

# 生命不止, 能量不息

## ——植入式摩擦纳米发电机的研究与应用

刘卓<sup>1</sup>, 王玲<sup>1</sup>, 李虎<sup>1</sup>, 邹洋<sup>2</sup>, 石波璟<sup>2</sup>, 欧阳涵<sup>2</sup>, 李舟<sup>2</sup>

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191

2. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 国家纳米科学中心, 北京 100083

**摘要** 2012年, 研究人员提出了一种将机械能转化为电能的摩擦纳米发电机(TENG), 该技术近年来得到了飞速发展, 实现了对人体运动能、风能、声波能、海洋能等各种机械能的收集。其中植入式摩擦纳米发电机(iTENG)可将生物体内的心跳、呼吸肌运动等生物机械能转化为电能并驱动有源植入式医疗器件, 可显著提高可植入式医疗器件的使用寿命, 在未来植入式医疗行业中有着潜在的应用前景。本文综述了iTENG的结构、工作原理、输出性能及其在有源植入式医疗器件供能应用等方面的最新研究进展, 并在此基础上进一步分析iTENG应用到临床治疗所面临的挑战。

**关键词** 摩擦纳米发电机; 有源植入式医疗器件; 生物机械能; 自驱动

随着医疗技术的不断发展, 满足各类疾病诊断与检测的医疗器件种类日益增多。其中包括有源植入式医疗器件, 诸如心脏起搏器、脑起搏器、神经刺激器、人工耳蜗等(图1)。有源植入式医疗器件植入到体内能够长期工作的一个关键因素就是电池。其电池必须满足高稳定性、高安全性、高可靠性和高寿命、小型化等要求。锂电池作为目前最为成熟的一种电源已经应用到了临床当中, 但它还是有一个不可回避的缺点——电池容量有限。以心脏起搏器为例, 患者平均佩戴约20年, 需要更换电池3次左右, 不仅需要支付昂贵的医



图1 有源植入式医疗器件

疗费用还要承担一定的手术风险。

在植入式医疗器件普及的今天, 遇到这样一个问题: 有源植入式医疗器件需要永不停息的能源供给, 才能给使用者带来安全感。体内植入电池来维持医疗器件运行, 能源有限且不可再生, 同时具有较大的安全隐患。如何实现植入式医疗器件更长效甚至终身供能, 是一项意义重大的研究课题。但是, 去哪里寻找不会枯竭的能源? 如何实现生命不止, 能量不息? 实际上, 从人类本身就可以找到答案。

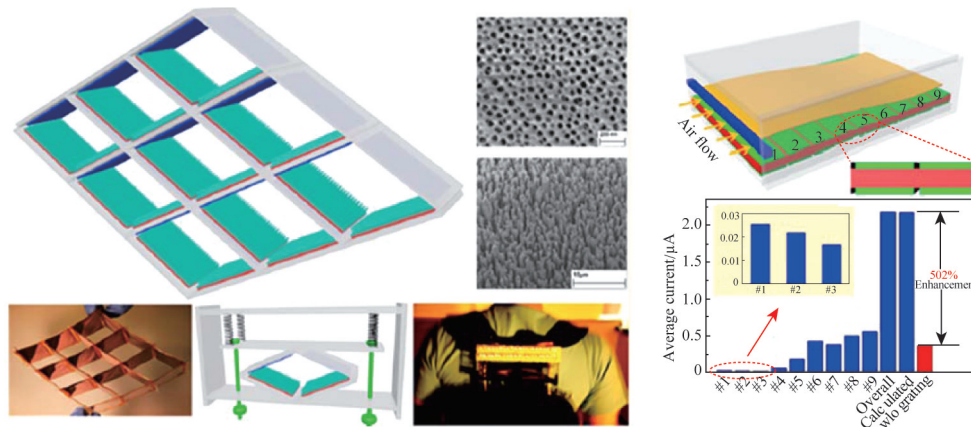
2012年美国佐治亚理工学院王中林研究团队提出了一种将机械能转化为电能的摩擦纳米发电机(iTENG)<sup>[1]</sup>。近年来随着对摩擦纳米发电机研究的深入, 研究者研制出了不同结构的摩擦纳米发电机来收集机械能, 其中包括人体运动、风能、海洋能等<sup>[2-4]</sup>(图2)。并且利用机械运动转化为电信号的原理, 摩擦纳米发电机还可以作为自驱动传感器用于多巴胺检测、紫外探测、角度测量、压力传感等<sup>[5-8]</sup>(图3)。

