

文章编号: 1000-7032(2024)05-0853-08

可见光抗菌的单向导湿自泵织物

王 健^{1,2}, 时连鑫^{3*}, 葛介超^{1,2*}

(1. 中国科学院理化技术研究所 光化学转换与功能材料重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 100049;

3. 中国科学院理化技术研究所 中国科学院仿生材料与界面科学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 具有湿度管理和抑菌性能的功能织物可以有效提高穿着舒适度。现有方法往往通过在亲水织物表面物理浸涂抗菌剂, 虽然可起到短效抑菌作用, 但会导致抗菌剂大量突释, 引起皮肤不适, 抗菌能力快速减弱。本文利用静电纺丝方法制备了一种掺杂可见光激发抗菌光敏剂的自泵织物(Self-pumping textile, SPT), 实现了汗液的单向移除同时高效抗菌。自泵织物由疏水的聚偏二氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP)纤维和亲水的碱水解醋酸纤维素(CA)纤维组成, 其中亲水纤维中掺杂了具有高活性氧产生能力的聚噻吩(PT2)光敏剂。在接触角导液模型中, 我们证实了导液时间随疏水层厚度增加而延长, 当疏水层电纺时间为 60 s 时, 水分可以在 10 s 内从疏水层单向导出到亲水层。使用功率为 25 mW/cm² 的氙灯光模拟日常太阳光进行抗菌, 结果表明, 10 min 可以杀灭 95% 以上的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌。本工作为功能性织物的设计提供了一种新的思路。

关 键 词: 自泵织物; 单向导湿; 可见光抗菌; 光动力

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240029

Directional Moisture Transport Self-pumping Textile with Day-light Bacterial Inhibition

WANG Jian^{1,2}, SHI Lianxin^{3*}, GE Jiechao^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. CAS Key Laboratory of Bio-inspired Materials and Interfacial Science Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding Authors, E-mail: shilianxin@mail.ipc.ac.cn; jchge2010@mail.ipc.ac.cn

Abstract: Multi-functional textiles with directional moisture management and antibacterial capabilities have the potential to enhance wearer comfort. Existing methods usually physically dip the antibacterial agents onto the surface of hydrophilic textile, which can play a short-term antibacterial effect, but will lead to a large number of burst release of antibacterial agents, cause skin discomfort, and quickly weaken the antibacterial ability. In this study, a photosensitizer-doped self-pumping textile was prepared by electrospinning for directional sweat removal and antibacterial. Specifically, the self-pumping fabric consists of a hydrophobic polyvinylidene-hexafluoropropylene fiber and a hydrophilic alkali hydrolyzed cellulose acetate (CA) fiber. Besides, the polythiophene photosensitizer with high reactive oxygen species production capacity was doped into hydrophilic fiber enabling daylight antibacterial activity. In the contact angle conductance liquid transport model, we confirmed that the liquid transport time increases with the thickness of the hydrophobic, and when the electrospinning time for the hydrophobic layer was 60 s, water could permeate through it to hydrophilic layer in a unidirectional manner within 10 s. Furthermore, antibacterial experiments

收稿日期: 2024-02-01; 修订日期: 2024-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(52272052, 2022027)

Supported by National Natural Science Foundation of China(52272052, 2022027)

demonstrated that over 95% of *S. aureus* and *E. coli* were eradicated within 10 minutes under xenon lamp irradiation simulating natural light power (25 mW/cm^2). This work presented a novel approach for designing functional fabrics.

Key words: self-pumping textile; directional moisture transport; day-light antibacterial; photodynamic

1 引 言

纺织品无处不在,在人类社会发挥着重要的作用。随着科学技术水平的发展,除了轻便、舒适、透气、保暖,应用于不同人群,人们对纺织品的功能提出了更高的要求^[1]。比如在炎热的夏天或者剧烈运动之后,人体皮肤表面分泌的汗液使衣物与皮肤之间形成一种不舒适的“黏”的状态,同时会使体表温度降低让人感觉到寒冷^[2],这是由于衣物没有及时将汗液导出。此外,潮湿的环境容易引起环境中微生物的附着^[3],促进细菌和真菌等微生物的聚集和传播,引发各种疾病。因此,开发具有导湿及抗菌性能的多功能织物具有重要意义。

自泵织物是具有单向导湿性能的一类材料,其设计原理包括差动毛细效应、浸润性梯度效应、仿生蒸腾效应等。自然界中存在许多基于梯度浸润性的水分定向输送现象,例如,水分可以在蜘蛛丝^[4]、水鸟嘴^[5]、仙人掌刺^[6]及沙漠甲虫背^[7]上实现定向输送。受这些研究启发,科研工作者们研发了许多仿生界面材料用于高效的单向水分输送^[8-10]。近年来,随着静电纺丝技术的不断发展,基于不对称结构的 Janus 纤维膜因具有较大的长径比、较高的比表面积及优异的界面效应等特点,在功能性复合材料领域受到了广泛关注^[11-12]。Janus 纤维膜作为一种亲疏水双层复合材料,具备不对称浸润性,可以自发将液体从内层疏水层传递到外层的亲水层,亲水层的水分随着环境蒸发,同时又不会回到疏水层,可以保持皮肤干燥清爽。因此,可以通过构建 Janus 纤维膜实现织物单向导湿的目的。

