式(1)和(2)可知,摩擦材料的相对介电常数(ε_{r1} 和 ε_{r2})与其表面电荷密度和转移电荷密度密切关联。一般而言,相对介电常数的增大会导致 BF-TENG 电荷密度的提高,进而提升相应器件的转移电荷量和摩擦电势。而 BF-TENG 的短路电流反映出感应电荷在外电路中的转移程度,即短路电流的数值大小也与转移电荷密度的大小呈正相关。因此,BF-TENG 摩擦材料相对介电常数的增加能有效增强其电输出性能。

2.4　工作频率对输出性能的影响

TENG 的输出性能与其工作频率有直接关系[20]。以 1.5BT/FKM 复合膜为电负性摩擦材料为例,测试不同工作频率对 BF-TENG 输出性能的影响,结果如 Fig.7 所示。随着摩擦材料间接触频率的升高,BF-TENG 的转移电荷密度、短路电流密度和输出电压数值均逐渐增加,其数值由 0.5 Hz 的 50 $\mu C/m^2$,3.3 mA/m^2 和 230 V 分别提升至 2.5 Hz 的

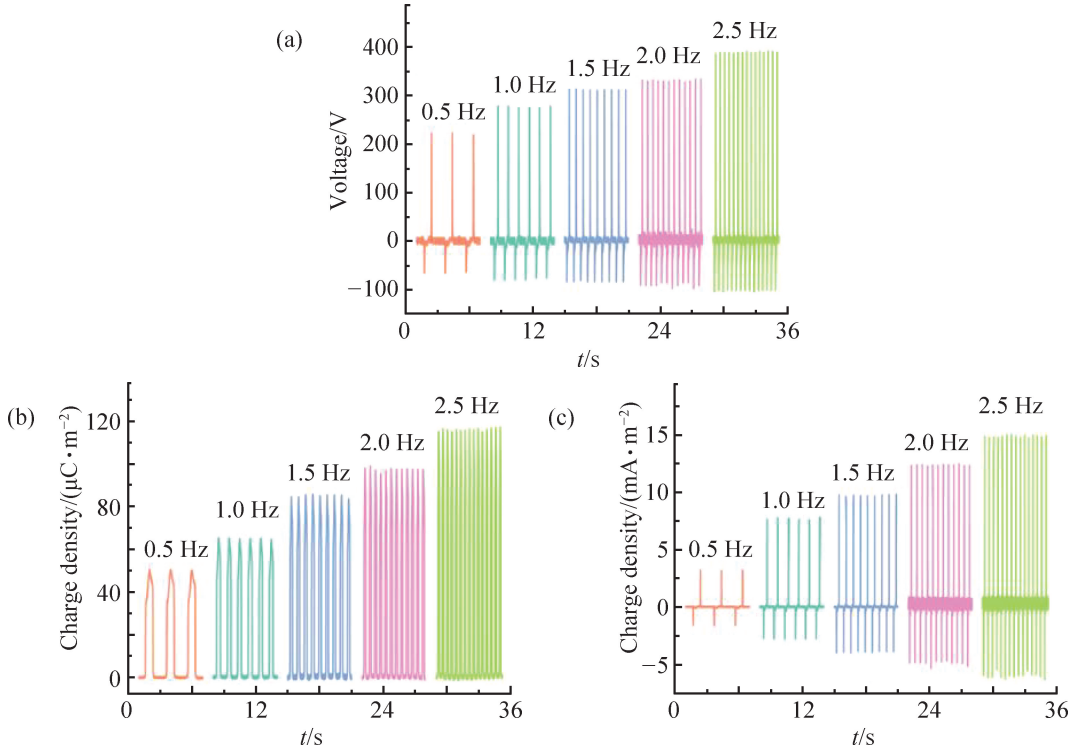


Fig. 7 (a) Output voltage, (b) transferred charge density, and (c) short-circuit current density of BF-TENG at different working frequencies

117 μC/m^2,15.1 mA/m^2 和 390 V,分别提高 134%,358% 和 70%。

3 结论

根据对 BF-TENG 的电输出性能测试分析,结合 BT/FKM 复合膜的微观结构和介电性能分析结果,得到如下结论。在 FKM 基体中添加的 BT 颗粒均分布在复合膜内部,当 BT 颗粒添加量超过 1.5% 时,其在复合膜内部出现明显的团聚。器件结构中引入 PI 层能有效提升电输出性能。以 PI 为中间层,并在 FKM 内部添加 1.5% 的 BT 颗粒时,BF-TENG 的转移电荷密度、短路电流密度和输出电压分别较 BT 颗粒添加前提高了 164%,208% 和 175%,继续增加 BT 颗粒添加量时,电输出性能呈先增后减的趋势。机制探究发现,引入的 PI 层作为电荷捕获层和存储层,能减缓电荷从陷阱中逸出的速率,降低逸出电荷与电极上相反电荷相结合的几率;添加适量的 BT 颗粒可以提高 BT/FKM 复合膜的介电常数,增大 BF-TENG 工作过程中的表面电荷密度,进而提升相应器件的转移电荷量和摩擦电势。进一步根据 BF-TENG 器件的本征电容特性,深入分析了 BT 介电颗粒对其电输出性能的增强机制,即 BF-TENG 的外电路短路电流与转移电荷密度正相关。为高性能电负性摩擦材料的设计与制备提供了新参考。

参考文献:

[1] Zhang X, Hu G K, Liu M J, *et al*. Advanced electrospun fiber-based triboelectric nanogenerators: from diversified designs to customized applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158636.

[2] Liu D, Zhou L L, Cui S N, *et al*. Standardized measurement of dielectric materials' intrinsic triboelectric charge density through the suppression of air breakdown[J]. Nature Communications, 2022, 13: 6019.

