

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.03.006

# 基于酸掺杂的 PANI/PET 材料的结构调控及其导电性

金欣<sup>1,2</sup>, 刘晓东<sup>1,2</sup>

(1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织未来技术研究中心, 天津 300387)

**摘要:** 为改善聚苯胺/聚酯(PANI/PET)复合导电织物的导电性, 采用不同酸掺杂方式对 PANI 的分子结构进行调控, 在 PET 纤维表面原位聚合 PANI, 制备 PANI/PET 复合织物; 采用 SEM、FTIR、XRD 和电导率测试分析掺杂酸种类对 PANI/PET 材料结构和导电性能的影响; 将 PANI/PET 复合导电织物与金属 Al、Cu 膜电极组装制备肖特基型纳米发电机, 考察其电输出性能。结果表明: 掺杂酸的种类显著影响 PANI 的苯醌结构比例、分子链规整性及晶面间距; PTSA 掺杂的 PANI 具有最高的苯式/醌式结构比值(2.16)、最优的晶面间距(0.343 nm)和最高的结晶度(46.16%), 从而表现出最佳的导电性能(0.65 S/m); 基于 PTSA 掺杂的 PANI/PET 复合材料制备的肖特基型纳米发电机展现出良好的电输出性能, 开路电压为 0.973 V, 短路电流为 327.19  $\mu$ A, 进一步验证了材料的优异导电性。

**关键词:** 聚苯胺/聚酯复合织物; 掺杂酸; 分子结构; 导电性; 纳米发电机

中图分类号: TM912.9; TQ152

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)03-0049-06

## Structural control of PANI/PET materials based on acid doping and its conductivity

JIN Xin<sup>1,2</sup>, LIU Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Future Textile Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** To improve the conductivity of polyaniline/polyester (PANI/PET) composite conductive fabrics, different acid doping methods were used to regulate the molecular structure of PANI. PANI was polymerized in situ on the surface of PET fibers to prepare PANI/PET composite fabrics. The effect of doping acid types on the structure and conductivity of PANI/PET materials was analyzed using SEM, FTIR, XRD, and conductivity testing; PANI/PET composite conductive fabric was assembled with metal Al and Cu film electrodes to prepare Schottky type nanogenerators and their electrical output performance was investigated. The results indicate that the type of doping acid significantly affects the benzoquinone structure ratio, molecular chain regularity, and interplanar spacing of PANI; PTSA doped PANI exhibits the highest benzene/quinone structure ratio (2.16), optimal interplanar spacing (0.343 nm), and highest crystallinity (46.16%), resulting in the best conductivity performance (0.65 S/m); The Schottky nanogenerator prepared based on PTSA doped PANI/PET composite material exhibits excellent electrical output performance, with an open circuit voltage of 0.973 V and a short-circuit current of 327.19  $\mu$ A, further verifying the excellent conductivity of the material.

**Key words:** PANI/PET fabric; dopant acid; molecular structure; electrical conductivity; nanogenerator

随着可穿戴电子设备的快速发展,对柔性高导电性材料的需求日益增长。近几年,基于导电聚合物改性的织物因其优异的柔韧性、可加工性和导电性,在可穿戴电子设备领域展现出重要的应用前景<sup>[1-2]</sup>。这些基于导电聚合物改性的柔性导电织物可应用于智

能可穿戴纳米发电机领域,采集人体运动中微小机械能并且进行直流电源输出,用作可穿戴纳米能源或传感器<sup>[3-5]</sup>。

聚苯胺(PANI)作为一种本征导电高分子材料,因其高电导率、环境稳定性及可调控的分子结构,在柔

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51573136);天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(20JCZDJC00350)

通信作者: 金欣(1972—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为导电聚合物材料设计与功能。E-mail: jinxin29@126.com

