

光催化杀菌技术的机理、影响因素及应用前景研究

李园园, 文 文, 王朝林, 张冰雪, 郑昕雨, 曹雅雯, 张竞月, 胡沥心, 黄娅妮*, 蒋文明*

重庆化工职业学院环境与质量检测学院, 重庆

收稿日期: 2026年1月17日; 录用日期: 2026年3月16日; 发布日期: 2026年3月30日

摘 要

光催化杀菌技术凭借杀菌高效、环境安全、抗菌谱广的优势, 突破了化学消毒、紫外线照射等传统杀菌手段的局限, 成为当下抗菌领域的研究热点。本文以光催化杀菌技术为研究对象, 系统阐述了ROS诱导氧化应激、金属离子释放、机械损伤三类核心杀菌机理; 分析了TiO₂、ZnO、Bi₂O₃、石墨相氮化碳等典型光催化材料的杀菌性能与光物理、光化学过程; 归纳了光催化剂自身特性、光源条件、反应环境、细菌自身属性等影响杀菌效率的关键因素; 同时总结了掺杂、贵金属沉积、半导体复合、表面修饰等光催化材料改性方法及改性对杀菌效率的提升作用。

关键词

光催化杀菌技术, 杀菌机理, 影响因素, 材料改性

Mechanism, Influencing Factors and Application Prospects of Photocatalytic Sterilization Technology

Yuanyuan Li, Wen Wen, Chaolin Wang, Bingxue Zhang, Xinyu Zheng, Yawen Cao, Jingyue Zhang, Lixin Hu, Yani Huang*, Wenming Jiang*

School of Environment and Quality Inspection, Chongqing Chemical Industry Vocational College, Chongqing

Received: January 27, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李园园, 文文, 王朝林, 张冰雪, 郑昕雨, 曹雅雯, 张竞月, 胡沥心, 黄娅妮, 蒋文明. 光催化杀菌技术的机理、影响因素及应用前景研究[J]. 材料科学, 2026, 16(3): 178-186. DOI: 10.12677/ms.2026.163064

Abstract

Photocatalytic sterilization technology offers advantages such as high sterilization efficiency, environmental safety, and a broad antibacterial spectrum. It overcomes the limitations of traditional sterilization methods, including chemical disinfection and ultraviolet irradiation, and has become a research hotspot in the field of antibacterial technology. This paper focuses on photocatalytic sterilization technology and systematically explains three core sterilization mechanisms: reactive oxygen species (ROS)-induced oxidative stress, metal ion release, and mechanical damage. Additionally, the bactericidal properties, photophysical characteristics, and photochemical processes of typical photocatalytic materials-such as TiO_2 , ZnO , Bi_2O_3 , and graphitic carbon nitride-are analyzed. Key factors affecting sterilization efficiency, including photocatalyst characteristics, light source conditions, reaction environment, and bacterial properties, are also summarized. Finally, modification methods for photocatalytic materials-such as doping, precious metal deposition, semiconductor composites, and surface modification-are reviewed, along with their impact on improving sterilization efficiency.

Keywords

Photocatalytic Sterilization Technology, Sterilization Mechanism, Influencing Factor, Material Modification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

随着人们健康卫生意识提升,化学消毒、紫外线照射等传统杀菌方法的局限性凸显,光催化杀菌技术应运而生。该技术起源于20世纪70年代,科学家发现 TiO_2 等半导体材料在光照下可产生强氧化性活性氧物质,借助掺杂、表面修饰等手段可提升材料性能,增强杀菌活性。其具有无需化学试剂、无二次污染、广谱杀菌等优势,能高效杀灭多种微生物[1]-[4],且无有害残留、适用场景广泛,在多领域具备应用潜力[5][6]。

尽管光催化杀菌技术优势显著,但仍面临材料稳定性、成本及规模化应用等挑战。为此,本研究提出开发新型高效稳定材料、优化反应器设计、探索技术耦合应用等改进策略[3]。我们相信,随着相关学科发展,该技术将在环境保护、公共卫生和人类健康等领域发挥越来越重要的作用,为各相关行业提供优质卫生保障方案。