光敏剂可以在特定波长的光源激发下产生活性氧物种(ROS),从而杀灭致病微生物^[13]。相比于传统的抗菌离子如银、锌等,具有非入侵性和高时空选择性的特点^[14]。ROS 可以通过破坏细菌的脂质体、蛋白质和核酸等生命大分子杀灭细菌,无需特定靶点,不会产生细菌耐药性^[15]。因此,在纺织品中复合光敏剂以增强织物的抗菌能力具有广阔的应用前景。人们日常穿着的织物所接触的最常见的光源为太阳光,然而目前报道的基于太阳

光光源的抗菌织物仍较少见。基于此,我们用静电纺丝方法制备了一种掺杂聚噻吩光敏剂的自泵织物,该织物可以将水分快速地由疏水层运输到亲水层,并且在可见光照射下,产生的单线态氧可以实现对革兰氏阴性菌和阳性菌的高效杀伤。该工作为具有湿度管理的日光抗菌织物的设计提供了全新的策略。

2 实 验

2.1 实验材料

醋酸纤维素(CA, $M_n \sim 30\,000$),聚偏二氟乙烯-六氟丙烯(PVDF-HFP, $M_n \sim 30\,000$),美国 Sigma-Aldrich 有限公司。N,N-二甲基乙酰胺(DMAC),N,N-二甲基甲酰胺(DMF),北京百灵威科技有限公司。丙酮(分析纯 A. R.),现代东方科技有限公司。氢氧化钠(NaOH),北京伊诺凯科技有限公司。无水乙醇,天津永达化学试剂有限公司。

2.2 PT2 制备

参考已报道的工作采用氧化聚合法合成 N-(4-(2,5-二甲基噻吩-3-基)苄基)-N-十二烷基-N,N-二甲基溴化铵聚合物(PT2)^[16]。步骤如下:无水氯仿(50 mL)中加入噻吩季铵盐单体(2.5 mmol)与 FeCl_3 (10 mmol),氮气条件下室温搅拌 3 d。反应结束后,将沉淀用甲醇洗涤并真空干燥,得到红色固体 PT2。

2.3 自泵织物制备

1.6 g CA 和 10 mg PT2 溶于丙酮与 DMAC(质量比为 2:1)混合溶液中得到质量分数为 16% 的 CA 纺丝液。2.0 g PVDF-HFP 溶于 DMF 与 丙酮(质量比为 7:3)混合溶液中得到质量分数为 20% 的 PVDF-HFP 纺丝液。首先采用静电纺丝方法制备 CA 纤维膜。注射器中吸入纺丝液,流速为 1.2 mL/h,针头与接收器距离 18 cm,喷头为 19G,电压为 18 kV,铝箔作为接收器。制得的纤维膜在 80 °C 烘箱干燥 3 h,命名为 CA/PT2 纤维膜,其中 PT2 的质量分数为 0.6%。随后将得到的纤维膜用氢氧化钠(0.05 mmol/L)水解处理 24 h,去离子水冲洗并再次干燥。随后在碱处理后的 CA 纤维膜上制备 PVDF-HFP 纤维膜,流速为

2.4 mL/h,针头与接收器距离20 cm,喷头为19G,电压为16 kV。得到自泵织物(SPT)。

2.4 PT2性质表征

将PT2溶于乙腈和水(1:1)的混合溶液中,配成1 mg/mL溶液。取2 mL加入石英比色皿中,乙腈/水溶液为背景,用紫外可见光谱(Hitachi, Japan)测定300~700 nm的吸收光谱,用荧光光谱仪(Hitachi, Japan)测定荧光光谱。采用9,10-蒽二基-双(亚甲基)二甲酸(ABDA)作为单线态氧捕获剂,用于检测PT2光照后产生单线态氧的能力。将PT2溶液在450 nm处的吸光度固定在0.1,加入40 μ L ABDA 1 mg/mL,在氙灯光(50 mW/cm²)照射下,测定300~500 nm的吸收光谱。

2.5 纤维膜形貌表征

纤维膜形貌采用扫描电子显微镜(SU8010, Japan)和激光共聚焦显微镜(Nicon C1 Si, Japan)进行表征。对于双层纤维膜,用手术刀将双层纤维膜置于液氮中切断,以观察其截面形貌。