性电子器件中备受关注<sup>[6]</sup>。通过在纤维表面原位聚合 PANI,可以有效提升织物的导电性,并保持其柔性<sup>[4-8]</sup>。为了进一步提高材料的导电性和柔性,研究者们常通过引入其他材料制备复合材料,如:引入碳基材料石墨烯等提供额外导电通路,提高电导率<sup>[9-10]</sup>;通过引入金属纳米颗粒增强电子迁移率,提高导电稳定性;引入 MXene 提高材料的柔性和耐用性<sup>[11-14]</sup>。然而,当前对 PANI/PET 复合织物的微观结构与导电性关系的研究仍不够深入,限制了该材料在柔性电子领域的进一步优化和应用。

本研究针对 PANI/PET 复合材料导电性受限的问题,研究不同掺杂酸对 PANI 分子结构、聚集态结构与导电性能的影响。改变掺杂酸种类,利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)等多种表征手段,分析 PANI/PET 材料的微观结构演变,揭示其对电导率的影响机制。在此基础上,选取导电性最佳的 PANI/PET 复合织物用于制备肖特基型纳米发电机,评估其在微小机械能收集领域的应用潜力,以期为 PANI/PET 材料的结构设计、性能优化以及应用提供思路。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与仪器

材料:苯胺( $\geq 99\%$ )、柠檬酸(CA,  $\geq 99.5\%$ ),上海阿拉丁(Aladdin)公司;过硫酸铵(APS,  $\geq 99\%$ )、对甲苯磺酸(PTSA,  $\geq 99\%$ ),天津大茂化学试剂厂;NaOH( $\geq 97\%$ )、乙醇( $\geq 99.7\%$ ),天津科密欧化学试剂有限公司;HCl( $\geq 99.8\%$ )、HNO<sub>3</sub>( $\geq 99.8\%$ )、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>( $\geq 99.8\%$ ),天津风船化学试剂科技有限公司;PET 织物,许昌联聚贸易有限公司。所有化学试剂均未经过进一步纯化,直接使用。

仪器:Gemini SEM 500 型热场发射扫描电子显微镜,德国卡尔蔡司公司;Niocolet iS50 型傅里叶红外光谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,德国 Bruker 公司;e-Coder 410 型高分辨率实验室数据记录仪,澳大利亚 eDAQ 公司;Chi 660 型电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;ST2263 型双电测四探针测试仪,苏州晶格电子有限公司。

### 1.2 PANI/PET 复合织物的制备

通过液相法在 PET 织物上对单体进行原位聚合,合成 PANI,制备 PANI/PET 复合织物,制备流程如图 1 所示。

将苯胺(0.3 mol/L)和 APS(0.3 mol/L)分别溶解在 50 mL、0.6 mol/L 的掺杂酸(HCl、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HNO<sub>3</sub>、CA 和

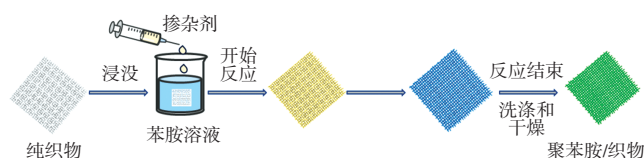


图 1 PANI/PET 复合织物制备流程

Fig.1 Preparation process of PANI/PET composite fabric

PTSA)溶液中,搅拌 2 h 后进行 1 h 超声处理;随后,将 2 cm × 2 cm 的 PET 织物浸泡在苯胺溶液中约 2 h;浸泡后,在剧烈机械搅拌下,缓慢滴加 APS 溶液至苯胺-织物混合体系中;在室温(20~26 °C)和相对湿度 30%~40%条件下,PANI 在 PET 织物表面完成聚合反应,反应时长 2 h;最后,将所得材料用乙醇和蒸馏水充分洗涤,以去除副产物,并在 60 °C 下干燥 24 h。

### 1.3 肖特基纳米发电机的制备

首先将铜胶带裁成尺寸为 2 cm × 2 cm 的正方形,将 PANI/PET 材料夹在铝(Al)膜与铜(Cu)膜电极之间,并用 EVA 薄膜进行塑封,得到肖特基型纳米发电机,如图 2 所示。