2. 杀菌机制及典型光催化材料的抗菌性能

2.1. 光催化杀菌机理

目前,无机抗菌材料的抗菌机制尚未形成统一定论,但学界普遍将其归纳为三类核心方式,分别是金属离子释放杀菌、ROS引起的氧化应激和机械损伤,如图1所示[7][8]。

第一类是ROS诱导的氧化应激,部分无机抗菌材料在光照或外界能量激发下,内部电子发生跃迁,进而引发氧化还原反应,生成具有抗菌活性的活性氧(ROS),如图2所示。ROS主要包括羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$),以及过氧化氢(H_2O_2)、单线态氧($^1\text{O}_2$)等活性氧物种,其中 $\cdot\text{OH}$ 是氧化性最强的

杀菌活性物种。ROS 的杀菌过程可分为三个阶段：光照激发产生的载流子与空气中的水、氧气作用，生成高氧化性 ROS，直接作用于细菌细胞膜与细胞壁；过量 ROS 破坏细胞膜完整性，导致膜破裂、细胞结构受损，逐步丧失生理活性；最终胞内物质外泄，细菌彻底失活[9]。初期 ROS 主要损伤细胞膜外层，改变膜通透性，为后续纳米粒子进入细胞创造条件；纳米粒子进入后通过脂质过氧化进一步破坏细胞质膜，最终导致细菌死亡[10]。

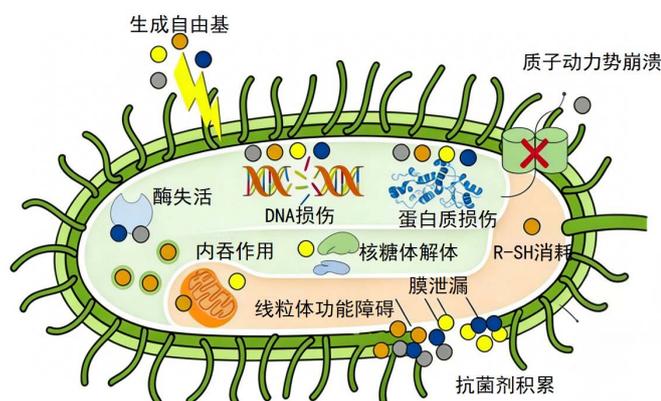


Figure 1. Photocatalytic sterilization mechanism

图 1. 光催化杀菌机理

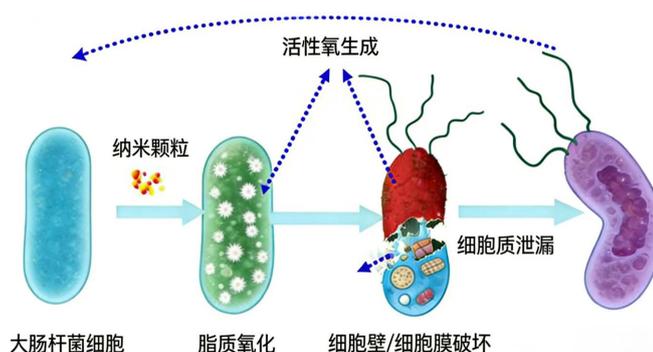


Figure 2. ROS sterilization mechanism [9]

图 2. ROS 杀菌机制[9]

第二类是金属离子释放杀菌。部分无机抗菌材料含 Cu、Zn、Ag 等抗菌活性金属离子，会从材料表面以缓释形式逐渐溶出。因细菌细胞膜带负电，带正电的金属离子通过静电作用吸附于膜表面，破坏膜内外离子平衡，阻碍细菌必需物质转运[11][12]。进入细菌内部后，金属离子与蛋白质中 N、O 元素发生络合反应，破坏蛋白质分子原本的空间构象，破坏蛋白质分子原本的空间构象，干扰 DNA 复制、氨基酸代谢等过程，破坏酶系统，导致细菌失去生理功能死亡。此外，金属基纳米粒子还可作为催化剂，对有机配体具有降解作用，辅助破坏细菌生存环境或生理结构，进一步强化杀菌效果，如图 3 所示[13][14]。

第三类是机械损伤抗菌。部分材料凭借表面纳米级粗糙度、特定形貌等微结构特征，对细菌产生机械力作用力，破坏细胞膜结构，该机制不依赖离子释放或 ROS 氧化，还能有效抑制耐药菌。通过调控合成条件可获得杆状、花瓣状等不同形貌材料，当细菌与材料表面不均匀纹理或粗糙边角接触时，细胞膜会因受力不均发生皱缩、变形甚至破裂，导致细胞内物质外流死亡。如 ZnO [15]-[17]、花瓣状 SnO₂ [18] 等对细菌的机械损伤更为显著，透射电镜可观察到细菌细胞壁出现明显破损[15]-[18]。

