

# 静电纺丝制备 Te 纳米线/PEDOT:PSS 热电薄膜及性能研究

孙晓萌<sup>1</sup>, 孙婷婷<sup>1</sup>, 吴鑫<sup>1</sup>, 邱小小<sup>1</sup>, 王连军<sup>1,2</sup>, 江莞<sup>2,3</sup>

(1. 东华大学材料科学与工程学院 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

(2. 东华大学 先进玻璃制造技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

(3. 东华大学 功能材料研究所, 上海 201620)

**摘要:**近年来,用于健康、环境监测的可穿戴传感器和电子设备发展迅速,由此对可持续能源收集与供应技术提出了新的要求。有机柔性热电材料和装置能够将热量直接转换成电能,且凭借其固有的柔韧性、低毒性和简单易得等优点,受到越来越多的关注。静电纺丝技术是制备纳米纤维膜的常用方法,具有简单、通用、易于控制等优点,在柔性电子器件领域具有广阔的应用前景。本研究采用静电纺丝结合原位合成的方法制备了碲(Te)纳米线/PEDOT:PSS 热电纳米纤维薄膜,当碲源浓度为 5%时(质量分数),Te 纳米线长度最长,纤维薄膜的热电性能最佳。其电导率为  $1.62 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,塞贝克系数为  $22.43 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ ,热导率仅为  $\sim 0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,热电优值(ZT 值)达  $0.112 \times 10^{-3}$ 。基于此纤维薄膜成功制备了柔性热电器件,当薄膜条数为 4 时,在温差  $\Delta T = 45 \text{ K}$  时,其输出电压为  $3.54 \text{ mV}$ 。

**关键词:** PEDOT:PSS; Te 纳米线; 热电薄膜; 静电纺丝; 可穿戴

中图分类号: TN304.055; TN304.25 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2021)07-0518-07

## Study on Preparation and Properties of Te Nanowires/PEDOT:PSS Thermoelectric Films by Electrospinning

SUN Xiaomeng<sup>1</sup>, SUN Tingting<sup>1</sup>, WU Xin<sup>1</sup>, QIU Xiaoxiao<sup>1</sup>,  
WANG Lianjun<sup>1,2</sup>, JIANG Wan<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(2. Engineering Research Center of Advanced Glasses Manufacturing Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(3. Institute of Functional Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of wearable sensors and electronic devices for health and environmental monitoring has put forward new requirements for sustainable energy collection and supply technologies. Organic flexible thermoelectric (TE) materials and devices are capable of converting heat directly into electricity, and have attracted increasing attention due to their inherent advantages of flexibility, affordability and low toxicity. Electrostatic spinning technology is a common method to prepare nanofiber membrane, which has the advantages of simplicity, universality and easy control, and has a broad application prospect in the field of flexible electronic devices. Here, Tellurium (Te) nanowires / PEDOT:PSS thermoelectric nanofiber thin films were prepared by electrospinning and *in-situ* synthesis. When the content of tellurium

source is 5wt%, the length of Te nanowires is the longest and the thermoelectric performance of nanofiber film is the best. The conductivity is  $1.62 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , the Seebeck coefficient is  $22.43 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ , the thermal conductivity is only  $\sim 0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , and the ZT value reaches  $0.112 \times 10^{-3}$ . Finally, a flexible device consisting of 4 strips was successfully prepared using the as-prepared composite film, and can produce an output voltage of  $3.54 \text{ mV}$  at a  $45 \text{ K}$  temperature difference.

**Key words:** PEDOT:PSS; Te nanowire; thermoelectric films; electrospinning; wearable

收稿日期: 2019-12-10 修回日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774096, 51871053);  
上海市科学技术委员会项目(18JC1411200); 中央高校基础研究项目(2232017A-07); 中国教育部创新研究团队项目(IRT\_16R13)

第一作者: 孙晓萌, 女, 1995 年生, 硕士研究生

通讯作者: 王连军, 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师,

Email: wanglj@dhu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201912005

## 1 前言

电子器件小型化与集成化的巨大进步促进了可植入和可穿戴电子产品的发展。但是传统的电池材料需要频繁更换、充电以及额外的维护<sup>[1]</sup>, 极大限制了其在可穿戴领域的使用。热电材料是一种零排放的无任何传动部件的功能材料, 通过塞贝克效应将体温与外界环境之间的温差转化为电能。目前的研究主要集中在无机材料及其合金体系, 如  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  块体热电材料在 525 K 时热电优值(ZT 值)为  $1.0^{[2]}$ ; 方钴矿的 ZT 值在 750 K 时达到  $1.19^{[3]}$ ;  $\text{CoSb}_3$  的 ZT 值在 523 K 时达到  $0.86^{[4]}$ 。但无机热电材料存在成本高、可加工性差、有毒并且只适用于高温区域等问题<sup>[5]</sup>。因此, 研究者们逐渐将目光转向了有机热电材料领域。

