

引用本文: 赵誉钦, 王钊. 光催化抗菌改性聚丙烯非织造布的制备及其性能研究[J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(3): 200-207.

Citation: ZHAO Yu-qin, WANG Yi. Preparation and Performance Study of Photocatalytic Antibacterial Modified Polypropylene Non-woven Fabric [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(3): 200-207.

· 研究论文 ·

文章编号: 1001-5493(2025)03-0200-08

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2025030200

光催化抗菌改性聚丙烯非织造布的制备及其性能研究*

赵誉钦^{1**}, 王钊²

(¹江苏开放大学江苏城市职业学院, 南京 210036; ²津菲盐城节能环保材料科技有限公司, 盐城 224002)

摘要: 一次性非织造布口罩在抵御有毒物质和病原微生物方面发挥着至关重要的作用, 但大量使用口罩也会带来固体废物处置压力。文章以常用聚丙烯非织造布为基材, 负载掺杂碳量子点的磷酸银复合物 (CQDs/Ag₃PO₄), 使其 (CQDs/Ag₃PO₄-PNF) 具备可见光催化抗菌功能。实验结果表明, 助催化剂 CQDs 不仅作为“激发器”增强 Ag₃PO₄ 对可见光的吸收, 还作为电子阱捕获光生电子, 抑制光生载流子复合和避免光腐蚀, 并能通过熵转换荧光效应进一步激发 Ag₃PO₄ 生成更多光生载流子。大量强氧化性光生空穴具有抑菌效应, 使得 CQDs/Ag₃PO₄-PNF 灭活病原菌的效率高达 89.49%, 且具有较好的稳定性。此外, 负载光催化灭菌材料并未明显降低聚丙烯非织造布的过滤与透气性能, 因此 CQDs/Ag₃PO₄-PNF 能够有效延长一次性口罩使用时间, 减少医疗固体废物产生量, 具有较大的应用前景。

关键词: 改性聚丙烯非织造布, CQDs/Ag₃PO₄-PNF, 光催化, 抗菌性能

中图分类号: TS176 **文献标志码:** A

1 前言

一次性口罩作为个人基础防护体系的重要组成部分^[1], 其功能化设计直接决定防护性能。研究显示, 滤布理化特性 (如纤维直径、孔隙率及表面电荷分布) 是影响细菌、病毒 (粒径 0.06~3 μm) 及 PM_{2.5} 等微粒截留效率的关键因素^[2]。目前常用聚丙烯熔喷非织造布, 虽可通过机械拦截与静电吸附实现初效防护, 但在实际使用过程中, 表层富集的病原微生物会随呼吸气流震荡形成二次污染源。为维持防护效能, 使用者需每 4~6 h 更换口罩, 不仅增加使用成本, 还导致我国每年产生超百万吨的医疗废弃物, 加剧环境治理压力。因此, 基于病原微生物灭活机制开发长效抗菌型口罩, 对构建可持续公共卫生防护体系具有显著应用价值。

在提升口罩抗菌性能研究领域, 学者们已取得多项重要进展。杜汶骏^[3]采用壳聚糖/聚乳酸复合体系对口罩滤布进行功能化改性, 研究表明改性后的滤布虽具有较好的生物相容性, 但其病毒灭活效率与耐湿性能尚无法满足高防护需求。Antonio 等^[4]开发的 TiO₂ 涂层光催化抗菌口罩, 通过紫外线激发产生活性氧物种实现病原体灭活, 但在实际应用过程中由于室内环境缺乏持续紫外线辐照条件, 其抗菌性能显著下降。因此, 现有研究在材料抗菌稳定性、光谱性及复杂环境适应性方面仍存在技术瓶颈, 亟需通过新型纳米复合技术实现抗菌体系长效稳定。

近些年, 光热灭活 (Photothermal Inactivation, PTI) 和光动力灭活 (Photodynamic Inactivation, PDI) 因低副作用以及光响应等优势, 成为医疗与食品领域重要的灭菌方式^[5-8]。光热灭活过程

* 收稿日期: 2025-02-22

作者简介: 赵誉钦 (1984—), 女, 讲师, 硕士学历, 主要从事功能型面料设计与应用研究。

**通信作者: 赵誉钦, E-mail: zhaoyuqinnju@163.com.

中温度迅速升高可能导致口罩表面过热, 从而引起佩戴者不适, 甚至造成皮肤灼伤。与光热灭活相比, 基于产生活性氧物种或载流子的光催化灭活技术具有温和、能耗低的优势, 适用于空气消毒领域^[9-11]。若能基于光动力灭活机制提升对可见光的响应, 实现常规室内可见光照条件下的抗菌、灭活, 将有效降低灭菌成本, 具有较大的应用潜力。