2014年iTENG研制成功<sup>[9]</sup>。通过将摩擦纳米发电机封装后植入体内收集心跳、呼吸肌运动等机械能并将其转化为电能, 给有源植入式医疗器件提供能源。到目前为止, iTENG已经成功地植入到小鼠和小型猪的体内, 实现了从小动物到大动物的跨越, 收集到了小鼠呼吸肌运动的机械能<sup>[9]</sup>和猪心

收稿日期: 2016-08-22; 修回日期: 2016-12-15

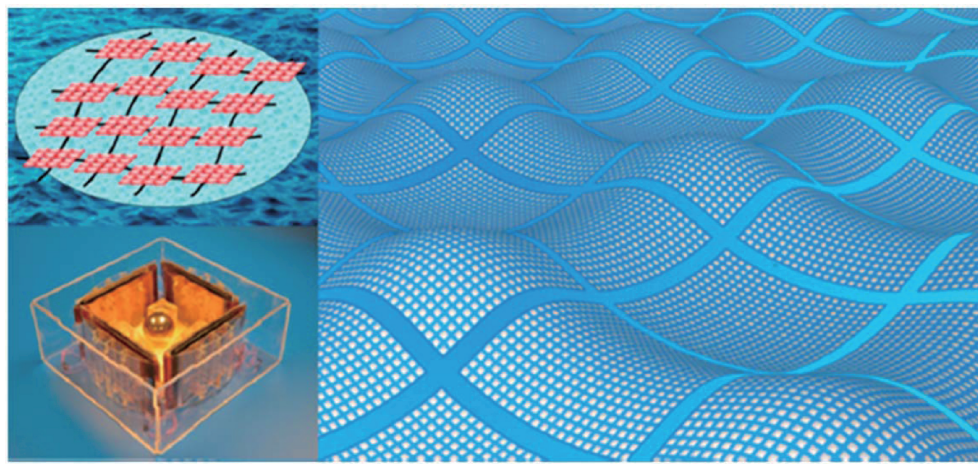
作者简介: 刘卓, 硕士研究生, 研究方向为纳米发电机封装技术及生物应用、细胞力学测量, 电子信箱: liuzhuo@buaa.edu.cn; 李舟(通信作者), 研究员, 研究方向为微纳能源与器件、植入式器件、新型微纳传感技术与生物测量方法, 电子信箱: zli@binn.cas.cn

引用格式: 刘卓, 王玲, 李虎, 等. 生命不止, 能量不息——植入式摩擦纳米发电机的研究与应用[J]. 科技导报, 2017, 35(2): 65-71; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.02.009