有机热电材料凭借较好的加工性能、低热导率、良好的柔韧性等优点, 具有重要的研究价值, 尤其是聚(3,4-乙基二氧噻吩): 聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)有机材料, 因具有高导电率( $400\sim 600\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )、易加工、无毒、良好的稳定性等优点<sup>[6-10]</sup>, 成为热电研究领域的热点。但是 PEDOT:PSS 拥有较低的塞贝克系数(约为  $15\text{ }\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ )和功率因子(PF) ( $0.008\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ )<sup>[11-15]</sup>, 其薄膜热电性能差。PEDOT:PSS 与半导体或者纳米金属材料的复合材料既提高了电学性能又保持了高分子的低热导率, 从而改善了 PEDOT:PSS 的热电性能。

目前制备有机薄膜的方法主要有旋涂法、滴涂法、抽滤法等, 但这些方法制备的薄膜不具有自支撑性且力学性能不够, 无法满足实际应用。静电纺丝技术是目前制备一维纳米结构的重要手段之一<sup>[16, 17]</sup>, 在静电纺丝过程中, 纳米纤维随机交叉排列形成纳米多孔结构, 这种多孔结构极大降低材料热导率, 同时能够增加薄膜变形能力, 赋予了纤维薄膜良好的柔性和延展性<sup>[18, 19]</sup>。由此热电薄膜组装的器件也具备良好的柔性, 可以弯曲成任意形状。在实际使用中, 热电器件可以与皮肤更紧密贴合, 从而更好地覆盖热源、收集热量, 并且穿戴更加舒适。Ding 等<sup>[20]</sup>将静电纺丝得到的聚氨酯(PU)无纺布浸渍到 PEDOT:PSS 溶液中, 干燥后得到的 PEDOT:PSS@PU 无纺布, 其电导率高达  $30\sim 200\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。Cai 等<sup>[21]</sup>直接将织物浸渍在 PEDOT:PSS 溶液中, 得到柔性和透气性良好的热电织物, 将其制备成柔性热电器件, 在  $75.2\text{ }^\circ\text{C}$  的温差下可以产生  $4.3\text{ mV}$  的输出电压。Jin 等<sup>[22]</sup>采用静电纺丝和原位后处理相结合的方法制备  $\text{Ag NPs@PVA/PEDOT:PSS/DMSO}$  复合纳米纤维薄膜, 电导率可达  $41.5\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 室温下最大功率因子为  $1.2\text{ }\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ 。由此可见, 静电纺丝技术在柔性热电薄膜领域具有一定优势。

本研究以 PEDOT:PSS 和具有高塞贝克系数的碲(Te)窄带半导体材料为基材, 基于静电纺丝技术结合浸渍法和原位合成法制备了 Te 纳米线/PEDOT:PSS 热电纳米纤维膜, 并对薄膜进行形貌结构分析和热电性能评估。

## 2 实验

### 2.1 样品的制备

#### 2.1.1 静电纺丝制备 PEDOT:PSS/PVA/DMSO 薄膜

称取一定量的聚乙烯醇(PVA)溶于 PEDOT:PSS 溶液(固体质量分数 1.3%, 防静电型), 在  $95\text{ }^\circ\text{C}$  温度下搅拌 4 h。加入适量的二甲基亚砜(DMSO)溶液室温搅拌 2 h。三者的质量比为 5:90:5。将得到的纺丝液在电压 23 kV、滚筒转速 100 r/min、接收距离 100 mm、进料速度  $0.4\text{ mL/h}$  的条件下进行纺丝。将所得纳米纤维膜在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 6 h, 之后  $160\text{ }^\circ\text{C}$  退火 10 min。将上述纳米纤维膜浸渍到 PEDOT:PSS 溶液(Clevios<sup>TM</sup> PH 1000) 15 min, 随后用去离子水、乙醇多次清洗, 除去表面多余溶液,  $60\text{ }^\circ\text{C}$  烘干 4 h 备用。