Ag_3PO_4 作为一种新型半导体材料, 因其独特的能带结构而具有可见光催化活性, 然而, 单独使用 Ag_3PO_4 在可见光激发下的灭菌效果并不理想, 需负载助催化剂以提升其催化性能^[12]。碳量子点(CQDs)作为一种新型助催化剂, 其光致发光熵转换效应(UPCL)能够有效增强可见光吸收并释放高能光生载流子。基于上述研究背景, 将CQDs/ Ag_3PO_4 复合材料负载到聚丙烯非织造布表面以增强其灭活性能, 并利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱分析(EDS)、X射线衍射仪(XRD)、电子能谱仪(XPS)、紫外-可见漫反射光谱(DRS)与光致发光光谱(PL)对材料进行系统表征与分析, 同时考察其抗菌性、透气性、过滤和压降性能。本研究不仅为光催化技术在口罩等个人防护用品中的应用提供理论支持, 同时也为自清洁、可见光抗菌材料的开发提供新思路。

2 实验部分

2.1 实验试剂

主要试剂: 水合柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$, AR)、乙酸银(CH_3COOAg , AR)、对苯醌($\text{C}_6\text{H}_4\text{O}_2$, AR)、罗丹明B($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$, AR)、5,5-二甲基-1-吡咯啉-N-氧化物($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$, AR)、2,2,6,6-四甲基-4-哌啶酮($\text{C}_9\text{H}_{20}\text{N}$)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 十二水合磷酸氢二钠($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, AR)、乙二胺($\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$, AR)、乙醇($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, AR)购自国药化学试剂股份有限公司; 二水合EDTA二钠($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, AR)购自南京化学试剂股份有限公司; PBS缓冲液(pH=7.4)购自江苏省凯基生物技术股份有限公司。上述所有实验药品在使用前均无需纯化, 实验过程中未做特殊说明情况下所用水均为超纯水。

2.2 材料制备

2.2.1 CQDs分散液的制备

称取1.0507 g的一水合柠檬酸置于烧杯中,

加入335 μL 乙二胺和10 mL超纯水, 剧烈搅拌1 h, 随后将混合液转移至25 mL聚四氟乙烯为内衬的反应釜中, 200 $^\circ\text{C}$ 下反应5 h, 待自然冷却至室温后, 10000 r/min高速离心20 min, 取出上清液即为CQDs分散液, 浓度为20 mg/mL。

2.2.2 CQDs/ Ag_3PO_4 的制备

将0.4 g乙酸银置于烧杯中, 加入200 mL超纯水, 搅拌使之充分溶解, 后加入6 mL 0.15 mol/L的磷酸氢二钠溶液, 继续搅拌1 h, 出现黄色沉淀后过滤, 将固体洗净烘干得到磷酸银固体颗粒。分别将316 mg和392 mg磷酸银超声溶解在50 mL超纯水中, 加入400 μL 的CQDs分散液, 在35 $^\circ\text{C}$ 下水浴反应3 h, 得到灰色浊液, 过滤, 将固体洗净烘干得到CQDs/ Ag_3PO_4 复合材料, 质量分数分别为1.25%和2%。

2.2.3 CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF的制备

将100 mg质量分数为2%的CQDs/ Ag_3PO_4 溶解于100 mL无水乙醇中, 将口罩的外表面非织造布裁剪成5 cm \times 9 cm的长方形, 平铺于培养皿中, 倒入溶液, 在自然条件下浸渍48 h, 待乙醇完全挥发, 干燥, 收集备用。材料的负载量约为0.35 mg/cm²。

2.3 催化材料表征

X射线衍射仪(XRD, SmartLab SE Rigaku)鉴定催化剂的物相; 场发射扫描电子显微镜(EM, 蔡司sigma360)观察和分析材料的微观形貌; X射线光电子能谱仪(XPS, ESCALAB 250XI)分析材料的表面元素组成和化学价态变化; 光致发光光谱仪(PL, FluoroMax-4)分析材料的载流子分离能力; 接触角测量仪(OCA200)分析材料的亲疏水性; 紫外-可见漫反射吸收光谱仪(UV-vis DRS, UV2600)分析材料的光吸收能力。

2.4 抗菌性能测试

将负载不同催化材料的口罩非织造布样品(CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF)裁剪为2.5 cm \times 2.5 cm的尺寸, 按照分组放入培养皿中, 紫外线灭菌30 min备用。用无菌PBS溶液将菌液稀释至10⁶ CFU/mL, 在样品表面分别均匀滴加500 μL 菌液。黑暗组锡纸包裹, 光照组置于光下, 放于37 $^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中静置培养2 h。培养完成后, 用无菌PBS溶液将菌液做连续10倍稀释, 取100 μL 稀释液均匀涂布于LB固体培养基上, 置于37 $^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养18 h, 取出拍照并记录菌落数。

2.5 稳定性能测试

将使用后的CQDs/Ag₃PO₄-PNF用去离子水冲洗3遍,放入培养皿中,紫外线灭菌30 min备用。用无菌PBS溶液将菌液稀释至10⁶ CFU/mL,在样品表面均匀滴加500 μL菌液,置于光下,放入37 °C恒温培养箱中静置培养2 h。培养完成后,用无菌PBS溶液将菌液做连续10倍稀释,取100 μL稀释液均匀涂布于LB固体培养基上,置于37 °C恒温培养箱中培养18 h,取出拍照并记录菌落数。