2.6 纤维膜单线态氧检测

2,2,6,6-四甲基哌啶(TEMP)作为自旋捕获剂,采用电子自旋共振波谱仪(E500, Bruker, Germany)检测¹O₂的产生。TEMP捕获¹O₂后,可以形成稳定的氮氧化物自由基TEMPO。将纤维膜剪成3 mm×3 mm加入TEMP溶液中。氙灯光(50 mW/cm²)照射10 min,收集3 460~3 560 G范围内谱图。

2.7 单向导湿能力测试

纤维膜接触角采用接触角测量仪(OCA20, Germany)进行测定,样品置于载玻片上,水滴大小为6 μ L,记录膜表面接触角随时间的变化。此外,用水分管理仪定量分析纤维膜导湿能力。样品剪成适合仪器大小,置于水分管理仪传感器上,滴加约0.2 g的水,传感器会记录样品上下表面的水分含量。

2.8 抗菌测试

选用金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*)测试自泵织物抗菌性能。细菌培养至对数期($OD_{600}=1.0$),取1 mL菌液离心后用磷酸盐缓冲溶液(PBS)重悬,稀释至 $10^6\sim10^7$ CFU/mL。织物剪成10 mm×10 mm片,灭菌后滴加20 μ L菌液孵育2 h,用不同功率氙灯光(10, 25, 50 mW/cm²)照射10 min;随后加入1 mL PBS离心震荡,取100 μ L液体均匀涂于琼脂板培养基上,培养24 h

观察菌落生长情况。光照下(50 mW/cm²)未加PT2的自泵织物作为对照组。为观察抗菌前后细菌形貌变化,将光照后的纤维膜用2.5%戊二醛固定,随后依次用30%、50%、70%、80%、90%、95%乙醇水溶液脱水,干燥后测试SEM。

3 结果与讨论

3.1 PT2性能

如图1(a)所示,吸收光谱表明PT2在400~500 nm范围内有较强的吸收。在440 nm波长激发下,荧光光谱(图1(b))显示荧光峰的位置在585 nm处,显示红色荧光。随后以ABDA作为单线态氧探针,检测了PT2在模拟太阳光光照下产生单线态氧的能力。从图1(c)、(d)中可以看出,在加入PT2后,相比于未光照组,随着光照时间的延长,ABDA的吸收明显降低,证明ABDA在氙灯光照射下可以被PT2产生的单线态氧快速降解。

3.2 自泵织物结构和性能

首先,用静电纺丝的方法制备了两种单层纤维膜,并对它们的浸润性进行考察。图2(a)为CA纤维膜的扫描电镜,可以看出制备的CA纤维膜形貌均匀,具有连续的丝状纤维结构。图2(b)表明CA纤维膜的接触角为136.4°,为疏水状态。用氢氧化钠对CA纤维膜水解处理可以改变纤维膜表面的浸润性^[17-18]。如图2(c)所示,与处理前CA膜相比,水解后的纤维膜在形貌与尺寸上基本没有变化,接触角(图2(d))结果显示为7.4°,为亲水状态,表明碱处理可以改变纤维素膜的浸润性而不破坏其基本结构。图2(e)为疏水层PVDF-HFP扫描电镜图,结构显示为连续的丝状纤维;图2(f)显示该纤维膜接触角为135.5°,具有疏水性。

图3(a)为CA/PT2纤维膜荧光图片,显示出PT2的红色荧光,表明PT2的成功负载。图3(b)为CA/PT2纤维膜水解后的荧光图片,结果显示仍具有红色荧光,可以推测在碱性环境下,PT2可以保持稳定。为验证PT2纤维膜的单线态氧产生能力,以2,2,6,6-四甲基哌啶(TEMP)作为捕获剂,用电子自旋共振波谱仪检测单线态氧的产生。如图3(c)所示,用50 mW/cm²氙灯光照射10 min后,可以观察到较强的TEMPO信号,而未光照组的信号较弱,表明PT2掺杂的纤维膜具有产生单线态氧的能力。此外,CA/PT2纤维膜在水洗20次后仍具有红色荧光(图3(d)),表明光敏剂负载较为稳定,保证了织物反复洗涤后的抗菌能力。

