

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.01.005

GN-g-MAH/PPy 多功能 PET 非织造布的制备及应用

韩娜¹, 苏欣¹, 沙乾坤², 杨田²

(1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387; 2. 国家先进印染技术创新中心, 山东 泰安 271000)

摘要: 为提高聚酯(PET)非织造布的性能, 将导电材料通过表面改性引入 PET 非织造布, 采用单宁酸(TA)作为桥联剂, 功能化石墨烯(GN-g-MAH)和聚吡咯(PPy)作为导电功能层, 制备得到多功能 PET 非织造布, 并使用 SEM、XRD、TG 等测试了 PET/GN-g-MAH/PPy 的微观结构和热稳定性。结果表明: 通过循环自组合法及低温化学聚合法成功制备了 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布, 表现出良好的导电性, 表面电阻率低至 $3.11 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$, 表面由疏水转变为亲水。基于此, 非织造布也表现出优异的电热性能, 对其施加 3 V 驱动电压时, 可在 20 s 内产生约 40 °C 的饱和温度。此外, 还具有良好的光热转换性能, 当光照强度为 300 mW/cm² 时, 照射 20 s 后, 表面温度可稳定到 105.8 °C, 非织造布还表现出优异的光热抗菌性, 当大肠杆菌的菌液浓度为 1.6×10^8 CFU/mL 时, 使用氙灯模拟太阳光源照射后, 抗菌率达到 99.6%。

关键词: 聚酯; 功能化石墨烯; 聚吡咯; 非织造布

中图分类号: TS174.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)01-0035-07

Preparation and application of GN-g-MAH/PPy multifunctional PET non-woven fabric

HAN Na¹, SU Xin¹, SHA Qiankun², YANG Tian²

(1. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. National Advanced Printing and Dyeing Technology Innovation Center, Tai'an 271000, Shandong Province, China)

Abstract: In order to improve the performance of polyester(PET) non-woven fabrics, conductive materials was introduced into PET non-woven fabrics through surface modification, using tannic acid (TA) as a bridging agent and functionalized graphene(GN-g-MAH) and polypyrrole(PPy) as conductive functional layers to prepare multifunctional PET non-woven fabrics, and the microstructure and thermal stability of PET/GN-g-MAH/PPy were tested using SEM, XRD and TG. The results showed that PET/GN-g-MAH/PPy non-woven fabric was successfully prepared by cyclic self-assembly method and low-temperature chemical polymerization method, which exhibited good electrical conductivity with a low surface resistivity of $3.11 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ and surface conversion from hydrophobic to hydrophilic. Based on this, the non-woven fabric also exhibited excellent electrothermal properties, generating a saturation temperature of about 40 °C in 20 s when a 3 V driving voltage was applied to it. In addition, it also has good photothermal conversion performance. When the light intensity is 300 mW/cm², the surface temperature can be stabilized to 105.8 °C after irradiation for 20 s, and the nonwoven fabric also shows excellent photothermal antibacterial properties. When the concentration of *E. coli* bacterial solution is 1.6×10^8 CFU/mL, the antibacterial rate reaches 99.6% after irradiation using xenon lamp simulating solar light source.

Key words: polyester(PET); functionalized graphene; polypyrrole(PPy); non-woven fabric

功能性纺织品融合了许多创新技术, 可以满足人们对织物功能化的需求, 提高人们的生活水平。导电织物将具有导电功能的材料集成到织物中, 赋予织物

导电功能, 并赋予其额外的新功能^[1]。具有优良力学性能、耐蠕变耐断裂性能的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纺织品被认为是设计成本效益高的导电织物的

收稿日期: 2023-02-25

基金项目: 国家先进印染技术创新中心科研基金资助项目(2022GCJJ06)

通信作者: 韩娜(1981—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为膜材料和纤维的功能化改性。E-mail: hanna@tiangong.edu.cn

理想基材。近年来,有许多对于纺织品表面导电改性的方法,包括偶联剂^[2]、碱处理^[3]、表面氧化、等离子体辐照^[4]、化学接枝^[5]、紫外接枝^[6]和高能辐照接枝^[7]等,这些方法适用于修饰纤维和纺织品上的不同功能层。据报道,上述对纤维的大多数处理可能改善了纤维/基体界面,但代价是牺牲了纤维的性能和结构完整性。例如,等离子体处理的材料是不稳定的,表面在几天后恢复疏水性^[8]。碱减量由于成本低成为了工业上最常用的 PET 表面改性方法,然而,废水对环境造成了巨大的破坏。基于对 PET 固有结构及力学性能的保护,无损改性是当前研究者们致力于开发的方向^[9]。

