

退火温度对 WO₃/CdZnS 光催化灭活铜绿假单胞菌性能的影响研究

黄敬添, 王怀宇, 李嘉诚, 王林佳, 况 正, 冯新越

青岛科技大学 山东青岛

【摘要】本研究采用水热法合成了 WO₃ 前驱体, 通过调控退火温度得到系列 WO₃ 光电极, 进一步在其表面负载 CdZnS 纳米颗粒后得到系列 WO₃/CdZnS 异质结光电极, 并研究了其对铜绿假单胞菌的灭活性能。研究发现, 400°C 退火的 WO₃ 与 CdZnS 复合后的 WO₃-400/CdZnS 在光照 40 min 后对铜绿假单胞菌的灭活率可以达到 100%。光电流密度变化曲线表明, WO₃/CdZnS 异质结的构建可以加速光生载流子的分离, 因而具有更优的光催化灭菌性能。

【关键词】WO₃/CdZnS; 异质结; 光催化; 铜绿假单胞菌

【基金项目】青岛科技大学 2025 年大学生创新训练计划项目 (S202510426020)

【收稿日期】2026 年 6 月 17 日 **【出刊日期】**2026 年 7 月 13 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20260058

Study on the Effect of Annealing Temperature on the Photocatalytic Inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* by WO₃/CdZnS

Jingtian Huang, Huaiyu Wang, Jiacheng Li, Linjia Wang, Zheng Kuang, Xinyue Feng

Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong

【Abstract】In this study, WO₃ precursors were synthesized using the hydrothermal method. A series of WO₃ photoelectrodes were obtained by adjusting the annealing temperature. After further loading CdZnS nanoparticles onto their surfaces, a series of WO₃/CdZnS heterojunction photoelectrodes were prepared, and their inactivation performance against *Pseudomonas aeruginosa* was investigated. The study found that WO₃-400/CdZnS, formed by combining WO₃ annealed at 400°C with CdZnS, achieved a 100% inactivation rate against *Pseudomonas aeruginosa* after 40 minutes of illumination. The photocurrent density curves indicated that the construction of the WO₃/CdZnS heterojunction accelerates the separation of photogenerated charge carriers, thereby exhibiting superior photocatalytic sterilization performance.

【Keywords】WO₃/CdZnS; Heterojunction; Photocatalytic; *Pseudomonas aeruginosa*

引言

铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 作为典型多重耐药致病菌, 易形成生物膜, 传统消毒方法难以彻底清除, 已成为公共卫生与环境治理领域亟待解决的难题^[1,2]。光催化技术因高效、绿色、不易诱导耐药等优势, 在微生物灭活领域备受关注。氧化钨 (WO₃) 具有可见光响应、化学稳定性好、生物相容性高等优点, 是极具潜力的光催化抗菌材料^[3,4]。然而, 纯相 WO₃ 存在载流子复合率高、光利用率低、晶相依赖性强等缺陷^[5,6], 限制了其对铜绿假单胞菌的高效清除能力。晶相调控是提升 WO₃ 光催化性能

的关键手段, 通过退火温度的调控可以优化晶相组成, 有效抑制载流子复合、提高活性氧生成效率^[7,8], 显著增强灭菌性能。

1 实验部分

1.1 不同晶相氧化钨的制备

采用水热法结合退火处理制备不同晶相 WO₃。将 1.4 g 偏钨酸铵溶于 76 mL 去离子水中, 依次加入 2.4 mL 盐酸、1.6 mL 过氧化氢, 搅拌 1 h 形成透明前驱体溶液。将预处理好的 FTO 导电玻璃放入水热釜, 加入前驱体溶液, 160°C 水热反应 4 h。自然冷却后, 将样品在马弗炉中分别于 300°C、400°C、

500°C 退火 2 h (升温速率 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$), 随炉冷却, 制得样品分别命名为 $\text{WO}_3\text{-300}$ 、 $\text{WO}_3\text{-400}$ 、 $\text{WO}_3\text{-500}$ 。

1.2 WO_3/CdZnS 异质结光催化剂的制备

以系列 WO_3 为基底, 采用水热法原位生长 CdZnS 。将 0.53 g 乙酸镉、0.40 g 乙酸锌、0.39 g 硫代乙酰胺溶于 80 mL 去离子水, 搅拌 10 min 得到前驱体溶液。将负载 WO_3 的 FTO 玻璃放入水热釜, 加入前驱体溶液, 160°C 反应 4 h。反应结束后, 用去离子水、乙醇交替冲洗, 80°C 烘干, 得到 $\text{WO}_3\text{-300}/\text{CdZnS}$ 、 $\text{WO}_3\text{-400}/\text{CdZnS}$ 、 $\text{WO}_3\text{-500}/\text{CdZnS}$ 异质结光催化剂。同时, 将 WO_3 替换为 FTO 导电玻璃制备得到 CdZnS 。

1.3 材料的表征

采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品微观形貌, 通过 VersaSTAT 3F 电化学工作站评价所制备的光电极的电流密度-时间曲线。