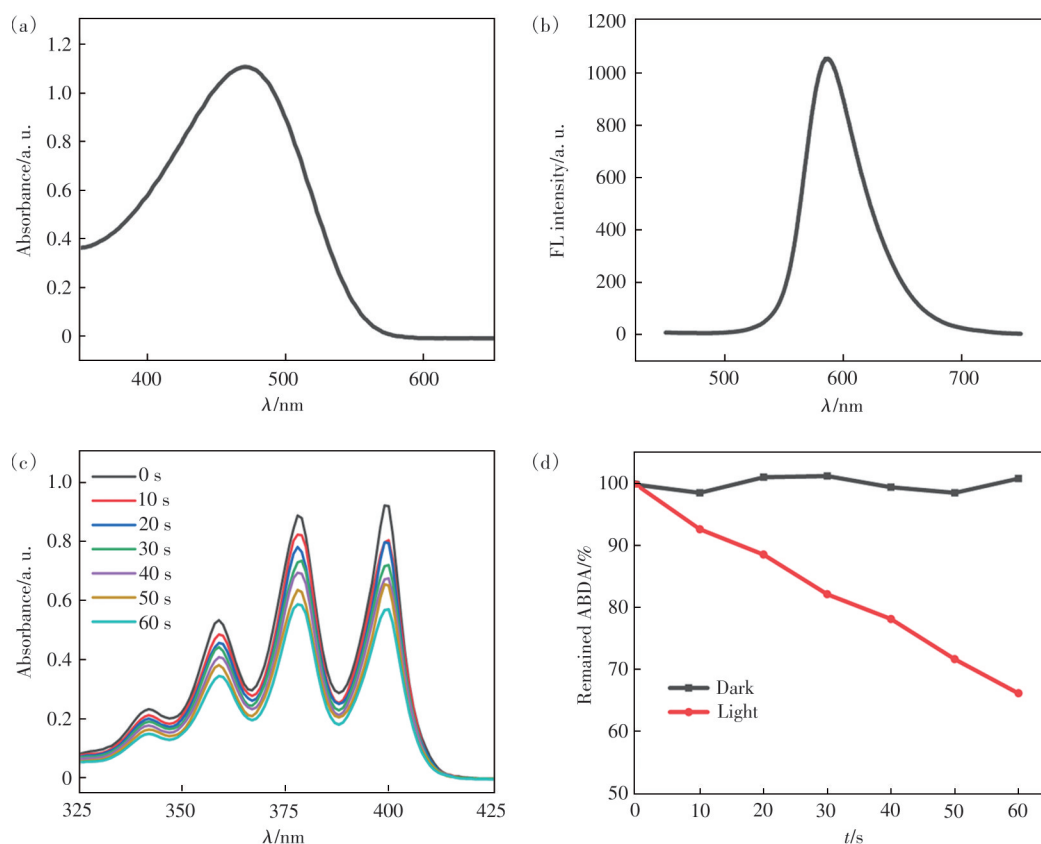


图1 (a)PT2的紫外可见吸收光谱;(b)PT2的荧光光谱;(c)ABDA吸收光谱;(d)光照组与对照组的ABDA在378 nm处的吸收

Fig.1 (a)UV-Vis absorption spectra of PT2. (b)Emission spectra of PT2. (c)The absorption spectra of ABDA. (d)The absorption at 378 nm of ABDA with or without light irradiation

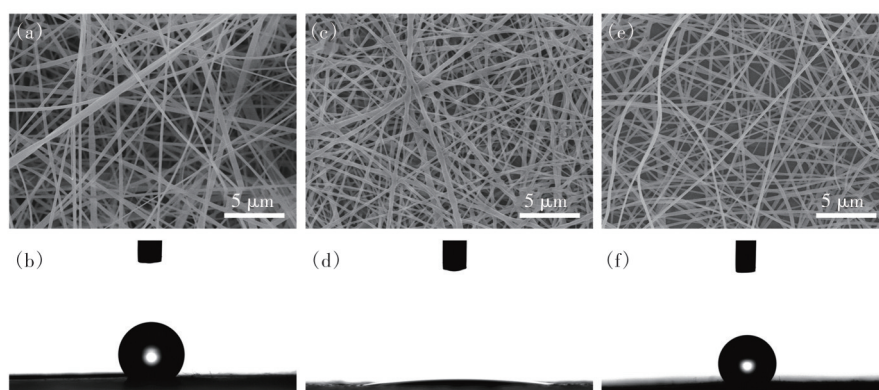


图2 (a)CA纤维膜的SEM图;(b)CA纤维膜的接触角;(c)水解CA纤维膜的SEM图;(d)水解CA纤维膜的接触角;(e)PVDF-HFP纤维膜的SEM图;(f)PVDF-HFP纤维膜的接触角

Fig.2 (a)SEM of CA fiber membrane. (b)Contact angle of CA fiber membrane. (c)SEM of hydrolyzed CA fiber membrane. (d)Contact angle of hydrolyzed CA fiber membrane. (e)SEM of PVDF-HFP fiber membrane. (f)Contact angle of PVDF-HFP fiber membrane

在碱处理后的CA纤维膜上电纺PVDF-HFP纤维膜,即得到定向导水的自泵织物。图4为自泵织物扫描电镜截面图,可以清晰地看出该自泵织物由双层纤维膜组成,其中上层较厚,为亲水纤维层,较

薄的下层为疏水纤维层。从局部放大图中可以看出,两种纤维膜表现出连续且均匀的纤维丝状结构,且上层含有PT2特征的S元素,下层含有PVDF-HFP特征的F元素,表明自泵织物已成功制备。