石墨烯(Graphene, GN)是由排列成蜂窝结构的 sp^2 碳结构组成的 2D 单原子片层。GN 具有大的比表面积和高的电子迁移率,表现出非常高的电导率和热导率^[10]。一般来说,GN 在织物表面的涂层可以通过与其氧化的官能化衍生物氧化石墨烯(GO)的化学键合来进行,然而 GO 的制备工艺复杂、危险系数较大。狄尔斯-阿尔德反应(Diels-Alder Reaction, D-A)环境友好、反应温和,可以通过烯键加成实现 GN 的共价官能化^[11]。由于具有高导电性、氧化状态下的稳定性以及合成过程中的易操作性,聚吡咯(PPy)是最典型的导电聚合物。球状的 PPy 颗粒与片层状的功能化石墨烯结合可以更好地形成导电网络^[12-13]。

本文使用聚酯(PET)非织造布作为柔性基底,首先利用 D-A 反应制备石墨烯接枝马来酸酐(GN-g-MAH),然后采用导电聚合物 PPy 和 GN-g-MAH 通过浸涂法负载到 PET 非织造布上,研究不同样品的导电性,以及 PET/GN-g-MAH/PPy 的电加热性能、光热转换性能、抗菌性能及稳定性。

1 实验部分

1.1 实验试剂及仪器

材料与试剂:聚酯纤维非织造布(25 g/m^2),普杰非织造布(中国)有限公司产品;石墨烯粉体(97%, $7\sim 12\ \mu\text{m}$, 1~3 层),厦门凯纳石墨烯技术股份有限公司产品;单宁酸(TA, 工业级)、吡咯(>99.7%)、马来酸酐(MAH, 分析纯),均为上海阿拉丁化学试剂有限公司产品;大肠杆菌(*E.coli*)、胰蛋白胨、酵母浸粉,均为分析纯,北京奥博兴生物科技有限公司产品;磷酸氢二钠(Na_2HPO_4)、磷酸二氢钾(KH_2PO_4),均为分析纯,天津市风船化学试剂有限公司产品。

主要仪器:DZF-6020 型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司产品;FD-1 型冷冻干燥机,河南予华

仪器有限公司产品;DFY 型低温恒温搅拌反应浴,巩义市英峪高科仪器厂产品;S4800 型冷场扫描电子显微镜、H7650 型透射电子显微镜,均为日本 Hitachi 公司产品;APOLLO XL 型能谱仪,美国 EDAX 公司产品;D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,德国 Bruker 公司产品;ST2 643 型超高阻微电流测试仪,苏州晶格电子有限公司产品;HY3005ET 型直流稳压电源,杭州华谊电子实业有限公司产品;UTi220A PRO 型红外热成像仪,优利德科技(中国)股份有限公司产品。

1.2 GN-g-MAH 的制备

GN-g-MAH 是基于无溶剂 D-A 反应制备的。首先将 GN 粉体置于甲酸中预处理,洗涤干燥后备用。GN-g-MAH 的制备过程为:称取 1 g GN 和 30 g MAH 置于 100 mL 圆底三口烧瓶中,以 300 r/min 转速搅拌,氮气保护下,升温至不同温度(100、120、130、140 $^{\circ}\text{C}$),反应不同时间(8 h、12 h、16 h)。反应结束后超声 30 min,用热水洗涤数次,真空抽滤,以去除没有完全反应的 MAH;将得到的产物 GN-g-MAH 置于冷冻干燥机中干燥至恒重。

1.3 PET/GN-g-MAH/PPy 的制备

首先,在 50 mL 去离子水中加入 50 mg TA,搅拌至充分溶解,得到 1 mg/mL 质量浓度的 TA 溶液,备用。其次,取上述制备好的 GN-g-MAH 120 mg,加入 20 mL 去离子水中超声 10 min,使其分散均匀,得到 6 mg/mL 质量浓度的 GN-g-MAH 分散液。将预处理好的 PET 非织造布浸渍于 TA 溶液中 20 min,60 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥 1 h,再浸渍于 GN-g-MAH 分散液中 30 min,60 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥 1 h,以上过程循环数次,然后用去离子水反复冲洗,将多余 GN-g-MAH 洗掉,干燥,得到 PET/GN-g-MAH- x ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6$)。通过低温化学聚合法制备导电 PPy 涂覆的 PET/GN-g-MAH- x 。将 0.2 mL 吡咯单体和 0.5 g 对甲苯磺酸(PTSA)掺杂剂分散在 30 mL 去离子水中,在低温下不断搅拌,然后将预处理过的 PET/GN-g-MAH- x 浸入上述混合液中。在连续搅拌下,将 30 mL 预冷的 $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 氧化剂溶液逐滴加入上述混合液中。聚合反应在 0~5 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 5 h。反应结束后,取出织物并用去离子水反复洗涤,并在真空烘箱中 50 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥 12 h,得到 PET/GN-g-MAH/PPy。制备流程如图 1 所示。