1.4 光催化灭菌性能测试

实验前先向光催化反应器通入冷凝水, 采用“下进上出”的通水方式以保证降温效果, 然后将所制备的材料放入光催化反应器中, 按体积比 98: 2 的比例向反应器中加入 PBS 缓冲液与菌液, 保证菌的浓度为 $3\times 10^7 \text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$, 开启搅拌使其混合均匀。在未开启光照的条件下取样, 作为 0 时刻空白样品, 然后开启光照进行光催化反应, 在光照时间为 40 min 时进行取样, 将样品稀释 10^3 倍后进行涂板, 最后将培养皿倒置放入恒温培养箱中培养 24 h。

2 结果与讨论

2.1 制备光电极的形貌表征

通过调控退火温度得到的系列 WO_3 的 SEM 如图 1a-c 所示, 系列 WO_3 均呈现纳米板状结构, 厚度和宽度略有不同。在系列 WO_3 纳米板上负载 CdZnS 后的 SEM 如图 1d-f 所示, CdZnS 纳米颗粒均匀的负载在纳米板表面。

2.2 光催化灭菌性能

为了研究退火温度对 WO_3/CdZnS 异质结光催化灭菌性能的影响, 对系列光催化剂进行了光催化灭活铜绿假单胞菌性能的测试, 结果如图 2 所示。在光照时间为 40 min 时, $\text{WO}_3\text{-400}$ 对铜绿假单胞菌的灭活率为 29%, 在不同退火温度的 WO_3 上负载 CdZnS 后, 灭菌率都得到不同程度的提升, 其中 $\text{WO}_3\text{-300}/\text{CdZnS}$ 、 $\text{WO}_3\text{-400}/\text{CdZnS}$ 和 $\text{WO}_3\text{-500}/\text{CdZnS}$ 的灭菌率分别为 96%、100%和 48%, 这可能是由于不同退火温度导致 WO_3 呈现不同晶相, 其与 CdZnS 的界面匹配性不同, 导致光生电子和空穴的分离和传输效率不同。

2.3 光电流密度-时间曲线

为了探究 WO_3/CdZnS 异质结光催化灭菌性能提升的原因, 对系列光催化剂的光电流密度-时间曲线进行了测试, 结果如图 3 所示。从图 3 中观察得到 $\text{WO}_3\text{-400}/\text{CdZnS}$ 光电极的光致电流密度最大, 表明其具有更高的电子-空穴对的分离效率, 因而更多的光生电子和空穴可以参与光催化灭菌过程。

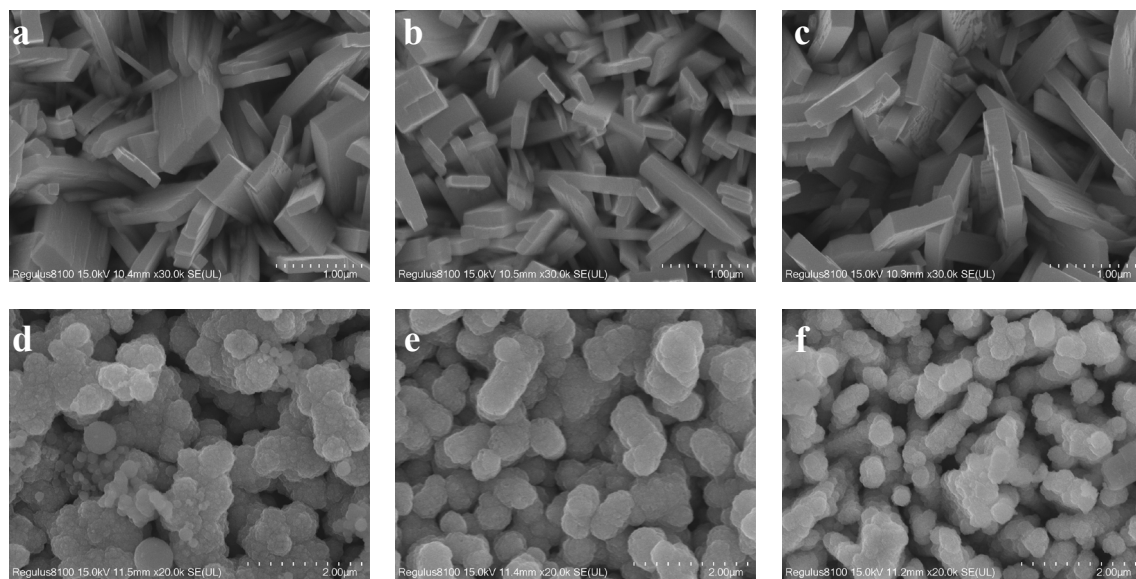


图 1 不同退火温度 WO_3 和 WO_3/CdZnS 的 SEM 图: (a) $\text{WO}_3\text{-300}$ 、(b) $\text{WO}_3\text{-400}$ 、(c) $\text{WO}_3\text{-500}$ 、(d) $\text{WO}_3\text{-300}/\text{CdZnS}$ 、(e) $\text{WO}_3\text{-400}/\text{CdZnS}$ 、(f) $\text{WO}_3\text{-500}/\text{CdZnS}$

