



余梦雅,郑敏,刘海涓,等. 不同应用环境下异质结纺织品抗菌性能的研究[J]. 轻工学报,2025,40(5): 55-63.
XU M Y, ZHENG M, LI H J, et al. Antimicrobial properties of heterojunction textiles in different application environments[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(5): 55-63. DOI: 10.12187/2025.05.007

不同应用环境下异质结纺织品抗菌性能的研究

余梦雅,郑敏,刘海涓,孔炯

苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215006

摘要: 为探究异质结纺织品在不同应用环境下抗菌性能的变化,以大肠杆菌为代表菌,采用振荡法考查温度、pH 值、光照强度和波长对其抑菌率的影响,并对其生物安全性、光催化性能和抗菌性能进行研究。结果表明:环境因素对异质结纺织品的抗菌性能具有显著影响,温度升高使其抑菌率基本呈先升高后降低趋势;pH 值在 3.0~8.0 范围内均呈现较好的抗菌性能,当 pH 值为 7.5 时抑菌率最高,且酸性环境优于碱性环境;光照强度显著影响其抗菌性能,黑暗条件下的抑菌率较光照强度 50 mW/cm² 时降低了 36%;随波长增加,抗菌性能降低。异质结纺织品对 HaCaT 细胞无明显毒性,且振荡过程中金属元素析出量均小于其实际金属元素测定值。与未处理涤纶织物相比,异质结纺织品的光催化性能显著提高;处理后的大肠杆菌形态扭曲、表面严重凹陷,PI 染色荧光点数显著增加;经 50 次水洗后,抑菌率仍达 AAA 级别,具有优异的抗菌稳定性。

关键词: 异质结纺织品;应用环境;抗菌性能;生物安全性;光催化性能

中图分类号: TS156 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)05-0055-09

0 引言

大肠杆菌是一种典型的革兰氏阴性细菌,因其优良的环境耐受性而广泛存在于食物、水源和粪便中^[1]。大肠杆菌在侵入并定植于人体肠道后,可诱发尿道感染、腹泻、出血性结肠炎等疾病,儿童、老年人等免疫力低下群体尤易感染。抗菌纺织品可在一定程度上阻断病原菌对人体的侵害,因而日益受到业界的关注。然而,传统化学抗菌纺织品在抗菌过程中往往伴随着不同程度的化学析出,长期使用易累积化学残留,给人体带来潜在的毒性风险^[2]。尽管科学技术的进步已使抗菌纺织品的制

备和应用更多元、有效,但安全、环保、无析出仍是行业关注的重点。

异质结纺织品是一类新型光催化抗菌材料,通过特殊工艺将异质结半导体材料聚合在化学大分子结构上而形成,可充分利用太阳能实现无化学添加的高效抗菌,对人体及环境安全友好^[3]。除用于生产传统衣物外,异质结纺织品的应用已拓宽至工业生产^[4]、医疗卫生^[5]、军工防护^[6]等领域。研究表明,通过构建异质结结构可显著提升纺织基复合材料的性能,如 J. F. Li 等^[7]研发了一种富含氧空位的 Ti₃C₂/BiOBr 异质结光催化抗菌纺织品,通过肖特基结和氧空位协同增强光生载流子分离效率,呈

收稿日期:2024-05-16;修回日期:2024-09-01;出版日期:2025-10-15

基金项目:纺织行业天然染料重点实验室基金项目(YX202327);多功能集成协同创新基金项目(P110903419)

作者简介:余梦雅(2001—),女,江苏省盐城市人,苏州大学硕士研究生,主要研究方向为异质结材料开发。E-mail:20234215031@stu.suda.edu.cn

通信作者:郑敏(1970—),女,湖北省天门市人,苏州大学教授,博士,主要研究方向为有机-无机杂化/纳米复合材料的开发及应用。E-mail:zhengmin@suda.edu.cn

现高效的抗金黄色葡萄球菌和大肠杆菌性能;Q. Q. Wang 等^[8]通过构建 $\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 异质结结构,显著提升了丝素复合膜的抗菌性能。

异质结纺织品的抗菌性能依赖于环境中能量的响应。当环境中的氧气和水分与光照产生的电子(e^-)和空穴(h^+)接触时,会发生氧化还原反应,生成活性氧基团(ROS)^[9];过量 ROS 会破坏细菌氧化还原稳态,诱发膜脂质过氧化,导致细胞质外渗和细菌死亡^[10]。周飞等^[11]指出,温度、pH 值及蛋白质、糖类和电解质的质量浓度均显著影响壳聚糖纤维对大肠杆菌的抗菌效果。陈媛媛等^[12]进一步证实了 ROS 的存在形态随温度、pH 值等的变化而改变。然而,异质结纺织品在不同应用环境中的抗菌性能研究尚未形成完整的体系,有待进一步探索复杂环境因素对其抗菌性能的动态影响。

基于此,本文拟采用振荡法,系统考查温度、pH 值、光照强度和波长对异质结纺织品抗大肠杆菌性能的影响,并结合细胞毒性、电子耦合等离子发射光谱(ICP-OES)、紫外可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)、光致发光光谱(PL)、电子自旋共振(ESR)、细菌形态、细菌染色和抗菌稳定性验证其生物安全性、光催化性能和抗菌效果,以期对异质结纺织品的生产工艺优化、应用场景精准匹配等方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

