环境效应与防护

光催化剂 AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃的结构 表征及其抗菌防污性能

徐会会^{1,2,3,4},张杰^{1,2,4},吕仙姿^{1,2,4},牛天杰¹,曾宇翔¹, 段继周^{1,2,4},侯保荣^{1,2,4}

(1.中国科学院海洋研究所,中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室,山东 青岛 266071; 2.海洋科学与技术试点国家实验室,海洋腐蚀与防护开放工作室,山东 青岛 266237;3.中国科学院大学,北京 100049;4.中国科学院海洋大科学研究中心,山东 青岛 266071)

摘要:目的 制备新型的光催化复合材料,提高其光催化性能。方法 通过水热法和原位生长法制备不同摩尔比的 AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃光催化剂。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)和高分辨透射电子显微镜(HRTEM)等一系列手段对所制备的光催化剂进行表征,并以可见光为光源,有机污染物罗丹明B(RhB)为降解对象,进行光催化活性测试,考察不同复合量的光催化剂对反应活性的影响。同时,以铜绿假单胞菌细胞、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌为模式菌,进行抗菌试验考察光催化剂的杀菌性能。结果 该复合材料通过 AgVO₃ 的(501)晶面、Ag₂MoO₄ 的(311)面和 AgBr 的(200)晶面紧密连接。在罗丹明 B(RhB) 溶液中加入该复合材料,120 min 内降解率达到了 94.9%,而纯 AgVO₃ 的降解率为 7.8%,说明复合后的材料光催化性能明显提高。此外,在光催化杀菌实验中,超过 99.99%的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假 单胞菌细胞均在 90 min 内被杀死。结论 复合后的 AgBr/Ag₂MoO₄@ AgVO₃ 异质结光催化剂具有优异的光 催化降解性能、杀菌性能和稳定性,该催化剂对于环境污染的治理以及海洋杀菌防污处理都起到一定的作用。

关键词:光催化;降解;杀菌;防污 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.000 中图分类号:TJ04 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2019)05-0065-07

Structural Characterization and Its Antibacterial and Antifouling Properties of AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃ Photocatalyst

XU Hui-hui^{1,2,3,4}, ZHANG Jie^{1,2,4*}, LYU Xian-zi^{1,2,4}, NIU Tian-jie¹, ZENG Yu-xiang¹, DUAN Ji-zhou^{1,2,4}, HOU Bao-rong^{1,2,4}

 Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: Objective To prepare novel photocatalytic composite material and improve its photocatalytic performance.

收稿日期: 2019-02-04; 修订日期: 2019-03-05

作者简介:徐会会(1994—),女,河南人,硕士研究生,主要研究方向为光催化防污。

• 65 •

基金项目:国家自然科学基金 (No. 41376003);中国科学院战略性先导科技专项 (XDA13040405)

通讯作者:张杰(1976—),男,山东人,博士,研究员,主要研究方向为海洋污损防护。

Methods AgBr / Ag₂MoO₄ @ AgVO₃ photocatalysts with different molar ratios were prepared with hydrothermal process and in situ growth method. The morphology and structure of AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃ nanocomposites were revealed by X-ray powder diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and high resolution transmission electron microscopy (HRTEM). The organic pollutant rhodamine B (RhB) was taken as the degradation target to carry out photocatalytic activity tests to investigate effects of photocatalytic performance with composite materials of different molar ratios under visible light irradiation. At the same time, *P. aeruginosa*, *S. aureus* and *E. coli* were used as model bacteria to carry out antibacterial tests to investigate the bactericidal properties of the photocatalysts. **Results** The composites were tightly connected by the (501) lattice plane of AgVO₃, the (311) plane of Ag₂MoO₄, and the (200) lattice plane of AgBr. The photodegradation rate for Rhodamine B (RhB) reached 94.9% within 12 min after the composite was added, but 7.8% of the RhB was degraded when pure AgVO₃ was used, which showed that the photocatalytic performance of the composite material was obviously improved. In addition, in the photocatalysis sterilization test, more than 99.99% of *E. coli*, *S. aureus*, and *P. aeruginosa* cells were killed within 90 minutes. **Conclusion** The AgBr/Ag₂MoO₄ @ AgVO₃ photocatalyst has excellent photocatalytic degradation performance, bactericidal performance and stability, which can play a certain role in treatment of environmental pollution and marine sterilization and antifouling treatment.