1.4 结构表征与性能测试

采用 S4800 冷场发射扫描电子显微镜在加速电压为 10 kV 时观察 PET 非织造布改性前后的微观形貌。采用 APOLLO XL 能谱仪(装于冷场发射扫描电子显微镜)对样品表面进行化学成分分析。扫描元素为:

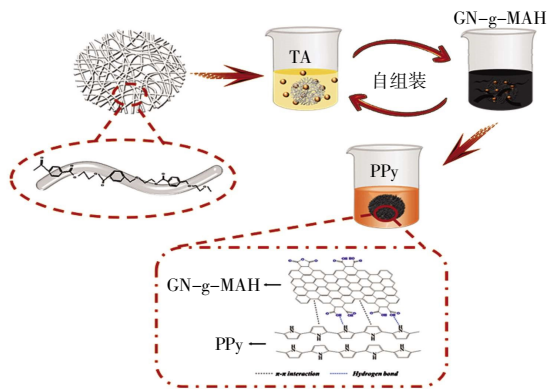


图1 PET/GN-g-MAH/PPy 样品的制备流程

Fig.1 Flow chart for preparing PET/GN-g-MAH/PPy samples

C、O、N。扫描类型为:面扫。采用 TG 209 F3 Tarsus 热重分析仪对样品进行热稳定性分析。在氮气氛围下,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温,升温范围为室温至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用超高阻微电流测试仪测量不同样品的电阻率。测试过程中探头与样品紧密接触,选取 5 个点进行测试取平均值。将样品 ($1\text{ cm} \times 3\text{ cm}$) 两端通过鳄鱼夹连接到直流稳压电源(HYELEC, HY3005ET)从而提供一定的电压,并通过红外热成像仪(UNI-T, UTi220A PRO)记录样品表面的温度变化来表征电热特性。

2 结果与讨论

2.1 PET/GN-g-MAH/PPy 的微观形貌

功能层在纤维表面的均匀覆盖以及片层之间的紧密连接是 PET/GN-g-MAH/PPy 样品导电性及稳定性良好的关键。本项工作首先采用浸渍-干燥的方法将 GN-g-MAH 纳米片负载在 PET 非织造布表面,然后通过原位聚合法在 PET/GN-g-MAH 表面原位生长 PPy。图 2 为改性前后不同样品的 SEM 图。图 2(a)为原始 PET 的表观形貌,由图 2(a)可以看出其表面非常光滑,直径均一,无明显缺陷。随着浸渍次数的增加,纤维表面被 GN 片层均匀覆盖,片层之间的桥联形成了完美的导电网络。图 2(d)显示了纤维被一层连续的球状形态的 PPy 纳米颗粒包裹,为了更好地观察,将图 2(d)中的纤维放大,可以观察到吡咯在纤维表面均匀地聚合生长,填充了 GN-g-MAH 纳米片之间的缝隙,使导电网络更加完整紧密。图 2(b)为 PET/GN-g-MAH/PPy 的 EDS 能谱图,其中的 N 元素也说明了 PPy 被聚合在了纤维表面。

改性后的非织造布在拥有出色的导电性的同时保持了纤维原本的结构形态和柔韧性,织物可以对

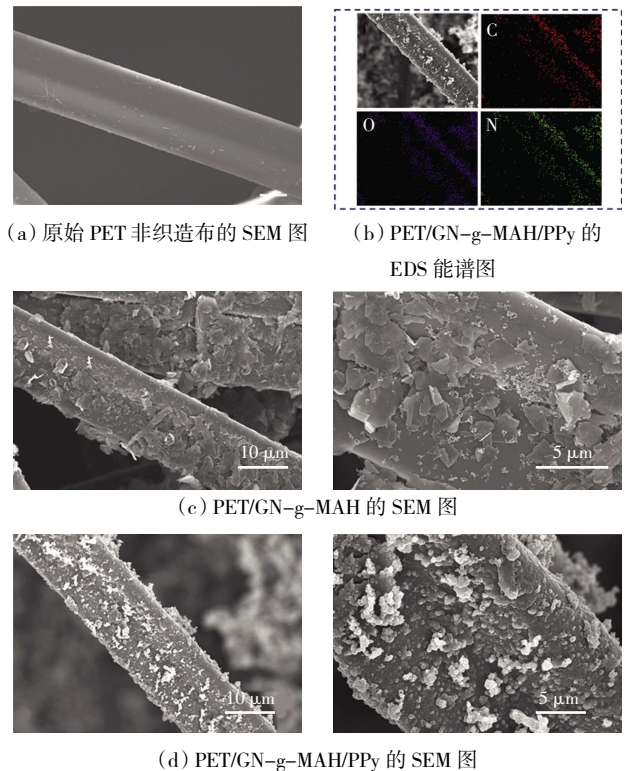


图2 改性前后不同样品的 SEM 图和 EDS 能谱图

Fig.2 SEM images and EDS energy spectra of different samples before and after modification