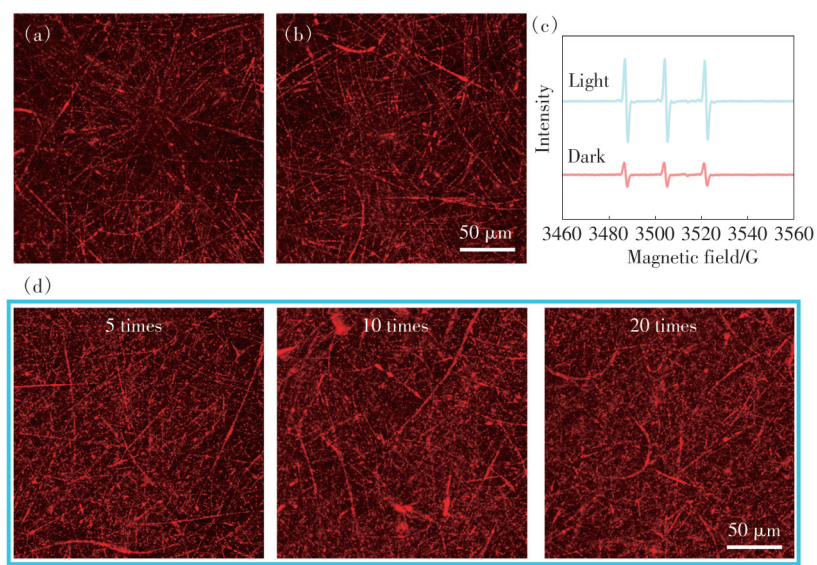


图 3 (a)CA/PT2 纤维膜荧光图;(b)CA/PT2 纤维膜水解后的荧光图;(c)CA/PT2 纤维膜水解后的 ESR 图;(d)水解后 CA/PT2 纤维膜水洗 5,10,20 次后的荧光图

Fig.3 (a) Fluorescence image of CA/PT2 fiber membrane. (b) Fluorescence image of hydrolyzed CA/PT2 membrane. (c) ESR of hydrolyzed CA/PT2 fiber membrane. (d) Fluorescence image of hydrolyzed CA/PT2 fiber membrane after 5, 10, 20 times of water washing

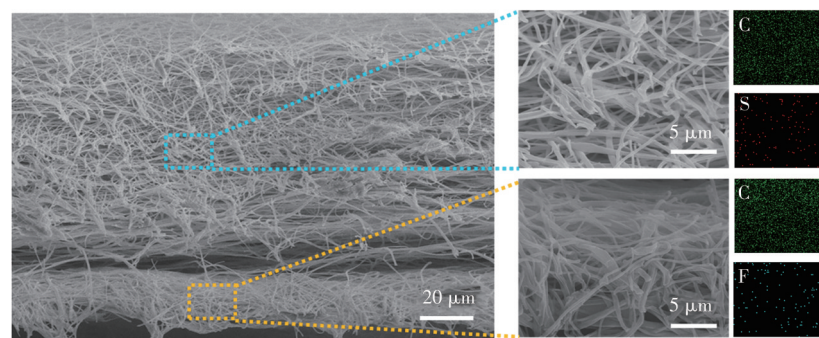


图 4 自泵织物 SEM 截面图(上层:水解 CA 纤维膜,下层:PVDF-HFP 纤维膜)和元素分析

Fig.4 SEM cross-section of SPT(upper layer: hydrolyzed CA fiber membrane, under layer: PVDF-HFP fiber membrane) and elemental mappings

3.3 自泵织物的单向导湿性能

由于疏水层孔径大小会影响织物单向导湿的能力,因此电纺不同时间 PVDF-HFP 纤维膜并分

析其孔径大小。如图 5 所示,随着电纺时间的延长,纤维膜的平均孔径逐渐变小,从 1 μm 左右逐渐下降到 0.3 μm 左右。

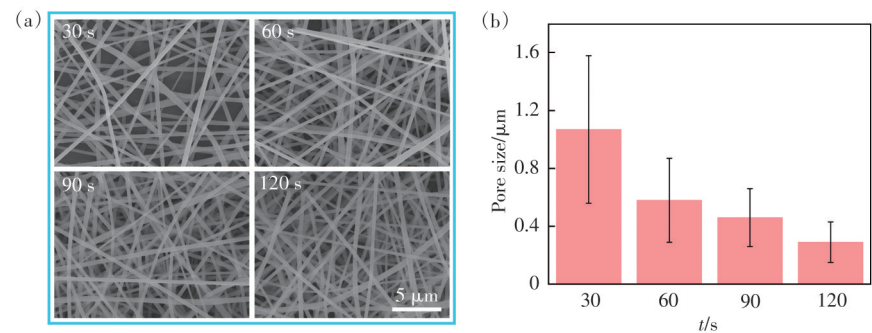


图 5 电纺不同时间(30,60,90,120 s)PVDF-HFP 纤维膜 SEM 图(a)及其孔径分析(b)