2.6 透气性、过滤和压降性能测试

分别将PNF和CQDs/Ag₃PO₄-PNF切成正方形小片(10 cm×10 cm),通过透气性测试仪(YG461E)在100 Pa下测量PNF和CQDs/Ag₃PO₄-PNF的透气性,试验标准为GB/T 5453—1997。使用自动过滤测试仪(TSI/8130 A)测量PNF和CQDs/Ag₃PO₄-PNF的气溶胶过滤性能,该测试仪产生NaCl气溶胶颗粒。测试气流流速为32 L/min,测试时间为1 min。

2.7 光催化活性物种测定

采用二水合EDTA二钠和硝酸银作为体系光生空穴和光生电子的猝灭剂,反应开始前分别向体系中加入这2种猝灭剂,定时取样分析。实验采用电子顺磁共振光谱仪(EPR, Bruker EMX micro)分析体系中活性氧物种,分别向体系中加入DMPO和TEMP,光反应5 min,用毛细管吸取少量溶液进行测试。测设条件设置为:调制幅度0.2 mT,输出功率20 MW,调制频率100 kHz。

3 结果与讨论

3.1 催化材料表征

图1(a)~(b)为口罩非织造布负载CQDs/Ag₃PO₄前后的SEM图,结果表明CQDs/Ag₃PO₄复合材料均匀分布在PNF纤维表面。图1(c)~(d)中的EDS图可以观察到碳元素在催化材料表面均匀分布,表明CQDs成功地负载在Ag₃PO₄上,进一步确认了复合材料的形成。对负载催化材料的口罩非织造布样品(CQDs/Ag₃PO₄-PNF)进行接触角测定,图1(e)结果表明,催化材料的负载并没有显著改变非织造布的疏水性。

图2为2% CQDs/Ag₃PO₄复合材料的XPS精细谱图,C 1s谱峰中可以分辨出3个位于284.8、

286.1和288.7 eV的特征峰,分别对应C—C/C=C、C=O和C—O键。O 1s谱图中530.4 eV处的特征峰为Ag₃PO₄中的氧元素,而531.4 eV和533.1 eV处的特征峰为CQDs表面的含氧官能团,这表明CQDs已经成功掺杂到Ag₃PO₄中。此外,Ag 3d轨道在368 eV和374 eV处出现的特征峰证实了银元素的存在,而P 2p轨道132.2 eV处的特征峰为Ag₃PO₄中五价磷元素^[13-16]。因此,XPS图谱分析证实了银、磷、氧和碳元素的存在,表明了光催化复合材料CQDs/Ag₃PO₄成功合成。

通过分析XRD数据可以得到材料的晶体结构信息,图3(a)呈现了纯Ag₃PO₄与不同CQDs掺杂量的CQDs/Ag₃PO₄复合材料的XRD图谱。纯Ag₃PO₄的衍射峰与标准卡片(JCPDS 06-0505)高度一致,出现在2θ为21.7°、29.7°、33.3°、36.5°处的特征峰,分别对应Ag₃PO₄的(110)、(200)、(210)与(211)晶面^[17]。在CQDs/Ag₃PO₄复合材料中,除了Ag₃PO₄的典型衍射峰外,并没有观察到与CQDs相关的衍射峰,这可能归因于作为助催化剂的CQDs负载量较低,不足以在XRD图谱中形成可检测的独立衍射峰。

为考察不同CQDs掺杂量对复合材料光催化性能的影响,图3(b)展示了不同CQDs掺杂量的CQDs/Ag₃PO₄复合材料的PL光谱。由于光生载流子(光生电子与空穴)在复合过程中会发生湮灭并释放出光能,PL光谱的荧光强度与光生载流子的复合率呈负相关,因此荧光强度越低,表示光生载流子的分离效率越高,光催化材料的活性也越强。结果表明3种光催化材料的荧光强度为Ag₃PO₄>1.25% CQDs/Ag₃PO₄>2% CQDs/Ag₃PO₄,表明2% CQDs/Ag₃PO₄的光生载流子分离效率最高,光催化活性最强。

图3(c)为纯Ag₃PO₄与掺杂不同量CQDs的CQDs/Ag₃PO₄复合材料UV-vis光谱。Ag₃PO₄的吸收带出现在512 nm处,当掺杂1.25%的CQDs时,复合材料对500~800 nm范围内的可见光吸收强度有所增加;而当CQDs掺杂量增加至2%时,可见光吸收强度进一步增强,表明CQDs/Ag₃PO₄复合材料具有更强的可见光响应能力。CQDs/Ag₃PO₄-PNF上CQDs与Ag₃PO₄存在着协同效应,在提高光催化反应速率和增强光生载流子分离方面发挥了关键作用。根据半导体催化材料的UV-vis光谱和光子能量,利用Tauc