折、卷绕、裁剪成各种需求的形状(图 3),显示了织物的实用性和灵活性。

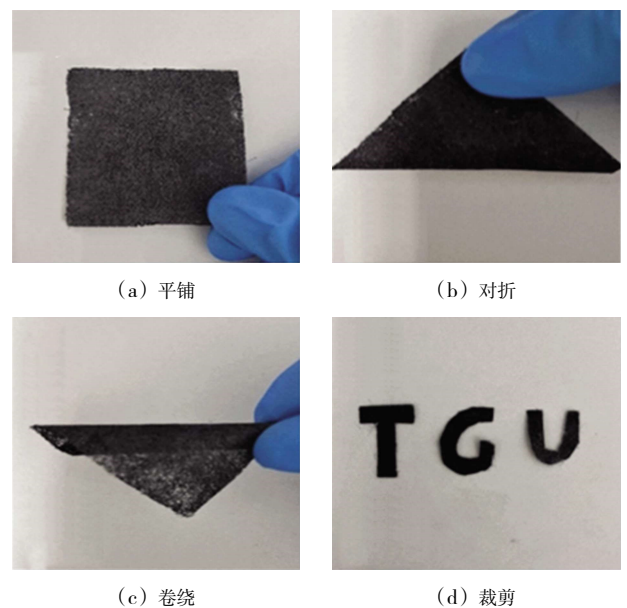


图3 样品 PET/GN-g-MAH/PPy 的实物图

Fig.3 Physical view of sample PET/GN-g-MAH/PPy

图 4 所示为原始 PET 非织造布、PET/GN-g-MAH 和 PET/GN-g-MAH/PPy 的 XRD 谱图分析。由图 4 可见,三者都在 17.7° 、 22.7° 、 26.0° 处都呈现出 3 个特征峰,分别

对应于(010)、(110)和(100)这 3 个晶面,这是由于 PET 为高度结晶的聚合物。而 PET/GN-g-MAH/PPy 样品的峰强低于纯 PET 非织造布,这是由于 PPy 为无定型聚合物,不会出现代表良好结晶度的尖锐的晶型^[14],同时也说明 PET 的表面覆盖了 PPy 纳米颗粒。

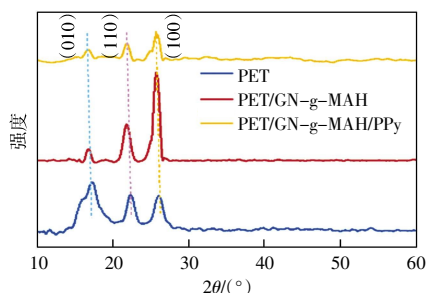


图 4 PET、PET/GN-g-MAH 及 PET/GN-g-MAH/PPy 的 XRD 谱图

Fig.4 XRD spectra of PET, PET/GN-g-MAH and PET/GN-g-MAH/PPy

图 5 为 PET、PET/GN-g-MAH 及 PET/GN-g-MAH/PPy 的 TGA 曲线图。

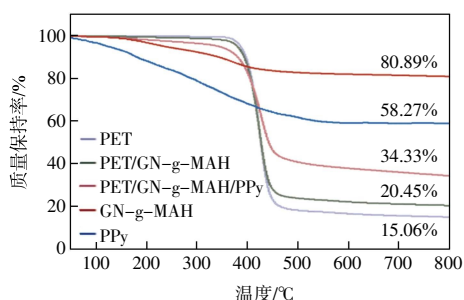


图 5 PET、PET/GN-g-MAH、PET/GN-g-MAH/PPy、GN-g-MAH 及 PPy 的 TGA 图

Fig.5 TGA plots of PET, PET/GN-g-MAH, PET/GN-g-MAH/PPy, GN-g-MAH and PPy

由图 5 可以看出,原始 PET 非织造布由于酯键的断链以及乙烯基酯和羧酸基团的形成,大约在 400 °C 发生热降解。当温度继续升高时,酯键进一步断裂,形成挥发性低分子链段^[15]。酯键的断裂造成一部分非织造布的质量会丢失。原始 PET 非织造布在 800 °C 下的重量保留率约为 15.06%。经过 GN-g-MAH 及 PPy 的负载后,非织造布表现出更高的热稳定性,PET/GN-g-MAH 及 PET/GN-g-MAH/PPy 的质量保持率分别在 20.45%和 34.33%。这是由于 GN-g-MAH 片层和 PPy 纳米颗粒本身的热稳定性以及限制 PET 非织造布热分解的能力。当非织造布表面被均匀覆盖时,GN-g-MAH 和 PPy 可以作为屏障能够抵抗热量。