Fig.5 SEM(a) and pore size(b) of PVDF-HFP fiber membrane with different electrospinning time(30, 60, 90, 120 s)

在水解 CA/PT2 纤维膜上电纺不同时间(30, 60, 90, 120 s)PVDF-HFP 纤维膜, 观察其动态接触角变化。如图 6 所示, 电纺 30 s PVDF-HFP 的自泵织物在 3 s 左右完全浸润; 电纺 60 s PVDF-HFP 的自泵织物在 10 s 左右完全浸润, 具有单向导湿能力; 电纺 90 s PVDF-HFP 的自泵织物在 60 s 内只能部分透过疏水层, 单向导湿能力较差; 而电纺 120 s PVDF-HFP 的自泵织物在 60 s 内液滴始终

停留在疏水层, 不具备单向导湿能力。这是由于随着电纺时间的延长, 疏水层厚度增大且孔径变小, 液滴无法透过疏水层。随后通过水分管理测试分析自泵织物的单向导湿能力。如图 7 所示, 在电纺 60 s PVDF-HFP 的自泵织物向疏水层滴加水滴 120 s 后, 下层亲水层的水分含量远高于上层疏水层, 进一步证明了该自泵织物具有单向导湿能力。

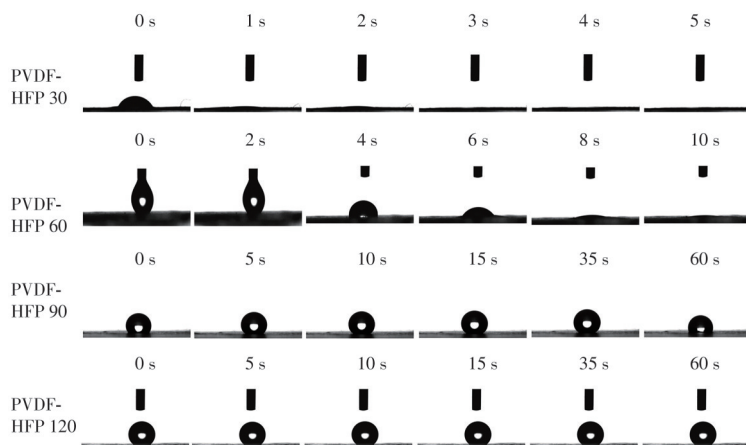


图 6 电纺不同时间(30, 60, 90, 120 s)PVDF-HFP 的自泵织物动态接触角

Fig.6 The dynamic contact angle of SPT with different electrospinning time(30, 60, 90, 120 s) of PVDF-HFP

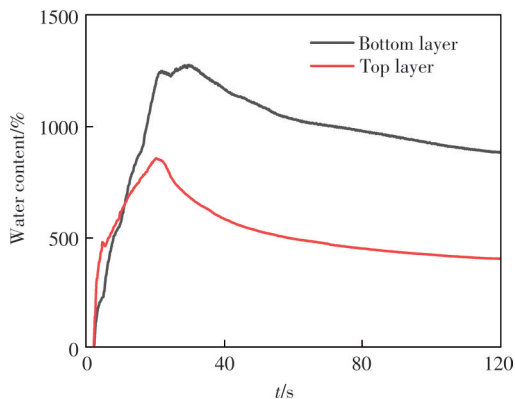


图 7 自泵织物水分管理测试

Fig.7 Water management test of SPT

3.4 自泵织物的抗菌性能

为研究自泵织物的抗菌能力, 分别选用革兰氏阳性的金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和革兰氏阴性的大肠杆菌(*E. coli*)作为代表性菌群, 采用平板计数法评价自泵织物在不同氙灯光功率下杀灭细菌的能力, 并对光照后的细菌菌落数进行统计。如图 8(a)、(b)所示, 在没有光照的条件下, 细菌的存活率略有下降, 我们推测这是由于 PT2 光敏剂具有季铵盐结构, 对细菌具有一定的暗毒性。室外正常日光功率大概为 25 mW/cm^2 , 阴天稍弱一些,

在正午或夏季则更强一些, 因此选用三个光照功率模拟日光。结果表明, 在 10 mW/cm^2 氙灯光照射 10 min 后, 对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌率分别为 80% 和 72% 左右。普通光照强度 (25 mW/cm^2) 照射 10 min 后, 该纤维膜对细菌的抑制率已达到 90% 以上。而在较高强度的日光下 (50 mW/cm^2) 照射 10 min, 该纤维膜对细菌的抑制率接近 100%。

图 8(c)为琼脂板的光学图像, 结果表明含有 PT2 的自泵织物在未光照时与对照组(光照下未加 PT2 的自泵织物)在菌落量上无明显差异, 而随着光功率的提高, 菌落数也明显减少, 与统计结果一致。