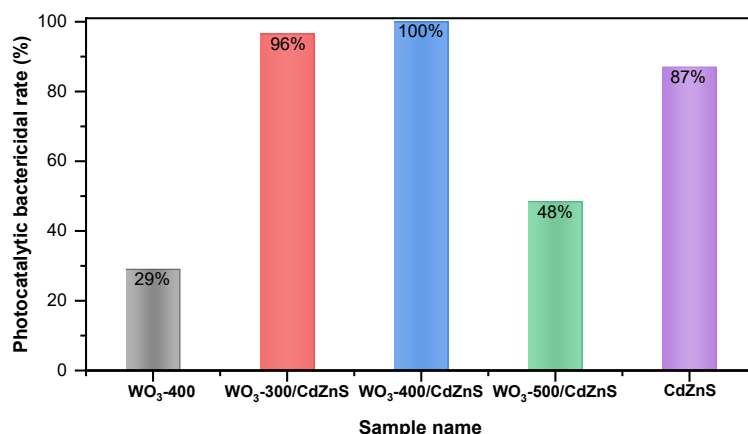


图2 系列光催化剂光催化灭活铜绿假单胞菌的结果

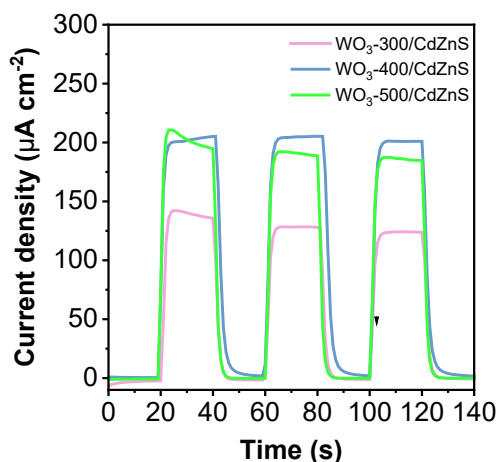


图3 系列光催化剂的光电流密度-时间曲线

3 结语

本研究采用两步水热法合成了 WO_3/CdZnS 异质结光催化剂, 并系统研究了退火温度对 WO_3/CdZnS 异质结的光催化灭活铜绿假单胞菌性能的影响。研究发现, 退火温度对 WO_3 的形貌变化影响较小, 但是复合 CdZnS 后的光催化灭菌性能却相差很大, 其中 WO_3 -400/CdZnS 具有最佳的光催化灭菌性能, 40 min 的灭菌率可以达到 100%。光电流密度变化曲线表明, WO_3/CdZnS 异质结的构建可以加速光生载流子的分离, 因而具有更优的光催化灭菌性能。

参考文献

- [1] Wang Guomin, Feng Hongqing, Hu Liangsheng, et al. An antibacterial platform based on capacitive carbon-doped TiO_2 nanotubes after direct or alternating current charging, *Nature Communications*, 2018, 9(1), 2055.
- [2] Zhu Minshen, Meng Wenjun, Huang Yan, et al. Proton-Insertion-Enhanced Pseudocapacitance Based on the Assembly Structure of Tungsten Oxide, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(21), 18901-18910.
- [3] Tian Jing, Cheng Yuanhang, Zhang Zhenyu, et al. Photogenerated carrier-directed modulation of $\text{WO}_3/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ Z-scheme heterojunction for marine anti-corrosion and anti-fouling, *npj Materials Degradation*, 2025, 9(1), 163.
- [4] Cheng Yuanhang, Zhou Yang, Zhang Zhenyu, et al. 1D/2D $\text{WO}_3/\text{Bi}_2\text{MoO}_6$ Z-Scheme heterojunction photocatalytic for efficient photocatalytic removal of microorganisms, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(3), 116368.
- [5] Tian Jing, Chen Zhuoyuan, Feng Chang, et al. Fabrication of two-phase WO_3 nanorod photoelectrode and its enhanced photoinduced cathodic protection performance,

Materials Letters, 2021, 292, 129674.

- [6] Dang Jin, Tian Jing, Liu Wenlong, et al. Weibing Li, Bifunctional WO₃/CdZnS heterojunction photoelectrodes for efficient and sustainable anticorrosion and antifouling, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 728, 138763.
- [7] Yu Haidong, Wang Mingxi, Yan Jiabao, et al. Complete mineralization of phenolic compounds in visible-light-driven photocatalytic ozonation with single-crystal WO₃ nanosheets: Performance and mechanism investigation,

Journal of Hazardous Materials, 2022, 433, 128811.

- [8] Tian Jing, Qian Feng, Cao Meijing, et al. A Mo doping WO₃/CdZnS heterojunction photoelectrode for boosting electron storage capacity, Applied Surface Science, 2023, 634, 157680.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS