DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2025.03.008

基于激光诱导石墨烯电极的柔性纸基摩擦纳米发电机

杨 丽,蒋晓琦
(河北工业大学 生命科学与健康工程学院,天津 300130)

摘 要: 为缓解传统能源稀缺带来的压力,同时减少能源开发和消耗过程中对环境的危害,采用激光直写技术,瞬态烧蚀牛皮卡纸,一步制备激光诱导石墨烯(laser induced graphene, LIG)电极,在 LIG 电极上旋涂硅橡胶(Ecoflex)形成摩擦负电层,制备单电极柔性纸基摩擦纳米发电机(card paper-triboelectric nanogenerator,CP-TENG)。分析扫描速率、激光功率等激光扫描参数和摩擦负电层厚度对于摩擦纳米发电性能的影响规律,确定最佳工艺参数;为进一步提高输出性能,采用折纸结构设计,制备了多单元结构 CP-TENG。结果表明:激光扫描速率为 15 cm/s、扫描功率为 3.6 W、摩擦负电层厚度为 0.9 mm 时,所制备的单电极 CP-TENG 实现了高性能输出,在负载频率 10 Hz、负载力 10 N 条件下 CP-TENG 开路电压峰-峰值可达 61.8 V,在负载力提高到 16 N 时开路电压峰-峰值最高可达 97.1 V,负载电阻为 18 MΩ 时输出功率为 47.8 μW;单电极 CP-TENG 能够承受多种弯曲折叠变形且性能稳定,经历 1 000 次折叠后其 LIG 方阻仅从初始的 16 Ω/sq 微增至 18 Ω/sq,依然具有良好的输出性能;多单元结构 CP-TENG 的输出性能进一步提升,当摩擦单元数量从 1 个递增至 6 个时,开路电压峰-峰值由 41 V 提升至 188 V;与编织结构相比,啮合结构的多单元 CP-TENG 输出性能更好,开路电压最高可达 389 V;将单电极 CP-TENG 贴附于人体关节部位,可实现人体关节位姿的自供能监测力。

关键词: 纸基摩擦纳米发电机;激光诱导石墨烯;多单元折纸结构;人体关节监测
中图分类号: TM910 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2025)03-0061-11

Flexible paper-based triboelectric nanogenerators based on laser-induced graphene electrodes

YANG Li, JIANG Xiaoqi
(School of Health Sciences and Biomedical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: To relieve the pressure caused by the scarcity of traditional energy sources and simultaneously reduce the environmental harm during the energy development and consumption processes, laser direct-writing technology was adopted. Kraft cardboard was transiently ablated to prepare flexible laser-induced graphene (LIG) electrodes in one step. Then, Ecoflex silicone rubber was spin-coated on the LIG flexible electrodes to form a negative triboelectric layer, thus preparing a single-electrode flexible paper-based triboelectric nanogenerator (CP-TENG). The influence laws of laser scanning parameters such as scanning rate and laser power, as well as the thickness of the negative triboelectric layer, on the triboelectric nanogeneration performance were analyzed, and the optimal process parameters were determined. To further enhance the output performance, an origami-structure design was used to prepare a multi-unit structured paper-based triboelectric nanogenerator. The results showed that when the laser scanning rate was 15 cm/s, the scanning power was 3.6 W, and the thickness of the negative triboelectric layer was 0.9 mm, the prepared single-electrode CP-TENG achieved high-performance output. Under the conditions of a load frequency of 10 Hz and a load force of 10 N, the peak-to-peak open-circuit voltage of CP-TENG could reach 61.8 V. When the load force was increased to 16 N, the peak-to-peak open-circuit voltage could reach up to 97.1 V. When the load resistance was 18 MΩ, the output power was 47.8 μW. The single-electrode CP-TENG could withstand various bending and folding deformations with stable performance. After 1 000 folds, the sheet resistance of LIG only slightly increased from the initial 16 Ω/sq to 18 Ω/sq, still main

收稿日期: 2025-02-28
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475591)
通信作者: 杨 丽(1983—),女,博士,研究员,主要研究方向为柔性可穿戴电子器件。E-mail:yangli5781@126.com

taining good output performance. The output performance of the multi-unit structured CP-TENG was further improved. When the number of friction units increased from 1 to 6, the peak-to-peak open-circuit voltage increased from 41 V to 188 V. Compared with the braided structure, the multi-unit CP-TENG with a meshing structure had better output performance, and its open-circuit voltage could reach 389 V. By attaching the paper-based triboelectric nanogenerator to human joint parts, self-powered monitoring of human joint postures could be achieved.

Key words: paper-based triboelectric nanogenerator; laser-induced graphene; multi-unit origami structure; human joint monitoring

随着物联网、大数据、人工智能等新技术的产生，传感器的应用也变得越来越广泛[1-2]，但都需要依赖电池长期供电，由此造成的资源浪费和环境污染非常严重[3-4]。摩擦纳米发电机（triboelectric nanogenerator，TENG）可以收集环境中的低频机械能如人体运动产生的能量、风能、水能等，并将其转化为电能，然后通过合理的电路设计为电子器件提供稳定的持续电源，实现器件的自供电功能[5-6]。与其他能量收集设备相比，TENG 具有制备简单、成本低、电压输出高、材料选择多样等优点[7-8]。

但 TENG 的发展过程仍存在关键难题，例如，大多数 TENG 的基底材料为不可降解甚至会对环境造成污染的有机高分子材料和金属材料，如聚四氟乙烯、聚偏二氯乙烯、铜、铝等[9-10]。此外，柔性 TENG 的电极制造工艺通常采用涂层、溅射、喷墨印刷和气溶胶喷射印刷等技术，这些技术存在加工步骤繁杂、加工条件苛刻、成本高昂、组装难度大的难题，难以满足快速批量化制备、多样化场景应用以及设备集成的需求[11-12]。因此，探索 TENG 柔性电极的低成本、快速制造方法成为当前的研究热点。激光诱导石墨烯技术（laser induced graphene，LIG）能够对含碳前驱体进行瞬态烧蚀，通过一步反应制备出三维多孔石墨烯，极大简化了制备流程，降低了生产成本。同时，LIG 具备良好的导电性与机械强度，使其成为 TENG 电极材料的理想选择[13-14]。随着资源短缺与环境污染等问题加剧，清洁能源的高效转化和绿色传感器件的开发成为研究热点[15-16]，纸基材料因其低成本、可生物降解、生物安全性高等优点，广泛应用于绿色电子器件的基底材料[17-19]。

本文采用激光直写技术瞬态烧蚀牛皮卡纸，一步制备激光诱导石墨烯柔性电极，并在 LIG 电极上旋涂了具有电负性的硅橡胶（Ecoflex）形成摩擦负电层，研发了三明治结构的单电极纸基柔性摩擦纳米发电机（card paper-triboelectric nanogenerator，CP-TENG）。为进一步提高输出性能，采用折纸结构设计，研发了多单元结构的 CP-TENG，并将 CP-TENG 贴附于人体关节部位，考察其在人体关节监测和步态监测中的应用效果。

1　实验部分

1.1　实验材料与设备

主要材料：Ecoflex A、B 双组份硅橡胶（Ecoflex TM00-50），美国 Smooth-on 公司；双组份耐高温导电银胶（8827X），中国圣格鲁科技有限公司；纯木浆牛皮卡纸（400 g/m^2），中国艺彩宸有限公司。

主要设备：ULS 2.30 型二氧化碳激光器，美国优利公司；KW-4A 型匀胶机，中国赛德凯斯电子有限公司；ST-2258C 型四探针方阻仪，中国晶格电子有限公司；DH 301 型数字信号发生器、DH 5872 型功率放大器、DH 40100 型激振器、3A105 型碰撞传感器，中国东华测试技术股份有限公司；MDO 5104B 型示波器，美国泰克科技公司；6514 型静电计，美国吉时利仪器公司；Vertex.C.EIS 型电化学工作站，荷兰艾维科技公司；Nova Nano SEM 450 型扫描电子显微镜，美国 FEI 公司；inVia Reflex 型激光显微拉曼光谱仪，英国雷尼绍公司。

1.2　单电极 CP-TENG 的制备流程

CP-TENG 的制备流程如图 1 所示。

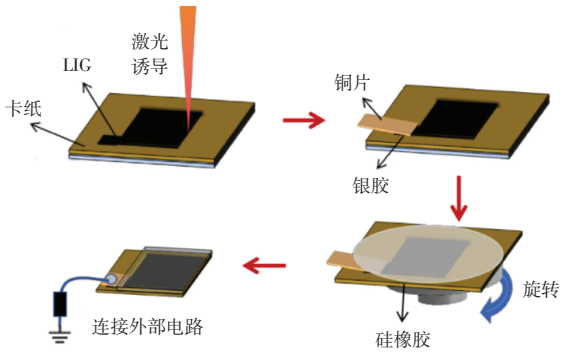
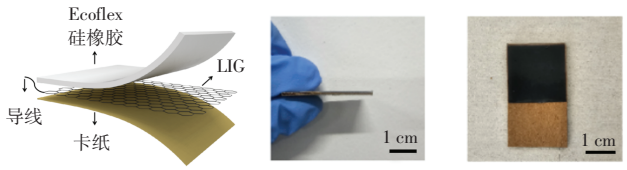


图 1　CP-TENG 的制备过程

Fig.1　Process of CP-TENG

首先，利用二氧化碳激光雕刻机对 400 g/m^2 的商用牛皮卡纸进行烧蚀处理，在卡纸上形成具有良好导电性的石墨烯网络，将该网络作为 CP-TENG 的电极，即 LIG 电极。将 Ecoflex 硅橡胶溶液的 A 和 B 部分以 1∶1 的体积比混合后再以 1 500 r/min 的速率磁性搅拌 1 min。将 LIG 电极牛皮卡纸固定在匀浆机上，再将 1 mL 的 Ecoflex 硅橡胶混合溶液倒在方形 LIG 电极上以 500 r/min 旋涂 30 s。迅速将其置于真空干燥箱中

10 min 以去除气泡，再转移至烘干箱于 60 ℃固化 2 h。取出后将其裁剪至 2 cm × 2 cm 大小方形块，并用银胶连接外部电路，最终成功制备出单电极工作模式下的 CP–TENG，具体结构如图 2 所示。



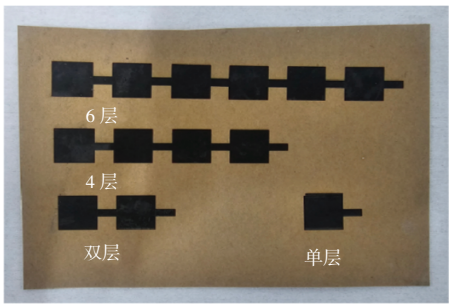
（a）结构示意图　（b）实物侧面　（c）实物平面

图 2　单电极 CP–TENG 的结构示意图

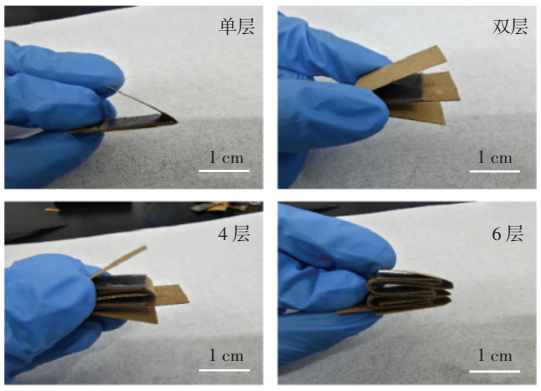
Fig.2　Schematic diagram of structure of CP–TENG

1.3　多单元折纸结构的 CP–TENG 制备

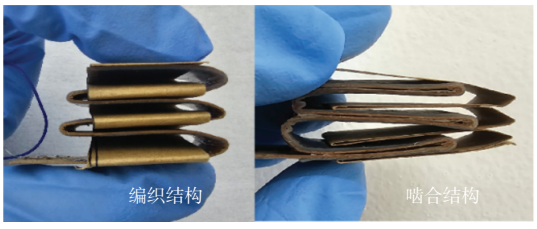
图 3 所示为多单元结构的 CP–TENG 的制备。



（a）串联 LIG 电极



（b）多单元结构



（c）2 种多单元折纸结构

图 3　多单元结构的 CP–TENG 制备

Fig.3　Preparation of CP–TENG with multi–unit structure

得益于 LIG 技术能够在柔性基底上大规模烧蚀出具有良好柔韧性和导电性的石墨烯，在激光功率 3.6 W 和扫描速率 15 cm/s 基础上，利用激光直写技术的可模式性和可编程特性，设计了串联 LIG 电极，如图 3(a)所示，用于制作多单元结构的 CP–TENG。本文构建了 4 种不同摩擦单元数量的 CP–TENG，即单单元结构、二单元结构、四单元结构以及六单元结构，如图 3(b)所示。其折叠结构的构建方式具体步骤为：将一对 Ecoflex 浇筑的 LIG 电极反向粘合，随后对摩擦正电性的卡纸条进行相同操作，使二者相互啮合，类似于 2 个齿轮相互咬合。为了探究不同结构多单元 CP–TENG 对能量输出性能的影响，本文设计了另一种折纸结构的 CP–TENG，由于 2 个摩擦电层相互交织在一起，所以将其称为编织结构。选取了具有 6 个单元的 LIG 电极，分别采用编织结构与啮合结构将它们制成折纸结构的 CP–TENG，如图 3(c)所示。

1.4　性能测试与结构表征

（1）微观形貌表征：选用 Nova Nano SEM 450 型扫描电子显微镜观察试样的微观形貌。

（2）拉曼光谱分析：采用 inVia Reflex 型激光显微拉曼光谱仪对试样进行分析，选择 514 nm 波长激光作为激发光源。

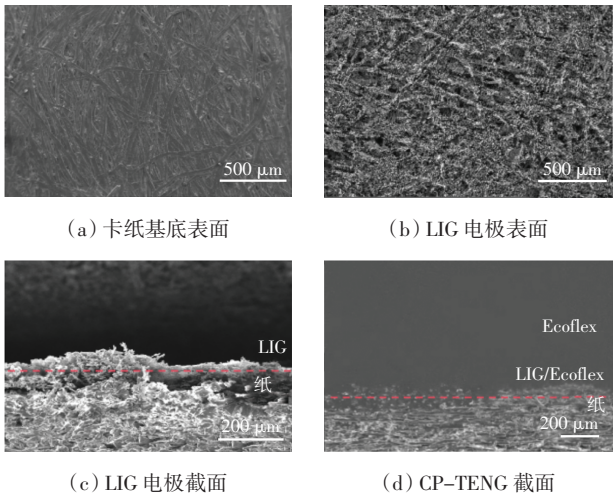
（3）纳米发电机输出性能测定：为系统分析 CP–TENG 的电学输出特性，搭建了由激励系统与测试系统构成的测试平台。激励系统采用东华测试 DH 系列设备（含 DH1301 信号发生器、DH5872 功率放大器及 DH40100 激振器）。测试系统采用 MDO 5104B 型示波器测试开路电压；采用 6514 型静电计测试转移电荷密度；利用 Vertex.C.EIS 型电化学工作站测量 CP–TENG 的短路电流密度。

2　结果与讨论

2.1　CP–TENG 的结构表征

激光烧蚀前后卡纸的微观形貌以及 LIG 电极、CP–TENG 的截面形貌如图 4 所示。

由图 4 可知，未经烧蚀的卡纸表面在微观层面呈现出一种高度有序的纤维交织状态；烧蚀后卡纸的表面均匀形成了一层激光诱导石墨烯（LIG）薄膜，呈现出类似纸纤维的结构特征，由此推断 LIG 的生成可能是沿着纸纤维的排列方向进行的，这些纤维网状的石墨烯结构相互交织，构建起高效的导电通道，赋予了 LIG 材料良好的导电性[20]；CP–TENG 呈现出由卡纸基底、LIG 电极层以及 Ecoflex 硅橡胶摩擦电层组成的三明治结构，这种复合体系结构使 CP–TENG 摩擦电层与电极层紧密结合，增强静电感应，降低电荷转移的



（a）卡纸基底表面　（b）LIG 电极表面

（c）LIG 电极截面　（d）CP–TENG 截面

图 4　激光烧蚀前后卡纸的微观形貌及 LIG 电极、CP–TENG 的截面形貌

Fig.4　Microscopic morphology of cardboard before and after laser ablation and cross–sectional morphology of LIG electrode and CP–TENG

介电损耗与额外电容效应，保障了能量转换效率[21–22]。

LIG 电极的拉曼光谱分析如图 5 所示。

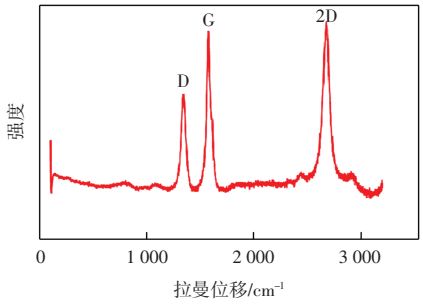


图 5　LIG 电极的拉曼光谱

Fig.5　Raman spectrum of LIG electrode

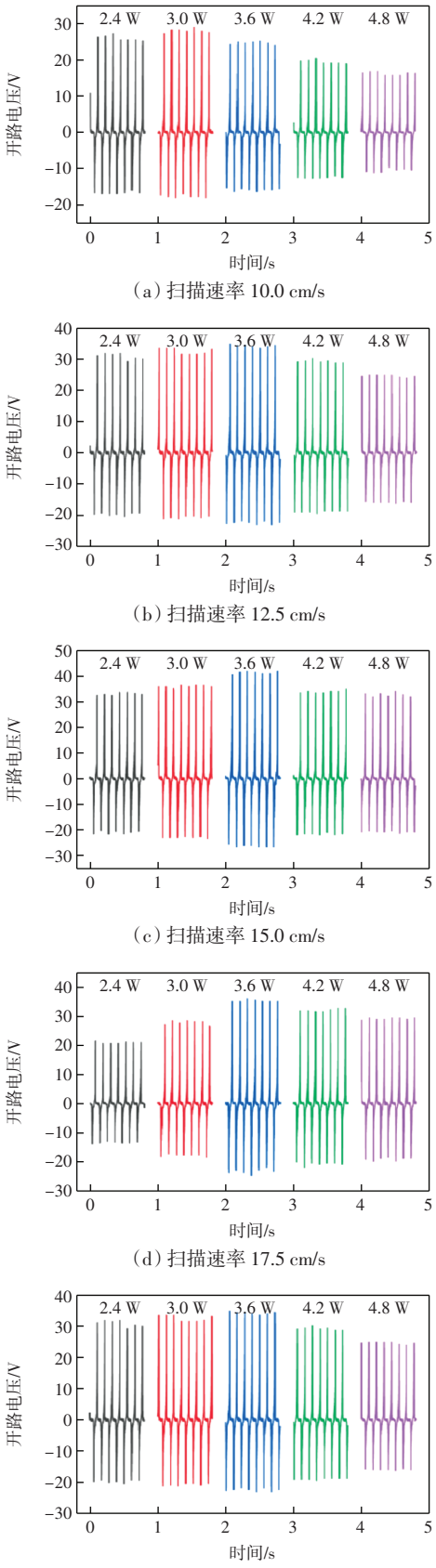
由图 5 可知，LIG 电极的拉曼光谱呈现出 3 个显著的特征峰，即位于 1 350 cm^{-1} 处的 D 峰、1 592 cm^{-1} 处的 G 峰以及 2 700 cm^{-1} 处的 2D 峰，特征峰是少层石墨烯的典型标识，由此证明了本文所制备 LIG 电极材料中石墨烯的存在。并且 D 峰和 G 峰的强度比即 $I_D/I_G = 0.6$，说明石墨烯结晶完整性好、缺陷少、质量较高。由此推测，该 LIG 电极具有优异的导电性和较高的机械强度[23–24]。

2.2　CP–TENG 的最佳制备工艺参数确定

2.2.1　激光烧蚀参数的影响

LIG 电极质量直接影响 CP–TENG 的输出性能，因此探讨激光功率、扫描速率等激光参数对于 CP–TENG 输出性能的影响规律至关重要。不同激光功率和扫描速率下所制备 CP–TENG 输出的开路电压如图 6 所示。

由图 6 可知：激光扫描速率为 10.0 cm/s 时，CP–



（a）扫描速率 10.0 cm/s

（b）扫描速率 12.5 cm/s

（c）扫描速率 15.0 cm/s

（d）扫描速率 17.5 cm/s

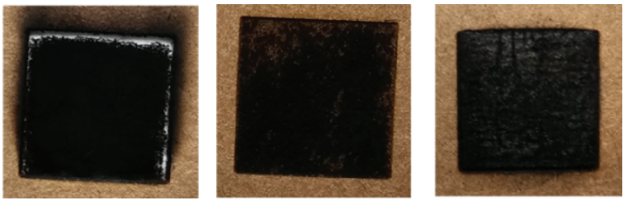
（e）扫描速率 20.0 cm/s

图 6　激光功率、扫描速率对 CP–TENG 输出性能的影响

Fig.6　Influence of laser power and scanning rate on output performance of CP–TENG

TENG 输出的开路电压峰–峰值随着激光功率的增加，呈现先增大后减小的趋势，当激光功率为 3.0 W 时，开路电压峰–峰值达到最高值 45.8 V；激光扫描速率继续加快，CP–TENG 输出的开路电压峰–峰值随着功率的增大同样呈现先增大后减小趋势。具体而言，最大开路电压峰–峰值分别为 57.9 V（12.5 cm/s）、67.6 V（15.0 cm/s）、59.8 V（17.5 cm/s）、58.4 V（20.0 cm/s）。因此，最佳激光烧蚀参数确定为扫描速率 15.0 cm/s、激光功率 3.6 W。

图 7 所示为激光参数对 LIG 电极质量的影响。



（a）激光功率过大，破坏 LIG 结构　（b）激光扫描速率过快，LIG 较为稀疏　（c）激光扫描速率过慢，LIG 出现裂纹

图 7　激光参数对 LIG 电极质量的影响

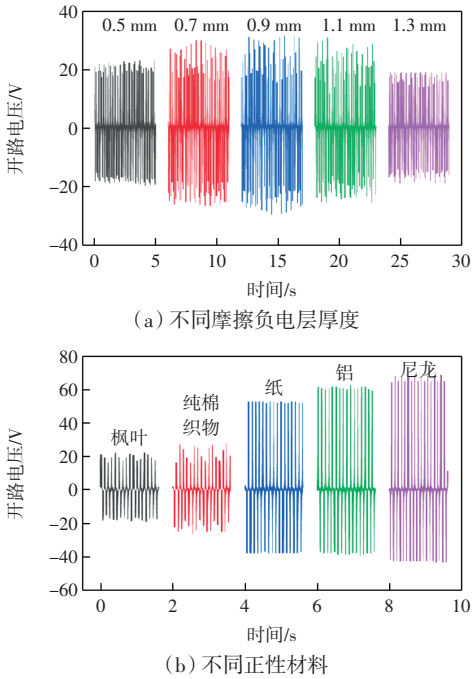
Fig.7　Effect of laser parameters on quality of LIG electrode

当激光功率较低时，烧蚀过程不充分，使得石墨烯方阻较大，可达到 800 Ω/sq；当激光功率过高时，由于能量供给过高，烧蚀过程中单位时间内产生过多的气体冲击 LIG 结构，甚至会造成断路状态，如图 7（a）所示。当激光扫描速率过快时，会导致纤维素的热解和碳原子的重排过程不够充分，此时形成的 LIG 结构比较稀疏，如图 7（b）所示，石墨烯的生长不完整，其方阻为 500 Ω/sq；而激光扫描速率减慢时，激光在每个点的作用时间延长，纤维素有足够的时间进行热解和碳原子的重排，能够形成更完整、更连续的石墨烯结构，方阻也会相应降低，一般可达到较为理想的 15 Ω/sq；但当扫描速率过慢时，会造成过度炭化的现象并出现裂缝，如图 7（c）所示，这使得 LIG 不同测量点之间的电阻差异较大，方阻值最低 20 Ω/sq，最高可达 3 000 Ω/sq。

2.2.2　摩擦负电层厚度与正性材料的影响

不同 Ecoflex 摩擦负电层厚度、不同正性材料条件下 CP–TENG 输出的开路电压如图 8 所示。

由图 8（a）可知，随着摩擦负电层厚度的增加，CP–TENG 输出的开路电压先增大后减小，摩擦负电层厚度为 0.9 mm 时 CP–TENG 输出性能最佳，开路电压为 31.8 V。究其原因，过薄的硅橡胶层因其绝缘性能不足而导致电荷泄漏，影响 CP–TENG 的稳定输出；而适当厚度的硅橡胶层可以在保证良好的摩擦电性能的同时，维持其电学稳定性，使得 CP–TENG 在多次循环工作后仍能保持较好的输出性能；当硅橡胶层过厚时，由于摩擦电层表面的束缚电荷产生的电场需要穿透



（a）不同摩擦负电层厚度

（b）不同正性材料

图 8　摩擦负电层厚度、正性材料对 CP–TENG 输出性能的影响

Fig.8　Influence of friction negative layer thicknesses of friction negative layer and positive materials on output performance of CP–TENG

更厚的材料才能在 LIG 电极层上产生感应电荷，使得感应电荷减少；此外，厚的摩擦电层可能会导致更多的能量损耗，如材料内部的分子、离子等发生碰撞，将部分能量转化为热能，使得可用于输出的电能减少[25]。因此，本文选择 0.9 mm 为最佳摩擦负电层厚度。

由图 8（b）可知，与 4 种常见正性材料相比，纸与硅橡胶构成的 CP–TENG 在负载力 10 N、频率 10 Hz 下具有 51.7 V 的开路电压，低于尼龙织物与金属铝，这一结果与摩擦电序列表高度吻合，有力地验证了摩擦电序列表在预测不同材料组合电学性能方面的准确性。为了提升 CP–TENG 的可降解性，本文采用纸基材料作为正性材料，组成全纸基柔性单电极 CP–TENG。

2.3　CP–TENG 的工作原理与理论仿真

CP–TENG 的工作原理如图 9 所示。

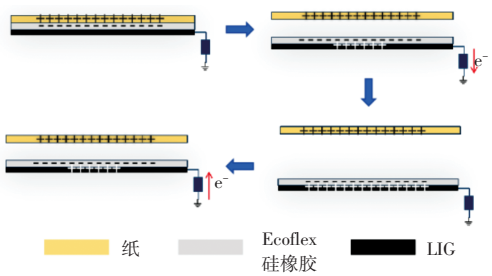


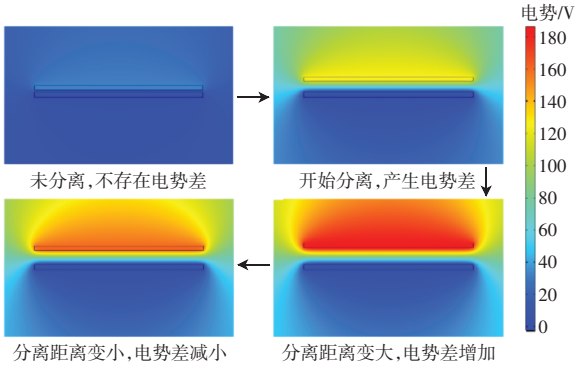
图 9　CP–TENG 的工作原理

Fig.9　Working principle of CP–TENG

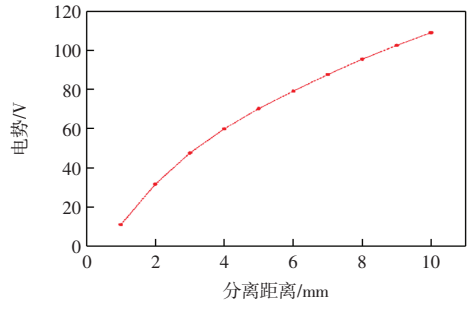
由图 9 可知，当硅橡胶与纸发生接触时，基于摩

擦起电效应，电子从纸表面转移至硅橡胶表面，使得 2 种材料表面分别带有等量异号电荷。从整个外部回路的视角分析，由于此时不存在驱动电子定向移动的电势差，所以外部回路中无电流产生，系统处于相对稳定的静电平衡状态。随着纸逐渐远离硅橡胶，两者之间会产生电势差。为了平衡这一电势差，电子从 LIG 电极层出发，经由外部电路流向地面。当纸与硅橡胶距离不再增大，由于电荷的重新分布，使得整个系统达到静电平衡状态。在此静电平衡状态下，由于不存在驱使电子在外部电路中定向移动的电势差，因此，外部电路中不再有电流信号产生。当纸再次向硅橡胶表面移动并与之接触时，为重新平衡系统中的电势差，电子会从地面反向流动，经外部电路流向 LIG 电极，这同样会产生一个反向输出的电流信号。