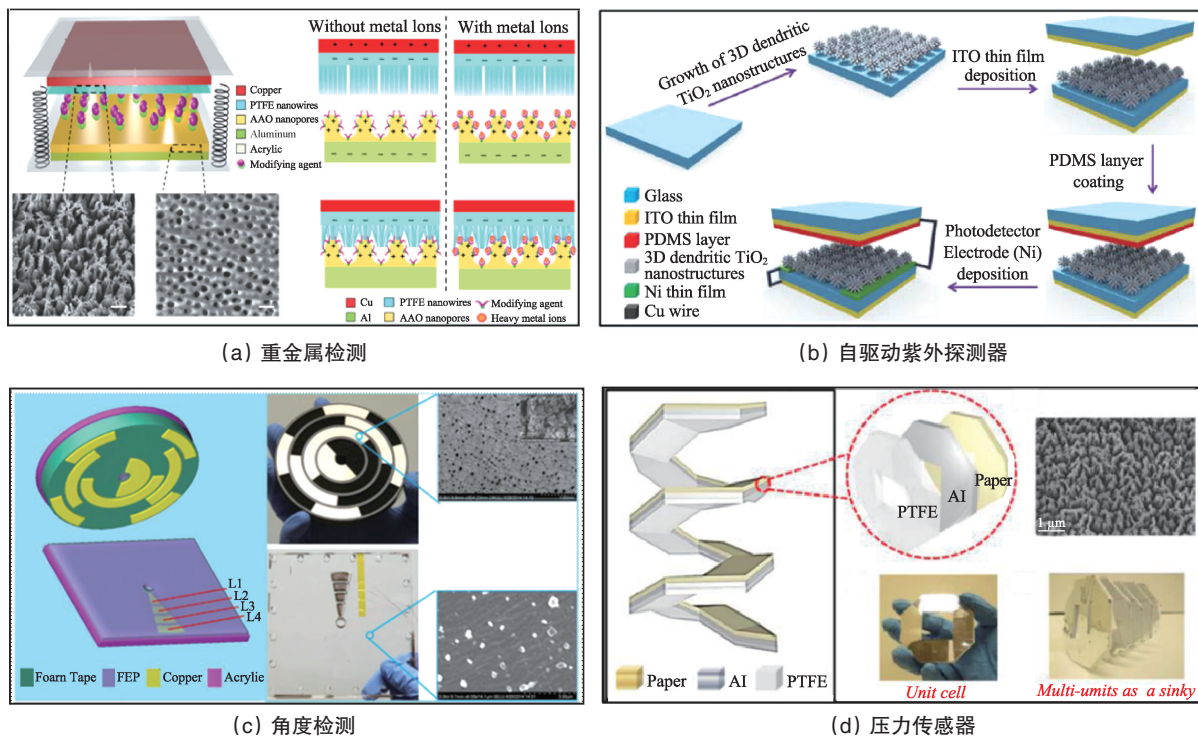
(a) 人体运动能收集

(b) 风能收集



(c) 海洋能收集

图2 TENG收集不同形式的机械能



(a) 重金属检测

(b) 自驱动紫外探测器

(c) 角度检测

(d) 压力传感器

图3 TENG作为自驱动传感器的应用

跳的机械能<sup>[10]</sup>。2016年《Science》子刊《Science Advances》报道了全可降解 iTENG, 实现了 iTENG 给瞬态有源植入式器件供能<sup>[11]</sup>。全可降解 iTENG 的研制成功进一步推动了 iTENG 的应用前景。iTENG 有望实现“生命不止, 能量不息”。

### 1 iTENG 的结构

iTENG 作为植入式器件, 良好的稳定性和生物相容性是其必须具备的条件。可以将 iTENG 的结构分为两个部分, 摩擦层和封装层。摩擦层为器件核心工作部分; 封装层作为保护结构, 能够使得摩擦层在植入体内环境当中正常工作。

#### 1.1 iTENG 摩擦层

iTENG 基本上采用的是接触分离式的摩擦纳米发电机工作模式。摩擦层大多采用金属和高分子, 例如有铝片和聚

二甲基硅氧烷 (PDMS) 摩擦、聚四氟乙烯 (PTFE) 与铝片摩擦<sup>[9-10]</sup>(图 4)。当一侧摩擦层采用金属时 (例如铝片), 其既是摩擦层又是电极层。摩擦层材料的表面都经过不同程度的表面纳米结构的修饰, 可进一步增大接触面积, 提高表面的电荷密度, 进而提高输出<sup>[9-10]</sup>(图 5)。两个摩擦层之间用一层间隔层或者采用拱形将它们隔离, 在外力循环作用下发生接触分离, 将机械能转化为电能。iTENG 的外力来源于心跳和呼吸肌的循环作用。发电机的电极通常采用的是金属电极, 例如铝、铜、金等。

全可降解 iTENG 所选择的摩擦层材料则是可以自我降解的聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA)、聚羟基丁酸酯 (PHB)、聚乙烯醇 (PVA) 等, 并且作为摩擦层的材料表面也进行了微纳结构的修饰; 用可降解镁作为电极材料<sup>[11]</sup>(图 4~图 5)。