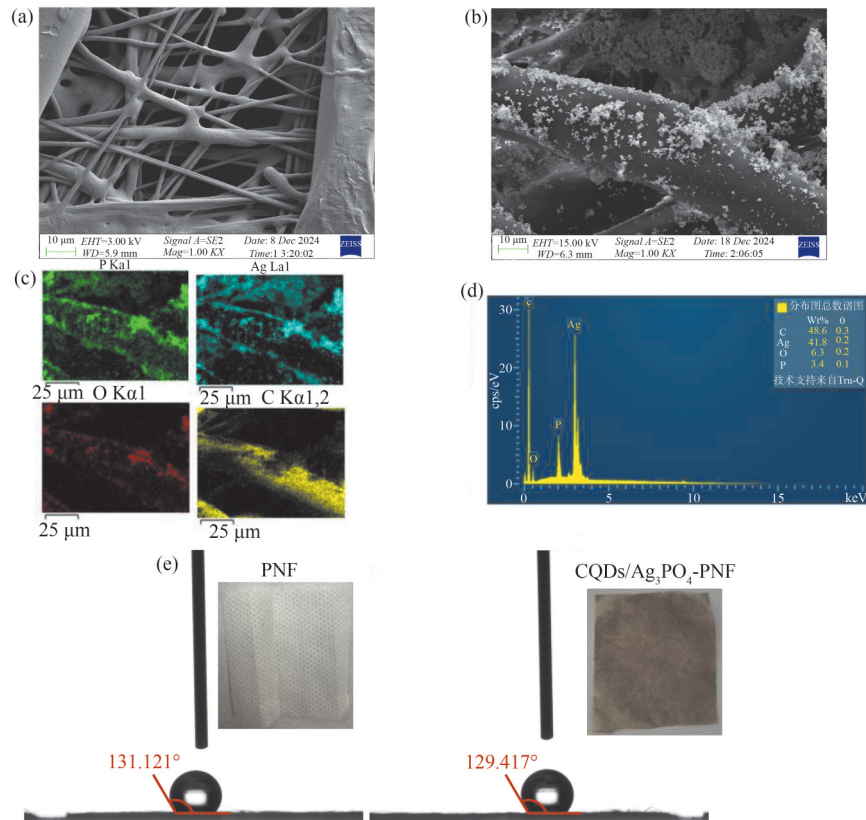


图1 PNF (a) 和 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF (b) 的 SEM 图; (c, d) 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF 的 EDS 元素分布图; (e) 负载催化材料前后的 PNF 接触角测定。

Figure 1 SEM images of PNF (a) and 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF (b); (c, d) EDS elemental mapping of 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF; (e) Contact angle measurements of PNF before and after catalyst loading.

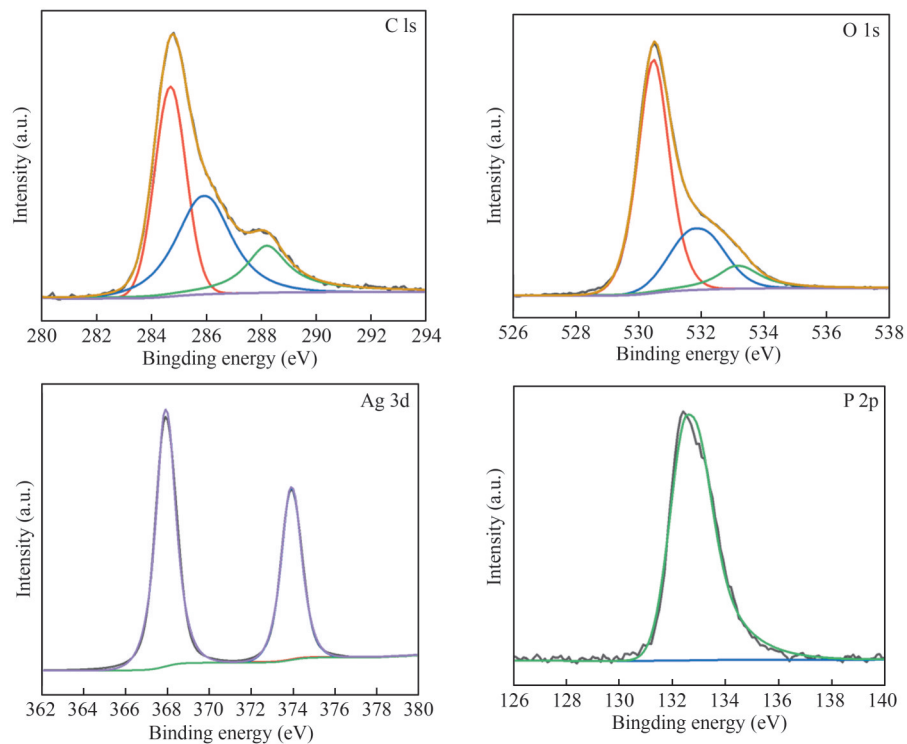


图2 2% CQDs/Ag₃PO₄ 复合材料 XPS 图。

Figure 2 XPS spectra of the 2% CQDs/Ag₃PO₄ composite.