2.2 PET/GN-g-MAH/PPy 的亲水性测试

图 6 所示为改性前后不同样品的水接触角测试。

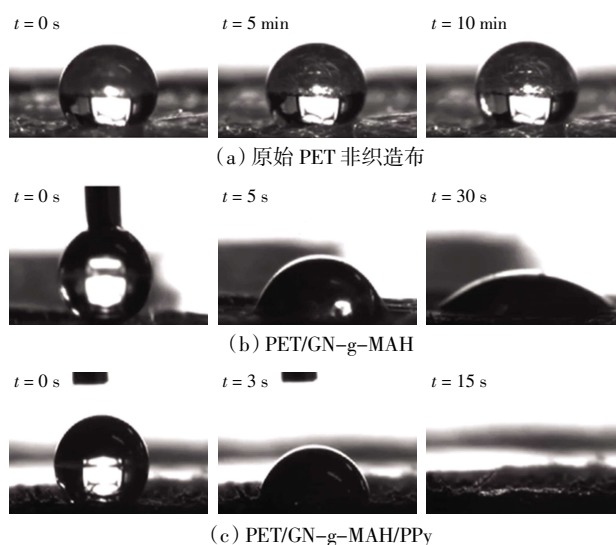


图 6 不同样品的接触角测试照片

Fig.6 Photographs of contact angle tests of different samples

由图 6 可以看出,PET 表面无亲水性基团,表现出疏水的特性,经过 TA 和 GN-g-MAH 的负载之后,由于 TA 分子表面丰富的亲水官能团羟基以及 D-A 反应接枝上的羧基,使得非织造布表面变得亲水,进一步证明了 MAH 接枝的成功。此外,原位生长 PPy 以后,液滴在 15 s 后可以完全铺展,PET/GN-g-MAH/PPy 表现出极好的亲水表面。

2.3 PET/GN-g-MAH/PPy 的电热性能

GN-g-MAH 纳米片在保留了 GN 原有的片层结构以及优异导电性的基础上,表面增加了含氧官能团,使其与基材之间的结合力更加牢固。通过增加浸渍次数来提高 GN-g-MAH 在 PET 表面的负载量,随着浸渍次数的增加,样品表面电阻率逐渐降低,在达到 6 次时,PET/GN-g-MAH 样品的电阻率达到一个令人满意的低电阻($0.46 \Omega \cdot m$),同时保证非织造布的柔性。低温化学聚合 PPy 后,PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布表现出良好的导电性,表面电阻率低至 $3.11 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ 。图 7 所示为不同样品的电阻率。

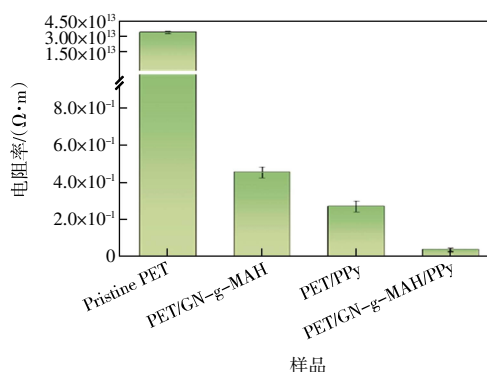


图 7 不同样品的电阻率

Fig.7 Resistivity of different samples

图 8 和 9 显示了 PET/GN-g-MAH/PPy (1 cm × 3 cm) 的电热转换性能, 通过使用直流电源施加不同的稳定输入电压, 红外摄像机 (IR) 记录了温度变化。图 8 显示了 PET/GN-g-MAH/PPy 在施加不同驱动电压下 2 min 然后切断的温度变化。PET/GN-g-MAH/PPy 的温度随着驱动电压的增加而快速升高, 证明了电加热性能的可控性。值得关注的是, 非常低的 3 V 驱动电压可以在 20 s 内产生约 40 °C 的高饱和温度, 在 4 V 时, 在 25 s 内进一步升高到 53 °C。

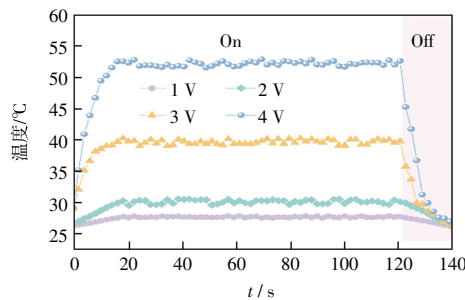


图 8 PET/GN-g-MAH/PPy 样品在不同电压下的时间-温度变化曲线

Fig.8 Time-temperature variation curves of PET/GN-gMAH/PPy samples at different voltages

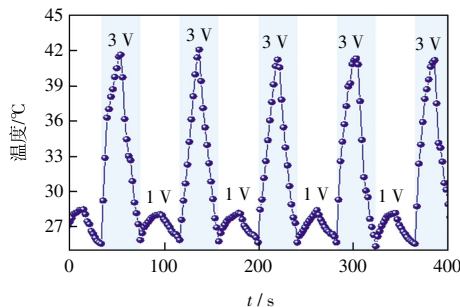


图 9 PET/GN-g-MAH/PPy 样品在 1-3 V 循环下的时间-温度变化曲线

Fig.9 Time-temperature variation curves of PET/GN-g-MAH/PPy samples at 1-3 V cycles