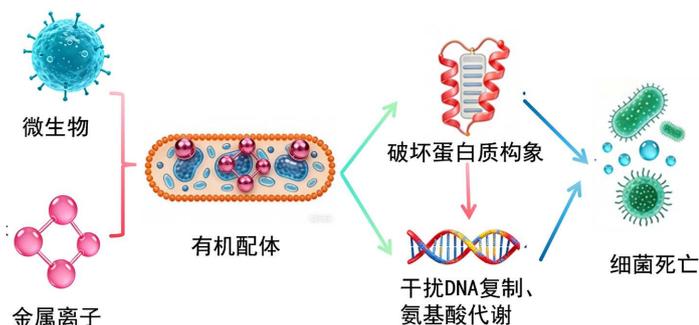


Figure 3. Antibacterial mechanism of metal ions [14]

图 3. 金属离子杀菌机制[14]

2.2. 典型光催化材料的杀菌表现与应用特性

TiO_2 、 ZnO 、 Bi_2O_3 、石墨相氮化碳($\text{g-C}_3\text{N}_4$)聚合物等典型光催化材料的杀菌表现与应用特性如下[19][20]:

TiO_2 杀菌能力强: 在紫外光照射下, TiO_2 价带电子跃迁至导带, 形成电子 - 空穴对, 产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$)等活性氧物种。这些自由基氧化能力强, 能破坏细菌细胞壁、细胞膜, 还可进入细菌内部氧化核酸、蛋白质和酶等生物大分子, 对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草杆菌黑色变种芽孢、乙肝表面抗原等都有显著的杀灭或降解效果。以纳米 TiO_2 /硅丙复合乳液为例, 其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草杆菌黑色变种芽孢的杀灭效果显著, 灭杀率均能达到 98% 以上[21]。同时它的化学性质稳定: 不易在光催化杀菌过程中发生自身的化学变化, 可长期保持催化活性, 能持续发挥杀菌作用, 且不会产生二次污染, 安全性高[22]。

ZnO 光催化活性较高: 与 TiO_2 类似, 在光照下 ZnO 也能产生电子 - 空穴对, 进而生成具有氧化性的羟基自由基等活性物质来杀菌。如聚多巴胺包被的水热碳化物异质结光催化剂, 在光照和黑暗条件下, 对大肠杆菌的抑菌率均超过 90%。此外, 该材料抗菌范围较广, 可有效抑制并杀灭包括大肠杆菌、金黄色葡萄球菌在内的多种细菌、真菌等微生物[23]。

Bi_2O_3 可见光响应良好: 能在可见光部分波段下表现出光催化活性, 拓宽了光催化杀菌的可用光源范围, 在实际应用中更具便利性。同时与其他材料协同性好: Bi_2O_3 与 TiO_2 等其他光催化材料复合后, 可产生协同效应, 提高光催化杀菌性能。若将 Bi_2O_3 掺杂至 TiO_2 中, 能够扩大 TiO_2 对光的吸收谱段, 提升其光催化反应效率, 进而强化该复合体系的杀菌能力[24]。

石墨相氮化碳($\text{g-C}_3\text{N}_4$)作为典型的非金属聚合物光催化材料, 具有可见光响应、原料廉价易得、生物相容性好等优势, 在抗菌领域展现出较大应用潜力。但其本征材料存在光生载流子复合率高、表面活性位点不足的问题, 导致纯 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 的光催化杀菌效率偏低, 需通过复合改性优化其性能。研究表明, 与半导体 SiC 构筑异质结是有效的改性手段: SiC 具有适宜的带隙、优异的耐腐蚀性与环境友好性, 二者复合后可形成内建电场, 显著促进光生电子 - 空穴对的分离, 大幅提升 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 基材料的杀菌活性[25]-[28]。

3. 光催化杀菌效率的影响因素

3.1. 光催化剂自身特性

光催化材料自身的固有属性为核心影响因子, 不同类型的光催化剂在光吸收表现、电子 - 空穴对的分离效率及抗菌活性上均有明显区别, 如 TiO_2 化学性质稳定、催化活性高、价廉无毒且应用广泛, ZnO 虽然光催化活性较高, 但存在一定光腐蚀现象, 长时间光照易发生晶格溶解与离子流失, 从而降低稳定