#### 2.1.2 Te 纳米线/PEDOT:PSS 基热电纤维膜的制备

称取一定量的亚碲酸钠( $\text{Na}_2\text{TeO}_3$ )、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)以及去离子水, 配置成 10 g 不同浓度的碲源溶液, 其中碲源浓度为 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%(质量分数, 下同); 配置浓度为 5% 的抗坏血酸(L-AA)水溶液 10 g。将上述薄膜浸入不同浓度的碲源溶液 30 min, 将薄膜取出浸入抗坏血酸溶液进行还原反应,  $90\text{ }^\circ\text{C}$  温度下反应 8 h。最后取出薄膜, 用去离子水和乙醇冲洗,  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 4 h。

#### 2.1.3 柔性器件的制备

将所得薄膜裁成 4 条  $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$  的方片, 将其整齐排列在柔性透明 PET 基板上, 用银线将薄膜的冷端和热端串联起来, 并在银线与薄膜的接触点上用高浓度银浆固定。

### 2.2 结构和性能测试表征

采用 Hitachi S-4800 型场发射扫描电子显微镜(FESEM)观测纳米纤维薄膜的微观形貌; 采用 21001F 型透射电子显微镜(TEM)观察 Te 纳米线的微观形貌; 采用 ESCALAB 250Xi 型 X 射线光电子能谱(XPS)表征纳米纤维薄膜表面的元素组成及价态; 一般采用四探针法来测定薄膜材料的电导率, 本实验热电材料的电导率由 Loresta-GX 高精度 MCP-T700 型四探针仪测得; 塞贝克系数由实验室自搭建设备测得; 采用 XIATECH TC-3000 型热导仪测试纳米纤维薄膜的热导率, 测试原理属于非稳态法中的 THW 法, 通过采集样品上某个固定点被加热瞬间温度场随时间的变化情况, 获得被测材料的热导率;

纳米纤维薄膜的载流子迁移速率和载流子浓度由 Lake-shore 8400 型霍尔仪器测得。

3 结果与讨论

图 1 是不同浓度  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  溶液处理后的纳米纤维膜的 SEM 照片。图 1a 是经 Clevios<sup>TM</sup> PH 1000 浸渍后的 PVA/PEDOT:PSS/DMSO 纳米纤维膜的 SEM 照片, 经过浸渍处理后薄膜保持均匀、光滑的纤维结构, 为碲源提供了附着点。图 1b 显示, 将薄膜浸渍到 2.5% 碲源溶液时, 生长出少量 Te 纳米线, 且分布不均匀。该 Te 纳米线长度约为 320 nm (表 1)。当碲源浓度增加至 5.0% 时, Te 纳米线数量增多, 长度可达~610 nm, 此时 Te 纳米线

长度最长, 且纳米线之间相互接触。当碲源浓度进一步增加至 7.5% 时, Te 纳米线数量增多, 相互之间紧密接触, 长度约为 540 nm, 呈现变短的趋势。随着碲源浓度达到 12.5% 时, Te 纳米线长度减少至 450 nm。这是因为在 Te 纳米线生长过程中,  $\text{H}^+$  与  $\text{TeO}_{42-}$  生成  $\text{TeO}_2$ , L-AA 弱的还原作用使  $\text{TeO}_2$  被缓慢还原为 Te 元素和 Te 晶核。CTAB 作为表面活性剂产生的大量棒状胶束, 一部包覆 Te 晶核起到稳定作用, 一部分在 Te 纳米线的生长过程中起到模板导向作用。当 Te 源浓度增加, CTAB 包覆的 Te 晶核的数量增多, 但是起到模板导向作用的部分 CTAB 数量减少, 导致纳米线的数量增多但是长度减少。