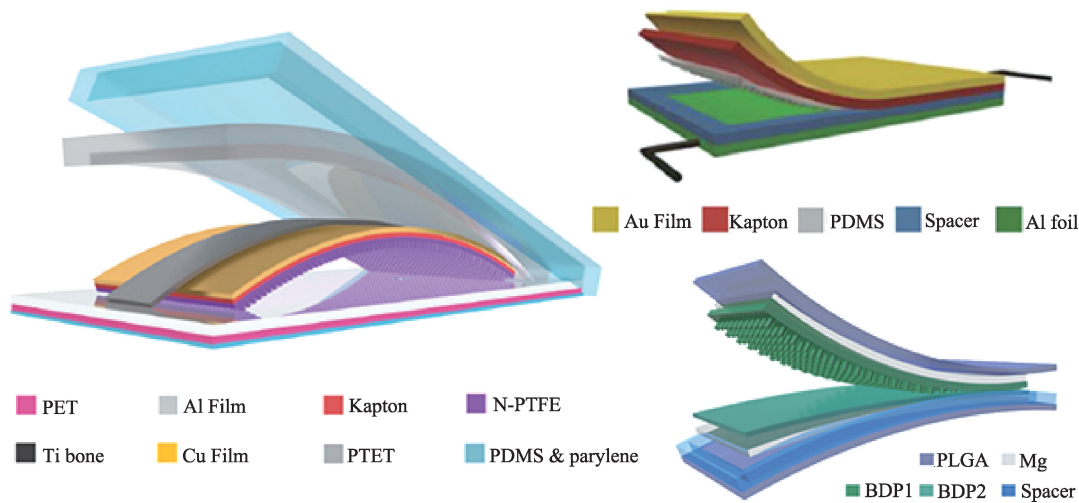


图 4 不同结构的 iTENG

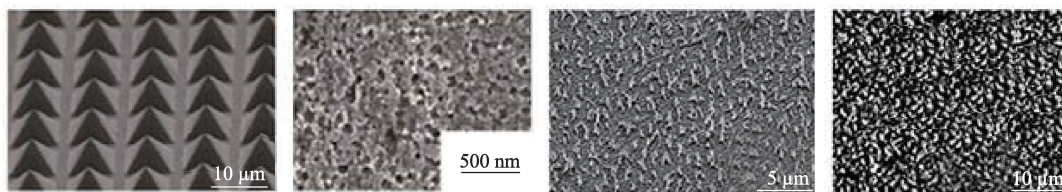


图 5 iTENG 不同材料摩擦层纳米结构扫描电子显微镜图

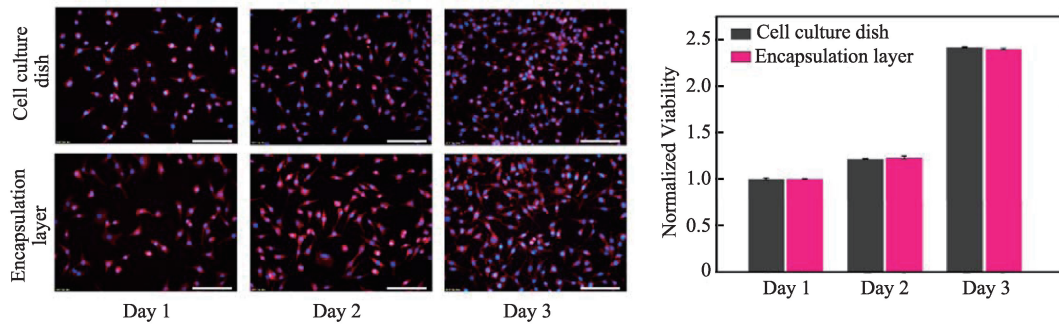
#### 1.2 iTENG 封装层

iTENG 的封装至关重要。首先, 封装材料应具有良好的生物相容性; 其次要求采用柔性封装; 最后器件封装后能够很好地隔绝 iTENG 与体液环境, 并保证在体内能够长期稳定工作。

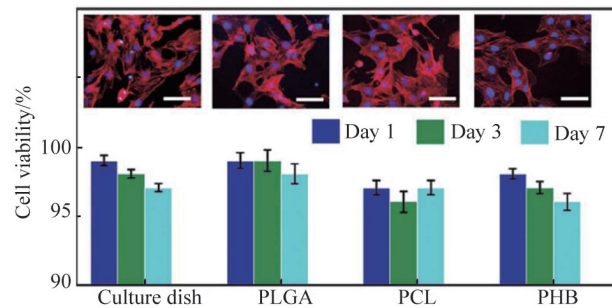
针对以上要求研究人员采用生物相容性很好的 PDMS 和聚对二甲苯 (Parylene) 作为表面封装材料。PDMS、Parylene 封装后的器件展现很好的柔韧性, 封装后植入体内能够保证

摩擦层在外力作用下正常的接触分离, 并且 Parylene 作为封装最外层具有疏水性, 进一步起到防止水汽和组织液渗透; 全可降解 iTENG 采用可降解材料 PLGA 和聚 PVA 作为封装层。

在封装材料上接种细胞, 对照组和实验组细胞的状态基本一致, 显示出封装材料良好的生物相容性<sup>[10-11]</sup>(图 6), 植入到体内以后没有任何炎症反应。