为观察单次接触分离过程中正、负摩擦电层的表面电位分布，采用 COMSOL 多物理场仿真软件对 CP–TENG 的电势分布进行了模拟分析。该模型含 3 个矩形层，自上而下为可移动正摩擦电层（纸）、可接触负摩擦电层（硅橡胶）和 LIG 电极层。长度均设置为 20 mm，正摩擦电层厚度 1.0 mm，负摩擦电层厚度 0.5 mm，电极层厚度 0.5 mm。正、负摩擦电层表面电荷密度分别设为 30 μC/m² 和–30 μC/m²，电极层接地。并对垂直接触分离距离 1~10 mm 内 CP–TENG 的摩擦电势和极化电荷进行仿真分析，结果如图 10 所示。



（a）模拟 CP–TENG 接触–分离过程中的电势分布



（b）电势随距离的变化关系

图 10　CP–TENG 的 COMSOL 有限元仿真分析

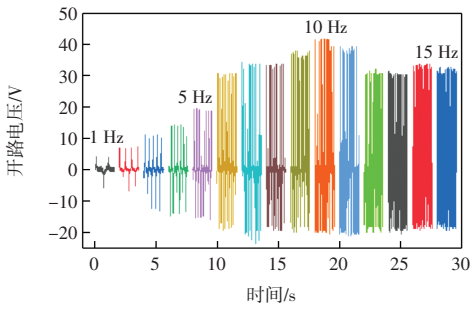
Fig.10　COMSOL finite element simulation analysis of CP–TENG

由图 10 可知，随着 CP–TENG 中摩擦材料间分离距离的逐渐增大，二者之间的电势差逐渐增大；反之，当分离距离逐渐减小时，电势差也随之减小。

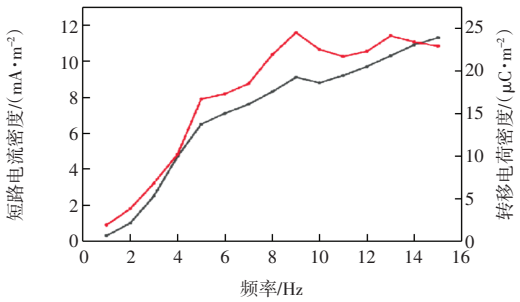
2.4　单电极 CP–TENG 的输出性能分析

2.4.1 负载力施加频率的影响

将最优参数下制备的 CP–TENG 固定在激励系统中的激振器上，将负载力的大小固定为 10 N，改变测试平台中数字信号发生器的脉冲频率（1~15 Hz），调节负载力的施加频率，考察不同频率对 CP–TENG 输出性能的影响，结果如图 11 所示。



（a）频率对开路电压的影响



（b）频率对短路电流与转移电荷的影响

图 11　负载力施加频率对 CP–TENG 输出性能的影响

Fig.11　Effect of load force application frequency on output performance of CP–TENG

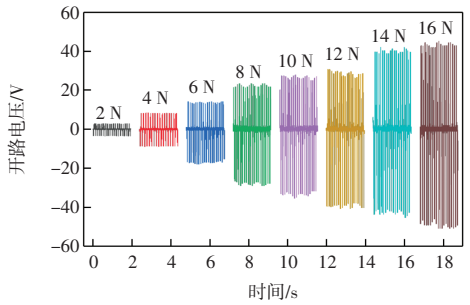
由图 11（a）可以看出，随着负载力施加频率的增大，开路电压呈现先增大后减小的趋势，在 10 Hz 频率下开路电压为 41.4 V，此时开路电压峰–峰值为 61.8 V。CP–TENG 存在最佳频率，原因可能是因为在 1~10 Hz 之间随频率增加，CP–TENG 摩擦层有效接触时间增长，电荷转移量增多，输出电压升高；但超过 10 Hz 时输出电压降低，可能是因为摩擦电层内部电容效应阻碍电荷转移，且材料响应跟不上高频激励，内部能量损耗加剧，综合导致输出电压下降[25]。

由图 11（b）可以看出，转移电荷密度随频率的增加而改变，10 Hz 时转移电荷密度达到了峰值 24.8 μC/m²，变化趋势与电压变化趋势一致。这是因为 TENG 的主要工作原理是静电感应机制，所以表面电荷密度决定其输出电压。TENG 的短路电流密度整体随频率的增

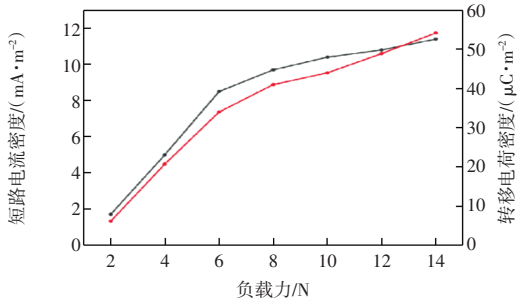
加而增加。这是因为电流密度是单位时间通过的电荷量，当电荷转移的数量一定时，高频下电荷转移速度更快，产生更高的短路电流密度幅值[25]。因此，能观察到短路电流密度随频率的增加而增大。

2.4.2　负载力的影响

在 10 Hz 的最佳频率下调节负载力从 2 N 到 16 N，考察不同负载力对 CP–TENG 输出性能的影响，结果如图 12 所示。



（a）不同负载力对开路电压的影响



（b）不同负载力对断路电流与转移电荷的影响

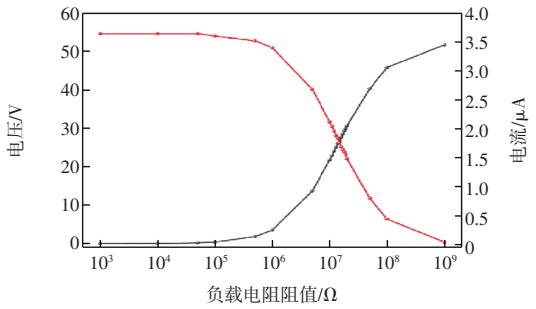
图 12　负载力对 CP–TENG 输出性能的影响

Fig.12　Effect of load force on output performance of CP–TENG

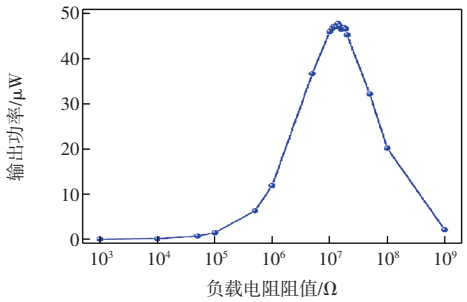
由图 12 可知，CP–TENG 的开路电压随负载力增加而增加，在 16 N 时开路电压为 43.9 V，此时开路电压峰–峰值为 97.1 V，短路电流密度为 11.8 μA/m^2，转移电荷密度为 58.7 μC/m^2。这是因为负载力的增大会增加摩擦层之间的有效接触面积，从而实现更多的电荷转移。增加材料变形程度，优化电荷分布，减少局部积累，提升输出电压[25]。但在实际的实验场景中，过高的负载频率和过大的负载力会使激振器承受超出其正常工作范围的压力和振动，这不仅会导致激振器的损坏，还会直接影响激振器输出激励的稳定性和准确性。因此，综合考虑实验的准确性和激振器的规范使用，本文将 CP–TENG 的最佳工况定义为负载频率 10 Hz、负载力 10 N。