涤纶织物、异质结纺织品($\text{ZnO}@\text{Cu}_2\text{O}$ 抗菌涤纶织物),江苏纳盾科技有限公司;人永生表皮细胞(HaCaT),武汉尚恩生物技术有限公司;噻唑蓝(MTT)、二甲基亚砷(DMSO),上海碧云天生物技术有限公司;2.5%戊二醛固定液,上海源叶生物科技有限公司;碘化丙啶(PI)、4',6-二脒基-2-苯基吡啶(DAPI),上海索莱宝有限公司;大肠杆菌(ATCC 8739),上海鲁微科技有限公司;金黄色葡萄球菌(ATCC 6538),优特普科技苏州有限公司; KH_2PO_4 ,上海凌峰化学试剂有限公司; NaH_2PO_4 ,国药集团化学试剂有限公司;肉汤粉、琼脂粉,北京陆桥技术股份有限公司。实验所用试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

M1000 pro 型酶标仪,美国帝肯公司;Icap 6300

DUO 型 ICP-OES 仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;Cary5000 型紫外-可见分光光度计,安捷伦科技有限公司;PCX-50C 型光反应仪,北京泊菲莱科技有限公司;FLS920 型荧光分光光度计,英国爱丁堡公司;JES-X320 型 ESR 仪,日本电子株式会社;Regulus8230 型扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司;YXQ-LS-50 S 型立式压力蒸汽灭菌锅,上海博讯实业有限公司;UV3600 型紫外-可见近红外分光光度计,日本岛津公司;CKX53 型荧光显微镜,日本 Olympus 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 抗菌实验 不同环境下异质结纺织品的抗菌性能参照《纺织品 抗菌性能的评价第 3 部分:振荡法》(GB/T 20944.3—2008)^[13]进行测试。分别称取 0.15 g 异质结纺织品和未处理涤纶织物,置于含 14 mL 磷酸盐(PBS)缓冲液和 1 mL 大肠杆菌菌液(10^5 CFU/mL)的三角烧瓶中。将烧瓶置于恒温振荡器上振荡 18 h 后,按 10 倍稀释法稀释到菌液的 10^{-4} 倍,吸取 1 mL 菌液加入培养皿中,再加入 15 mL 琼脂,混匀后静置凝固,放入 37 °C 恒温培养箱中培养 24 h。记录培养皿中的菌落数,计算抑菌率。

抗菌稳定性参照《抗菌针织品》(FZ/T 73023—2006)^[14]进行测定。取经 0 次、10 次、20 次、50 次水洗后的异质结纺织品,以大肠杆菌和金黄葡萄球菌为实验菌进行抗菌测试,并评定其抗菌稳定性。

1.3.2 不同应用环境变量对异质结纺织品抑菌率的影响 1) 温度:将恒温振荡器温度设定为 10 ~ 40 °C,其他测定条件均按照 1.3.1 所述实验方法进行。

2) pH 值:在装样环节中将 14 mL PBS 缓冲液的 pH 值调节为 3.0 ~ 9.0,其他测定条件均按照 1.3.1 所述实验方法进行。

3) 光照强度:在振荡阶段调整恒温培养箱灯管光照强度分别为 0 mW/cm^2 , 17.5 mW/cm^2 , 35.0 mW/cm^2 , 50.0 mW/cm^2 , 70.0 mW/cm^2 ,其他测定条件均按照 1.3.1 所述实验方法进行。

4) 波长:在振荡阶段改变恒温培养箱灯管的颜色,波长与颜色对应关系为紫色灯光波长 400 nm、

蓝色灯光波长 460 nm、绿色灯光波长 530 nm、橙色灯光波长 620 nm 和红色灯光波长 700 nm。其他测定条件均按照 1.3.1 所述实验方法进行。

1.3.3 细胞毒性测试 为表征异质结纺织品的生物安全性,选用 HaCaT,参照《医疗器械生物学评价 第 5 部分:体外细胞毒性试验》中附录 C 提供的 MTT 法进行细胞毒性测试^[15]。将未处理涤纶织物和异质结纺织品经高温灭菌处理后分别置于 96 孔板中;取对数生长期的 HaCaT 细胞,以 1×10^4 个/孔的密度接种,以空白(不含试样)和未处理涤纶织物作为对照组,每组设置 4 个平行样;置于 37 ℃ 培养箱中培养 24 h 后,每孔中加入 10 μ L MTT,继续孵育 4 h;加入 100 μ L/孔的 DMSO 终止反应,用酶标仪测定 570 nm 处的吸光度,并计算细胞存活率。

1.3.4 金属元素质量浓度测定 利用 ICP-OES 仪测试异质结纺织品中金属元素质量浓度及其在模拟抗菌环境下金属元素析出情况。取 0.15 g 异质结纺织品,置于 400 ℃ 马弗炉中煅烧 4 h,将残余物置于烧杯中并滴加适量稀硝酸进行溶解,使用 0.22 μ m 过滤器过滤后,定容至 20 mL 容量瓶中,待测;另取 0.15 g 异质结纺织品加入装有 14 mL PBS 缓冲液的烧瓶中,置于 24 ℃ 恒温振荡器上振荡 18 h,振荡速率为 150 r/min,使用 0.22 μ m 过滤器过滤振荡后的溶液,待测。按照 0.1 mg/mL、1 mg/mL、5 mg/mL、10 mg/mL 的质量浓度梯度取 Zn 和 Cu 的混合标液,使用 ICP-OES 仪依次测定标准溶液和待测溶液曲线。

1.3.5 甲基橙降解速率测定 以 300 W 氙灯为光源,分别取 0.01 g 织物(未处理涤纶织物或异质结纺织品,下同)与 100 mL 10 mg/L 甲基橙溶液混合均匀,置于黑暗环境中振荡 20 min,再移入光反应仪中,每隔 20 min 吸取 3 mL 工作液离心,使用紫外-可见分光光度计测定上清液的吸光度,甲基橙的降解速率以 C/C_0 表征,其中 C_0 、 C 分别为甲基橙溶液的初始和反应一段时间后的质量浓度(mg/L),空白组为不含织物的甲基橙溶液。