(a) iTENG 封装层材料上细胞染色图和细胞活性统计图



(b) 全可降解 iTENG 封装材料上细胞染色图和细胞活性统计图

图6 iTENG 封装层材料生物相容性

## 2 iTENG 的工作原理

iTENG 工作原理可以描述为:心跳和呼吸肌等外力作用于 iTENG 上,两种摩擦层材料的内表面接触,在摩擦电效应的作用下发生电荷转移,使得一个摩擦层的内表面带正电,另一个摩擦层的内表面带负电。当外力释放时,两个带相反摩擦电荷的表面就会自动分开,相反的摩擦电荷就会在两个面之间产生一个电场,从而在两个电极之间形成一个电势

差。为了屏蔽这个电势差,电子就会被驱动着经由外电路从一个电极流到另一个电极。在这个过程中产生的电流将持续,直到两个电极的电势再次达到相等。随后,当两个摩擦层再次向对方接近时,摩擦电荷诱导的电势差开始降低到0,转移的电荷将通过外电路流回,从而产生另一个方向相反的电流脉冲<sup>[12]</sup>。在心跳和呼吸肌等外力周期性作用下,交变电流信号将会持续产生(图7)。

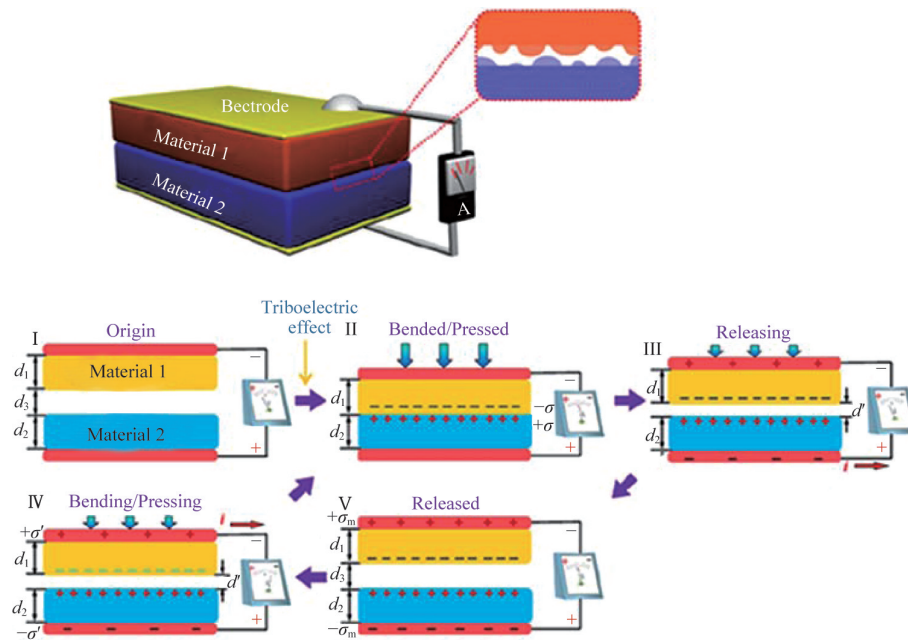


图7 iTENG 工作原理

### 3 iTENG 的输出性能

2014年植入到小鼠左胸皮下位置的iTENG,尺寸设计为1.2 cm×1.2 cm<sup>91</sup>(图8(a)),其开路电压大小为3.72 V,短路电流为0.14 μA(图9)。2016年植入到小型猪心包间隙内的

iTENG,尺寸为4 cm×6 cm<sup>101</sup>(图8(b)),电压增加了5倍,电流提高了将近35倍,分别达到了14 V、5 μA,并且研究人员系统性的研究对比了植入到心脏不同部位后其电压输出的变化情况,结果显示左室侧壁的电输出最高(图10);2016