2.4.3　负载电阻的影响

在负载力 10 N、负载频率 10 Hz 条件下将 CP–TENG 接入外部负载电路，考察不同负载电阻对 CP–TENG 输出性能的影响，结果如图 13 所示。



（a）不同负载电阻下的电压和电流



（b）不同负载电阻下的输出功率

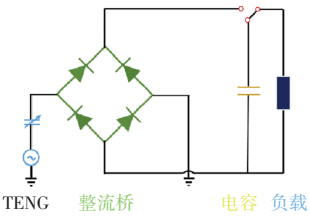
图 13　负载电阻对 CP–TENG 输出性能的影响

Fig.13　Effect of load resistance on output performance of CP–TENG

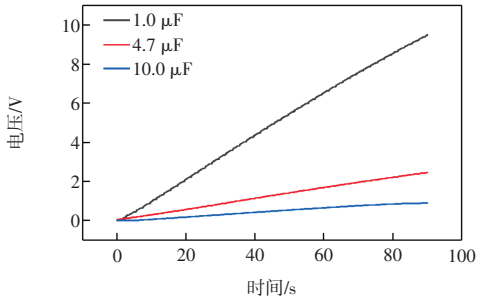
由图 13 可以看出，随着外部负载电阻增大，输出电压增加但输出电流减小；在负载电阻为 18 MΩ 时峰值功率为 47.8 μW。

2.4.4　充电性能

基于 CP–TENG 的自供电系统如图 14 所示。



（a）CP–TENG 自供电电路模型



（b）CP–TENG 给不同电容充电能力测试

图 14　基于 CP–TENG 的自供电系统

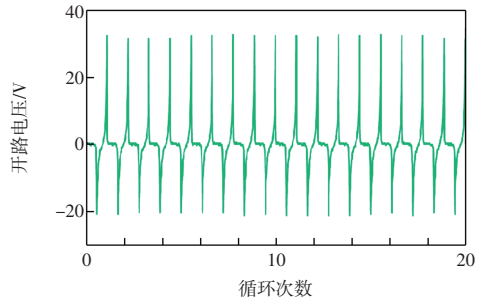
Fig.14　Self–powered system based on CP–TENG

由于 CP–TENG 的内阻过大，难以直接为电子器件供电，通过搭建如图 14(a)所示的自供电电路模型。

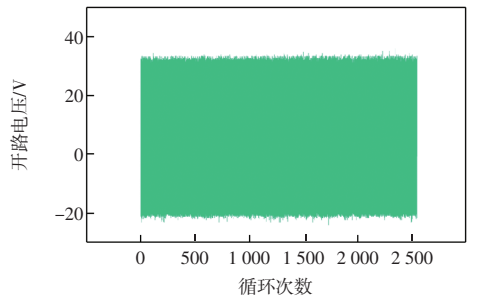
利用该电路可以将 CP–TENG 产生的交流电通过桥式整流器转换为直流电，用于电容器的充电。供电时，使用单刀双掷开关将存有电能的电容直接与负载相连，释放电能，为负载电子器件供电。通过使用手动敲击 CP–TENG，可以快速为 1 到 10 μF 的电容器充电，如图 14(b)所示。

2.4.5　循环稳定性

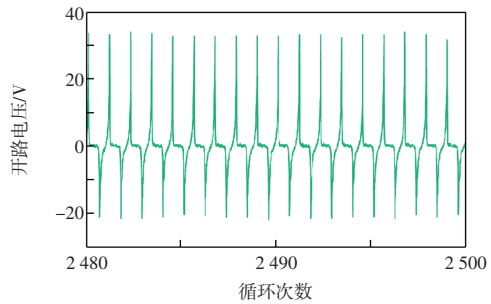
为验证 CP–TENG 的稳定性，在频率为 10 Hz、负载力为 10 N 的最佳负载条件进行了 2 500 次的连续循环实验，结果如图 15 所示。



(a) 1–20 次循环的连续电压输出(局部图)



(b) 2 500 次循环下的连续电压输出



(c) 2 480–2 500 次循环的连续电压输出(局部图)

图 15　CP–TENG 的循环稳定性

Fig.15　Cycle stability of CP–TENG

由图 15 可以观察到，CP–TENG 的电输出特性在 2 500 次连续循环实验前后均能够保持稳定，并未出现明显变化，证明了基于 LIG 电极的 CP–TENG 具有良好的稳定性，具备长时间使用的能力，为可穿戴能源收集、物联网自供电传感等应用提供了稳定性支撑。

2.5　单电极 CP–TENG 的折叠稳定性

将 LIG 电极紧贴在半径为 1.25 cm 的砝码上，如图 16 所示，LIG 方阻变化小于 5%。这说明在曲率为 0.8 cm^{-1} 的弯曲程度下，LIG 电极内部的导电网络能够良好地适应变形，未出现明显的断裂或损坏现象。这得益于 LIG 的网状导电网络和石墨烯片层的弹性形变机制，使其能够有效分散外部应力，避免导电通路的断裂[26]，从而保证了 CP–TENG 在承受多种弯曲折叠形变时的性能稳定。

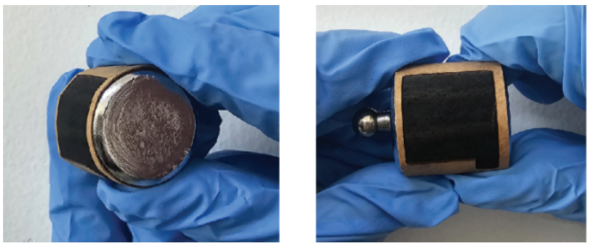
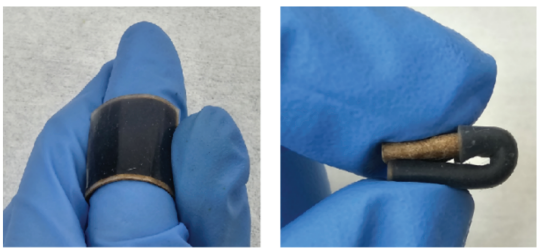


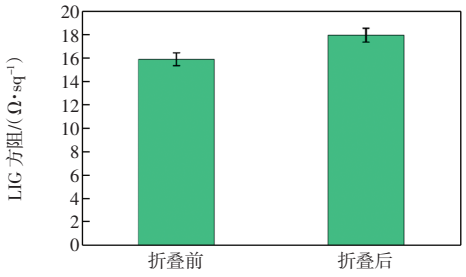
图 16　LIG 电极安全曲率测试

Fig.16　Safety curvature test of LIG electrode

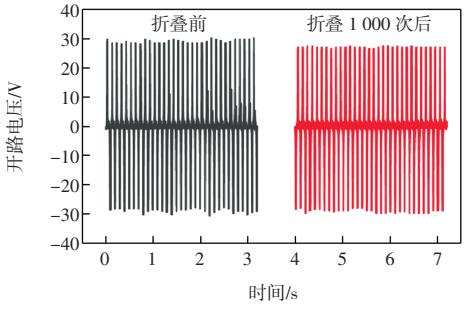
将单电极 CP–TENG 进行 1 000 次折叠前后，其 LIG 方阻和开路电压如图 17 所示。



