

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230140

数字出版日期: 2024-01-23; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.n.20240122.1738.003>

TiO₂-BiOBr 复合材料的制备及其光催化性能

张淑娟, 冯巧林, 李昱卓, 贾蕊萌

(天津农学院基础科学学院, 天津 300392)

摘要: 为了提高 BiOBr 的可见光光催化性能, 利用微波法将不同物质的量比的 TiO₂ 与 BiOBr 进行复合形成 TiO₂-BiOBr, 研究催化剂 TiO₂-BiOBr 对有机污染物罗丹明 B 降解效果的影响。采用扫描电子显微镜(SEM)、粉末 X 射线衍射(XRD)、X 射线光电子能谱(XPS)和紫外可见吸收光谱(UV-vis)等手段对所制备的催化剂进行表征。结果表明: 相较于纯 TiO₂ 和 BiOBr, TiO₂-BiOBr 在可见光区的光催化能力有了较大提高且可见光催化降解效率最高的物质的量比为 $n(\text{TiO}_2) : n(\text{BiOBr}) = 1 : 12$ 。TiO₂-BiOBr 复合催化剂光催化活性的提高是由于 TiO₂ 粒子在 BiOBr 层状结构上附着并使结构向外生长, 有利于具有光催化活性的 BiOBr(110) 晶面产生优势生长; TiO₂ 和 BiOBr 之间形成了独特的异质结构, 两者都有效地提高了光生电子与空穴的分离效率。

关键词: 二氧化钛; 溴氧化铋; 复合材料; 微波法; 光催化

中图分类号: TQ426.64

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)03-0035-06

Preparation and Photocatalytic Properties of TiO₂-BiOBr Composites

ZHANG Shujuan, FENG Qiaolin, LI Yuzhuo, JIA Ruimeng

(School of Basic Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: In our present study, in order to improve the visible light photocatalytic performance of BiOBr, TiO₂-BiOBr was synthesized by microwave method with different molar ratio of TiO₂ and BiOBr. The effect of TiO₂-BiOBr on the degradation of organic pollutant rhodamine B was then studied. The prepared catalysts were further characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray powder diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and UV-visible absorption spectrum (UV-vis). The results showed that compared with pure TiO₂ and BiOBr, the photocatalytic ability of TiO₂-BiOBr in the visible light region was greatly improved, and the quantity ratio of substances with the highest visible photocatalytic degradation efficiency was $n(\text{TiO}_2) : n(\text{BiOBr}) = 1 : 12$. The improvement of photocatalytic activity of TiO₂-BiOBr composite catalyst is due to the attachment of TiO₂ particles on the BiOBr layered structure and the outward growth of the structure, which is beneficial to the dominant growth of BiOBr(110) crystal plane with photocatalytic activity. A unique heterostructure was also formed between TiO₂ and BiOBr, both of which effectively improved the separation efficiency of photogenerated electrons and holes.

Key words: titanium dioxide; bismuth bromide; composites; microwave method; photochemical catalysis

引文格式:

张淑娟, 冯巧林, 李昱卓, 等. TiO₂-BiOBr 复合材料的制备及其光催化性能[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(3): 35-40.
ZHANG S J, FENG Q L, LI Y Z, et al. Preparation and photocatalytic properties of TiO₂-BiOBr composites[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(3): 35-40.

太阳能驱动的光催化污水处理技术能够在温和条件下实现水体中污染物的降解, 与传统污水处理技

收稿日期: 2023-07-12; 修回日期: 2023-12-01

基金项目: 国家级大学生创新训练计划资助项目(202210061001, 202310061105)

作者简介: 张淑娟(1976—), 女, 河北石家庄人, 教授, zhangshujuan@tjau.edu.cn

术相比,光催化污水处理技术具有经济、绿色、高效等优势^[1-4]。BiOBr 具有独特的层状结构、高稳定性和合适的禁带宽度,使其在光催化处理水污染问题上成为科学家的研究热点^[5-6],但 BiOBr 存在的对可见光的响应范围较窄以及电子空穴复合概率高等缺点,限制了其应用^[7]。TiO₂ 因具有优秀的催化性能、稳定的化学性能、绿色无毒和使用寿命长等优点也被广泛关注和利用^[8-10],但存在仅吸收紫外光等缺点^[11]。因此,增加 TiO₂ 在可见光区的吸收和提高 BiOBr 光生电子与空穴的分离效率是本文的研究重点。