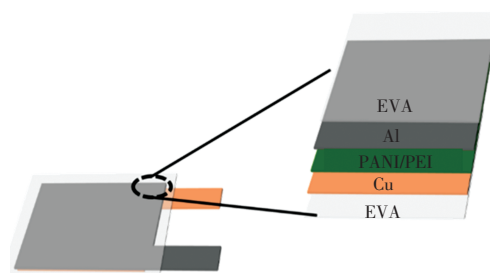


图 2 肖特基纳米发电机的制备

Fig.2 Preparation of Schottky nanogenerator

### 1.4 测试与表征

(1) 表面形貌观察(SEM):通过 Gemini 500 型扫描电子显微镜观察 PANI/PET 材料的形貌。

(2) 红外光谱测定:采用 Nicolet iS50 型傅里叶变换红外光谱仪测试试样的傅里叶变换红外光谱(FTIR)。

(3) 结晶性能分析:通过 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪测定样品的 X 射线衍射图谱(XRD),采用 Cu-K $\alpha$  辐射,工作电压 40 kV,电流 40 mA,扫描范围 2 $\theta$  为 10°~60°。为了更好地判断 PANI 材料结晶结构的变化,采用 Jade 软件去除 PANI/PET 材料 XRD 图谱中 PET 织物的背景,并根据修改后的 XRD 图谱,通过布拉格方程计算 PANI 材料的晶面间距,如式(1)所示,通过 25.8°处的结晶峰计算 PANI 材料的结晶度<sup>[15-17]</sup>,如式(2)所示。

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

$$X_c = \frac{I_c}{I_c + I_{am}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $d$ 为晶面间距; $\theta$ 为衍射半角; $n$ 为衍射级数; $\lambda$ 为X射线波长; $X_c$ 为结晶度; $I_c$ 为XRD图中结晶峰的强度; $I_{am}$ 为非晶峰强度。随着入射光束与晶面之间的衍射角减小,晶面之间距离增大。

(4) 电学性能: 在 1 Hz、13 N 的条件下进行循环压缩释放机械运动, 采用 Chi 660 型电化学工作站和 e-Corder 410 型高分辨率实验室数据记录仪测试并记录电压和电流输出情况, 如图 3 所示。设定采样频率为 10 kHz; 采用 ST2263 型双电测四探针测试仪测试电导率。所有测量均在室温 25 °C、湿度 30% 的环境下进行。