KEY WORDS: photocatalysis; degradation; sterilization; antifouling

随着海洋勘探的发展,海洋生物污损已经引起了 世界的关注^[1-2]。海洋生物污损不仅影响了海洋工程 设施的正常运行,而且还加速了它们的腐蚀,引起重 大安全问题。其中微生物腐蚀是导致腐蚀加速,设备 故障以及经济损失的主要原因。为尽量减少生物污染 的影响,使用防污漆具有显著效果,然而,其生物毒 性对海洋环境造成巨大影响。因此,开发新型、环保 且高效的防污材料具有重要的实际意义^[3]。最近,由 于其低能耗和环境友好性,一种新型的基于半导体的 绿色光催化防污技术引起了越来越多的关注^[4-8],该 技术利用太阳辐射作为能源,在污染物降解,杀菌防 污方面具有巨大的应用前景。

在光照条件下,半导体材料会产生电子和空穴, 它们与水或空气反应,生成活性自由基,该自由基可 氧化分解细菌及藻类的细胞壁和细胞膜^[8],进而杀死 微生物。由于半导体材料可以抑制材料表面微生物膜 的形成,从而阻止了大型海洋生物的附着,可有效防 止生物污染^[9]。因此,利用光催化技术保护海洋工程 结构具有潜在的应用前景。

目前,偏钒酸银(AgVO₃)因其窄带隙和稳定的 结构而受到越来越多的关注,然而其电子和空穴的分 离能力弱,导致光催化性能较差,因此需要将AgVO₃ 与其他半导体结合,形成异质结来增强其光催化性 能。已有学者将AgVO₃与RGO,InVO₄和MoS₂结合形 成 异 质 结 Ag/AgVO₃/RGO^[10]、InVO₄/AgVO₃^[9]和 AgVO₃/MoS₂^[11],这些复合材料主要用于降解有机污 染物,很少用于杀菌和防污。因此在该实验中,将 AgVO₃与Ag₂MoO₄以及Ag基半导体助催化剂AgBr相 结合,形成新型复合光催化剂,用于有机污染物的降 解以及抗菌防污。在该实验中,通过水热法和原位生 长法制备了不同摩尔比的AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃光 催化剂。采用X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM) 和高分辨透射电子显微镜(HRTEM)等一系列手段 对所制备的光催化剂进行了表征,并以可见光为光 源,有机污染物罗丹明B(RhB)为降解对象,进行 光催化活性测试,比较纯AgVO₃以及不同摩尔比 AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃复合材料的光催化活性。同 时,以铜绿假单胞菌细胞、金黄色葡萄球菌和大肠杆 菌为模式菌,进行抗菌实验,考察复合材料的杀菌性 能。该催化剂不仅对于环境污染的治理起到一定的作 用,同时也为海洋防污新材料的开发和设计提供了理 论依据。

1 试验

1.1 催化剂的制备

称取0.34 g的硝酸银(AgNO₃)加入到30 mL的蒸 馏水中,在磁力搅拌器上搅拌10 min,使其完全溶解, 将其标为溶液A。另称取0.234 g的偏钒酸铵,同样加 入到30 mL的蒸馏水中,搅拌,标为溶液B。将溶液A 缓慢地逐滴滴入溶液B中,使用氨水和2 mol/L的硝酸 溶液将其pH值调到7.0,在黑暗中搅拌3 h。然后将其 移入到100 mL的高压釜,放入烘箱中,在180 ℃下反 应24 h^[9]。待自然冷却后,用蒸馏水和无水乙醇清洗3 次,在60 ℃下干燥12 h,研磨后备用。