由图 9 可见, 当向 PET/GN-g-MAH/PPy 反复施加 1 V 和 3 V 的电压时, PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布的表面温度最大值基本相同, 进一步证明了 PET/GN-g-MAH/PPy 作为可穿戴加热器的稳定性和温度可调性。总之, PET/GN-g-MAH/PPy 表现出广泛的温度可调性 (26~55 °C)、快速的热响应 (20 s) 以及在非常低的驱动电压 (1~4 V) 下的长期稳定性。PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布作为可穿戴加热器需要低驱动电压这一事实不仅确保了它们的操作过程中的安全性, 而且还降低了能耗。

2.4 PET/GN-g-MAH/PPy 的光热性能

尽管 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布具有优异的

电热转换性能, 但其供电需求在一定程度上限制了其应用。作为一种可再生的自由能源, 太阳能每天向地球辐射大量的能量。光热转换材料吸收太阳能并将其转化为热能^[6]。GN 和 PPy 材料具有出色的光热转换性能, 具有宽的光谱吸收带。经 GN 和 PPy 协同改性的织物还具有优异的光热转换性能, 在阳光照射下这些织物的表面温度会升高^[7]。图 10 显示了 3 种 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布在氙灯模拟太阳光源 (光强 150~300 mW/cm²) 下的温度变化曲线。织物的表面温度随着日光强度的增加而升高。例如, PET/GN-g-MAH/PPy 的稳态温度从 150 mW/cm² 光强下的 57.3 °C 增加到 300 mW/cm² 光强下的 105.8 °C, 可应用于取暖、人体保温和生活取暖。

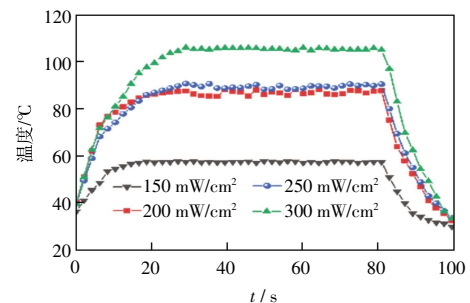


图 10 PET/GN-g-MAH/PPy 样品在不同光功率密度下的时间-温度变化曲线

Fig.10 Time-temperature variation curves of PET/GN-g-MAH/PPy samples at different optical power densities

2.5 PET/GN-g-MAH/PPy 的抗菌性能

目前, 由于细菌感染而导致的健康问题仍然是公共安全的一项严重威胁, 大肠杆菌可以通过食物和水的摄入, 在人与人之间的接触中引发各种疾病^[8]。因此本项工作还探索了 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布的抗菌性能, 主要将革兰氏阴性细菌大肠杆菌用于抗菌实验, 结果如图 11 和图 12 所示。基于改性后的非织造布具有光热转换的特性, 本项实验将各个样品分别置于氙灯模拟太阳光源 (300 mW/cm²) 下和黑暗条件下通过平板计数法对样品的抗菌性能进行测试。当大肠杆菌的菌液浓度为 1.6×10^8 CFU/mL 时, 在黑暗条件下, PET/GN-g-MAH 样品的抗菌率达到了 73.3%, 而 PET/PPy 样品的抗菌率达到了 65.5%, 复合后的 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布的抗菌率达到了 73.4%。由此可以看出, 黑暗条件下, GN-g-MAH 和 PPy 都具有一定的抗菌作用。PPy 作为一种无金属抗菌剂, 其杀菌活性归因于主链 (极化子和双极化子) 上的正电荷, 这些正电荷吸引细菌, 通过破坏细胞壁引发细菌失活^[9]。样品和菌液经过氙灯照射处理后, PET/GN-g-MAH 和 PET/PPy 都表现出优异的光热转换效应, 抗菌率分别

达到了 89.4%和85.0%。而同时负载 2 种导电物质后的 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布的抗菌率达到了 99.6%，明显高于空白对照组和未处理的 PET 非织造布，表明了 GN-g-MAH 具有优秀的抗菌性能。GN 作为一种典型的二维纳米材料，其特殊的结构组成带来了优异的抗菌特性^[20]。首先，GN-g-MAH 纳米片会对细菌的细胞膜造成物理损伤。在计算机模拟中，GN-g-MAH 可以切割并插入细胞膜并提取磷脂，导致细菌活力丧失。膜脂质和 GN-g-MAH 之间的强相互作用基于 GN-g-MAH 的 sp^2 杂化的碳原子。本文选择的具