1.3.6 光生电子-空穴对分离效率测定 通过 PL 光谱比较处理前后织物的峰强度,定性评估异质结纺织品在光催化反应中光生电子-空穴对的分离效率。

织物大小为 3 mm×5 mm,激发波长为 330 nm。

1.3.7 氧空穴定性测试 利用 ESR 判定异质结纺织品在光催化反应中是否形成氧空位。测试前需将织物塞进毛细试管中,长度约为 3 cm;测试参数为中心磁场 326 mT,调谐频率 100 kHz,微波功率 9 150.185 MHz。

1.3.8 细菌形态观察 取 1 mL 大肠杆菌菌液(10^9 CFU/mL)于离心管中,以 8000 r/min 的转速离心 2 min;弃去上清液,向沉淀中加入 1 mL 肉汤和 20 mg 织物,培养 2 h 后,使用 500 μ L PBS 缓冲液清洗 2 次。为使细菌形态稳定,加入 1 mL 2.5%戊二醛固定液并置于 4 ℃ 冰箱中过夜。次日,用无菌 PBS 缓冲液冲洗 3 次,每次 15 min,再依次用体积分数为 30%、50%、60%、70%、80%、90% 的乙醇溶液冲洗 1 次,无水乙醇冲洗 3 次,每次 15 min。将适量菌悬液滴加到硅片表面,置于 60 ℃ 真空烘箱中过夜干燥。经喷金处理后,使用 SEM 观察细菌形态。

1.3.9 大肠杆菌染色实验 通过荧光显微镜观察经 PI 和 DAPI 处理后大肠杆菌的存活状态。将 500 μ L 大肠杆菌菌液(10^9 CFU/mL)加入装有 3.8 mL PBS 缓冲液和 53.6 mg 织物的三角烧瓶中,置于 24 ℃ 恒温振荡器上振荡 18 h;取 1 mL 工作液,于 8000 r/min 条件下离心 5 min;向细菌沉淀中加入 100 μ L 体积比为 1 : 1 的 PI 与 DAPI 混合液,于 37 ℃ 条件下振荡 15 min,使大肠杆菌充分染色;用 500 μ L PBS 缓冲液清洗 2 次后,再加入适量 PBS 缓冲液重悬,吸取 10 μ L 菌液滴加到载玻片上,使用荧光显微镜进行观察。PI 的发射波长和激发波长分别为 614 nm 和 535 nm,DAPI 的发射波长和激发波长分别为 460 nm 和 360 nm。

1.4 数据处理

利用 SPSS 22.0 对所得数据进行统计分析,采用 origin 2024 绘图。所有实验均进行 3 次重复,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 不同应用环境变量对异质结纺织品抗菌性能影响分析

2.1.1 温度 不同温度下异质结纺织品的抗菌性

能如图 1 所示。由图 1 可知,异质结纺织品在不同温度下的抗菌性能存在差异,随着温度升高,抑菌率先升高后降低,并于 37 ℃ 出现小幅回升后又下降。这可能是由于大肠杆菌细胞膜在较低温度时稳定性较好,抗菌活性基团如超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$)和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)难以有效攻击^[11],故抑菌率随温度升高而有所增加;37 ℃ 邻近大肠杆菌最适生长温度,菌体代谢旺盛而分裂脆弱,对 ROS 敏感性增强,出现二次峰值;>37 ℃ 后,热激发加剧电子-空穴复合,ROS 产率显著下降,抑菌性能随之回落。

2.1.2 pH 值 不同 pH 值下异质结纺织品的抗菌性能如图 2 所示。由图 2 可知,异质结纺织品有较宽的 pH 值作用范围,在 pH 值为 3.0~8.0 时均呈现较好的抗菌性能,其中当 pH 值为 7.5 时抑菌率最高,故抗菌实验常选用 pH 值为 7.5 的 PBS 缓冲液作为溶剂。

$\cdot\text{O}_2^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 是异质结纺织品光催化抗菌过程中的核心 ROS,其状态随 pH 值变化而异^[12]。在酸性条件下, $\cdot\text{O}_2^-$ 与 h^+ 发生质子加成反应生成氢过氧自由基($\text{HOO}\cdot$), $\text{HOO}\cdot$ 比 $\cdot\text{O}_2^-$ 更易穿过细胞膜进入细菌体内,破坏细菌内部结构;同时 $\cdot\text{OH}$ 可与 e^- 、 h^+ 发生歧化反应生成 H_2O ,减少 $\cdot\text{OH}$ 数量,从而降低异质结纺织品在酸性条件下的抗菌性能^[16]。 $\cdot\text{OH}$ 主要通过表面羟基(OH^-)的 h^+ 氧化生成,碱性条件可显著促进该过程,从而提高 $\cdot\text{OH}$ 的生成效率;而 $\cdot\text{O}_2^-$ 的生成则依赖于 H_2O_2 的 h^+ 氧化和 O_2 的 e^- 还原两条途径。 $\cdot\text{O}_2^-$ 与 $\cdot\text{OH}$ 的产生存在竞争关系,随着 $\cdot\text{OH}$ 产率的提升, $\cdot\text{O}_2^-$ 的生成会受到明显抑制,进而影响异质结纺织品在碱性环境下的抗菌性能。实验表明,酸性环境的抑菌率高于碱性环境,推测主要与酸性环境中大肠杆菌存活率较低有关。