plot法计算出禁带宽度:

$$(ah\nu)^{\frac{1}{n}} = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

式中: a 为吸光系数, h 为普朗克常数, ν 为频率, A 为常数, E_g 为半导体禁带宽度。指数 n 取决于半导体的类型, 直接带隙半导体 n 取1/2, 间接带隙半导体 n 取2, 本式中 n 取1/2。因为吸光度Abs与吸光系数 a 呈正比, 所以通过Tauc plot曲线图计算禁带宽度时, 无论采用Abs还是 a 都不会影响到禁带宽度 E_g 值的大小, 为了方便

计算, 直接以吸光度Abs取代 a 。

图3(d)展示了 Ag_3PO_4 与不同CQDs掺杂量复合材料的Tauc图(禁带宽度计算图)。根据Tauc公式, Ag_3PO_4 的禁带宽度为2.42 eV, 而1.25% CQDs/ Ag_3PO_4 和2% CQDs/ Ag_3PO_4 的禁带宽度分别为2.21 eV和2.26 eV。禁带宽度的减小有利于增强材料对可见光的吸收, 提高光催化效率, 但禁带宽度过窄会导致光生载流子易于复合, 因此在本实验中2%的CQDs掺杂量是最佳的, 可用于后续灭菌性能测试。

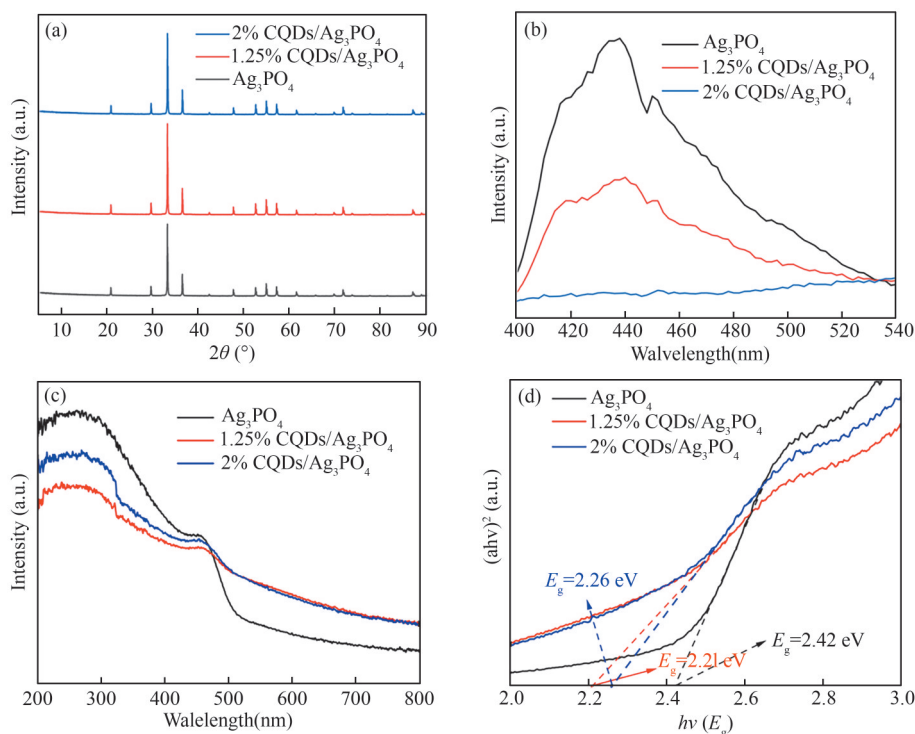


图3 Ag_3PO_4 单体和CQDs/ Ag_3PO_4 复合材料XRD图(a)、PL光谱图(b)、UV-vis光谱图(c)以及Tauc图(d)。

Figure 3 XRD (a), PL spectrum (b), UV-vis spectrum (c), and Tauc plot (d) of Ag_3PO_4 monomer and CQDs/ Ag_3PO_4 composites.

3.2 光催化抗菌性能测试

为评估2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF在可见光条件下的抗菌性能, 本研究以金黄色葡萄球菌作为目标菌种, 系统比较不同实验条件下PNF、2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF对细菌的抑制效果。如图4(a)所示, 单独用可见光照射或2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF材料在无光照条件下均未对金黄色葡萄球菌产生明显的抑菌作用, 灭活效果不显著。2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF复合材料在可见光照射条件下抑菌效果显著增强, 其灭菌率高达89.49%, 明显高于其他实验条件(表1)。这表明2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF在可见光照射下具有

优良的光催化抗菌性能, 能够有效抑制金黄色葡萄球菌的生长。2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF中CQDs与 Ag_3PO_4 存在着协同效应, 能提高光催化反应速率, 增强光生载流子分离, 从而提升复合材料的催化活性与灭菌效率。此外, 2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF重复使用后的灭菌效果并没有明显削弱, 具有较好的稳定性(图4(b)), 这同样归因于CQDs作为电子捕获阱促进了 Ag_3PO_4 光生载流子的分离, 有效避免了光生电子对 Ag_3PO_4 自身的光腐蚀。由此可见, 2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF在可见光条件下表现出优良的光催化抗菌性能, 且在重复使用后抗菌性能稳定, 作为一种价格