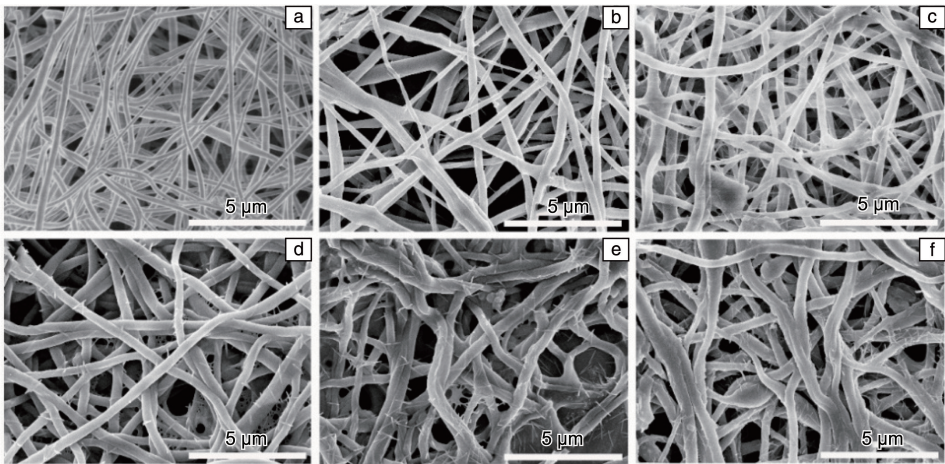


图 1 不同浓度  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  溶液处理的纳米纤维膜 SEM 照片 (质量百分数): (a) 0%, (b) 2.5%, (c) 5.0%, (d) 7.5%, (e) 10%, (f) 12.5%

Fig. 1 SEM images of the prepared films treated with different  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  solution concentrations: (a) 0%, (b) 2.5%, (c) 5%, (d) 7.5%, (e) 10%, (f) 12.5%

表 1 不同浓度  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  溶液处理的 Te 纳米线长度

Table 1 Length of Te nanowires treated with different concentrations of  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  solution

| $\text{Na}_2\text{TeO}_3$ solution concentration/wt% | Length/nm |
|--|-----------|
| 2.5  | 320       |
| 5  | 610       |
| 7.5  | 540       |
| 10   | 510       |
| 12.5   | 450       |

为了进一步分析原位生成的 Te 纳米线的微观结构和化学组成, 通过离心清洗收集 5% 碲源含量的还原溶液中 Te 纳米线, 并利用透射电镜进行观察。图 2a 为纳米线形貌, 其直径约为 20 nm, 长短不一。对图 2b 中的 Te 纳米线进行 X 射线能谱 (EDS) 面扫描分析, 发现 Te 纳米线的

表面存在着大量的 C, O, S 元素, 尤其是 S 元素为 PEDOT:PSS 的特征元素, 说明 Te 纳米线外部包裹着 PEDOT:PSS, 这是因为浸渍在纳米纤维膜表面的 PEDOT:PSS 在还原的过程中扩散到溶液中, 并作为表面活性剂参与到 Te 纳米线的生长过程中 (PEDOT:PSS 可以作为生长 Te 纳米线的模板剂<sup>[23]</sup>)。

对 Te 纳米线/PEDOT:PSS 纳米纤维膜进行 XPS 分析, 结果如图 3 所示, 在全谱图中 C, O, S, Te 这 4 种元素均存在, 证实了 Te 纳米线/PEDOT:PSS 复合薄膜已成功制备。在 Te 3d 谱图中, 572.98 和 583.38 eV 对应于零价碲 (Te(0)) 3d 结合能。两个峰值分别为 576.48 和 586.88 eV 的峰, 对应于正四价碲 (Te(IV)) 3d 结合能, 图中 Te(IV) 3d 峰比 Te(0) 3d 峰强, 表明 Te 被氧化。这是因为, 相比于内部原子的稳定性, 外部原子化学性质更活泼, 使其向配位数减小的趋势发展, 从而发生了氧化反应。



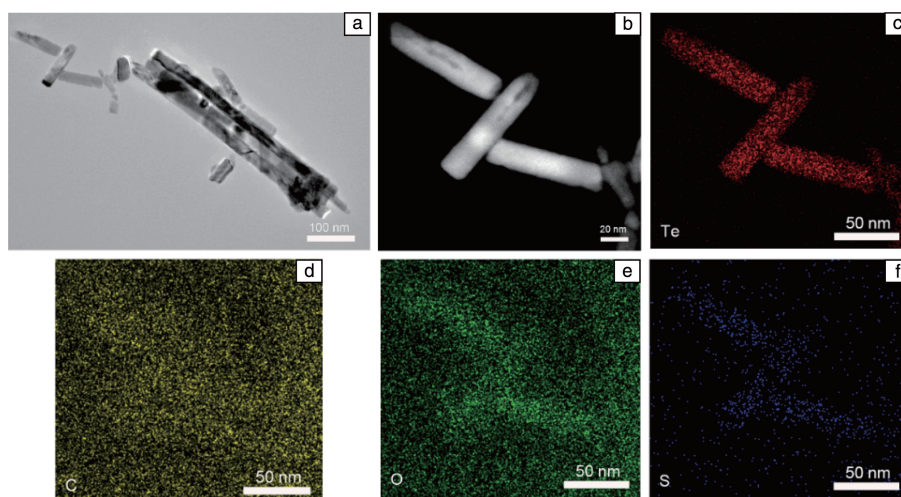


图2 还原液中的 Te 纳米线的 TEM 照片和 EDS 面扫描图谱

Fig. 2 TEM image and EDS elemental mappings of Te nanowire in the reduction solution