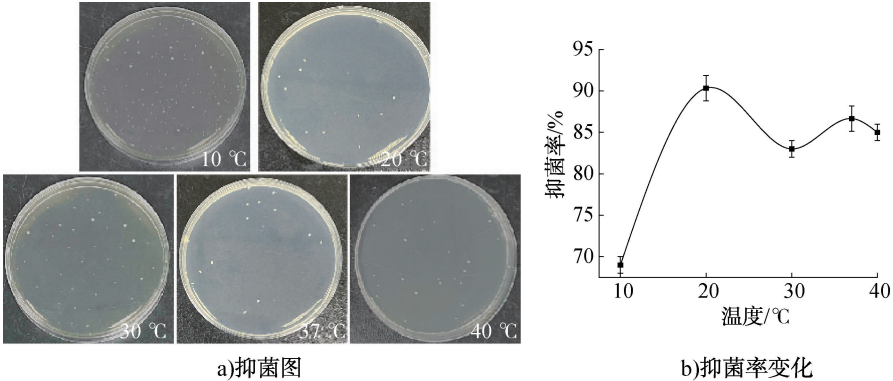


图 1 不同温度下异质结纺织品的抗菌性能
Fig. 1 Antibacterial properties of heterojunction textiles at different temperatures

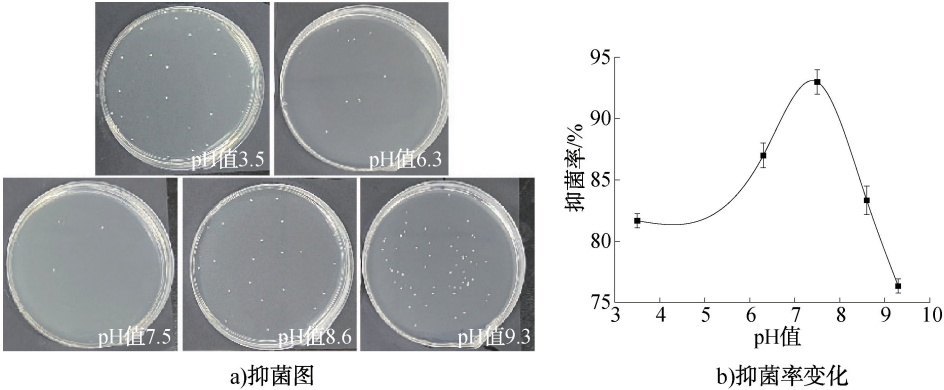


图 2 不同 pH 值下异质结纺织品的抗菌性能
Fig. 2 Antibacterial properties of heterojunction textiles at different pH values

2.1.3 光照强度 不同光照强度下异质结纺织品的抗菌性能如图 3 所示。由图 3 可知,异质结纺织品在黑暗条件下的抑菌率比光照强度为 50.0 mW/cm² 时低 36%,说明能量强度对其抗菌性能影响较大。

异质结纺织品抗菌性能依赖光催化反应中生成的 ROS,光照强度越大,单位时间内接受光子能量越多,价带上 e⁻ 迁移速率与 h⁺ 生成速率越快,与环境中 O₂ 和 H₂O 反应生成的 ·O₂⁻ 和 ·OH 数量越多,ROS 对大肠杆菌的攻击速率显著提升^[17]。然而,光照强度继续增大后,抗菌性能反而降低,一是异质结纺织品对光子能量的吸收存在饱和值,达到单位时间光通路的上限后光子利用效率会降低;二是死亡的大肠杆菌仍吸附在异质结纺织品表面,阻碍了后续光催化反应的进行。

2.1.4 波长 不同波长下异质结纺织品的抗菌性能图 4 所示。由图 4 可知,波长越长,异质结纺织品的抗菌性能越差。当波长低于 620 nm 时,异质结纺织

织品的抑菌率随波长增加而缓慢降低;当波长高于 620 nm 时,抑菌率急剧下降。

细菌死亡的实质是大肠杆菌胞内抗氧化系统与 ROS(·O₂⁻ 和 ·OH)之间形成浓度差,导致氧化还原失衡,进而破坏细胞结构完整性^[18]。异质结纺织品通过光响应产生 ·O₂⁻ 和 ·OH 进行抗菌。由光子能量公式 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 可知,波长越短,蕴含的能量越高,产生的 ROS 浓度越高,抗菌效果越优异^[19]。而当入射波长超过异质结纺织品的吸收阈值(620 nm)时,光子能量低于禁带宽度,导致 e⁻ 无法从价带跃迁至导带,载流子浓度骤降,光催化活性显著削弱,抗菌性能急剧降低^[16]。

2.2 生物安全性分析

生物安全性是贴身纺织品质量评价的重要指标之一,利用 HaCaT 细胞测试空白、未处理的涤纶织物和异质结纺织品的细胞毒性,结果如图 5 所示。由图 5 可知,与空白和未处理的涤纶织物相比,异质结纺织

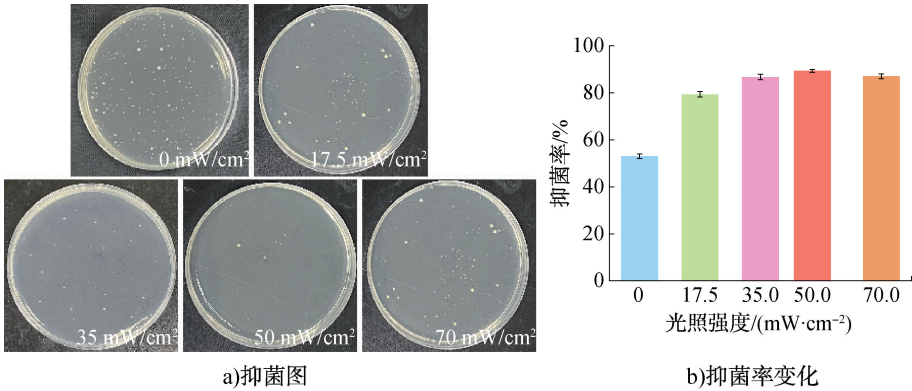


图 3 不同光照强度下异质结纺织品的抗菌性能

Fig. 3 Antibacterial properties of heterojunction textiles under different light intensities