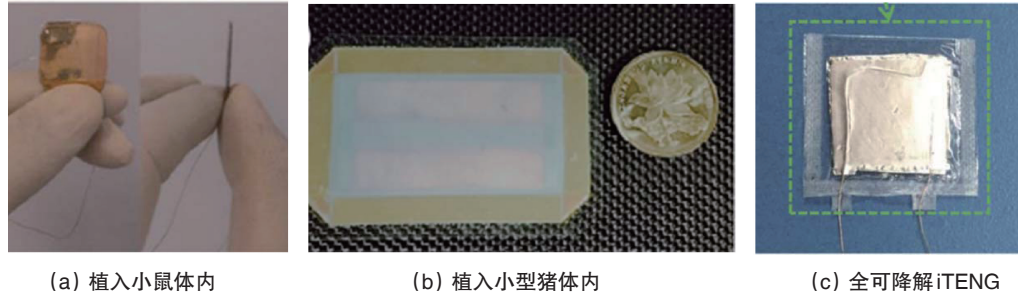


图8 iTENG实物图

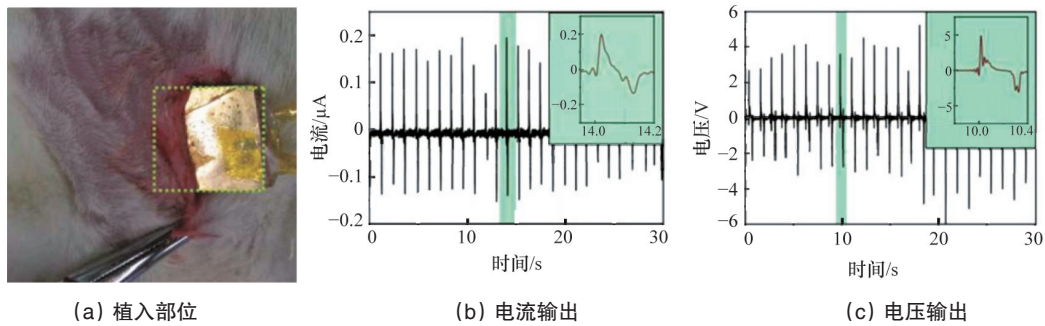
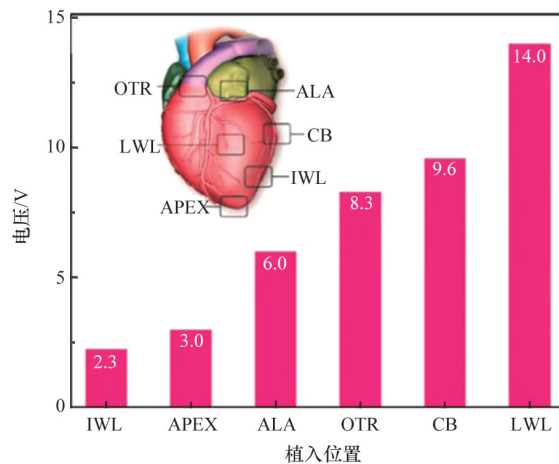
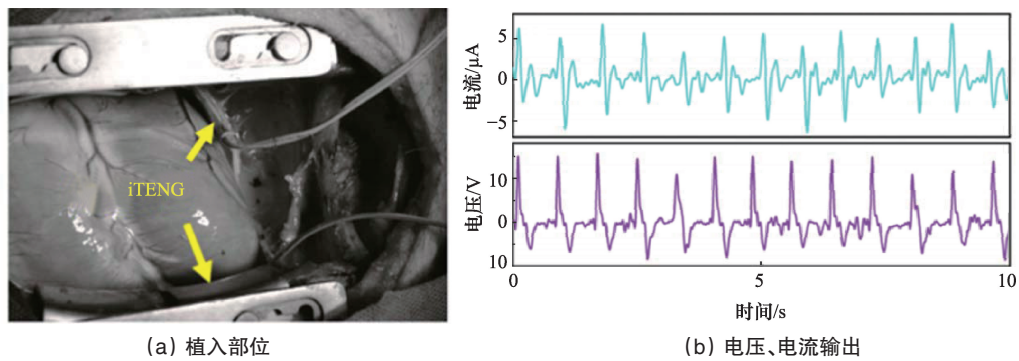


图9 植入到小鼠体内iTENG电信号输出图



(c) 植入不同位置电压输出

图10 植入到小型猪体内iTENG电信号输出图

年植入到小鼠体内全可降解的iTENG的尺寸为2 cm×3 cm<sup>[11]</sup> (图8(c)),电压能够达到4 V,功率密度为36.2 mW/m<sup>2</sup>,并且根据材料的选择研究人员可以很好地调控其降解时间,进一