称取0.2068 g偏钒酸银加入到30 mL的蒸馏水 中,超声30 min,之后加入0.34 g的硝酸银,剧烈搅 拌30 min,使其分散均匀。随后称取0.1822 g十六烷 基三甲基溴化铵以及0.121 g钼酸钠,将其溶于20 mL的蒸 馏水中,搅拌溶解后,逐滴缓慢加入上述溶液中。在黑暗 环境中搅拌2 h,然后用水和乙醇洗涤3次,在温度为60 ℃的烘箱中干燥12 h,制备的样品标记为"1.0 AgBr/ Ag2MoO4@AgVO3"。依据此方法,制备具有不同摩尔 比的复合材料,依次标记为0.2AgBr/Ag2MoO4 @AgVO₃、 0.6AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃、 1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃、 1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃の $\mathbb{R}^{1.4AgBr/Ag_2MoO_4}$ @AgVO₃。

1.2 催化剂的表征

光催化剂样品的晶体结构由XRD表征,采用 Rigaku D/max-3C型X射线衍射仪。通过扫描电子显微 镜(SEM, Hitachi S-4800, Japan)和透射电子显微 镜(TEM, Tecnai G220)表征产物的形态。

1.3 光催化降解活性

通过AgBr/Ag2MoO4@AgVO3光催化剂对罗丹明 B溶液(RhB, 10 mg/L)的降解来分析其光催化性能。 该实验使用多功能光化学反应仪(配备420 nm的滤光 片, 使其输出波长范围为420~780 nm的可见光) 对合 成材料的光催化活性进行测定。称取 0.03 g不同摩尔 比的光催化剂分散在50 mL的RhB溶液中,开启光化 学反应仪,在无光照条件下暗吸附30 min,使催化剂 和目标降解物达到吸附-脱附平衡。之后开启光源, 每隔一段时间对降解物进行取样,直至光催化反应 结束。得到的样品通过离心处理,使用紫外可见分光 光度计测量RhB的浓度,使用拟一级反应动力学模 型^[12-13]: $\ln(C_{\ell}/C_{0}) = -kt$ 来计算其反应速率常数(其中 t为反应时间, C_t 为反应时间t时刻的RhB溶液浓度, C_0 为RhB溶液的初始浓度,速率常数k为相应拟合曲 线的斜率),进而对AgBr/Ag2MoO4@AgVO3光催化 性能进行分析。

1.4 光催化抗菌防污实验

在抗菌实验中常用的三种模式菌分别为大肠杆 菌、金黄色葡萄球菌,铜绿假单胞菌。海洋细菌铜绿 假单胞菌使用Zobell 2216E培养基培养,大肠杆菌及 金黄色葡萄球菌使用 Luria-Bertani(LB)培养基进 行培养,养菌所需实验用品及配制的培养基均需在压 力蒸汽灭菌锅中高温灭菌。菌种的培养及后续杀菌实 验的取样过程均需在超净台中完成,且超净台在使用 前需紫外灭菌30 min,避免杂菌污染。抗菌实验同样是在 光化学反应仪中进行,将30 mg的光催化剂,45 mL的灭 菌海水以及5 mL的细菌悬浮液依次加入到50 mL的 石英管中,在黑暗中搅拌30 min。开启光源(波长范 围为420~780 nm的可见光),每30 min取一次样,用 无菌海水稀释相应倍数。之后,取100 µL稀释液涂在 LB琼脂平板上,在37 ℃下培养24 h,然后数算细菌 菌落数,每组进行3次重复实验。与空白样进行对照, 抗菌率^[9]计算如下:存活率= $(N_t/N_0) \times 100\%$ ($N_0 \pi N_t$ 分别为空白对照中的原始活细胞数和经光催化处理 的样品中剩余的活细胞数),抗菌率=1-存活率。