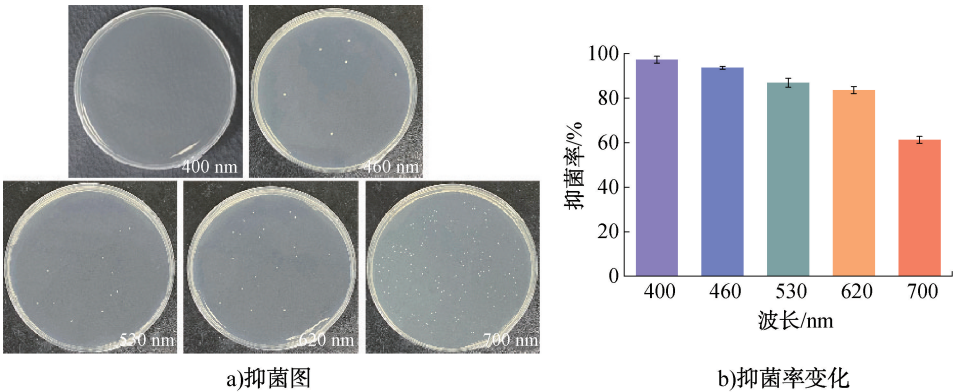


图 4 不同波长下异质结纺织品的抗菌性能

Fig. 4 Antibacterial properties of heterojunction textiles under different wavelengths

织品的细胞存活率分别降低了 16.99% 和 5.73%, 下降值显著低于对照组细胞存活率的 30%, 即异质结纺织品对 HaCaT 细胞基本无毒性作用。在异质结纺织品的金属元素质量浓度测定中, Zn 和 Cu 的质量浓度分别为 2.508 mg/L 和 5.706 mg/L, 而在模拟抗菌过程中, 2 种元素析出的质量浓度分别为 0.011 mg/L 和 0.044 mg/L, 表明半导体光催化材料 ZnO 和 Cu₂O 能与涤纶织物较好地结合在一起, 不易从纺织品中析出, 进一步验证了异质结纺织品具有较好的生物安全性。

2.3 光催化性能分析

2.3.1 UV-Vis DRS 谱图分析 UV-Vis DRS 可用于评估材料的光学性能。已有研究^[17]指出, 异质结纺织品的光催化性能与其对光的吸收能力成正比相关。利用 UV-Vis DRS 测定异质结纺织品在 200~800 nm 范围内的吸光度, 异质结纺织品的吸光度及其对甲基橙的降解速率如图 6 所示。由图 6a) 可

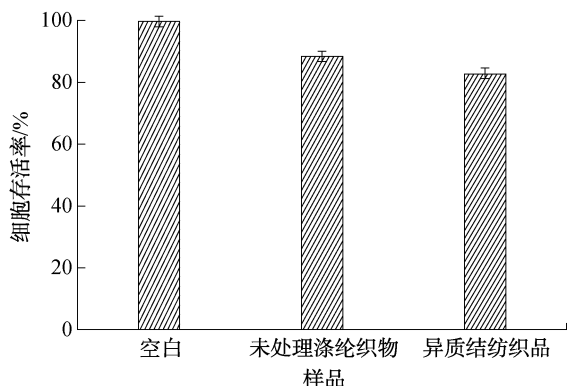


图 5 异质结纺织品细胞毒性测试结果

Fig. 5 Cytotoxicity test results of heterojunction textiles

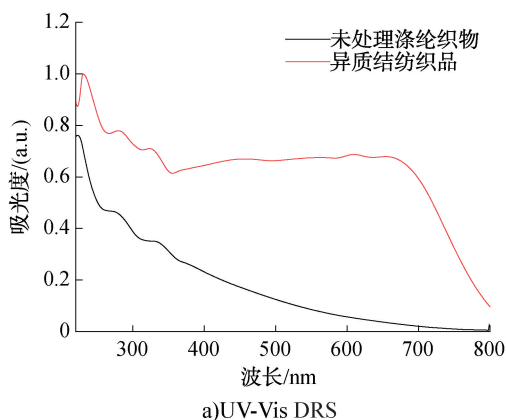


图 6 异质结纺织品的 UV-Vis DRS 及其对甲基橙的降解速率

Fig. 6 UV-Vis DRS and degradation rate of methyl orange by heterojunction textiles

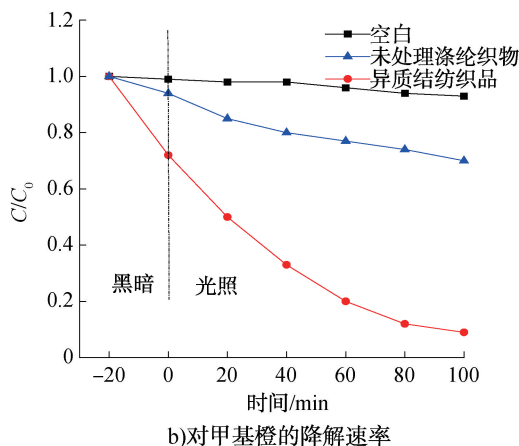
知, 与异质结纺织品相比, 未处理涤纶织物在 360~700 nm 范围内的吸光度和响应范围均明显降低, 且其吸收边带发生大幅蓝移, 说明异质结纺织品具有更高的光利用效率^[18], 有利于光生载流子的激发和转移。由图 6b) 可知, 与未处理涤纶织物相比, 异质结纺织品可在 100 min 内将甲基橙几乎完全降解, 光催化性能显著提升^[19]。