性与长效抗菌效果[7]。以 TiO_2 为例，锐钛矿型比表面积大、活性高，产生活性物种能力强，金红石型则稳定性佳但活性较低。粒径越小，比表面积与活性位点越多，电子-空穴对扩散距离越短，复合概率降低，杀菌效率越高；表面粗糙度、孔隙率及羟基(-OH)、氧空位等活性位点，也能提升吸附性能与杀菌效能[3]。

3.2. 光源条件

光源条件直接决定催化效果。不同光催化剂有最佳吸收波长，如 TiO_2 在紫外光波段(250~380 nm)活性较好，可见光响应型催化剂可在自然光下起效[29]。光照强度提升能增多电子-空穴对与活性氧，延长光照时间可让活性物质充分反应，二者均利于提高杀菌效率[10]。

3.3. 反应环境因素

反应环境参数影响光催化进程。适度升温可加快界面传质与载流子迁移，提升反应速率；但温度过高会加速光生载流子复合、降低反应物吸附量，反而抑制杀菌效率；适宜湿度促进羟基自由基($\cdot\text{OH}$)生成，过高会形成水膜阻碍反应。适宜浓度的氧气作为电子捕获体，能抑制电子-空穴对复合、强化氧化能力。pH 值通过改变催化剂与细菌表面电荷、影响活性氧生成，间接调控杀菌效果[3]。

3.4. 细菌自身因素

不同种类的细菌在细胞壁结构、细胞膜组成及内部生物化学反应等方面存在差异，对光催化产生的活性氧物种的敏感性也有所不同。一般情况下，相较于革兰氏阳性菌，革兰氏阴性菌对光催化抗菌剂更为敏感，原因在于革兰氏阴性菌外壁脂多糖层较薄，更易受到活性氧攻击；而革兰氏阳性菌具有较厚肽聚糖层，耐受性相对更高[7]。细菌浓度过高时，光催化剂产生的活性氧物种有限，难以在短时间内杀灭所有细菌，单位时间内的杀菌率可能会降低[6]。

4. 光催化材料改性对杀菌效率的影响

为解决纯 TiO_2 、 ZnO 等无机抗菌材料带隙宽、光生载流子复合快、可见光利用率低等问题，需通过改性优化其性能，来提高其杀菌效率。

4.1. 掺杂对杀菌效率的影响

离子掺杂分为金属掺杂、非金属掺杂及共掺杂三类。金属掺杂常用 Fe、Cu、Mn 等过渡金属[30]-[32]，或 Ce、La、Er 等稀土元素；非金属掺杂以 N、C、S、F 等周期表中 O 附近元素为主；共掺杂则通过金属-非金属、稀土-过渡金属等多元组合实现协同改性。研究表明[33]，相较于纯 TiO_2 ，经掺杂或复合改性后的 TiO_2 材料，光催化活性与抗菌性能均实现显著提升。在 Cu、Ce、Zn 三元掺杂体系中，600°C 煅烧样品的带隙宽度最窄，光催化活性最优，且在该研究中的掺杂量与煅烧温度范围内，抗菌性能随 Zn 掺杂量增加与煅烧温度升高呈逐步增强趋势；在惰性气氛煅烧的 Cu_2O 复合改性的 Ce、Zn 共掺体系中，450°C 与 600°C 煅烧样品的可见光吸收范围显著拓宽，其中 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C}_3\text{Z}_3\text{-TiO}_2$ 的带隙最小，光催化性能表现最为优异。

4.2. 贵金属沉积对杀菌效率的影响

贵金属沉积是 TiO_2 、 ZnO 光催化剂的重要修饰手段，常用于 Pt、Ag、Au、Pd 等贵金属。这类贵金属具有高耐腐蚀性和抗氧化性，一方面，其纳米粒子功函数高、费米能级低，可作为电子接收器，使 TiO_2 、 ZnO 表面的光生电子向其迁移，直至费米能级平衡，从而加快电荷转移，抑制载流子复合；另一方面，

部分贵金属的表面等离子体共振效应能增强材料光吸收，通过局域电场增强效应提升对光能的利用率，显著改善光催化活性[34]-[38]。

4.3. 半导体复合对杀菌效率的影响

半导体复合是近年来光催化领域的高效改性技术，通过复合不同带隙的半导体材料，利用其能级差异产生协同效应。由于不同半导体的导带、价带位置不同，载流子可在二者间跨界面迁移，大幅降低电子-空穴复合速率，提升电荷分离效率。此外， TiO_2 、 ZnO 与窄带隙半导体复合后，能有效拓宽光吸收范围，降低带隙能量，更充分地利用太阳光，为其在抗菌、污染物降解等领域的应用提供更优性能支撑[39]-[42]。