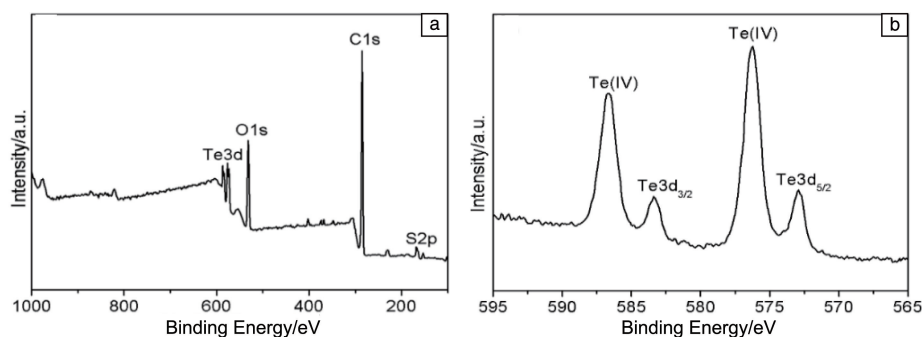


图3 Te 纳米线/ PEDOT:PSS 热电纳米纤维膜的 XPS 谱图: (a) 全谱图, (b) Te 3d 谱图

Fig. 3 XPS spectra of the Te nanowires / PEDOT:PSS thermoelectric nano fiber films: (a) survey scan, (b) Te 3d spectra

由于助纺剂 PVA 的加入, 纺丝得到的 PEDOT:PSS 复合薄膜电学性能很差, 几乎处于绝缘状态, 热电性能也因此表现不佳。为了提高薄膜的热电性能, 原位生长 Te 纳米线。值得注意的是, 在原位生长 Te 纳米线之前, 需对纳米纤维膜进行退火处理, 以提高其结晶度, 从而使纳米纤维膜的抗溶解性和力学强度满足原位生长 Te 纳米线对基底的要求<sup>[24]</sup>。

如图 4 所示, 随着碲源浓度的增加, 薄膜的电导率从 0.37 增加到 1.62 S·cm<sup>-1</sup>, 在碲源浓度为 5% 时达到最大, 即 Te 纳米线的长度最大时, 导电性能最佳。Kim 等<sup>[25]</sup>通过控制聚合物模板剂聚(4-苯乙烯磺酸)(PSSA)的量, 得到直径为 20~140 nm, 长度在微米级的 Te 纳米线, 同样发现长度最长的纳米线其热电性能最优。推测其原因为 Te 纳米线的形貌影响其载流子的传输, 该原因从图 4b 结合图 1 Te 纳米线长度的分析可以得到印证, Te 纳米线的长度与载流子迁移率呈正相关性, 当长度最长时, 载流子迁移率也较大, 此时长的 Te 纳米线相互之间

的接触点多, 界面电阻率较小。根据电导率公式  $\sigma = ne\mu$ , 此时薄膜的电导率最大。而载流子浓度随着碲源浓度增大呈现先增加后减小的变化趋势。当碲源浓度增大到 12.5% 时, Te 纳米线的数量增多, 长度变短, 体系中的载流子浓度降低, 推测其原因是在其他条件相同的情况下, 碲源浓度的增加使得 Te 纳米线缺陷增多, 载流子浓度降低, 因此电导率也随之下降。从图 4a 中可见, 塞贝克系数随碲源浓度的变化并不大, 维持在 21.15  $\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$  左右, 这是因为在 PEDOT:PSS 薄膜和 Te 纳米线的复合界面处存在着能量过滤效应, 只有高能量的载流子可以通过, 低能量的载流子被界面散射掉, 整个体系的塞贝克系数变化不大。

图 4c 是复合薄膜的热导率随碲源含量的变化曲线, 通常引入无机颗粒会使复合薄膜的热导率有一定程度的增大, 但是本文采用静电纺丝的方法制备的纳米复合薄膜具有孔隙结构, 孔隙中存在的大量低热导非流动空气, 起到了阻碍热量传递的作用<sup>[26]</sup>。Te 源浓度为 5%~