2.3.2 PL 光谱和 ESR 谱图分析 光催化过程中, 导带 e⁻ 重新跃迁至价带与 h⁺ 复合, 导致光生载流子利用率降低, 光催化性能减弱^[20]。PL 光谱强度可反映 e⁻ 和 h⁺ 复合率, 峰强度越高, 表明复合率越高, 光催化性能越差^[21]。异质结纺织品的 PL 光谱和 ESR 谱图如图 7 所示。由图 7a) 可知, 与未处理涤纶织物相比, 异质结纺织品的峰强度显著降低, 表明其载流子复合受到显著抑制, 光催化性能更优。

ESR 可用来检测材料中的未成对 e⁻。根据公式 $g = 0.07144777 v/H$, 当 $g = 2.0023$ 时可判定为氧空位^[22], 即峰值出现在磁场强度 326 mT 时证明材料中有氧空位。由图 7b) 可知, 异质结纺织品在磁场强度为 326 mT 处出现明显的信号峰, 而未处理涤纶织物的 ESR 结果趋于平缓, 说明在异质结纺织品表面存在氧空位, 有助于 ROS 的生成, 从而提升其抗菌效果。

2.4 抗菌效果分析

2.4.1 细菌形态和染色实验分析 在相同条件下接触不同织物的大肠杆菌会表现出不同的细菌形态^[23]。利用 SEM 观察未处理涤纶织物和异质结纺织品的细菌形态, 结果见图 8。由图 8 可知, 未



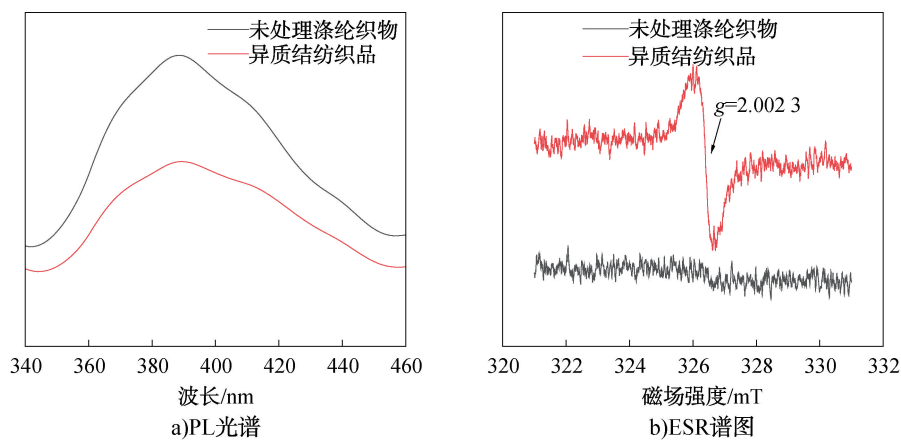


图 7 异质结纺织品的 PL 光谱和 ESR 谱图
Fig. 7 PL spectra and ESR spectra of heterojunction textiles

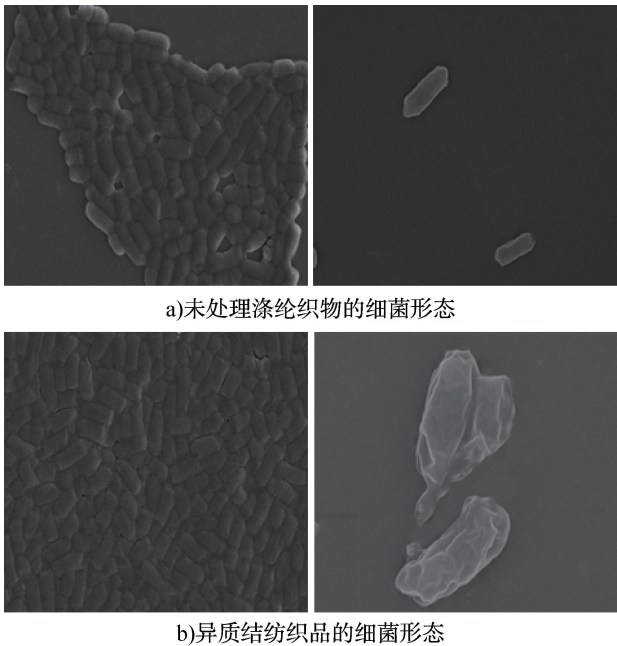


图 8 未处理涤纶织物和异质结纺织品的
细菌形态
Fig. 8 Bacterial morphology of untreated
and treated PET

处理涤纶织物表面的大肠杆菌仅局部发生凹陷,大部分仍保持饱满棒状结构;而与异质结纺织品接触的大肠杆菌呈现扁平外观,形态扭曲且表面严重凹陷,直观证实异质结纺织品具有更为优异的抗菌性能。

进一步采用 DAPI/PI 双染验证异质结纺织品的抗菌性能,DAPI 可同时标记活菌和死菌,呈现蓝色荧光^[24];而 PI 只能上染细胞膜受损的细菌,产生红色荧光信号^[25-26]。未处理涤纶织物和异质结纺织品的活死染色结果如图 9 所示。由图 9 可知,2