(a) CP–TENG 的弯曲与折叠的实物



(b) CP–TENG 1 000 次折叠前后 LIG 电阻变化



(d) CP–TENG 1 000 次折叠前后开路电压对比

图 17　CP–TENG 的折叠稳定性

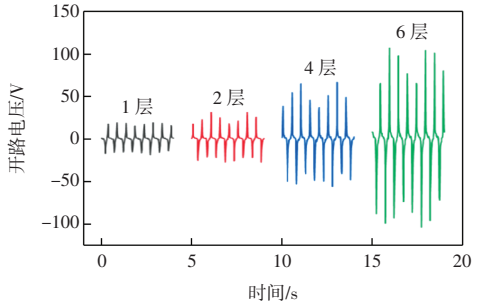
Fig.17　Folding stability of CP–TENG

由图 17 可知，本文所制备单电极 CP–TENG 能够承

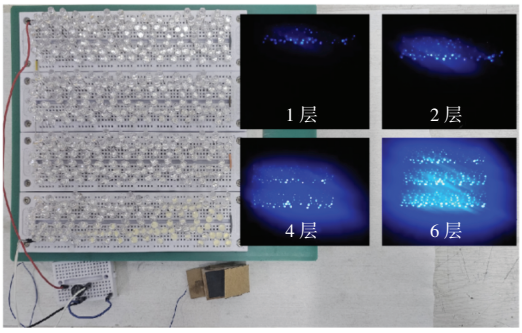
受多种弯曲折叠形变且性能稳定。这得益于 LIG 电极具备良好的柔韧性，并且 LIG 电极与其上浇筑的硅橡胶共同组成的复合体系能够承受机械形变与摩擦作用。这使得 CP–TENG 在经历 1 000 次折叠后，CP–TENG 中的 LIG 方阻仅从初始的 16 Ω/sq 微增至 18 Ω/sq，折叠后的 CP–TENG 依然能维持良好的输出性能，这保障了实际应用中 CP–TENG 在可穿戴设备、移动电子器件等领域的可靠性与使用寿命。

2.6　多单元折纸结构 CP–TENG 的输出性能

设定外界负载为 15 N、频率为 2 Hz，不同摩擦单元数的 CP–TENG 的输出性能对比如图 18 所示。



（a）具有不同摩擦单元数量的 CP–TENG 的开路电压比较



（b）具有不同摩擦单元数量的 CP–TENG 点亮 LED 灯效果

图 18　多单元折纸结构 CP–TENG 的输出性能

Fig.18　Output performance of CP–TENG with multi–unit origami structure

由图 18(a)可知，当摩擦单元数量从 1 个递增至 6 个时，开路电压峰–峰值从 41 V 提升至 188 V。随着 CP–TENG 结构中摩擦单元数量的增多，装置将外界机械能转化为电能的效率提升。然而输出性能并非随单元数量呈线性增加，这可能是由于在不同摩擦单元数量的啮合折纸结构下部分有效摩擦面积损失以及在接触分离过程位移距离的不同所致。为更加直观地展示多单元折纸结构设计对 CP–TENG 电输出性能的提升效果，在昏暗环境中，将不同单元数量的 CP–TENG 置于足底进行踩压，由图 18(b)可以看出，通过踩压 1、2、4、6 层的 CP–TENG 分别可以点亮 60、120、240、360 个 LED 灯。

将编织结构和啮合结构的多单元 CP–TENG 放置在足底，对比它们在实际应用场景下的能量输出情况，结果如图 19 所示。

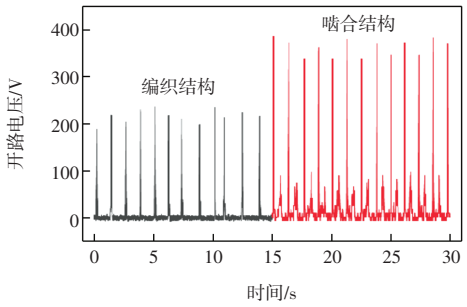


图 19　编织结构与啮合结构 CP–TENG 的开路电压比较

Fig.19　Comparison of open–circuit voltage between CP–TENGwith braided structure and mesh structure

由图 19 可知，啮合结构的多单元 CP–TENG 的开路电压为 389 V，明显高于编织结构的多单元 CP–TENG 的开路电压(207 V)。这可能是因为啮合结构在受到压力作用产生接触后，能够形成更多、更有效的接触区域。当压力消失时，各个单元之间能够更充分地拉开距离。而在编织结构中，单元之间的连接较为紧密，在接触–分离过程中可能会受到彼此之间的牵扯，难以实现像啮合结构那样较大的分离距离，并且难以将全部作用力集中于接触过程，导致在摩擦起电阶段产生的电荷量相对较少，进而影响了整个多单元 CP–TENG 的输出性能。

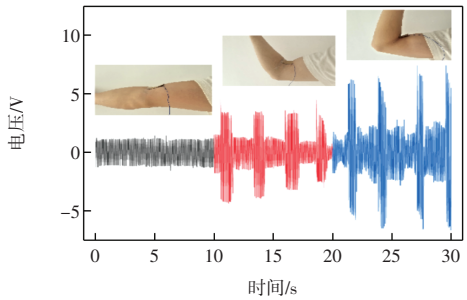
总体而言，利用 CP–TENG 的可折叠性设计多单元结构的 CP–TENG，能有效提升其输出性能，并且采取啮合结构的折叠方式相比编织结构展现出了明显的优势，这为高性能 TENG 的开发提供了一种可行的思路和方法。

2.7　在人体关节监测与步态监测的应用效果

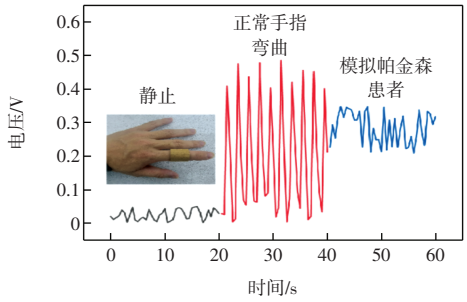
为考察本文所制备 CP–TENG 在人体关节监测与步态监测方面的应用效果，将单电极 CP–TENG 贴于人体不同部位，测试 CP–TENG 的电压信号变化，如图 20 所示。

由图 20(a)可知，将 CP–TENG 贴于肘关节部位，当手肘弯曲程度较小时(0°~60°)，Ecoflex 摩擦电层与皮肤之间的接触–分离程度相对较小，电压信号弱。随着弯曲角度的增大，肘关节的收缩使得皮肤与摩擦电层之间的相对运动加剧，接触–分离的幅度增大，电压信号显著变大。

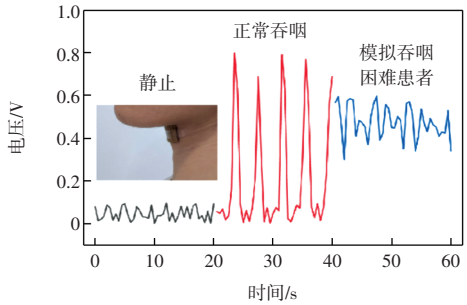
由图 20(b)可知，可以利用 CP–TENG 监测帕金森病。帕金森病早期患者通常在指关节运动方面具有明显特征。患者在静止状态下手指会出现不由自主的震



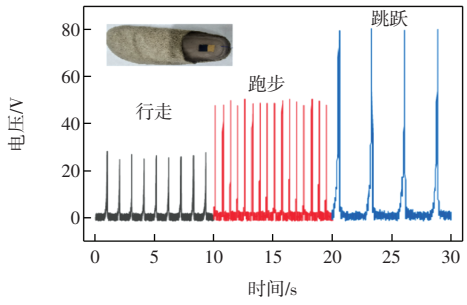
(a) 肘关节的弯曲监测



(b) 模拟帕金森患者与正常人指关节电信号对比



(c) 模拟吞咽困难患者与正常人咽喉电信号对比



(d) 足底运动状态监测

图 20　基于 CP–TENG 的人体健康与运动监测

Fig.20　Human health and motion monitoring based on CP–TENG

颤,而正常弯曲时指关节屈伸带动硅橡胶摩擦电层与皮肤相对运动,产生与运动状态关联的周期性电信号变化。帕金森患者由于不自主的震颤会使得 CP–TENG 与皮肤频繁接触,使得电信号偏高。