谢桂香等^[12]采用水热法,水热 12 h 制得 TiO₂/BiOBr 异质结复合催化剂,可见光照射 150 min 后,甲基橙的脱色率达 97.19%。刘霞等^[13]结合碱热法和溶剂热法反应 6 h,制得 BiOBr/TiO₂ 异质结复合催化剂,可见光照射 15 min,罗丹明 B 的脱色率达 96.5%。与传统制备方法相比,微波法具有升温速率快、能源利用率高、绿色无污染等优势,使其在材料合成领域被广泛关注^[14-16]。本文利用微波法合成 TiO₂-BiOBr 复合物,并研究改性后的 BiOBr 对有机污染物罗丹明 B 的可见光光催化性能的影响。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

五水合硝酸铋 [Bi(NO₃)₃·5H₂O]、溴化钾 (KBr),分析纯,天津市福晨化学试剂厂;罗丹明 B、醋酸 (CH₃COOH),分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;蒸馏水,实验室自制。

XRD-6100 型粉末 X 射线衍射仪,日本岛津公司;SUPRA TM55 型扫描电子显微镜 (SEM),德国蔡司公司;UV-1100 型紫外-可见分光光度计,上海美普达仪器有限公司;SCIENTZ-IIDM 型微波反应器,宁波新芝生物科技股份有限公司;CL-1A 型磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限公司;TL80-2 型高速离心机,江苏天力医疗器械有限公司;ESCALAB 250XI 型 X 射线光电子能谱仪,赛默飞世尔科技有限公司。

1.2 TiO₂-BiOBr 复合催化剂的制备

用微波法制备 TiO₂-BiOBr 复合催化剂。称取 5 mmol KBr 溶于 10 mL 蒸馏水中,搅拌 10 min;称取 5 mmol Bi(NO₃)₃·5H₂O 置于 40 mL 质量分数为 40% 的醋酸溶液中,搅拌 10 min;称取 0.42 mmol TiO₂ 置于上述 Bi(NO₃)₃ 与醋酸的混合溶液中,形成悬浊液,通过剧烈磁力搅拌使 TiO₂ 分散均匀。将 KBr 溶液缓慢滴入上述混合悬浊液中,室温下磁力搅拌

30 min;将前驱体悬浊液在功率为 180 W 的微波反应器内微波反应 180 s,然后分别用水和乙醇各洗涤 3 次,2 000 r/min 离心分离,最后得到的固体产物在 120 °C 下真空干燥 5 h,得到 $n(\text{TiO}_2) : n(\text{BiOBr}) = 1 : 12$ 的复合催化剂,将其命名为 TB1/12,根据 TiO₂ 和 BiOBr 不同物质的量比分别制得复合催化剂 TB1/10、TB1/11、TB1/13、TB1/14。

1.3 催化剂的表征

采用粉末 X 射线衍射仪对样品的物相与结构进行表征,入射波长 $\lambda = 15.406 \text{ nm}$,管电压为 40 kV,管电流为 200 mA。用扫描电子显微镜表征催化剂的表面形态。用紫外-可见分光光度计测量紫外可见吸收光谱 (UV-vis),以 BaSO₄ 为标准参考物,检测波长范围为 200 ~ 800 nm。利用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对催化剂的表面元素及化学状态进行分析。

1.4 催化剂光催化性能测试

所制备复合催化剂的光催化活性通过降解罗丹明 B 溶液进行测定^[17],光催化反应装置如图 1 所示。

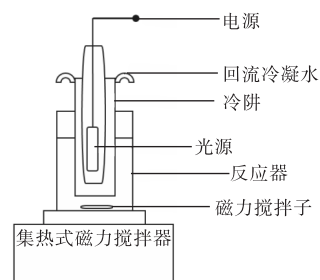


图 1 光催化反应装置图

Fig. 1 Schematic diagram of photocatalytic reactor

量取 200 mL 10 mg/L 罗丹明 B 溶液置于光催化反应器中,再加入 20 mg 复合催化剂。在灯照之前,将样品溶液于黑暗条件下搅拌 30 min,使该溶液体系达到吸附-脱附平衡。模拟可见光光源为功率 300 W、波长 320 ~ 2 500 nm 的氙灯。通过磁力搅拌悬浊液使其形成悬浮体系,进行光催化降解罗丹明 B 的反应。以 10 min 为间隔,每次从反应器中抽取大约 6 mL 悬浮液,经过 2 000 r/min 离心 10 min 后吸取上层清液,利用紫外-可见分光光度计在 553 nm 处测定吸光度^[18]。