步调控电输出大小,PLGA作为长期降解材料,在28天后电压从4 V下降到0,与之相对的PVA作为短期降解材料,3天后电压降为0(图11)。

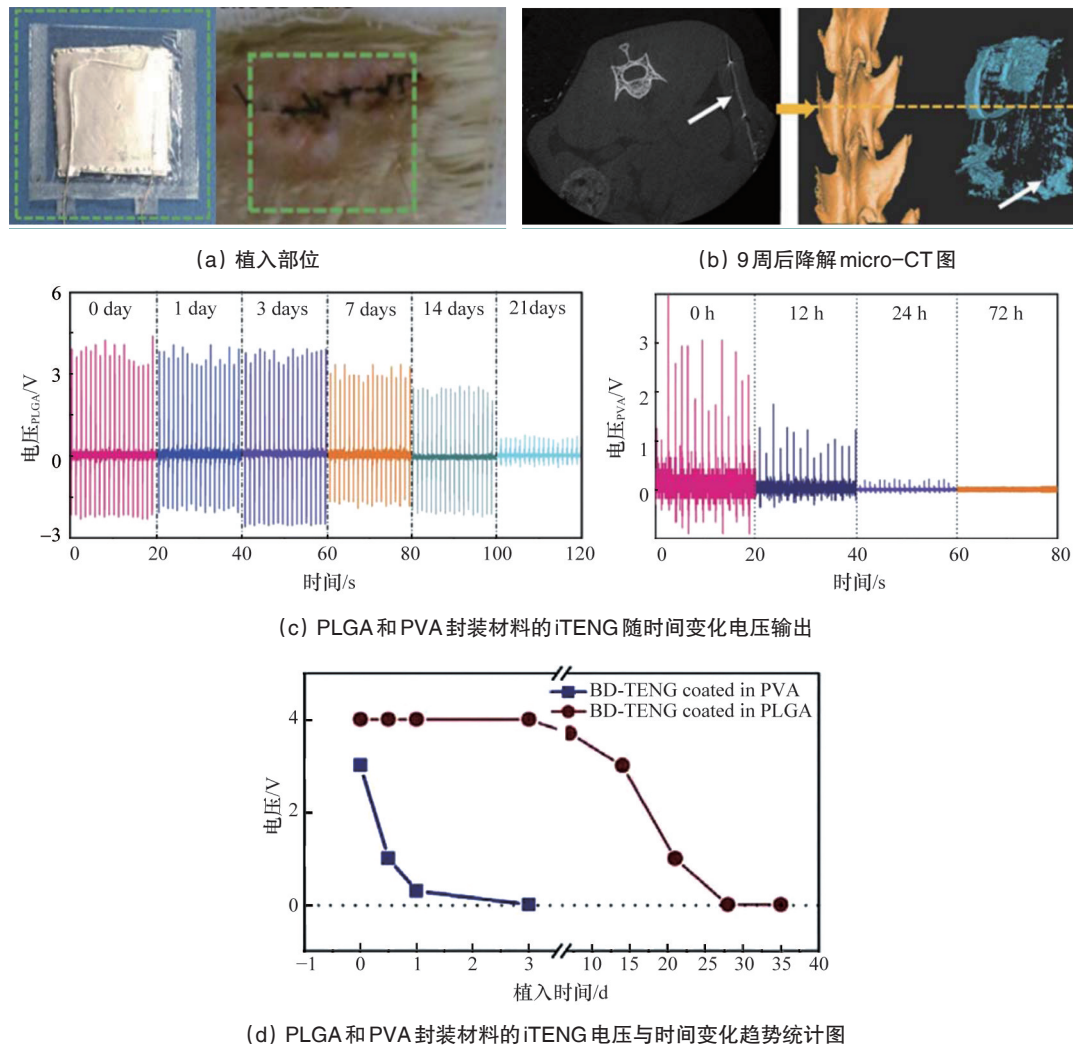


图11 全可降解iTENG电信号输出图

#### 4 iTENG在有源植入式医疗器件中的供能应用

一次心脏起搏器原型机的刺激脉冲输出大约是25  $\mu\text{A}$ ,根据医用心脏起搏器脉冲宽度被设为2 ms,基于这些参数,可以计算出5次小鼠呼吸的能量,可以通过iTENG驱动一次心脏起搏器原型机产生电脉冲输出(图12)。将这些电能高

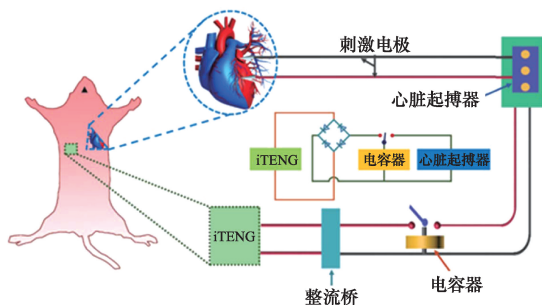


图12 基于植入式摩擦纳米发电机的自驱动心脏起搏器示意

效储存后,能够满足多数植入式医疗器件或者芯片的供能。研究人员在动物实验的基础上已经证明了iTENG收集生物机械能的有效性,能够实现在体工作并驱动有源植入式医疗电子器件。