2 结果及分析

2.1 光催化剂的结构分析

制备的光催化剂样品的X射线衍射图(XRD)如

图1所示,对于纯AgVO3样品,其中28.4°、29.8°、32.8°、 33.5°、34.4°、34.9°、50.9°处的衍射峰分别对应于晶 体的(-211)、(501)、(-411)、(-112)、(-602)、(112)、(020) 晶面^[9],这与标准图谱(JCPDS No. 29-1154)相一致。 对于复合材料AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃,其中30.9°、 44.3°、55.0°、73.2°处的衍射峰分别对应于AgBr晶体 的(200)、(220)、(222)、(420)晶面^[14],这与标准图谱 (JCPDS No. 79-0149)相一致。另外在20=27.06°、 31.84°, 33.29°, 38.63°, 47.83°, 50.92°, 55.80°, 78.88° 处显示的衍射峰,对应于Ag2MoO4(220)、(311)、(222)、 (400)、(422)、(511)、(440)、(731)晶面^[15](JCPDS No.08-0473)。此外,随着AgBr和Ag₂MoO₄摩尔比的 增加, AgBr在20=30.94°以及Ag2MoO4在20=31.84°处 的衍射峰强度逐渐增强,而AgVO3在20=29.8°处的衍 射峰逐渐减弱。在复合材料的XRD图中并没有检测到 其他杂质峰,表明该材料仅是由 $AgVO_3$ 、 Ag_2MoO_4 和AgBr组成的,并且衍射峰较窄,说明该催化剂结 晶度较好。



图 1 不同摩尔比的 AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃复合 材料的 XRD 图

2.2 光催化剂的形貌表征

图2显示了具有不同摩尔比的AgBr/Ag2MoO4@-AgVO3复合材料的SEM图像。可以看到,该复合材料 是具有不规则颗粒负载的棒状结构,AgVO3为棒状结 构,直径约为300 nm,AgBr以及Ag2MoO4组成不规 则颗粒,负载在棒状结构上。随着AgBr以及Ag2MoO4 的摩尔比值不断增大,AgVO3棒状结构上附着的不规 则颗粒逐渐增多。在负载量少时,不规则颗粒较均匀 地分布在棒状结构上;当负载量较大时,颗粒聚集成 团,堆积在棒状结构上。

为了进一步研究该复合材料的微观结构,对1.0 AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃复合材料进行了SEM以及 HRTEM表征。从图3可以更清晰地看出,该复合材料 是具有不规则颗粒负载的棒状结构。图3e清楚地显 示了三组不同的晶格条纹,其间距分别为0.2985、



图3 1.0AgBr/Ag2MoO4@AgVO3光催化材料的SEM以及HRTEM图像

0.281、0.285 nm,符合AgVO₃的(501)晶面、Ag₂MoO₄的(311)晶面和AgBr的(200)晶格平面,这些结果与上述XRD结果一致。

2.3 光催化降解活性

通过比较在可见光照射下RhB溶液的降解率来

评价光催化剂的活性。AgBr/Ag2MoO4@AgVO3复合 材料的光催化性能如图4所示。图4a中的空白试验表 明,RhB在可见光照射下的降解率非常低,因此不需 要考虑可见光和其他环境因素的影响。此外,在图4a 中可以看出,与纯AgVO3以及其他摩尔比的AgBr/ Ag2MoO4@AgVO3复合材料相比,1.0AgBr/Ag2MoO4 @AgVO₃光催化剂对RhB溶液具有更好的降解效果, 降解率达到94.9%。在图4b中,RhB溶液在554 nm处 具有最强吸收峰,使用1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃催 化剂后,随着时间的延长,在554 nm处的吸收峰强度 逐渐降低,120 min后,RhB溶液的降解率达到94.9%。 如图4c和4d所示,1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃催化剂 在降解RhB溶液的反应中,其一级反应动力学常数 K_{app} 最大,是0.017 min⁻¹,是纯AgVO₃的21.25倍。