[3] Cho H, Kim I, Park J, *et al*. A waterwheel hybrid generator with disk triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator as a power source for an electrocoagulation system[J]. Nano Energy, 2022, 95: 107048.

[4] Li X J, Zhang L Q, Feng Y G, *et al*. Solid-liquid triboelectrification control and antistatic materials design based on interface wettability control[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 1903587.

[5] Zhang X, Liu M J, Zhang Z Y, *et al*. Highly durable bidirectional rotary triboelectric nanogenerator with a self-lubricating texture and self-adapting contact synergy for wearable

applications[J]. Small, 2023, 19: 2300890.

[6] Sun N, Wang G G, Zhao H X, *et al*. Waterproof, breathable and washable triboelectric nanogenerator based on electrospun nanofiber films for wearable electronics[J]. Nano Energy, 2021, 90: 106639.

[7] Jiao Y, Lin Z H, Guo X, *et al*. Compositional engineering of hybrid organic-inorganic lead-halide perovskite and PVDF-graphene for high-performance triboelectric nanogenerators[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16: 3532-3541.

[8] Rana S M S, Rahman M T, Salauddin M, *et al*. Electrospun PVDF-TrFE/MXene nanofiber mat-based triboelectric nanogenerator for smart home appliances[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13: 4955-4967.

[9] Wang X M, Zhang Y H, Liao H W, *et al*. Dielectric enhancement by inorganic nano-fillers for triboelectric optimization[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13: 7634-7655.

[10] Shi K M, Zou H Y, Sun B, *et al*. Dielectric modulated cellulose paper/PDMS-based triboelectric nanogenerators for wireless transmission and electropolymerization applications[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 30: 1904536.

[11] Lv S S, Zhang X, Huang T, *et al*. Trap distribution and conductivity synergic optimization of high-performance triboelectric nanogenerators for self-powered devices[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13: 2566-2575.

[12] Cao C, Shen F, Xin C, *et al*. Electro-mechano transduction of stacked triboelectric nanogenerator considering wave force: modeling, validation and applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 153738.

[13] Zhou Z J, You C Y, Jia J Z, *et al*. Flexible triboelectric nanogenerator via magnetic field-orientated nanocomposites as a self-powered sensor for wireless transmission-based remote security systems[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 726: 137775.

[14] Liu J J, Afzal S U, Wang K B, *et al*. Triboelectric nanogenerators based on polyimide membranes doped with barium titanate nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2025, 2: 107-115.

[15] Wang S, He M J. A flexible triboelectric nanogenerator-enabled insole for self-powered gait monitoring in football applications[J]. Energy Reports, 2025, 14: 803-812.

[16] 杨丽, 蒋晓琦. 基于激光诱导石墨烯电极的柔性纸基摩擦纳米发电机[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(3): 61-71.
Yang L, Jiang X Q. Flexible paper-based triboelectric nanogenerators based on laser-induced graphene electrodes[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2025, 44(3): 61-71.

[17] 胡光凯, 张笑瑞, 徐航, 等. 端氨基液体丁腈橡胶/环氧树脂绝缘胶黏剂的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 144-150.
Hu G K, Zhang X R, Xu H, *et al*. Preparation and properties of amine terminated liquid nitrile rubber/epoxy resin insulating adhesive[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11): 144-150.

[18] Niu S M, Wang S H, Lin L, *et al*. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source[J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6: 3576-3583.

[19] Zhu G, Pan C F, Guo W X, *et al*. Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning[J]. Nano Letters, 2012, 12: 4960-4965.

[20] Liu M J, Zhang X, Xin Y, *et al*. Earthworm-inspired ultra-durable sliding triboelectric nanogenerator with bionic self-replenishing lubricating property for wind energy harvesting and self-powered intelligent sports monitoring[J]. Advanced Science, 2024, 11: 2401636.

Barium Titanate Nanoparticles/Fluoroelastomer Composite Multi-Layer Triboelectric Nanogenerator

Guangkai Hu[1], Mengjiao Liu[2], Xin Zhang[2], Bin Yu[2], Tao Huang[2], Hao Yu[2]

(*1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China;*
2. State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: Triboelectric nanogenerators (TENGs) can capture the low-frequency, disordered, and fragmented high-entropy energy in the surrounding environment and convert it into electrical energy. However, at present, this main focuse is on increasing the cumulative amount of surface charge of friction materials, and there are shortcomings such as the inability to fully utilize the overall volume of the friction layer and the short enhancement cycle. Herein, fluoroelastomers (FKM) and polyimide (PI) were respectively used as matrix and interlayer of electronegative friction materials. The electrical output performance was significantly improved by uniformly adding high dielectric barium titanate nanoparticles (BT particles) to the matrix. The introduced PI interlayer serves as the charge capture layer and storage layer, which slows down the rate of charge escape from the trap while decreasing the probability of the escaped charge combining with the opposite charge on the electrode. Meanwhile, adding an appropriate amount of BT particles can increase the dielectric constant of the composite film and the surface charge density during working process of TENG. When the addition amount is 1.5%, the corresponding transfer charge density, short-circuit current density and output voltage are 66 $\mu C/m^2$, 8 mA/m^2 and 275 V, respectively, which are increased by 164%, 208% and 175%, respectively, compared with those before the addition of BT particles. Based on the intrinsic capacitance characteristics of the corresponding TENG devices, the enhancement mechanism of BT dielectric particles on the electrical output performance was deeply analyzed. This work provides a new reference for the design and fabrication of high-performance electronegative friction materials.

Keywords: triboelectric nanogenerator; fluoroelastomers; dielectric-enhanced; interlayer