最后用 SEM 探究了自泵织物对细菌的杀伤效果。如图 9 所示, 对照组(单纯光照和单纯织物)的 *S. aureus* 和 *E. coli* 两种细菌在纤维膜上结构形态完整, 边界清晰。在氙灯光照射之后, *S. aureus* 的形态发生明显变化, 表明膜结构被破坏, 细菌收缩。 *E. coli* 在光照后也同样表现出细菌的膜表面的收缩与融合, 该结果符合已报道的光动力抗菌机制。具体原理为, 自泵织物中光敏剂在光照后, 产生的单线态氧对细菌表面的脂类、多糖

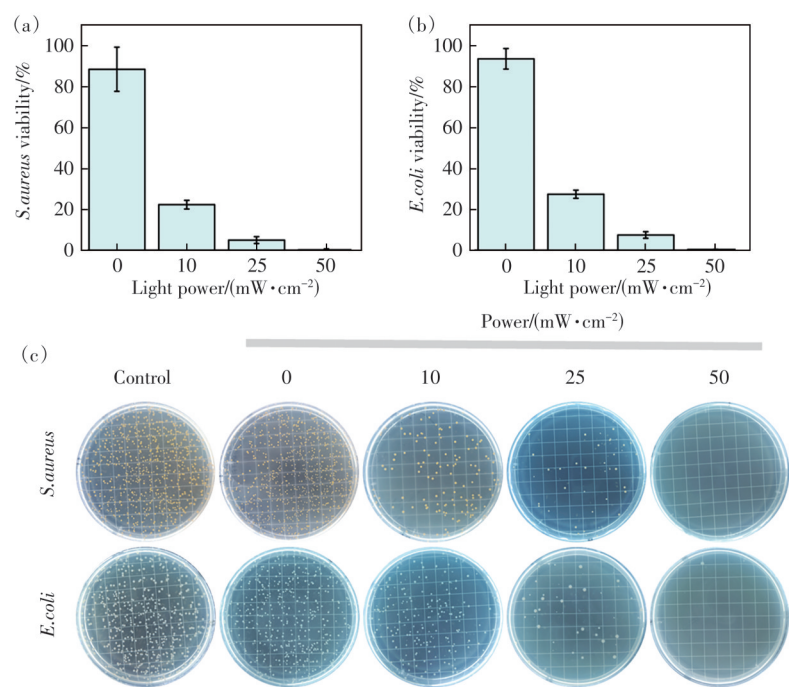


图 8 自泵织物在不同功率氙灯光照射 10 min 对 *S.aureus*(a)和 *E.coli*(b)的杀伤能力;(c)*S.aureus* 和 *E.coli*在琼脂板上存活的光学照片

Fig.8 The killing ability of SPT to *S.aureus*(a) and *E.coli*(b) after 10 min irradiation by xenon lamp with different power. (c)Optical photograph of *S.aureus* and *E.coli* alive on AGAR plate

等生物大分子产生毒性并造成破坏,导致细菌死亡及形态结构改变^[19]。

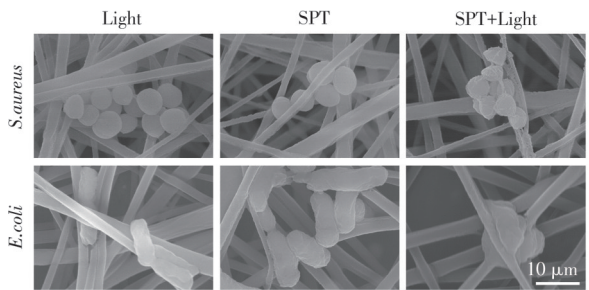


图 9 不同处理条件下细菌 SEM 表征

Fig.9 SEM characterization of bacteria with different treatments

4 结 论

本研究采用静电纺丝方法,结合 PT2 光敏剂,构建了基于亲水性水解 CA 纤维和疏水性 PVDF-

HFP 纤维的自泵织物。扫描电镜和接触角测试证明了自泵织物中亲疏水双层纤维结构的成功制备。研究了疏水层纺丝时间对导湿能力的影响,结果表明,当疏水层 PVDF-HFP 纺丝时间为 60 s 时,所制备的自泵织物能在 10 s 内实现液体从疏水层向亲水层单向传输。此外,用氙灯光模拟可见光进行抗菌,在正常日光强度(25 mW/cm²)下,10 min 可以杀灭 90% 以上的细菌,高强度日光(50 mW/cm²)下 10 min 可以杀灭 99% 以上细菌。因此,该单向导湿自泵织物提供了一种简单、高效的湿度管理及可见光抗菌策略,对功能性纺织品的设计与应用具有潜在的应用价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240029>.

参 考 文 献:

[1] RIVERO P J, URRUTIA A, GOICOECHEA J, *et al.* Nanomaterials for functional textiles and fibers [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, 10(1): 501.