4.4. 表面修饰对杀菌效率的影响

表面修饰可通过改变表面性质与构建异质结构提升光催化杀菌效率。改变表面性质主要体现在两方面：一是提高光生电荷分离效率，如用 Nafion 修饰 TiO_2 ，能促进可见光下腐殖酸与 TiO_2 界面敏化电子迁移，提升光生电子还原氧效率及光催化产 H_2O_2 能力， H_2O_2 进一步分解产生 $\cdot\text{OH}$ 发挥杀菌作用[43]，二是增强细菌吸附能力，通过修饰使材料表面更粗糙或引入特定官能团，增加与细菌的接触，如多孔结构硫掺杂石墨氮化碳纳米片，依托大比表面积暴露更多活性位点，在光催化与纳米酶协同作用下抗菌效率达 100%。此外，在材料表面构筑纳米异质结构也属于表面修饰的范畴，可进一步促进电荷转移并拓宽光吸收范围，如 CdS 与 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 经高温焙烧形成的异质结，能高效分离光生电子-空穴对，使复合材料在可见光下短时间内杀灭大肠杆菌[44]， $\text{g-C}_3\text{N}_4$ - Zn-NC 等异质结构可扩大吸收光谱，同步促进载流子转移分离，有效杀灭耐甲氧西林金黄色葡萄球菌。

5. 光催化杀菌技术的应用前景和挑战

5.1. 应用前景

光催化杀菌技术应用前景广阔，覆盖多领域场景。医疗领域可用于医院手术室、病房等环境及医用导管、手术设备消毒，持续杀菌抗病毒，降低交叉感染风险。水处理领域能降解染料、农药等有机污染物，杀灭水中微生物，适用于家庭净水器、自来水厂深度处理。食品行业可对加工设备、包装材料消毒，保障食品安全、延长保质期。空气净化领域可分解甲醛、苯等有害气体，除味杀菌并释放氧气，适配家庭、办公室等场所。公共卫生领域能快速杀灭人员密集场所的病原体，预防传染病传播。

5.2. 光催化杀菌技术应用的挑战

光催化杀菌技术实际应用面临多重挑战。催化剂性能存在局限，常用 TiO_2 主要吸收紫外光，太阳光利用率低，改性后光吸收范围拓展效果有限，且光生电子与空穴易复合，降低杀菌效率。应用成本偏高制约规模化推广，高性能材料制备复杂、耗材昂贵，配套光源与反应装置投资较大[45]。实际环境中，温湿度、酸碱度会破坏催化剂结构性能，有机污染物还会与细菌竞争活性位点。此外，反应中间产物可能存在健康风险，相关法规标准不完善，阻碍技术推广。

5.3. 光催化杀菌技术应用的改进策略

光催化杀菌技术的应用改进可从材料、反应器、耦合技术三方面推进。新型光催化材料开发是核心，需聚焦三类材料：一是拓展光吸收范围材料，如铋系半导体材料，其在可见光区有强吸收和优良催化活性，可通过优化制备方法、掺杂负载、构建异质结进一步提升性能；二是高光量子效率材料，通过设计特殊能带与晶体结构，提升载流子分离效率和迁移速率，如低温煅烧制备的三明治结构复合纳米片，显

著提高杀菌效率；三是多功能材料，整合光催化与吸附、自清洁等功能，通过先吸附细菌再杀菌的模式强化效果[44]。

反应器设计优化需兼顾光能利用率、传质效率与稳定性。光能利用上，选用适配光源的催化剂，优化粒径形貌提升光捕获能力，引入光散射介质延长光传播路径；传质效率方面，优化进出口设计减少涡流死区，通过导流板、流道改造优化流场，同时增强催化剂吸附性能；稳定性上，采用透光稳定材料制作外壳，合理控制反应温湿度，为催化剂提供良好环境。

耦合技术应用可实现效能跃升，主要有三类模式：与其他杀菌技术联用，如光催化-臭氧联用，借助活性物质促进臭氧分解，生成更多高活性氧物种；与生物处理技术耦合，在生物膜反应器等系统中引入光催化材料，降解难降解污染物并杀灭有害微生物；与物理分离技术集成，结合膜分离、吸附分离等手段，及时分离产物避免反应抑制，同时回收催化剂，保障连续稳定运行[12]。