12.5%时, 纳米纤维膜的热导率约为  $0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。虽然聚合物热导率低, 直接烘干的薄膜热导率为  $0.1474 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [22], 但纳米纤维膜具有更低的热导率, 仅为烘干薄膜的 1/2。这是因为材料的热导率是由载流子热导率( $\kappa_c$ )和晶格热导率( $\kappa_l$ )共同贡献的, 所制备的复合纤维薄膜比表面积大, 在 Te 纳米线与复合薄膜间会形成无数的界面, 界面的存在会阻碍声子的传输, 声子被散射程度增大, 晶格热导率减小, 使整个复合薄膜的热导率维持在一个较低的水平。由于薄膜的塞贝克

系数维持在  $21.15 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$  左右, 功率因子与电导率成线性变化, 如图 4e 所示, 在碲源浓度为 5% 时, 薄膜的功率因子最大, 达到  $0.0785 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ 。目前薄膜的热导率测试没有统一的标准和准确的测试方法, 本实验采用的是平面内热导率来计算 ZT 值, 图 4f 给出了薄膜的 ZT 值变化, 由于低的热导率, 当碲源浓度为 5% 时, ZT 值达到最大为  $0.112 \times 10^{-3}$ , 随着 Te 纳米线长度的减小, ZT 值也呈现下降的趋势。

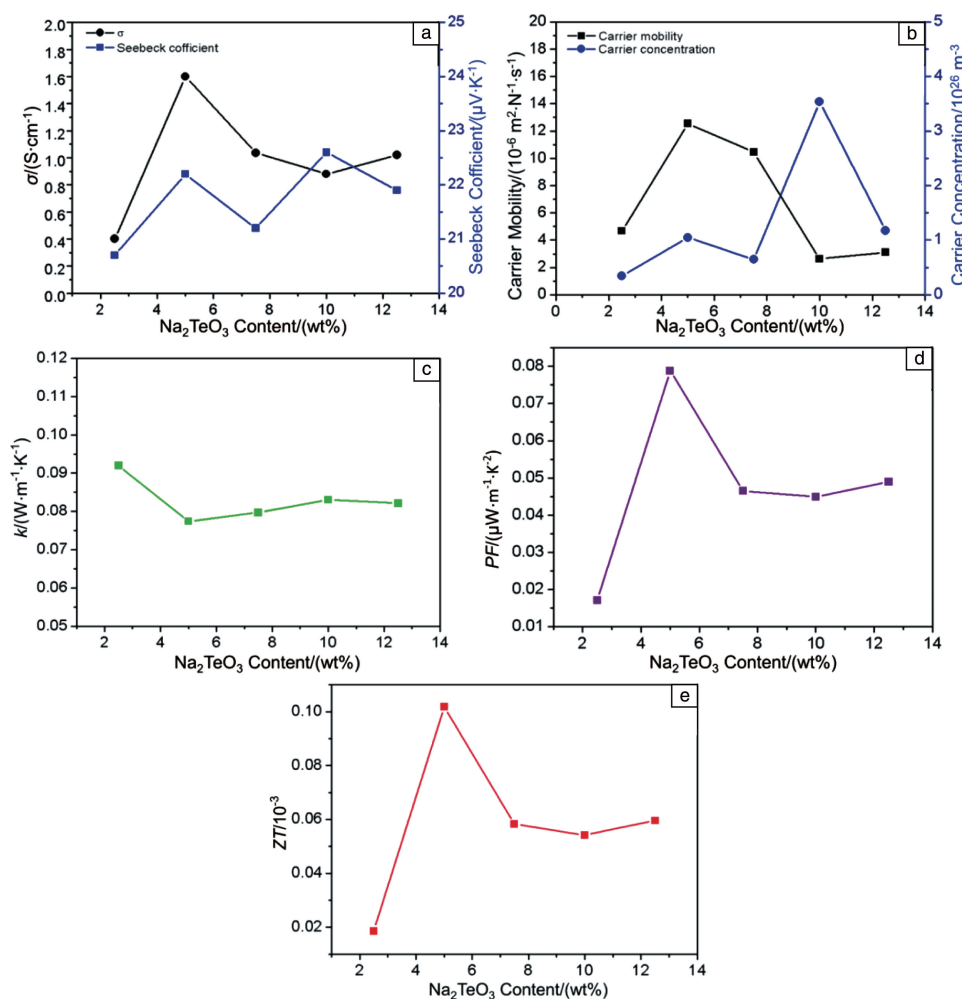


图 4 Te 纳米线/PEDOT:PSS 纳米纤维膜的热电性能随碲源浓度变化图: (a) 电导率和塞贝克系数, (b) 载流子浓度和迁移率, (c) 薄膜的热导率, (d) 功率因子, (e) ZT 值