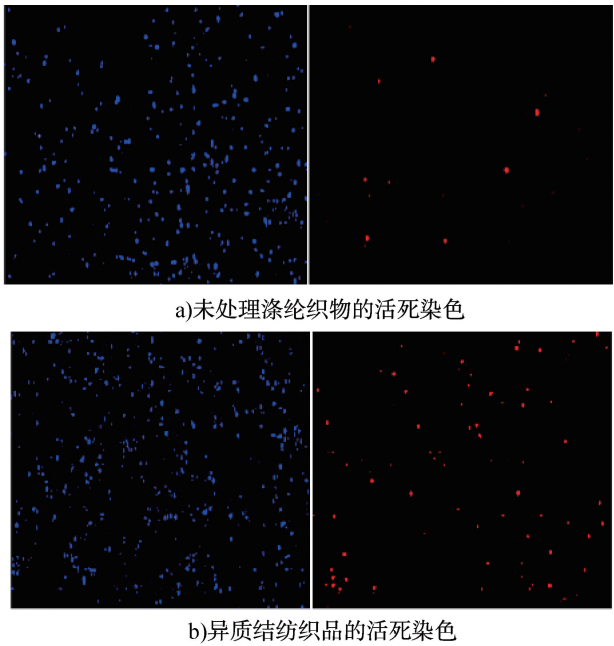


图 9 未处理涤纶织物和异质结纺织品的
活死染色结果
Fig. 9 Live/dead staining of untreated
and treated PET

组 DAPI 染色荧光点数相近;但异质结纺织品的 PI 染色荧光点数远高于未处理涤纶织物,表明其抑菌率更高,抗菌性能更优。

2.4.2 抗菌稳定性分析 不同水洗次数下异质结纺织品的抗菌稳定性测试结果见表 1。由表 1 可知,随着水洗次数的增加,异质结纺织品的抗菌性能虽略有下降但仍保持在较高水平,且水洗 50 次后,其抑菌率仍符合标准值要求,达到 AAA 级别,表明其具有优异的抗菌稳定性。

表 1 不同水洗次数下异质结纺织品的抗菌稳定性测试结果

Table 1 Antibacterial stability testing results of heterojunction textiles under different washing cycles

水洗 次数/次	抑菌率/%				等级 判定
	大肠杆菌		金黄葡萄球菌		
	标准	试样	标准	试样	—
0	—	93	—	99	—
10	不考核	—	≥99	99	A 级
20	≥70	90	≥80	89	AA 级
50	≥70	82	≥80	84	AAA 级

注:—表示该项无相关数据、不适用或未作要求。

3 结论

本文采用振荡法研究不同应用环境下异质结纺织品抗菌性能的差异,并验证其生物安全性、光催化性能和抗菌性能。结果表明:应用环境的变化会影响异质结纺织品的抗菌性能,低温时细菌细胞膜稳定,温度升高,细菌繁殖速率加快,抑菌率先增加后降低,酸碱性能影响·O₂⁻和·OH状态,pH值为7.5最适宜;光照强度和波长对抗菌性能的影响基本一致,接受光子能量越强,抗菌性能越好,但存在上限。异质结纺织品表现出优异的生物安全性,其细胞存活率为82.67%,与空白(99.66%)和未处理涤纶织物(88.40%)相比,分别降低了16.99%和5.73%,其细胞存活率下降幅度显著低于对照组的30%,对HaCaT细胞基本无毒性作用,且在振荡过程中的金属元素析出量均小于其实际金属元素测定值。与未处理涤纶织物相比,异质结纺织品对光的吸收更强,对甲基橙的降解速率更快,且存在氧空穴,有助于ROS的生成;其表面的大肠杆菌形态扭曲且严重凹陷,PI荧光点数量显著增多,抗菌性能更优;经水洗50次后,其抑菌率仍达AAA级别,抗菌稳定性优异。

综上所述,异质结纺织品是一种通过能量响应产生抗菌因子的新型物理光催化抗菌材料,应用环境对其抗菌性能具有显著影响。本研究结果有助于改善其抗菌性能及选择适宜应用场景,为新型物理抗菌纺织品的应用提供指导。

参考文献:

[1] KHONG M J,SNYDER A M,MAGNATERRA A K,et al.

Antimicrobial resistance profile of *Escherichia coli* isolated from poultry litter [J]. Poultry Science, 2023, 102 (1):102305.

[2] BOTSA S M, BASAVIAIAH K. Fabrication of multifunctional TANI/Cu₂O/Ag nanocomposite for environmental abatement [J]. Scientific Reports, 2020, 10:14080.

[3] LIU H P,LI J F,LIU X M,et al. Photo-sono interfacial engineering exciting the intrinsic property of herbal nanomedicine for rapid broad-spectrum bacteria killing [J]. ACS Nano,2021,15(11):18505–18519.

[4] AMBIGADEVI J,SENTHIL KUMAR P,VO D N,et al. Recent developments in photocatalytic remediation of textile effluent using semiconductor based nanostructured catalyst:A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2021,9(1):104881.

[5] CI H,MA L L,LIU X M,et al. Photo-excited antibacterial poly(ε-caprolactone)@ MoS₂/ZnS hybrid nanofibers[J]. Chemical Engineering Journal,2022,434:134764.

[6] LI L L,WANG D P,ZHANG D,et al. Near-infrared light triggered self-powered mechano-optical communication system using wearable photodetector textile[J]. Advanced Functional Materials,2021,31(37):2104782.

[7] LI J F,MA L L,LI Z Y,et al. Oxygen vacancies-rich heterojunction of Ti₃ C₂/BiOBr for photo-excited antibacterial textiles[J]. Small,2022,18(5):e2104448.

[8] WANG Q Q,JI S T,LI S Y,et al. Electrospinning visible light response Bi₂MoO₆/Ag₃PO₄ composite photocatalytic nanofibers with enhanced photocatalytic and antibacterial activity[J]. Applied Surface Science,2021,569:150955.

[9] XU J,YU C Z,WANG S L,et al. Quantitative generation of ROS and their effective photocatalytic antibacterial activity of high-intensity universal P25 network films:The role of ROS [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2023,11(5):110915.