6. 结尾

光催化杀菌技术以其绿色无残留、广谱高效的核心优势，成为突破传统杀菌技术局限的重要方向。本文系统梳理了其杀菌机理、关键影响因素及材料改性路径，TiO₂、ZnO 等材料的特性与应用潜力得到充分印证。尽管该技术在催化剂性能、规模化成本及复杂环境适应性上仍面临挑战，但新型材料研发、反应器优化与多技术耦合等策略已为突破瓶颈提供了有效路径。随着跨学科技术的深度融合，光催化杀菌技术必将在公共卫生、生态环保、食品医疗等领域实现更广泛的产业化应用，为守护人类健康与可持续发展注入持久科技动力。

基金项目

校级学生创新创业项目(HZY202414315003)；重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202204503)。

参考文献

- [1] Vishwakarma, A., Dang, F., Ferrell, A., Barton, H.A. and Joy, A. (2021) Peptidomimetic Polyurethanes Inhibit Bacterial Biofilm Formation and Disrupt Surface Established Biofilms. *Journal of the American Chemical Society*, **143**, 9440-9449. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c02324>
- [2] Elbourne, A., Cheeseman, S., Wainer, P., Kim, J., Medvedev, A.E., Boyce, K.J., et al. (2020) Significant Enhancement of Antimicrobial Activity in Oxygen-Deficient Zinc Oxide Nanowires. *ACS Applied Bio Materials*, **3**, 2997-3004. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00065>
- [3] 张国艳, 贾玲萍, 刘刚, 等. 用于泳池水灭菌的光催化组件的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12691-12697.
- [4] 郭全贵, 孙鹏飞, 孙丰武, 等. 养殖场石墨烯基光催化生物反应技术及灭菌除氨设备[C]//中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第四卷). 南京: 2020: 849-854.
- [5] Saidin, S., Jumat, M.A., Mohd Amin, N.A.A. and Saleh Al-Hammadi, A.S. (2021) Organic and Inorganic Antibacterial Approaches in Combating Bacterial Infection for Biomedical Application. *Materials Science and Engineering: C*, **118**, Article ID: 111382. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111382>
- [6] 王妍彦, 张宝莹, 张流波, 等. 一种光催化消毒机的消毒效果及其影响因素研究[J]. 中国消毒学杂志, 2024, 4(6): 401-403, 407.
- [7] 于欣. 光催化/酶催化协同杀菌治疗[C]//中关村汇智抗菌新材料产业技术创新联盟, 东北大学, 中国科学院金属研究所. ASTF 2023 (第 5 届)抗菌科学与技术论坛论文摘要集. 济南: 济南大学前沿交叉科学研究院, 2023: 184.
- [8] 邱海珍. 光催化杀菌技术在纸质档案保护中的应用[J]. 中华纸业, 2024, 45(11): 80-82.
- [9] 钟焕琼. 二氧化钛基纳米材料的制备及抗菌和光催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [10] Ghosh, S. and Das, A.P. (2015) Modified Titanium Oxide (TiO₂) Nanocomposites and Its Array of Applications: A Review. *Toxicological & Environmental Chemistry*, **97**, 491-514. <https://doi.org/10.1080/02772248.2015.1052204>
- [11] Le Ouay, B. and Stellacci, F. (2015) Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles: A Surface Science Insight. *Nano*

- Today*, **10**, 339-354. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.002>
- [12] Shavandi, A., Saeedi, P., Ali, M.A. and Jalalvandi, E. (2019) Green Synthesis of Polysaccharide-Based Inorganic Nanoparticles and Biomedical Aspects. In: *Functional Polysaccharides for Biomedical Applications*, Elsevier, 267-304. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102555-0.00008-x>
- [13] Zhang, H., Song, Z., Wang, D., Tong, Z. and Qin, Y. (2017) A Facile Synthetic Method of ZnO Nanoparticles and Its Role in Photocatalytic Degradation of Refractory Organic Matters. *Desalination and Water Treatment*, **90**, 189-195. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21233>
- [14] Shen, M., Forghani, F., Kong, X., Liu, D., Ye, X., Chen, S., *et al.* (2020) Antibacterial Applications of Metal-Organic Frameworks and Their Composites. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **19**, 1397-1419. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12515>
- [15] Li, Y., Niu, J., Zhang, W., Zhang, L. and Shang, E. (2014) Influence of Aqueous Media on the ROS-Mediated Toxicity of ZnO Nanoparticles toward Green Fluorescent Protein-Expressing *Escherichia coli* under UV-365 Irradiation. *Langmuir*, **30**, 2852-2862. <https://doi.org/10.1021/la5000028>
- [16] Phuruangrat, A., Siri, S., Wadbua, P., Thongtem, S. and Thongtem, T. (2019) Microwave-Assisted Synthesis, Photocatalysis and Antibacterial Activity of Ag Nanoparticles Supported on ZnO Flowers. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **126**, 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2018.11.007>
- [17] Lin, M.Z., Chen, H., Chen, W.F., Nakaruk, A., Koshy, P. and Sorrell, C.C. (2014) Effect of Single-Cation Doping and Codoping with Mn and Fe on the Photocatalytic Performance of TiO₂ Thin Films. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 21500-21511. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.013>
- [18] Wen, X., Niu, C., Zhang, L. and Zeng, G. (2017) Fabrication of SnO₂ Nanoparticles/BiOI N-P Heterostructure for Wider Spectrum Visible-Light Photocatalytic Degradation of Antibiotic Oxytetracycline Hydrochloride. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 5134-5147. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00501>
- [19] 扈莹莹, 李其轩, 刘昊天, 等. 纳米二氧化钛光催化技术抑菌机制及其在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 232-238.
- [20] Das, S., Roy, S., Bhattacharya, T.S. and Sarkar, C.K. (2021) Efficient Room Temperature Hydrogen Gas Sensor Using ZnO Nanoparticles-Reduced Graphene Oxide Nanohybrid. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 1264-1272. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3020755>
- [21] 谢锋, 郭建峰, 王海涛, 等. ZnO/CdS/Ag 复合光催化剂的制备及其催化和抗菌性能[J]. 材料研究学报, 2023, 37(1): 10-20.
- [22] 邹烈烈, 李治国, 万先凯, 等. 纳米材料在光、电催化杀菌技术中的应用进展及展望[J]. 广东化工, 2024, 51(15): 77-79, 100.
- [23] 杨苏娥. ZnO/Cu₂O 复合抗菌材料的设计及抗菌机理研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [24] 尹艳菲, 霍敬豪, 李海帅, 等. Ag/Ag₃PO₄/CNTs 复合材料的光催化杀菌性能及机理[J]. 功能材料, 2024, 55(10): 10121-10126.
- [25] Wu, X.L., Xiong, S.J., Zhu, J., Wang, J., Shen, J.C. and Chu, P.K. (2009) Identification of Surface Structures on 3C-SiC Nanocrystals with Hydrogen and Hydroxyl Bonding by Photoluminescence. *Nano Letters*, **9**, 4053-4060. <https://doi.org/10.1021/nl902226u>
- [26] Steenackers, M., Sharp, I.D., Larsson, K., Hutter, N.A., Stutzmann, M. and Jordan, R. (2009) Structured Polymer Brushes on Silicon Carbide. *Chemistry of Materials*, **22**, 272-278. <https://doi.org/10.1021/cm903051j>
- [27] Xu, H., Gan, Z., Zhou, W., Ding, Z. and Zhang, X. (2017) A Metal-Free 3C-SiC/gC₃N₄ Composite with Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity. *RSC Advances*, **7**, 40028-40033. <https://doi.org/10.1039/c7ra06497g>
- [28] Yang, J., Peng, Y., Yang, B. and Li, P. (2018) Enhanced Photocatalytic Degradation of Rhodamine B over Metal-Free SiC/C₃N₄ Heterostructure under Visible Light Irradiation. *Materials Research Express*, **5**, Article ID: 085511. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad3df>
- [29] 刘梅, 张晋波. 石墨相氮化碳的光催化应用研究[J]. 山东化工, 2023, 52(18): 180-183.
- [30] Jia, T., Wang, W., Long, F., Fu, Z., Wang, H. and Zhang, Q. (2009) Synthesis, Characterization and Luminescence Properties of Y-Doped and Tb-Doped ZnO Nanocrystals. *Materials Science and Engineering: B*, **162**, 179-184. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.04.004>
- [31] Ren, Y., Han, Y., Li, Z., Liu, X., Zhu, S., Liang, Y., *et al.* (2020) Ce and Er Co-Doped TiO₂ for Rapid Bacteria-Killing Using Visible Light. *Bioactive Materials*, **5**, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.02.005>
- [32] Lahiri, R., Ghosh, A., Dwivedi, S.M.M.D., Chakrabartty, S., Chinnamuthu, P. and Mondal, A. (2017) Performance of Erbium-Doped TiO₂ Thin Film Grown by Physical Vapor Deposition Technique. *Applied Physics A*, **123**, Article No. 573. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1180-2>

- [33] 张恒. 以 TiO₂、ZnO 为代表的纳米无机抗菌粉末的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2025.
- [34] Chen, H., Ku, Y. and Kuo, Y. (2007) Effect of Pt/TiO₂ Characteristics on Temporal Behavior of O-Cresol Decomposition by Visible Light-Induced Photocatalysis. *Water Research*, **41**, 2069-2078. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.021>
- [35] Sakthivel, S., Shankar, M.V., Palanichamy, M., Arabindoo, B., Bahnemann, D.W. and Murugesan, V. (2004) Enhancement of Photocatalytic Activity by Metal Deposition: Characterisation and Photonic Efficiency of Pt, Au and Pd Deposited on TiO₂ Catalyst. *Water Research*, **38**, 3001-3008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.04.046>
- [36] Liu, H.R., Shao, G.X., Zhao, J.F., Zhang, Z.X., Zhang, Y., Liang, J., *et al.* (2012) Worm-Like Ag/ZnO Core-Shell Heterostructural Composites: Fabrication, Characterization, and Photocatalysis. *The Journal of Physical Chemistry C*, **116**, 16182-16190. <https://doi.org/10.1021/jp2115143>
- [37] Ahmad, M., Yingying, S., Nisar, A., Sun, H., Shen, W., Wei, M., *et al.* (2011) Synthesis of Hierarchical Flower-Like ZnO Nanostructures and Their Functionalization by Au Nanoparticles for Improved Photocatalytic and High Performance Li-Ion Battery Anodes. *Journal of Materials Chemistry*, **21**, 7723-7729. <https://doi.org/10.1039/c1jm10720h>
- [38] Bo, L., *et al.* (2019) Superimposed Surface Plasma Resonance Effect Enhanced the Near-Infrared Photocatalytic Activity of Au@Bi₂WO₆ Coating for Rapid Bacterial Killing. *Journal of Hazardous Materials*, **380**, Article ID: 120818.
- [39] Yang, L., Luo, S., Li, Y., Xiao, Y., Kang, Q. and Cai, Q. (2010) High Efficient Photocatalytic Degradation of P-Nitrophenol on a Unique Cu₂O/TiO₂ P-N Heterojunction Network Catalyst. *Environmental Science & Technology*, **44**, 7641-7646. <https://doi.org/10.1021/es101711k>
- [40] Wei, S., Wang, F., Yan, P., Dan, M., Cen, W., Yu, S., *et al.* (2019) Interfacial Coupling Promoting Hydrogen Sulfide Splitting on the Staggered Type II g-C₃N₄/r-TiO₂ Heterojunction. *Journal of Catalysis*, **377**, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.07.024>
- [41] Liu, J., Yan, X., Qin, X., Wu, S., Zhao, H., Yu, W., *et al.* (2020) Light-Assisted Preparation of Heterostructured g-C₃N₄/ZnO Nanorods Arrays for Enhanced Photocatalytic Hydrogen Performance. *Catalysis Today*, **355**, 932-936. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.02.028>
- [42] Makama, A.B., Salmiaton, A., Saion, E.B., Choong, T.S.Y. and Abdullah, N. (2015) Microwave-Assisted Synthesis of Porous ZnO/SnS₂ Heterojunction and Its Enhanced Photoactivity for Water Purification. *Journal of Nanomaterials*, **2015**, Article ID: 108297. <https://doi.org/10.1155/2015/108297>
- [43] 赵璐瑶, 张佳丽, 张轲, 等. 介质阻挡放电协同 Ag-Cu/TiO₂-CS 复合光催化剂灭活生物气溶胶的实验研究[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2777-2785.
- [44] 杨晓宇, 欧晓霞, 赵可, 等. CdIn₂S₄/In₂O₃/BP 复合可见光催化剂降解 RhB 及光催化灭活大肠杆菌[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(8): 2467-2479.
- [45] 朱文慧, 谭桂芝, 吕月月, 等. 光催化技术对牡蛎肉杀菌效果及品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(5): 202-212.