图4 AgBr/Ag2MoO4@AgVO3复合材料的光催化性能

2.4 光催化抗菌防污实验

在该实验中,选择铜绿假单胞菌(1.4×10⁷ cfu/mL)代表海洋污损微生物,以评估在可见光照射下制备的复合材料的光催化防污活性。同时还选用大肠杆菌(2.9×10⁷ cfu/mL,革兰氏阴性菌)和金黄色葡萄球菌(1.09×10⁷ cfu/mL,革兰氏阳性菌)作为实验模式菌。如图 5 所示,在空白对照实验中,铜绿假单胞菌的数量基本保持不变,同时在加入催化剂黑暗



中搅拌 30 min 后,铜绿假单胞菌的数量变化不明显, 表明在黑暗中光催化剂对细菌活性没有影响。此外, 从图 5 中还可以看出,与纯 AgVO₃以及其他摩尔比 的复合材料相比,1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃光催化 剂表现出最强的光催化防污活性,且对铜绿假单胞菌 的杀菌率达到 99.9992%。由图 6 中可以得出, 1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃光催化剂对大肠杆菌以 及金黄色葡萄球菌的杀菌率分别为 99.9999% 和 99.9989%。与其他报道的防污光催化剂,如



图 6 三种微生物在 1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃光催化反 应 90 min 后的杀菌率直方图



对铜绿假单胞菌的循环抗菌实验

BiOI/BiVO₄^[16]、Cu₂O^[17]、ZnO-Bi₂O₃^[18], 1.0AgBr/Ag₂-MoO₄@AgVO₃ 催化剂表现出了更好的光催化杀菌性能,在海洋防污中具有潜在的应用前景。

为了评价 1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃ 光催化剂 的稳定性及可重复利用性,在可见光照射下重复铜绿 假单胞菌的抗菌实验。每次循环反应后,将光催化剂 离心收集,洗涤并干燥后用于下一个循环反应。如图 7 所示,经过 5 个循环后,1.0AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃ 光催化剂的抗菌率没有明显降低,仍然达到 98.5942% 的抗菌率,这表明该催化剂具有良好的稳定性。

3 结论

1)通过水热法和原位生长法成功地制备了由棒状结构AgVO₃和不规则颗粒AgBr以及Ag₂MoO₄组成的AgBr/Ag₂MoO₄@AgVO₃复合材料,该催化剂通过AgVO₃的(501)晶面、Ag₂MoO₄的(311)面和AgBr的(200)晶面紧密结合。

2) 与纯AgVO₃以及具有其他摩尔比的AgBr/Ag₂ MoO₄@AgVO₃复合材料相比, 1.0AgBr/Ag₂MoO₄. @AgVO₃光催化剂对RhB溶液具有更好的降解效果, 降解率达到了94.9%, 而纯AgVO₃的降解率为7.8%, 复合后的材料光催化性能明显提高。

3)在光催化抗菌防污实验中,1.0AgBr/Ag₂MoO₄ @AgVO₃光催化剂对铜绿假单胞菌、大肠杆菌以及金 黄色葡萄球菌的杀菌率分别为 99.9992%、99.9999%、 99.9989%。在经过 5 个循环后,该催化剂对铜绿假单 胞菌的抗菌率依然达到 98.5942%,表明该材料具有 良好的抗菌性以及稳定性。

参考文献:

 ABDOLI L, GUO C H, CHEN X Y, et al. Defined Hydrodynamic Shear Stresses Influence the Adhesion Behaviors of Marine Bacillus Sp on Stainless Steel in Artificial Seawater[J]. Colloids Surf A, 2018, 553: 503-508.