[10] NOSAKA Y,NOSAKA A Y. Generation and detection of reactive oxygen species in photocatalysis [J]. Chemical Reviews,2017,117(17):11302–11336.

[11] 周飞,孟久灵,李乐. 环境因素对纺织品抗菌性能的影响[C]//第十八届中国科协年会. 第十八届中国科协年会论文集;2017年卷. 西安:[出版社不详],2016:1–6.

[12] 陈媛媛,唐晓宁,崔帅,等. 活性氧抗菌机理及其研究进展[J]. 工程科学学报,2023,45(6):967–978.

[13] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 纺织品 抗菌性能的评价 第3部分:振荡法:GB/T 20944.3—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 抗菌针织品:FZ/T 73023—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准 GB/T 16886.5—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[16] MA C C, CHEN S G, WANG C Q, et al. Defect engineering of Cu_{2-x}Ga_xO/PDINH nanomaterial for significantly improved photocatalytic antibacterial activities[J]. Nanotoday, 2024, 56:102230.

[17] LENG J L, LIU X W, XU Y, et al. Evaluation of the alkyl chain length and photocatalytic antibacterial

performance of cation g-C₃N₄ [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2024, 13:264-273.

[18] 刘晓丽,郭曹羽,林锴立,等.壳聚糖基抑菌抗氧化活性复合膜的制备及其性能研究[J].轻工学报,2023,38(4):27-36.

[19] ZHANG J, SHI R Z, ZHANG Z H, et al. Modulating the large vacancy types of CuS ultrathin nanosheets via defect engineering to improve the photocatalytic antibacterial performance [J]. Applied Surface Science, 2023, 639 (1):158269.

[20] NUR A S M, SULTANA M, MONDAL A, et al. A review on the development of elemental and codoped TiO₂ photocatalysts for enhanced dye degradation under UV-vis irradiation [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022,47:102728.

[21] 马占强,郭葳,张凯悦,等. Bi₅O₇I 的制备及光催化抗菌性能研究[J]. 化学研究与应用,2023,35(2):407-413.

[22] ZHENG M, JIANG Y, WANG C, et al. Multifunctional modification polyester with Au @ Cu₂O-ZnO ternary heterojunction fabricated by *in situ* polymerization [J]. RSC Advances, 2024,14(9):6216-6224.

[23] KARBASI M, KARIMZADEH F, RAEISSI K, et al. Insights into the photocatalytic bacterial inactivation by flower-like Bi₂WO₆ under solar or visible light, through *in situ* monitoring and determination of reactive oxygen species (ROS) [J]. Water, 2020,12(4):1099.

[24] HAO L, JU P, ZHANG Y, et al. Novel plate-on-plate hollow structured BiOBr/Bi₂MoO₆ p-n heterojunctions: *in situ* chemical etching preparation and highly improved photocatalytic antibacterial activity [J]. Separation and Purification Technology, 2022,298:121666.

[25] WANG X J, ZHAO Y, LI F T, et al. A chelation strategy for *in situ* constructing surface oxygen vacancy on {001} facets exposed BiOBr nanosheets [J]. Scientific Reports, 2016,6:24918.

[26] WANG W, FENG H M, LIU J G, et al. A photo catalyst of cuprous oxide anchored MXene nanosheet for dramatic enhancement of synergistic antibacterial ability [J]. Chemical Engineering Journal, 2020,386:124116.

[27] RAHMATI Z, ABDI J, VOSSOUGH M, et al. Ag-doped magnetic metal organic framework as a novel nanostructured material for highly efficient antibacterial activity [J]. Environmental Research, 2020,188:109555.

[28] SUBBIAH N, PALANISAMY T. Collagen-supported amino-functionalized Ag @ SiO₂ core-shell nanoparticles for visible-light-driven water remediation [J]. ACS Applied Nano Materials, 2022,5(10):14408-14424.

[29] 张丽华,刘世豪,唐培鑫,等.杜仲叶多糖对植物乳杆菌 CICC 20022 胆盐耐受性的影响 [J]. 轻工学报, 2024,39(3):1-8.

Antimicrobial properties of heterojunction textiles in different application environments

YU Mengya, ZHENG Min, LIU Haijuan, KONG Jiong

School of Textile and Clothing Engineering, Suzhou University, Suzhou 215006, China

Abstract: To explore the changes in antibacterial performance of heterojunction textiles in different application environments, *Escherichia coli* was used as representative bacteria to study the antibacterial rate of heterojunction textiles at different temperatures, pH, light intensity and wavelengths by the oscillation method. The results indicated that environmental factors significantly influenced the antibacterial performance of the heterojunction textiles. The bacteriostatic rate basically increased initially and then decreased with rising temperature. Within the pH range of 3.0~8.0, the heterojunction textiles exhibited strong antibacterial activity, peaking at pH 7.5, with acidic conditions being more favorable than alkaline environments. Light intensity significantly affected its antibacterial efficacy, as the bacteriostatic rate under dark conditions was 36 % lower than that at 50 mW/cm². Additionally, antibacterial effectiveness diminished with increasing wavelength. The heterojunction textiles showed no significant cytotoxicity toward HaCaT cells, and the amounts of released metal elements during oscillation remained below the actually measured levels of metal elements. Compared to untreated polyester fabric, the heterojunction textiles demonstrated significantly enhanced photocatalytic performance. Treated *Escherichia coli* showed distorted morphology with severe surface depression and significantly increased PI-stained fluorescent spots. After 50 washing cycles, the bacteriostatic rate still reached the AAA level, indicating exceptional antibacterial efficacy and stability.

Key words: heterojunction textiles; application environment; antibacterial property; biosecurity; photocatalytic performance

[责任编辑:王晓波]