有较高浓度和较大横向尺寸的 GN-g-MAH 纳米片会加强对细菌细胞膜的破坏。其次，氧化应激是抗菌作用的另一机理，GN-g-MAH 产生的过量活性氧(ROS)会对细菌的脂质和蛋白质形成损害，脂质和蛋白质失活后，细菌将无法继续增殖。最后一方面是电子转移，抗菌性能可能通过电子从微生物膜转移到 GN-g-MAH 表面而不是源于 ROS 介导的损伤来产生^[21]。基于此，不管是在室温还是加热条件下，其卓越的抗菌能力可防止细菌在较高温度下过度生长，从而保护用户免受细菌侵扰。

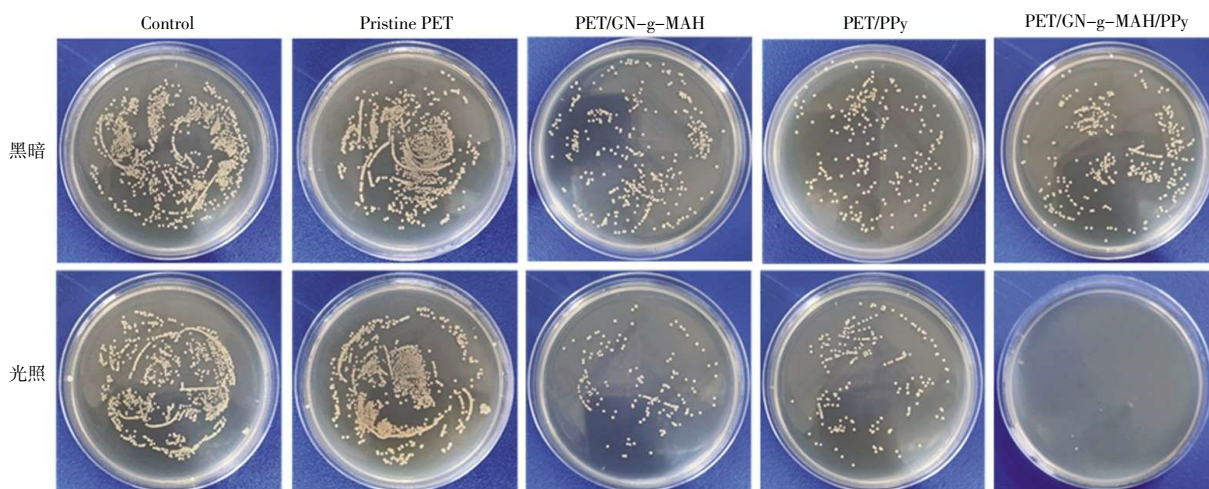


图 11 不同样品和大肠杆菌在光照和黑暗中培养后固体培养基实物照片

Fig.11 Antibacterial properties of different samples and *E. coli* after incubation in light and dark

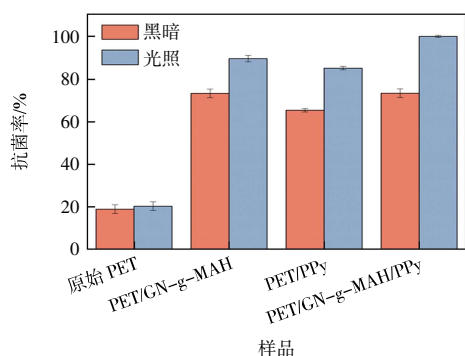


图 12 改性后的样品与原始样品在光照和黑暗两种条件下的抗菌率对比

Fig.12 Comparison of antimicrobial rate of modified sample and original sample under both light and dark conditions

3 结 论

本文以 PET 非织造布为柔性基材，将功能化石墨烯 GN-g-MAH 及 PPy 通过循环自组装法及原位聚合法负载，制备出基于导电的多功能柔性电子织物。根

据对 PET/GN-g-MAH/PPy 的结构表征及性能测试，得出以下结论：

(1) 通过天然生物型化合物 TA 作为连接层，将表面无活性基团的 PET 非织造布与 GN-g-MAH 纳米片通过氢键作用紧密结合，当以质量浓度 6 mg/mL 的 GN-g-MAH 分散液涂覆 6 次时，非织造布表面被充分覆盖，达到 $0.46 \Omega \cdot m$ 的低电阻率。再通过低温化学聚合的方法在 PET/GN-g-MAH 表面生长一层 PPy，制备出 GN-g-MAH 和 PPy 协同作用的 PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布。

(2) PET/GN-g-MAH/PPy 非织造布表现出良好的导电性和亲水性，表面电阻率低至 $3.11 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ ，基于此，非织造布也表现出优异的电热性能，对其施加 3 V 驱动电压时，可在 20 s 内产生约 40 °C 的饱和温度。此外，还具有良好的光热转换性能，在户外 56.9 mW/cm^2 的光照强度下，照射 90 s 后，表面温度可以达到 52.4 °C。非织造布还表现出优异的抗菌性及光热抗菌性，当大肠杆菌的菌液浓度为 $1.6 \times 10^8 \text{ CFU/mL}$ 时，黑暗条件下的抗菌率达到 73.4%，使用氙灯模拟太阳光源照射后，抗菌率达到 99.6%。