Fig. 4  $\text{Na}_2\text{TeO}_3$  solution concentration dependence of electrical conductivity and Seebeck coefficient (a), carrier concentration and carrier mobility (b), thermal conductivity (c), power factor (PF) (d) and ZT merit (e) of these thermoelectric nano fiber films at room temperature

本文按照图 5a 所示的原理图采用热端并联电端串联方法, 将 Te 源浓度为 5% 时制备的纳米纤维膜组装成热电器件。纳米纤维薄膜热电器件实物如图 5b 所示, 器件具有良好的柔韧性。图 5c 是器件开路电压 ( $V$ ) 与温差 ( $\Delta T$ ) 的实际测量图。当增加器件面内温差时, 由于热电

材料的塞贝克效应, 纳伏表立即检测到电压输出, 且该电压会随温差的增加而增加。为了获得较大的输出电压, 增加了器件中组装的薄膜数量, 当薄膜的数量增加到 4 条时, 在温差  $\Delta T = 45 \text{ K}$  时器件的输出电压达到  $3.54 \text{ mV}$ 。

器件最大输出功率由公式 (1) 计算:

$$P_{\max} = \frac{\Delta V^2}{4R_0} \quad (1)$$

其中  $P_{\max}$  是最大输出功率,  $\Delta V$  是器件两端的电压差,  $R_0$

是器件的内部电阻。如图 5d 所示, 器件连接外加负载电阻时测得的最大输出功率可达  $\sim 0.234 \text{ nW}$ 。

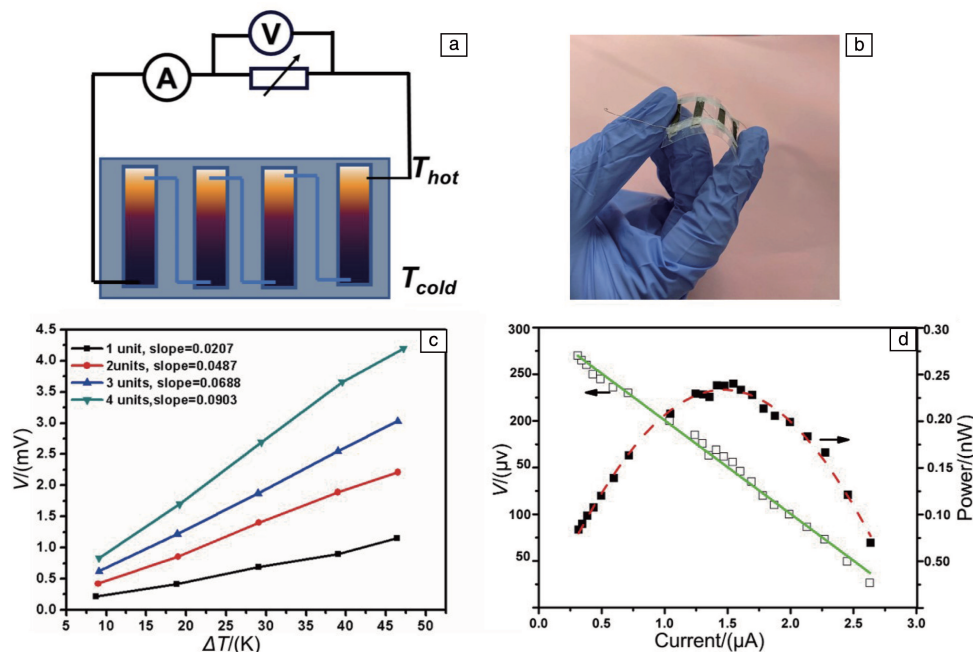


图 5 热电器件原理图(a), 热电器件实物照片(b), 热电器件的输出电压与温差的关系曲线(c), 器件连接外加负载电阻时的输出电压和输出功率与电流关系曲线(d)

Fig. 5 Schematic illustration of a thermoelectric (TE) power generating (a), the photograph of TE generator (b), TE voltage generated by the prepared devices versus temperature difference (c), output voltage and power as a function of current (d)