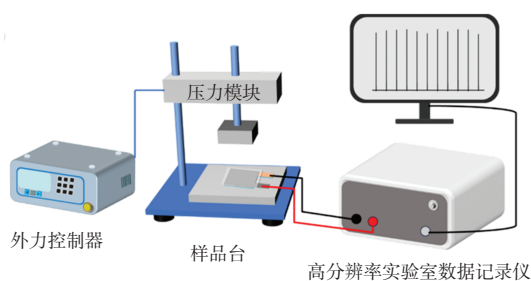


图3 纳米发电机的机电转换性能测试

Fig.3 Mechanical and electrical conversion performance testing of nanogenerators

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面形貌分析

图 4 展示了不同酸掺杂 PANI/PET 材料的形貌。

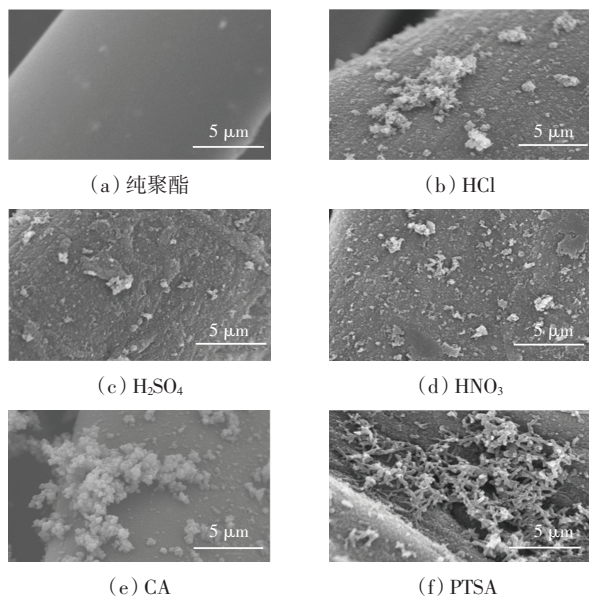


图4 掺杂不同酸的 PANI/PET 电镜图

Fig.4 SEM of PANI/PET doped various acids

由图 4 可知, 聚合反应后 PET 纤维结构保持完整, 纤维表面可见颗粒状 PANI 沉积物, 证实了 PANI/PET 材料的成功合成。值得注意的是, HCl、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HNO<sub>3</sub> 掺杂的 PANI/PET 材料颗粒密度较低, 并形成典型的球形颗粒; 而 CA、PTSA 掺杂的 PANI/PET 材料颗粒密度高, 且 PTSA 掺杂促使 PANI 颗粒表现出棒状结构。

### 2.2 电导率分析

不同酸掺杂 PANI/PET 样品的电导率如图 5 所示。

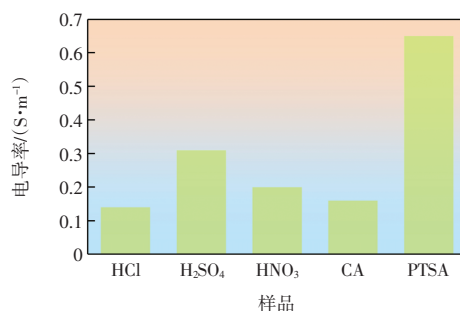


图5 掺杂不同酸的 PANI/PET 材料的电导率

Fig.5 Conductivity of PANI/PET doped various acid

由图 5 可知, 在众多酸掺杂的 PANI/PET 样品中, 掺杂 HCl 的 PANI/PET 样品电导率最低, 仅为 0.14 S/m; 掺杂 PTSA 的 PANI/PET 样品电导率最高, 为 0.65 S/m。这是因为棒状 PANI 颗粒具有更大的长径比和更规整的分子链取向, 这种结构特征不仅能够增强电荷传输效率, 同时对其导电性能的提升起到重要促进作用<sup>[18-19]</sup>。

### 2.3 FTIR 分析

除形貌特征外, PANI 的分子结构对其导电性能同样具有重要影响。本文通过 FTIR 研究 PANI/PET 材料分子结构的变化, 纯 PET 和不同酸掺杂 PANI/PET 的 FTIR 光谱及 PANI 苯醌结构强度比如图 6 所示。

由图 6 可知, 与纯 PET 材料相比, PANI/PET 材料在 1578 cm<sup>-1</sup> 和 1504 cm<sup>-1</sup> 处出现 2 个显著振动峰, 分别对应聚苯胺材料中的醌式结构单元与苯式结构单元的 C=C 键伸缩振动<sup>[19]</sup>, 除此之外没有新的特征峰, 这表明 PET 材料被 PANI 材料覆盖, 且两者之间未发生反应。酸掺杂后, 醌式结构单元上的双极子更易发生结构转变, 导致醌式单元向苯式单元转化。红外光谱显示: 相较于 HCl 掺杂的 PANI, 经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HNO<sub>3</sub>、CA 和 PTSA 掺杂的 PANI 中, 1578 cm<sup>-1</sup> 处的醌式 C=C 峰逐渐蓝移, 而 1504 cm<sup>-1</sup> 处的苯式 C=C 峰发生红移。这种位移现象表明 PANI 分子中醌式环的 C=C 键强度减弱, 苯式环的 C=C 键强度增强, 暗示醌式与苯式结构比例发生变化。值得注意的是, HCl 掺杂的 PANI