[2] NEVES S F, CAMPOS J B L M, MAYOR T S. Effects of clothing and fibres properties on the heat and mass transport, for different body heat/sweat releases [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 117: 109-121.

- [3] BYRD A L, BELKAID Y, SEGRE J A. The human skin microbiome [J]. *Nat. Rev. Microbiol.*, 2018, 16(3): 143-155.
- [4] ZHENG Y M, BAI H, HUANG Z B, *et al.* Directional water collection on wetted spider silk [J]. *Nature*, 2010, 463(7281): 640-643.
- [5] PRAKASH M, QUERE D, BUSH J W M. Surface tension transport of prey by feeding shorebirds: the capillary ratchet [J]. *Science*, 2008, 320(5878): 931-934.
- [6] JU J, BAI H, ZHENG Y M, *et al.* A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus [J]. *Nat. Commun.*, 2014, 3: 1247.
- [7] PARKER A R, LAWRENCE C R. Water capture by a desert beetle [J]. *Nature*, 2001, 414(6859): 33-34.
- [8] 马晓龙, 杨占平, 曹建华. 生物技术在功能性纺织纤维中的应用和展望 [J]. *合成纤维工业*, 2005, 28(2): 55-58.
MA X L, YANG Z P, CAO J H. Prospects and application of biotechnology in functional fiber for textile [J]. *China Synth. Fiber Ind.*, 2005, 28(2): 55-58. (in Chinese)
- [9] DAI B, LI K, SHI L X, *et al.* Bioinspired Janus textile with conical micropores for human body moisture and thermal management [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(41): 1904113.
- [10] SHI L X, LIU X, WANG W S, *et al.* A self-pumping dressing for draining excessive biofluid around wounds [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(5): 1804187.
- [11] PENG Z C, LIU R P, XU Z G, *et al.* Directional sweat transport window based on hydrophobic/hydrophilic Janus fabric enables continuous transfer and monitoring of sweat [J]. *Appl. Mater. Today*, 2022, 29: 101623.
- [12] XIE A Q, ZHU L L, LIANG Y Z, *et al.* Fiber-spinning asymmetric assembly for Janus-structured bifunctional nanofiber films towards all-weather smart textile [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(40): e202208592.
- [13] 张云秀, 贾庆岩, 葛介超. 绿茶衍生碳点用于光动力治疗耐药菌感染 [J]. *发光学报*, 2023, 44(6): 1112-1120.
ZHANG Y X, JIA Q Y, GE J C. *Thea viridis* derived carbon dots for drug-resistant bacterial infections by photodynamic therapy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(6): 1112-1120. (in Chinese)
- [14] WAINWRIGHT M, MAISCH T, NONELL S, *et al.* Photoantimicrobials: are we afraid of the light? [J]. *Lancet Infect. Dis.*, 2017, 17(2): E49-E55.
- [15] JIA Q Y, SONG Q, LI P, *et al.* Rejuvenated photodynamic therapy for bacterial infections [J]. *Adv. Healthc. Mater.*, 2019, 8(14): 1900608.
- [16] LAN M H, WU J S, LIU W M, *et al.* Copolythiophene-derived colorimetric and fluorometric sensor for visually supersensitive determination of lipopolysaccharide [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(15): 6685-6694.
- [17] WANG X F, HUANG Z, MIAO D Y, *et al.* Biomimetic fibrous murray membranes with ultrafast water transport and evaporation for smart moisture-wicking fabrics [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 1060-1070.
- [18] 宣小会, 朱思敏, 潘志娟. 静电纺丝制备 CA 纳米纤维及其碱处理 [J]. *纺织学报*, 2013, 34(9): 6-11.
XUAN X H, ZHU S M, PAN Z J. Preparation and alkali treatment of electrospun CA nanofibers [J]. *J. Text. Res.*, 2013, 34(9): 6-11. (in Chinese)
- [19] ZHANG J H, JIA Q Y, YUE Z L, *et al.* An electroluminodynamic flexible device for highly efficient eradication of drug-resistant bacteria [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(17): 2200334.



王健(1992-),男,黑龙江铁力人,博士研究生,2018年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光诊疗材料设计及抗菌/抗肿瘤应用研究。

E-mail: wangjian18@mails.ucas.ac.cn



葛介超(1970-),男,山东临沂人,博士,研究员,2008年于山东师范大学获得博士学位,主要从事新型碳纳米材料,包括碳点或碳化聚合物点、富勒烯、和多孔碳球的设计和组装及其在肿瘤诊疗、抗菌/抗病毒、生物成像、炎症消除/伤口修复等应用研究。

E-mail: jchge2010@mail.ipc.ac.cn



时连鑫(1990-),男,辽宁抚顺人,博士,副研究员,2019年于中国科学院理化技术研究所获得博士学位,主要从事自泵功能织物用于伤口渗出液单向导出促进愈合、服装湿热管理等研究。

E-mail: shilianxin@mail.ipc.ac.cn