由图 20(c)可知,利用 CP–TENG 同时可以检测吞咽困难。当咽喉进行吞咽动作时,咽喉会使 CP–TENG 摩擦电层与皮肤之间产生相对的接触–分离运动。正常吞咽时,摩擦电层之间的接触–分离运动是相对规律的;而吞咽困难时,可能会出现多次无效的吞咽尝试,这会导致摩擦电层之间出现频繁的接触–分离过程。由于这种异常的运动模式,电荷来不及在摩擦电层表面均匀分布就被进一步分离,从而产生了更高的电势差。

由图 20(d)可知,将 CP–TENG 放置于足底,通过输出电信号强度以及频率可以区分低频率的慢走、高频率的跑步以及跳跃。

3　结　论

本研究成功制备了基于纸基材料激光诱导石墨烯电极的摩擦纳米发电机(CP–TENG),并系统研究了其制备过程、结构表征、性能特点及应用。结果表明:

(1) 当激光扫描速率为 15 cm/s、功率为 3.6 W 时,LIG 具备微观片层的网状结构,拉曼分析显示结晶良好,宏观结构保障电荷转移高效。

(2) 利用本文所制备 LIG 电极制成的 CP–TENG 性能优异,开路电压峰–峰值最高可达 97.1 V ,此时短路电流密度为 11.8 μA/m^2,转移电荷密度 58.7 μC/m^2,且循环输出性能稳定。

(3) 多单元折纸结构的设计可有效提升 CP–TENG 的开路电压至 389 V。

(4) 该研究为高性能、可降解的绿色 TENG 的开发提供了新思路和方法。在健康监测领域,可通过附着于人体实现长期、自供电式的生理参数监测;在物联网中,能够为众多分布式传感器节点提供稳定能源;在人机交互方面,可灵敏感知人体动作并转化为电信号,实现交互功能。有望在这些领域得到广泛应用,并推动清洁能源转化和自供电技术的发展。

参考文献

[1] WU M, WANG Y X, GAO S J, et al. Solution–synthesized chiral piezoelectric selenium nanowires for wearable self–powered human–integrated monitoring[J]. Nano Energy, 2019, 56: 693–699.

[2] ZHANG S L, ROACH D J, XU S X, et al. Electromagnetic pulse powered by a triboelectric nanogenerator with applications in accurate self–powered sensing and security[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(10): 2000368.

[3] ASKARI H, KHAJEPOUR A, KHAMESEE M B, et al. Embedded self–powered sensing systems for smart vehicles and intelligent transportation[J]. Nano Energy, 2019, 66: 104103.

[4] CHENG R W, DONG K, LIU L X, et al. Flame–retardant

textile –based triboelectric nanogenerators for fire protection applications[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15853–15863.

[5] ZOU H Y, ZHANG Y, GUO L T, et al. Quantifying the triboelectric series[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1427.

[6] SUN Z Z, YANG L, LIU S C, et al. A green triboelectric nanogenerator composite of degradable cellulose, piezoelectric polymers of PVDF/PA6, and nanoparticles of $BaTiO_3$[J]. Sensors, 2020, 20(2): 506.

[7] TCHO I W, KIM W G, KIM J K, et al. A flutter–driven triboelectric nanogenerator for harvesting energy of gentle breezes with a rear–fixed fluttering film[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107197.

[8] HAN J Y, SINGH H H, WON S, et al. Highly durable direct–current power generation in polarity–controlled and soft–triggered rotational triboelectric nanogenerator[J]. Applied Energy, 2022, 314: 119006.

[9] WANG L L, LIU W Q, YAN Z G, et al. Stretchable and shape–adaptable triboelectric nanogenerator based on biocompatible liquid electrolyte for biomechanical energy harvesting and wearable human–machine interaction[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(7): 2007221.

[10] JING T T, XU B G, YANG Y J. Organogel electrode based continuous fiber with large–scale production for stretchable triboelectric nanogenerator textiles[J]. Nano Energy, 2021, 84: 105867.

[11] GAO S J, WANG R X, MA C X, et al. Wearable high–dielectric–constant polymers with core–shell liquid metal inclusions for biomechanical energy harvesting and a self–powered user interface[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(12): 7109–7117.

[12] WANG W, YU A F, LIU X, et al. Large–scale fabrication of robust textile triboelectric nanogenerators[J]. Nano Energy, 2020, 71: 104605.

[13] LIN J, PENG Z W, LIU Y Y, et al. Laser–induced porous graphene films from commercial polymers[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5714.

[14] YE R Q, JAMES D K, TOUR J M. Laser–induced graphene: From discovery to translation[J]. Advanced Materials, 2019, 31(1): 1803621.

[15] MA M Y, ZHANG Z, LIAO Q L, et al. Self–powered artificial electronic skin for high–resolution pressure sensing[J]. Nano Energy, 2017, 32: 389–396.

[16] YANG W, CHEN H M, WU M Q, et al. A flexible triboelectric nanogenerator based on cellulose–reinforced MXene composite film[J]. Advanced Materials Interfaces, 2022, 9(7): 2102124.

[17] LI M, PAN Y T, WAN L Y, et al. Sisal cellulose paper based triboelectric nanogenerator with high performance for detection of chemical group substitution degree[J]. Nano Energy, 2022, 104: 107937.

[18] YANG M Y, TIAN X, HUA T. Green and recyclable cellulose based TENG for sustainable energy and human–machine interactive system[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 442: 136150.

[19] YAO C H, YIN X, YU Y H, et al. Chemically functionalized natural cellulose materials for effective triboelectric nanogenerator development[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(30): 1700794.

[20] LE T D, PHAN H P, KWON S, et al. Recent advances in laser–induced graphene: Mechanism, fabrication, properties, and applications in flexible electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(48): 2205158.

[21] LUO Y C, YU M L, ZHANG Y T, et al. Highly sensitive strain sensor and self–powered triboelectric nanogenerator using a fully physical crosslinked double –network conductive hydrogel[J]. Nano Energy, 2022, 104: 107955.

[22] HE J M, XUE Y Y, SUN W C, et al. High–performance flexible triboelectric nanogenerator based on environmentally friendly, low –cost sodium carboxymethylcellulose for energy harvesting and self–powered sensing[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(1): 291–301.

[23] 吴娟霞，徐华，张锦. 拉曼光谱在石墨烯结构表征中的应用[J]. 化学学报，2014，72(3)：301–318.
WU J X, XU H, ZHANG J. Raman spectroscopy of graphene[J]. Acta Chimica Sinica, 2014, 72(3): 301–318(in Chinese).

[24] LE T D, PHAN H P, KWON S, et al. Recent advances in laser–induced graphene: Mechanism, fabrication, properties, and applications in flexible electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(48): 2205158.

[25] WANG Z L. From contact electrification to triboelectric nanogenerators[J]. Reports on Progress in Physics, 2021, 84(9): 096502.

[26] HE J M, XUE Y Y, SUN W C, et al. High–performance flexible triboelectric nanogenerator based on environmentally friendly, low–cost sodium carboxymethylcellulose for energy harvesting and self–powered sensing[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(1): 291–301.

本文引文格式：

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 Tiangong University, 2025, 44(3): 61–71(in Chinese).