#### 5 结论与展望

iTENG在有源植入式医疗器件供能上有着广阔的应用前景,与植入式医疗设备结合可以极大地推动植入式医疗的发展,有望对未来医疗产业做出贡献。同时,应该意识到iTENG还有些许地方需要完善。主要包括以下几点:

1) iTENG的输出需进一步提高,输出与摩擦层接触面积有着很大的关系,但iTENG需要植入体内,限制了摩擦层的面积。所以,在面积一定的条件下需针对性地解决摩擦层的材料选择、表面微纳结构的修饰、接触分离更加充分等几

个方面的问题来提高输出。

2) iTENG 的封装也是所面临的挑战之一,需要寻求更好的封装材料和工艺使得 iTENG 能够稳定、安全、可靠地在体内工作。

3) iTENG 将机械能转化为电能后,电能的储存与管理是一个急需解决的问题。充电效率有待进一步提高;同时电源管理系统也要求小型化、便于植入。

iTENG 目前还面临着以上挑战,这仍需各行各业的研究者不断参与进来、贡献才智,逐一解决。iTENG 的前景是可观的,未来有源植入式医疗器件将与植入式摩擦纳米发电机整合为一体,实现“生命不止,能量不息”的自驱动有源植入式电子医疗器件。

#### 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] Yang W, Chen J, Zhu G, et al. Harvesting energy from the natural vibration of human walking[J]. *ACS nano*, 2013, 7(12): 11317-11324.
- [3] Meng X S, Zhu G, Wang Z L. Robust thin-film generator based on segmented contact-electrification for harvesting wind energy[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2014, 6(11): 8011-8016.
- [4] Zhu G, Su Y, Bai P, et al. Harvesting water wave energy by asymmetric screening of electrostatic charges on a nanostructured hydrophobic thin-film surface[J]. *ACS nano*, 2014, 8(6): 6031-6037.
- [5] Li Z, Chen J, Guo H, et al. Triboelectrification-enabled self-powered detection and removal of heavy metal ions in wastewater[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(15): 2983-2991.
- [6] Lin Z H, Cheng G, Yang Y, et al. Triboelectric nanogenerator as an active UV photodetector[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(19): 2810-2816.
- [7] Wu Y, Jing Q, Chen J, et al. A self-powered angle measurement sensor based on triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(14): 2166-2174.
- [8] Yang P K, Lin Z H, Pradel K C, et al. Paper-based origami triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(1): 901-907.
- [9] Zheng Q, Shi B, Fan F, et al. In vivo powering of pacemaker by breathing-driven implanted triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(33): 5851-5856.
- [10] Zheng Q, Zhang H, Shi B, et al. In vivo self-powered wireless cardiac monitoring via implantable triboelectric nanogenerator[J]. *ACS Nano*, 2016.
- [11] Zheng Q, Zou Y, Zhang Y, et al. Biodegradable triboelectric nanogenerator as a life-time designed implantable power source[J]. *Science Advances*, 2016, 2(3): e1501478.
- [12] 张虎林. 摩擦电纳米发电机(TENG)的结构设计及其相关应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

## Research and application of implanted triboelectric nanogenerator

LIU Zhuo<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>1</sup>, LI Hu<sup>1</sup>, ZOU Yang<sup>2</sup>, SHI Bojing<sup>2</sup>, OUYANG Han<sup>2</sup>, LI Zhou<sup>2</sup>

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences; National Center for Nanoscience and Technology (NCNST), Beijing 100083, China

**Abstract** The triboelectric nanogenerator (TENG) developed in 2012 converts the mechanical energy into the electrical energy. The mechanical energy is used for human body motion, wind blow, sound vibration and ocean fluctuation. The implanted TENG (iTENG) can convert the biological mechanical motion into the electrical energy in vivo and power the implantable active medical devices. The biological mechanical motion includes the heartbeat and respiratory muscle movement. This technology can extend the service life of implanted electronic devices and has a wide potential applications in medical industry. This paper reviews the latest research progress in iTENG's structure, working principle, output performance and its applications in powering the implantable active medical devices. Additionally, a further analysis is made on the challenges of iTENG's applications in clinical treatment.

**Keywords** TENG; implantable active medical devices; biological mechanical energy; self-powered

(责任编辑 刘志远)