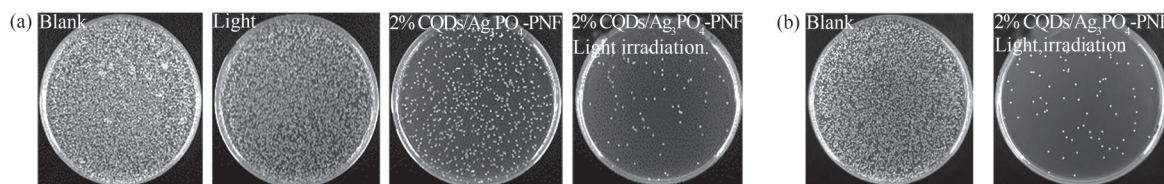


图4 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF在光照条件下灭菌效果 (a) 和2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF重复使用后的灭菌效果 (b).

Figure 4 Bactericidal performance of 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF under visible light (a) and performance of 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF after repeated use (b).

低廉的抗菌面料具有较大的应用潜力, 这也为开发新型高效抑菌口罩材料提供了理论依据。

表1 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF在光照条件下的灭菌率.

Table 1 Sterilization rate of 2% CQDs/Ag₃PO₄-PNF under visible light.

分组	菌落数	稀释倍数	菌液浓度 (CFU/mL)	灭菌率 (%)
黑暗组	78	10 ⁴	7.80×10 ⁶	—
光照组	82	10 ³	8.20×10 ⁵	89.49

3.3 过滤与透气性能测试

为了评估改性后聚丙烯非织造布 (CQDs/Ag₃PO₄-PNF) 作为口罩使用时的实际过滤与透气性能, 实验测试了CQDs/Ag₃PO₄-PNF的气溶

胶过滤效率、压降和透气性能。结果表明未经改性的PNF口罩具有良好的过滤效率 (93.77%) 和较低的压降 (46 Pa) (图5(a)); 而改性非织造布CQDs/Ag₃PO₄-PNF口罩的过滤效率为90.17%, 压降为45.3 Pa (图5(b)), 并没有出现明显的下降, 这表明负载CQDs/Ag₃PO₄不会降低聚丙烯非织造布的过滤性能。此外, 如图5(c)所示, PNF和CQDs/Ag₃PO₄-PNF的透气性分别为3300 mm·s⁻¹和3219 mm·s⁻¹, 这表明负载CQDs/Ag₃PO₄同样不会降低聚丙烯非织造布的透气性能。因此, CQDs/Ag₃PO₄-PNF可以作为口罩滤材使用, 且与改性前聚丙烯非织造布性能接近, 具有较大的应用前景。

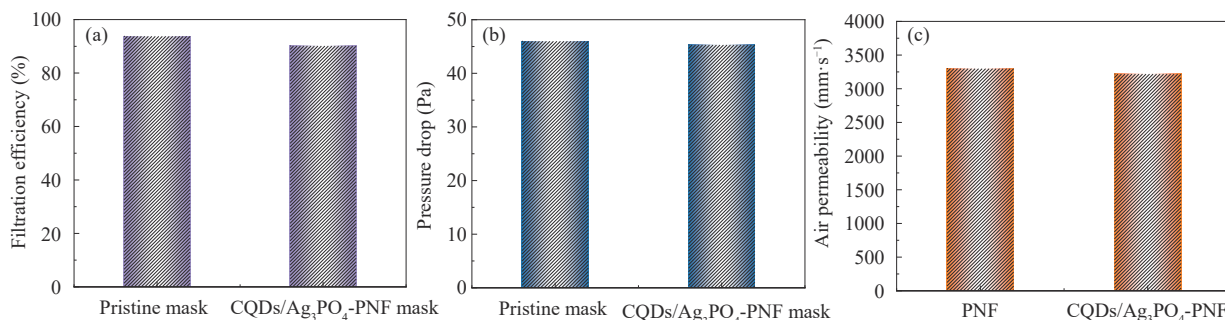


图5 PNF和CQDs/Ag₃PO₄-PNF材质口罩透气性能测试: (a) 过滤效率; (b) 压降; (c) 透气性.

Figure 5 The air permeability of PNF and CQDs/Ag₃PO₄-PNF pristine mask: (a) filtration efficiency; (b) pressure drop; (c) breathability.