2 结果与讨论

2.1 光催化活性分析

在可见光照射下,TiO₂、BiOBr 及 TiO₂-BiOBr 对罗丹明 B 的光催化降解率曲线如图 2 所示。由图 2

可知:在氙灯光源下,纯 TiO₂ 对罗丹明 B 基本没有光催化降解效果,氙灯光源主要为可见光,紫外光占比较小^[8];BiOBr 降解效果优于 TiO₂,100 min 时降解了 60% 的罗丹明 B,这是因为纯 BiOBr 本身禁带宽度为 2.77 eV,有较好的可见光光催化活性。TiO₂ 与 BiOBr 复合后形成异质结构,可以促进光生载流子的分离,提高复合催化剂的光催化活性。随着 TiO₂ 含量的增加,TiO₂-BiOBr 复合催化剂可见光光催化降解率先明显提升,TB1/12 在 100 min 时降解率可达到 98%,但继续增大 TiO₂ 含量,降解率开始降低,这是由于 TiO₂ 量过多,大量覆盖在 BiOBr 的表面,影响了 BiOBr 对可见光的吸收,而 TiO₂ 对可见光的响应又很低,进而降低光催化效果。由此可见,TiO₂ 与 BiOBr 的最佳比例为 1:12,此时可有效提升可见光光催化降解罗丹明 B 的效果。

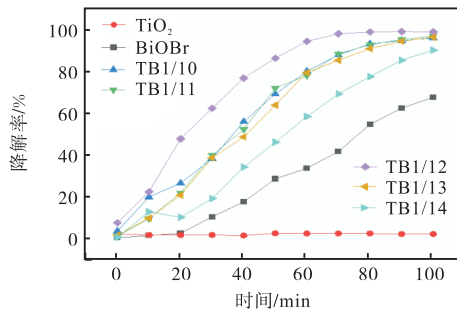


图2 TiO₂、BiOBr 及 TiO₂-BiOBr 对罗丹明 B 的光催化降解率曲线

Fig. 2 Photocatalytic degradation rate curves of Rhodamine B by TiO₂, BiOBr and TiO₂-BiOBr

BiOBr 及 TB1/12 光催化降解罗丹明 B 过程随时间变化的紫外可见吸收光谱如图 3 所示。由图 3 可知:随着时间的延长,罗丹明 B 的吸收峰在逐渐减弱,在 BiOBr 和 TB1/12 的光催化降解过程中,罗丹明 B 的主要吸收峰发生了蓝移,此现象与实验过程中溶液颜色由玫瑰红色到绿色的变化一致。这主要是由于罗丹明 B 在降解过程中会发生脱乙基反应^[19]。由实验结果可知:在 TB1/12 降解罗丹明 B 过程中,可以较大程度完成脱乙基,且速度较快;而在 BiOBr 降解罗丹明 B 过程中,脱乙基过程较慢,且经过 100 min 光催化反应后,仍有大量的罗丹明 B 未被降解。TB1/12 降解罗丹明 B 过程中脱乙基程度优于 BiOBr, TiO₂ 与 BiOBr 复合能够有效地提高催化剂的可见光降解效率。这主要是因为形成的异质结构有效地提高了复合催化剂 TiO₂-BiOBr 的光生电子和空穴的分离效率^[20],有更多的活性粒子参与可见光催化降解反应过程。

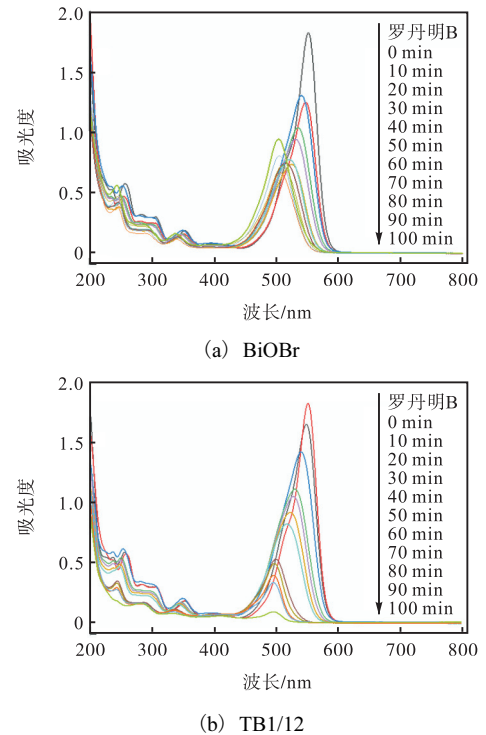


图3 BiOBr 及 TB1/12 光催化降解罗丹明 B 过程的紫外可见吸收光谱

Fig. 3 UV-visible absorption spectra of Rhodamine B during the photocatalytic degradation process of BiOBr and TB1/12