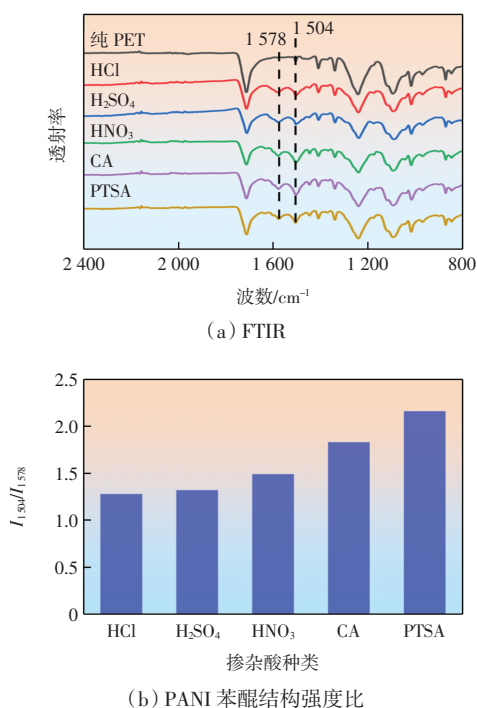


图6 掺杂不同酸的 PANI/PET 的 FTIR 光谱及分子结构  
Fig.6 FTIR spectra and molecular structure of PANI/PET doped with different acids

中苯式/醌式结构强度比( $I_{1504}/I_{1578}$ )最低(约 1.28 : 1.00), 而其他酸掺杂体系的该比值逐渐升高, 其中 PTSA 掺杂的 PANI 达到最大值(约 2.16 : 1.00)。更高的  $I_{1504}/I_{1578}$  比值表明材料共轭效应增强, 促使分子链排列更加有序, 从而提升 PANI 材料的导电性<sup>[20]</sup>。

## 2.4 XRD 分析

图 7 为掺杂不同酸的 PANI/PET 材料的 XRD 谱图及 PANI 晶面间距和结晶度计算结果。

由图 7(a) XRD 谱图可见, 纯 PET 织物在  $2\theta$  为  $10^\circ \sim 30^\circ$  范围内呈现 3 个特征峰, 3 个衍射峰表现为弥散峰; 相比较而言, PET 织物上聚合 PANI 后, PANI/PET 材料在  $2\theta$  为  $10^\circ \sim 30^\circ$  范围内的 3 个衍射峰更为尖锐。由于质子酸体积差异, 不同酸掺杂会导致 PANI 分子链与聚集态结构发生显著变化, 进而影响材料结晶度与导电性能。在图 7(a) 中, HCl 掺杂的 PANI/PET 材料在  $17.6^\circ$ 、 $22.7^\circ$  和  $25.8^\circ$  处的峰分别对应 PANI 的非晶区与结晶区特征<sup>[16]</sup>。经不同酸掺杂后,  $25.8^\circ$  处的结晶峰均向左偏移, 其中 PTSA 掺杂的 PANI/PET 材料衍射角最小(约  $25.6^\circ$ )。

质子酸掺杂使 PANI 分子链间距增大, 进而扩大晶体的晶面间距。分子间聚集程度降低可削弱分子间作用力, 促进电荷离域以增强导电性<sup>[21]</sup>; 但分子链间距过大则会导致晶面间距过度增加, 反而不利于电荷离域而降低导电性。因此, 获得适度的分子链与晶面间

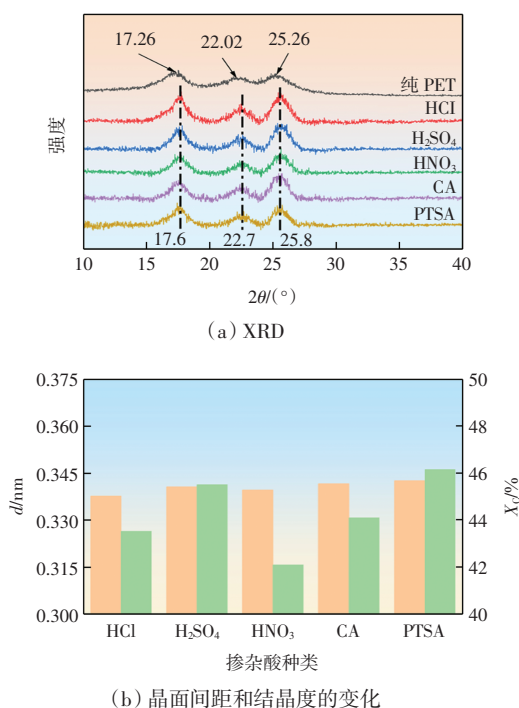


图7 掺杂不同酸的 PANI/PET 材料的 XRD 分析  
Fig.7 XRD analysis of PANI materials doped with different acids

距至关重要。当晶面间距为 0.53 nm 时, 极化子跃迁活化能降低, 有利于  $\pi-\pi$  堆积与电子离域, 从而提升导电性<sup>[12, 21]</sup>。由式(1)可知, 衍射角减小对应聚合物层间距增加。由图 7(b) 可知, 所有掺杂酸中, HCl 掺杂的 PANI 材料晶面间距最小(约 0.338 nm), 而 PTSA 掺杂的 PANI 材料晶面间距为 0.343 nm, 最接近 0.530 nm 的最佳值且导电性最优<sup>[22]</sup>。分子链间距与晶面间距共同影响材料结晶度。适度的分子链间距可形成有利的晶面间距, 进而调控分子间作用力。分子链有序排列促进晶体生长, 从而提高结晶度。由图 7(b) 可知, PANI 结晶度随掺杂酸种类不同而改变, 且结晶度变化趋势与晶面间距变化高度一致: HCl 掺杂的 PANI 材料结晶度最低(43.51%), 而 PTSA 掺杂的 PANI 结晶度最高(46.16%)。由于结晶度与导电性呈显著正相关<sup>[19, 23]</sup>, 这解释了本文所制备 PANI 材料的导电性差异, 即 HCl 掺杂的 PANI 材料导电性最低, 而 PTSA 掺杂的 PANI 材料的导电性最高, 与电导率实验结果一致。

综上所述, 掺杂酸的引入通过调控 PANI 的苯醌结构比例, 增强材料的共轭效应, 改善聚合物分子链排列的有序性与规整性, 同时使晶面间距与分子链间距逐渐增大。分子链堆积紧密程度降低促使材料结晶度提高, 从而显著提升导电性能。

## 2.5 PANI/PET 材料的应用

肖特基纳米发电机因含有肖特基整流结可以直

接将器件产生的交流信号转变成直流信号,从而便于为电子器件直接供电,减少电能损耗。通过采用 PANI/PET 柔性材料制备发电机可以更好地适应人体活动变化,更高效地采集机械能。因此,本文将掺杂 PTSA 的 PANI/PET 材料夹在铝(Al)膜与铜(Cu)膜电极之间,制备肖特基型纳米发电机进行应用测试,其电输出性能如图 8 所示。

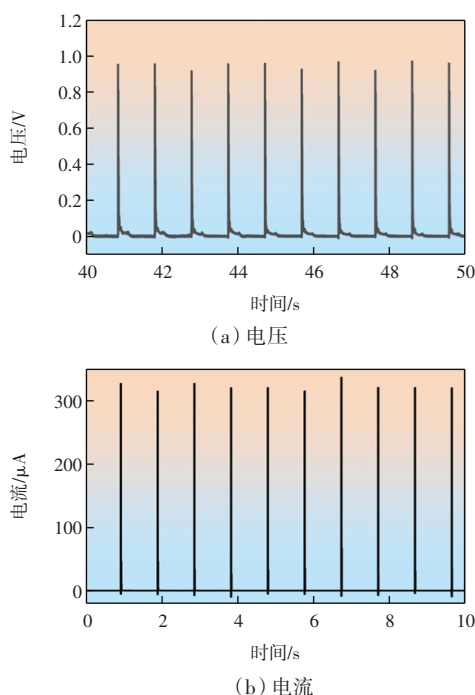


图 8 掺杂 PTSA 的 PANI 器件的电输出性能

Fig.8 Electrical output properties of PANI devices doped with PTSA

在未压缩条件下,肖特基型纳米发电机中的 PANI/PET 材料只有部分面积与金属电极接触。在压缩条件下,PANI/PET 材料发生形变,变得更加致密,更多的 PANI/PET 材料与 Al 膜接触,增大接触面积;含有 PANI 的 PET 纤维相互摩擦以及与 Al 金属电极的摩擦效应会产生电荷。同时,压缩导致纤维之间的距离减小,使纤维彼此紧密接触,通过这种方式,建立了更有效的电电路径,降低了材料内部电阻率。Al/PANI 肖特基二极管导致单向电荷传输,从而产生直流输出<sup>[24]</sup>。由图 8 可知,在外力作用下,Al/PANI-PTSA/Cu 器件展现出相对较好的电压输出性能,开路峰值电压达到 0.973 V,短路电流达到 327.19 μA,说明掺杂 PTSA 的 PANI/PET 材料制备的器件表现出优异的电性能。

### 3 结论

本文采用不同酸掺杂方式对 PANI 的分子结构进

行调控,在 PET 纤维表面原位聚合 PANI,分析掺杂酸种类对 PANI/PET 材料结构和导电性能的影响;将 PANI/PET 材料与金属 Al、Cu 膜电极组装制备肖特基型纳米发电机,考察其电输出性能。研究表明:

(1) 掺杂酸的种类对 PANI 的苯醌结构比例、分子链规整性及晶面间距具有显著影响。PTSA 掺杂的 PANI 材料中苯式/醌式结构比最高(2.16),其共轭效应更强,有助于提升 PANI/PET 材料的导电性能。

(2) PTSA 掺杂的 PANI 具有最优的晶面间距(0.343 nm)和最高的结晶度(46.16%),有助于改善电荷传输能力。相比之下,HCl 掺杂的 PANI 材料晶面间距最小(0.338 nm),结晶度最低(43.51%),导电性最差。

(3) 不同掺杂酸调控的 PANI/PET 材料表现出不同的导电性,其中 PTSA 掺杂的 PANI/PET 复合材料电导率最高(0.65 S/m),相比 HCl 掺杂的 PANI/PET 材料(0.14 S/m)提高了约 4.64 倍。

(4) 基于 PANI/PET 复合材料制备的肖特基型纳米发电器件展现出良好的直流电输出性能。采用 PTSA 掺杂的 PANI/PET 材料所制备的肖特基型纳米发电机表现出较高的开路电压(0.973 V)和短路电流(327.19 μA),进一步验证了其优异的导电性和电荷传输能力。

本研究通过调控 PANI/PET 复合材料的结构和导电性,为高性能柔性电子器件的开发提供了新的思路,并为可穿戴纳米发电机的应用奠定了基础。未来可进一步优化掺杂策略,提升材料在实际应用中的稳定性和输出性能。

### 参考文献:

- [1] YI H K, WANG S J, MEI S X, et al. Conductive polymer composites for resistive flexible strain sensors[J]. *Polymer*, 2024, 307: 127286.
- [2] MOHAMED MUSTAKIM N S, KAMARUZAMAN D, ABDULLAH M H, et al. Review of recent advances in piezoelectric material for nanogenerator application: Preparation methods, material selection, performance, applications, and future outlook[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(41): 19380-19423.
- [3] 宋业谔,陈卓明,王艺琳,等.银/导电共聚物复合涤纶织物的制备与表征[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(1): 30-38.  
SONG Y Y, CHEN Z M, WANG Y L, et al. Preparation and characterization of composite polyester fabric with silver and conductive copolymer[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2024, 50(1): 30-38(in Chinese).
- [4] XIE X Y, XIN B J, CHEN Z M, et al. Preparation and char-

- acterization of PANI-PPY/PET fabric conductive composite for supercapacitors[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2022, 113(11): 2443-2450.
- [5] ZHAO Z Y, ZHOU J, XIAO H, et al. Creation of polyaniline-coated polyester fabrics with conductive, electrothermal and energy-storage properties via micro-dissolution method[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101042.
- [6] SHARMA N, SINGH A, KUMAR N, et al. A review on polyaniline and its composites: From synthesis to properties and progressive applications[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(15): 6206-6244.
- [7] ZHANG B H, XUE T, MENG J G, et al. Study on property of PANI/PET composite conductive fabric[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2015, 106(3): 253-259.
- [8] BERA A, DEB K, KATHIRVEL V, et al. Flexible diode of polyaniline/ITO heterojunction on PET substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 418: 264-269.
- [9] KIM J, CHO Y W, WOO S G, et al. Advancements in chemical vapor deposited carbon films for secondary battery applications[J]. *Small*, 2025, 21(12): e2410570.
- [10] RAHMAN M M, HOSSEN M R, ALAM I, et al. Synthesis of hexagonal boron nitride based PANI/h-BN and PANI-PPy/h-BN nanocomposites for efficient supercapacitors[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 947: 169471.
- [11] 李金梅. 长寿命聚苯胺基柔性电极的电化学制备及其在超级电容器中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- LI J M. Wait electrochemical preparation of long-life polyaniline based flexible electrode and its application in supercapacitors[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022(in Chinese).
- [12] POOJA, KUMAR A, PRASHER P, et al. Factors affecting the electrical conductivity of conducting polymers[J]. *Carbon Letters*, 2023, 33(2): 307-324.
- [13] HUANG D Z, KIM H, ZOU G D, et al. All-MXene thermoelectric nanogenerator[J]. *Materials Today Energy*, 2022, 29: 101129.
- [14] ABIRAMI S, KUMAR E. A review on metal oxide-doped polyaniline nanocomposites[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(31): 14141-14171.
- [15] BANERJEE S, SARMAH S, KUMAR A. Photoluminescence studies in HCl-doped polyaniline nanofibers[J]. *Journal of Optics*, 2009, 38(2): 124-130.
- [16] 李帅东. 聚苯胺/镍铁合金/涤纶功能复合材料的制备及性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- LI S D. Preparation and properties of polyaniline/NiFe alloy/polyester functional composites[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023(in Chinese).
- [17] 方娜. PANI/PET 及 PPY/PA66 复合导电织物制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- FANG N. Preparation and properties of PANI/PET and PPY/PA66 composite conductive fabrics[D]. Shanghai: Donghua University, 2010(in Chinese).
- [18] OYHARÇABAL M, OLINGA T, FOULC M P, et al. Influence of the morphology of polyaniline on the microwave absorption properties of epoxy polyaniline composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 107-112.
- [19] LIU S Y, DONG Z J, WANG X Z, et al. Different acid doped polyaniline waterborne epoxy coatings: Anticorrosion and passivation performance on 5083 Al alloy[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 173: 107182.
- [20] BLINOVA N V, STEJSKAL J, TRCHOVÁ M, et al. Polyaniline and polypyrrole: A comparative study of the preparation[J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43(6): 2331-2341.
- [21] DAS T, PANDEY V K, VERMA S, et al. Optimization of the ratio of aniline, ammonium persulfate, para-toluenesulfonic acid for the synthesis of conducting polyaniline and its use in energy storage devices[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(14): 19914-19928.
- [22] SUENDO V, LAU Y, HIDAYAT F, et al. Effect of face-to-face and side-to-side interchain interactions on the electron transport in emeraldine salt polyaniline[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(12): 7190-7199.
- [23] XU X J, FU Q G, GU H B, et al. Polyaniline crystalline nanostructures dependent negative permittivity metamaterials[J]. *Polymer*, 2020, 188: 122129.
- [24] WANG W Y, HAN X, NIU J R, et al. Direct-current energy generators from polypyrrole-coated fabric/metal Schottky diodes with considerably improved output[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(45): 24166-24174.

## 本文引文格式:

金欣, 刘晓东. 基于酸掺杂的 PANI/PET 材料的结构调控及其导电性[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(3): 49-54.

JIN X, LIU X D. Structural control of PANI/PET materials based on acid doping and its conductivity[J]. *Journal of Tianjgong University*, 2025, 44(3): 49-54(in Chinese).