3.4 光催化活性物种测定

为深入探究CQDs/Ag₃PO₄复合材料的光催化灭菌机理, 实验以罗丹明B为模型污染物, 结合电子顺磁共振 (EPR) 捕获实验和猝灭实验进行了系统分析^[18-19]。图6(a)中的EPR捕获实验结果表明, 在CQDs/Ag₃PO₄复合材料的光催化过程中, 未能观察到羟基自由基 (·OH)、超氧自由基 (·O₂) 及单线态氧 (¹O₂) 的产生。尽管上述3种活性氧物种被视作光催化材料的主要活性物种, 但在CQDs/Ag₃PO₄复合材料中并非主

要的光催化活性物种。为进一步验证光生载流子的作用机制, 采用乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-2Na) 和硝酸银 (AgNO₃) 分别作为光生空穴 (h⁺) 和光生电子 (e⁻) 的捕获剂。如图6(b)所示, 在加入空穴捕获剂EDTA-2Na后, 罗丹明B降解反应几乎停止, 表明光生空穴在催化反应中起主导作用, 是灭菌过程中的主要活性物种。

结合以上实验结果, 可以推测2% CQDs/Ag₃PO₄复合材料的光催化机理, 如图6(c)所示, 可见光 (波长<530 nm) 照射到复合材料表面时,

Ag_3PO_4 中的光生电子会从价带 (VB) 跃迁至导带 (CB), 从而形成电子-空穴对。负载在 Ag_3PO_4 上的 CQDs 能够吸收波长 $>530\text{ nm}$ 的可见光, 并通过熵转换荧光效应将短波长光发射出来, 这些短波长光进一步激发 Ag_3PO_4 , 促进生成更多的光生载流子。通过上述机制, CQDs 在光催化反应中起到了增强光响应的作用, 光生空穴会

迁移到催化剂表面, 参与污染物的氧化降解和灭菌过程, 而光生电子则迅速转移至 CQDs 中被存储, 从而有效抑制电子-空穴对的复合, 进一步提升光催化反应效率。因此, CQDs 在本反应中不仅增强了可见光的吸收, 还有效促进了载流子的分离和迁移, 从而提升复合材料的光催化灭菌能力。

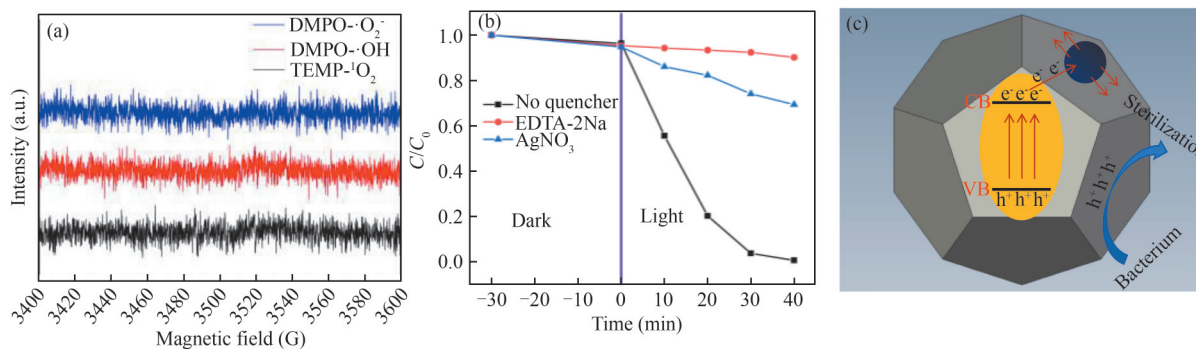


图6 2% CQDs/ Ag_3PO_4 在光照条件下的EPR图(a)、猝灭实验(b)及光催化机理图(c)。

Figure 6 EPR spectra (a), quenching experiments (b), and proposed photocatalytic mechanism (c) of 2% CQDs/ Ag_3PO_4 under light.

4 结论

改性聚丙烯非织造布 CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF 能够在可见光照射下产生大量的光生空穴, 具有优良的光催化抗菌性能。助催化剂 CQDs 不仅作为“激发器”增强 Ag_3PO_4 对可见光的吸收, 还作为电子阱捕获并储存光生电子, 抑制光生载流子复合并避免了光腐蚀, 通过熵转换荧光效应进一步

激发 Ag_3PO_4 生成更多的光生载流子, 从而显著提升其抑菌性能。实验结果表明, 2% CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF 在可见光照射下灭菌效率高达 89.49%, 且具有较好的长效稳定性。改性后的非织造布 CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF 过滤效率为 90.17%, 压降为 45.3 Pa, 并没有出现明显的下降。该方法操作简便, 所制备的抑菌非织造布口罩能有效降低一次性口罩使用产生的环境与经济成本, 具有较大的应用潜力。