- [2] LIU H W, SHARMA M, WANG J L, et al. Microbiologically Influenced Corrosion of 316L Stainless Steel in the Presence of Chlorella Vulgaris[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2018, 129: 209-216.
- [3] ALMEIDA J R, MOREIRA J, PEREIRA D, et al. Potential of Synthetic Chalcone Derivatives to Prevent Marine Biofouling[J]. Sci Total Environ, 2018, 643: 98-106.
- [4] BENABBOU A K, DERRICHE Z, FELIX C, et al. Photocatalytic Inactivation of Escherischia Coli Effect of Concentration of TiO₂ and Microorganism, Nature, and Intensity of UV Irradiation[J]. Appl Catal B, 2007, 76: 257-263.
- [5] ALROUSAN D M A, DUNLOP P S M, MCMURRAY T A, et al. Photocatalytic Inactivation of E. Coli in Surface Water Using Immobilised Nanoparticle TiO₂ Films[J]. Water Res, 2009, 43: 47-54.
- [6] PODPORSKA-CARROLL J, PANAITESCU E, QUILTY B, et al. Antimicrobial Properties of Highly Efficient Photocatalytic TiO₂ Nanotubes[J]. Appl Catal B, 2015, 176: 70-75.
- [7] AMEZAGA-MADRID P, SILVEYRA-MORALES R, CORDOBA-FIERRO L, et al. TEM Evidence of Ultrastructural Alteration on Pseudomonas Aeruginosa by Photocatalytic TiO₂ Thin Films[J]. J Photochem Photobiol B, 2003, 70: 45-50.
- [8] XIANG Z B, WANG Y, JU P, et al. Facile Fabrication of AgI/BiVO₄ Composites with Enhanced Visible Photocatalytic Degradation and Antibacterial Ability[J]. J Alloys Compd, 2017, 721: 622-627.
- [9] ZHANG X, ZHANG J, YU J Q, et al. Fabrication of InVO₄/AgVO₃ Heterojunctions with Enhanced Photocatalytic Antifouling Efficiency under Visible-light[J]. Appl Catal B, 2018, 220: 57-66.
- [10] ZHAO W, LI J H, WEI Z B, et al. Fabrication of a Ternary Plasmonic Photocatalyst of Ag/AgVO₃/RGO and Its Excellent Visible-light Photocatalytic Activity[J]. Appl Catal B, 2015, 179: 9-20.
- [11] QIN Y Y, LI H, LU J, et al. Enhanced Photocatalytic Performance of MoS₂ Modified by AgVO₃ from Improved Generation of Reactive Oxygen Species[J]. Chin J Catal, 2018, 39: 1470-1483.
- [12] MAHSA P, AZIZ H. Ultrasonic-assisted Preparation of Plasmonic ZnO/Ag/Ag₂WO₄ Nanocomposites with High Visible-light Photocatalytic Performance for Degradation of Organic Pollutants[J]. J Colloid Interface Sci, 2017, 491: 216-229.
- [13] CAI Y F, CHANG S Y, LIU Y F, et al. Hydrothermal-photoreduction Synthesis of Novel Ag@AgBr/BiVO₄ Plasmonic Heterojunction Photocatalysts with Enhanced Activity under White Light Emitting Diode (wLED) Irradiation[J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2018, 29: 17602-17611.
- [14] BAI L Y, XU Q, CAI Z S. Synthesis of Ag@AgBr /CaTiO₃ Composite Photocatalyst with Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity[J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2018, 29: 17580-17590.

- [15] WANG Z L, HUO Y, ZHANG J F, et al. Facile Preparation of Two-dimensional Bi₂MoO₆@Ag₂MoO₄ Core-shell Composite with Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity[J]. J Alloys Compd, 2017, 729: 100-108.
- [16] XIANG Y H, JU P, WANG Y, et al. Chemical Etching Preparation of the Bi₂WO₆/BiOI p-n Heterojunction with Enhanced Photocatalytic Antifouling Activity under visible Light Irradiation[J]. Chem Eng J, 2016, 288: 264-275.
- [17] LI R, YAN X F, YU L M, et al. Dependence of Micro/Nano-Cu₂O Structures: Controlled Morphology Synthesis, and Photocatalytic and Antifouling Property[J]. Chin J Inorg Chem, 2014, 30: 2258-2269.
- [18] JAN T, AZMAT S, WAHID B, et al. Chemically Synthesized ZnO-Bi₂O₃ (BZO) Nanocomposites with Tunable Optical, Photoluminescence and Antibacterial Characteristics[J]. Mater Sci Semicond Process, 2018, 84: 71-75.