参考文献:

- [1] FANG S, WANG R, NI H S, et al. A review of flexible electric heating element and electric heating garments[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(1): 101S-136S.
- [2] ZHENG N, HE J M, ZHAO D, et al. Improvement of atomic oxygen erosion resistance of carbon fiber and carbon fiber/epoxy composite interface with a silane coupling agent[J]. *Materials & Design*, 2016, 109: 171-178.
- [3] CAI M, TAKAGI H, NAKAGAITO A N, et al. Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber-reinforced composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 589-597.
- [4] ZHANG S M, DING F, WANG Y F, et al. Antibacterial and hydrophilic modification of PET fabrics by electron beam irradiation process[J]. *Fibers and Polymers*, 2020, 21(5): 1023-1031.
- [5] SAINI S, BELGACEM M N, BRAS J. Effect of variable aminoalkyl chains on chemical grafting of cellulose nanofiber and their antimicrobial activity[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 75: 760-768.
- [6] WANG J L, LIANG G Z, ZHAO W, et al. Studies on surface modification of UHMWPE fibers via UV initiated grafting[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 253(2): 668-673.
- [7] XING L X, LIU L, HUANG Y D, et al. Enhanced interfacial properties of domestic aramid fiber-12 via high energy gamma ray irradiation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 69: 50-57.
- [8] SANAEI Z, MOHAJERZADEH S, ZAND K, et al. Minimizing permeability of PET substrates using oxygen plasma treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(6): 2218-2225.
- [9] CHEN Y A, WU X Q, WEI J F, et al. Nondestructive modification of catechol/polyethyleneimine onto polyester fabrics by mussel-inspiration for improving interfacial performance [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(9): 2000258.
- [10] WANG T, WANG Y Z, JING L C, et al. Novel biodegradable and ultra-flexible transparent conductive film for green light OLED devices[J]. *Carbon*, 2021, 172: 379-389.
- [11] CAO R R, LI X, CHEN S, et al. Fabrication and characterization of novel shape-stabilized synergistic phase change materials based on PHDA/GO composites[J]. *Energy*, 2017, 138: 157-166.
- [12] CHEN X D, LI B T, QIAO Y, et al. Preparing polypyrrole-coated stretchable textile via low-temperature interfacial polymerization for highly sensitive strain sensor [J]. *Micromachines*, 2019, 10(11): 788.
- [13] BAIK K, PARK S, YUN C S, et al. Integration of polypyrrole electrode into piezoelectric PVDF energy harvester with improved adhesion and over-oxidation resistance[J]. *Polymers*, 2019, 11(6): 1071.
- [14] HE H, GUO Z G. Fabric-based superhydrophobic MXene@polypyrrole heater with superior dual-driving energy conversion[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 629: 508-521.
- [15] BERENDJCHI A, KHAJAVI R, YOUSEFI A A, et al. Improved continuity of reduced graphene oxide on polyester fabric by use of polypyrrole to achieve a highly electro-conductive and flexible substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 363: 264-272.
- [16] YANG D Z, ZHOU B, HAN G J, et al. Flexible transparent polypyrrole-decorated MXene-based film with excellent photothermal energy conversion performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(7): 8909-8918.
- [17] CHAI Y Q, MA H, MA X L, et al. Ultrahigh photothermal temperature in a graphene/conducting polymer system enables contact thermochemical reaction[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(21): 10891-10897.
- [18] XU A Y, MCGILLIVRAY D J, DINGLEY A J. Active antibacterial coating of cotton fabrics with antimicrobial proteins[J]. *Cellulose*, 2021, 28(12): 8077-8094.
- [19] SANCHEZ RAMIREZ D O, VARESANO A, CARLETTO R A, et al. Antibacterial properties of polypyrrole-treated fabrics by ultrasound deposition[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, 102: 164-170.
- [20] STANEVA A D, DIMITROV D K, GOSPODINOVA D N, et al. Antibiofouling activity of graphene materials and graphene-based antimicrobial coatings[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(9): 1839.
- [21] CAO G H, YAN J H, NING X X, et al. Antibacterial and antibiofilm properties of graphene and its derivatives[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 200: 111588.

本文引文格式:

韩娜,苏欣,沙乾坤,等. GN-g-MAH/PPy多功能PET非织造布的制备及应用[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(1): 35-41.

HAN N, SU X, SHA Q K, et al. Preparation and application of GN-g-MAH/PPy multifunctional PET non-woven fabric[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(1): 35-41 (in Chinese).