参考文献

- Zhou X, Tian L, Wu H T, et al. Reusable and self-sterilization mask for real-time personal protection based on sunlight-driven photocatalytic reaction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, **2024**, 466: 133513.
- 魏玮, 戴一鸣, 石瑾. 一种高透气性杀菌口罩内膜的制备及其抗菌性能的研究[J]. *江西化工*, **2021**, 37(6): 95-99.
- 杜汶骏. 静电纺丝制备口罩用抗菌空气过滤材料的研究[D]. 上海: 东华大学, **2023**.
- Antonio M A, Vanessa M, Luis C, et al. Characterization and photocatalytic activity of TiO_2 nanoparticles on cotton fabrics, for antibacterial masks[J]. *Applied Nanoscience*, **2022**, 12(12): 11-14.
- ElZorkany E H, Youssef T, Mohamed B M, et al. Photothermal versus photodynamic treatment for the inactivation of the bacteria *Escherichia coli* and *Bacillus cereus*: An in vitro study[J]. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **2019**, 27: 317-326.
- Hu X J, Zhang H, Wang Y T, et al. Synergistic antibacterial strategy based on photodynamic therapy: Progress and perspectives[J]. *Chemical Engineering Journal*, **2022**, 450: 138129.
- Chao P, Hua Y, Li Z, et al. Prophylactic vaccine delivery systems against epidemic infectious diseases[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **2021**, 176: 113867.
- Xu J W, Yao K, Xu Z K. Nanomaterials with a photothermal effect for antibacterial activities: An overview[J]. *Nanoscale*, **2019**, 11(18): 8680-8691.

- 9 张辉, 周权, 唐玉柱, 等. 负载型纳米 TiO_2/Al 光催化降解丙酮[J]. 江南大学学报 (自然科学版), **2008**, 7(6): 730-733.
- 10 顾卓良, 赵伟荣, 王海强, 等. 玻纤负载纳米 TiO_2 光催化降解气相苯[J]. 江南大学学报 (自然科学版), **2008**, 7(2): 239-243.
- 11 徐阳, 魏取福, 汪莹莹, 等. 负载纳米 TiO_2 的纯棉抗菌织物[J]. 江南大学学报 (自然科学版), **2007**, 6(4): 474-477.
- 12 叶远丽, 李飞, 冯志忠, 等. 纺织品抗菌整理研究进展[J]. 服装学报, **2018**, 3(1): 1-8.
- 13 Ma J F, Zou J, Li L Y, et al. Synthesis and characterization of Ag_3PO_4 immobilized in bentonite for the sunlight-driven degradation of Orange II[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2013**, 134:1-6.
- 14 Yang X F, Qin J L, Yan J, et al. Fabrication of $\text{P25}/\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{graphene oxide}$ heterostructures for enhanced solar photocatalytic degradation of organic pollutants and bacteria[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2015**, 166:231-240.
- 15 Reddy A L M, Srivastava A, Gowda S R, et al. Synthesis of nitrogen-doped graphene films for lithium battery application[J]. *Acs Nano*, **2010**, 4(11): 6337-6342.
- 16 Chen X, Liu Q, Wu Q L, et al. Incorporating graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) quantum dots into bulk-heterojunction polymer solar cells leads to efficiency enhancement[J]. *Advanced Functional Materials*, **2016**, 26(11): 1719-1728.
- 17 Liu L, Qi Y H, Lu J R, et al. A stable $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{g-CN}$: Hybrid core@shell composite with enhanced visible light photocatalytic degradation[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2016**, 183: 133-141.
- 18 Miao X L, Yue X Y, Ji Z Y, et al. Nitrogen-doped carbon dots decorated on $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ photocatalyst with improved visible light photocatalytic activity and mechanism insight[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, **2018**, 227: 459-469.
- 19 Zheng N C, Li L J, Tang X H, et al. Spontaneous formation of low valence copper on red phosphorus to effectively activate molecular oxygen for advanced oxidation process[J]. *Environmental Science & Technology*, **2023**, 57 (12): 5024-5033.

Research paper

Preparation and Performance Study of Photocatalytic Antibacterial Modified Polypropylene Non-woven Fabric

ZHAO Yu-qin^{1*}, WANG Yi²

(¹The City Vocational College of Jiangsu, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China; ²Energy Conservation and Environmental Protection Functional Materials Technology Co., Ltd., Yancheng 224002, China)

Abstract Masks play an important role in protecting against toxic substances and pathogenic microorganisms. However, large amounts of disposable masks brought environmental problem. In the article, CQDs/ Ag_3PO_4 was loaded on polypropylene non-woven fabric, which could achieve antimicrobial function under visible-light irradiation. The experimental results indicated that co-catalyst not only strengthened the visible-light achievement but also captured the photogenerated carriers, which prevented the photo-corrosion and carriers recombination. Besides, CQDs could further promote Ag_3PO_4 for generation of more photo-generated carriers via entropy conversion fluorescence effect. A large number of strong oxidizing photogenerated holes have an antibacterial effect, which makes CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF inactivate pathogenic bacteria with high efficiency up to 89.49%, and has good stability. More importantly, loading of CQDs/ Ag_3PO_4 on polypropylene non-woven fabric did not show adverse effect on the filtration and breathability performance. Therefore, CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF can effectively prolong the lifetime of disposable masks for reducing the generation of solid wastes, thus shows great potential in application.

Keywords Modified polypropylene non-woven fabric, CQDs/ Ag_3PO_4 -PNF, Photocatalysis, Antibacterial properties

* Corresponding author: ZHAO Yu-qin., E-mail: zhaoyuqinnju@163.com.