## 4 结 论

通过静电纺丝结合原位生长的方法制备了碲(Te)纳米线/PEDOT:PSS 热电纳米纤维膜, 利用碲源的浓度控制 Te 纳米线形貌, 最终调控薄膜的热电性能。当碲源浓度为 5% 时, 原位生长的 Te 纳米线长度最长, 复合薄膜热电性能最优, ZT 值可达  $0.112 \times 10^{-3}$ 。最终基于所制备的热电纳米纤维膜设计并制作了一个由 4 条薄膜组成的柔性热电器件, 该器件可以在 45 K 的温差下产生 3.54 mV 的输出电压。本文为柔性有机-无机复合薄膜的制备提供了新的实验方法和思路, 对柔性热电器件的构建提供参考。

## 参考文献 References

- [1] STOPPA M, CHIOLERIO A. *Sensors* [J], 2014, 14(7): 11957–11992.
- [2] LU X F, LU P, FAN Y C, *et al.* *Scripta Materialia* [J], 2019, 166: 81–86.
- [3] 周振兴, 陆晓芳, 王连军, 等. *中国材料进展* [J], 2019, 38(6): 588–593.

- ZHOU Z X, LU X F, WANG L J, *et al.* *Materials China* [J], 2019, 38(6): 588–593.
- [4] LIANG G X, ZHENG Z H, LI F, *et al.* *Journal of the European Ceramic Society* [J], 2019, 39(15): 4842–4849.
- [5] SHI X, CHEN L, UHER C. *International Materials Reviews* [J], 2016, 61(6): 1–37.
- [6] YUE R R, XU J K. *Synthetic Metals* [J], 2012, 162(11/12): 912–917.
- [7] CHEN H Y, SHEN H P, WU C H, *et al.* *Journal of Materials Chemistry C* [J], 2013, 1(34): 5351–5358.
- [8] WANG G, CHENG Q J, CAI Y G, *et al.* *Acta Polymerica Sinica* [J], 2014, 11: 1532–1538.
- [9] HAN S B, FENG Y, CHEN G M, *et al.* *RSC Advances* [J], 2014, 4(60): 31874–31878.
- [10] WEI Q H, MUKAIDA M, KIRIHARA K, *et al.* *Materials* [J], 2015, 8(2): 732–750.
- [11] KIRCHMEYER S, REUTER K. *Journal of Materials Chemistry* [J], 2005, 15(21): 2077–2088.
- [12] FAN B H, MEI X G, OUYANG J Y. *Macromolecules* [J], 2008, 41(16): 5971–5973.
- [13] OUYANG J Y. *ACS Applied Materials & Interfaces* [J], 2013, 5

- (24): 13082–13088.
- [14] LUO J J, BILLEP D, BLAUDECK T, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2014, 115(5): 054908.
- [15] JIANG F X, XIONG J H, ZHOU W Q, *et al.* Journal of Materials Chemistry A[J], 2016, 4(14): 5265–5273.
- [16] LI D, XIA Y N. Advanced Materials[J], 2010, 16(14): 1151–1170.
- [17] GREINER A, WENDORFF J H. Angewandte Chemie International Edition[J], 2007, 46(30): 5670–5703.
- [18] FAN Z, DU D H, YU Z M, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces [J], 2016, 8(35): 23204–23211.
- [19] JIN Q, SHI W B, ZHAO Y, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2018, 10(2): 1743–1751.
- [20] DING Y C, XU W H, WANG W Y, *et al.* ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2017, 9(35): 30014–30023.
- [21] DU Y, CAI K F, CHEN S, *et al.* Scientific Reports[J], 2015: 56411.
- [22] JIN S N, SUN T T, FAN Y C, *et al.* Polymer[J], 2019, 167: 102–108.
- [23] Song H J, Cai K F. Energy[J], 2017, 125: 519–525.
- [24] KANG Y O, YOON I S, LEE S Y, *et al.* Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials[J], 2010, 92B(2): 568–576.
- [25] Park H, Son W, Lee S H, *et al.* Crystengcomm[J], 2015, 17(5): 1092–1097.
- [26] 王婷婷, 刘晓霞, 庄明宇. 上海纺织科技[J], 2014(4): 6–9.  
WANG T T, LIU X X, ZHUANG M Y. Shanghai Textile Science & Technology[J], 2014(4): 6–9.

(编辑 张雨明)