2.2 动力学分析

本文通过一阶动力学模型,研究复合催化剂光降解罗丹明 B 的动力学特性。式(1)为其一阶线性关系方程^[21]。

$$\ln(\rho/\rho_0) = -Kt \quad (1)$$

式中: ρ 为 t 时刻罗丹明 B 的质量浓度, ρ_0 为溶液中罗丹明 B 的初始质量浓度, K 为动力学速率常数, t 为光催化反应时间。

根据式(1),以 t 为横坐标, $-\ln(\rho/\rho_0)$ 为纵坐标绘图,TiO₂、BiOBr 及 TiO₂ 和 BiOBr 不同物质的量比的复合催化剂样品的一阶动力学曲线如图 4 所示。

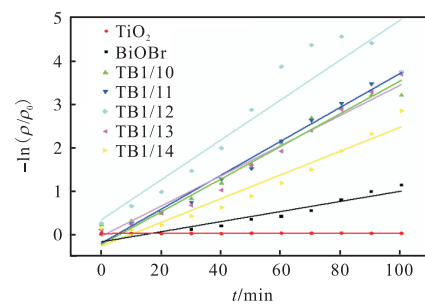


图4 一阶动力学曲线

Fig. 4 First order dynamic curve

由拟合后的一阶动力学曲线可以发现, TB1/12 对罗丹明 B 的降解速率明显优于其他比例样品。

2.3 XRD分析

TiO₂、BiOBr 及 TB1/12 光催化剂的 XRD 图谱如图 5 所示。

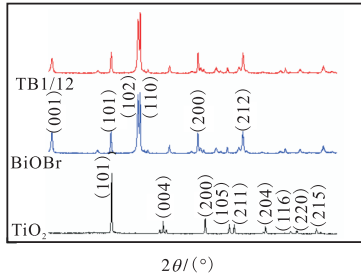
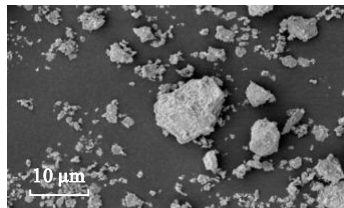


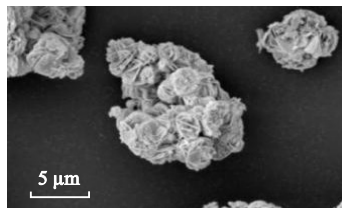
图 5 TiO₂、BiOBr 及 TB1/12 光催化剂的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of TiO₂, BiOBr and TB1/12 photocatalysts

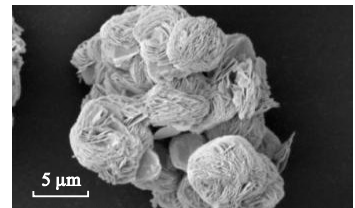
由图 5 可知: 所得复合催化剂样品的结晶相位置均与 BiOBr 相匹配, 且图谱中没有其他杂峰的出现, 说明 TiO₂-BiOBr 相对于 BiOBr 没有形成新的杂质相, 复合催化剂有较高的纯度; 图谱中样品具有尖锐的衍射峰, 说明复合催化剂有很高的结晶度。与 TiO₂ 复合后, BiOBr 的一些特征衍射峰的强度增强, 表明



(a) TiO₂



(b) BiOBr



(c) TB1/12

图 6 TiO₂、BiOBr 及 TB1/12 的扫描电子显微镜图

Fig. 6 SEM images of TiO₂, BiOBr and TB1/12

2.5 XPS分析

采用 X 射线光电子能谱分析 BiOBr 与 TB1/12 的元素组成和表面化学状态。BiOBr 及 TB1/12 的 XPS 图谱如图 7 所示。

图 7(a) 为 Bi 4f 的高分辨 XPS 图谱, 图中 BiOBr 样品在结合能为 158.7 eV 和 164.0 eV 处有两个较强的峰, 分别属于 Bi 4f_{7/2} 和 Bi 4f_{5/2} 的特征峰, 而 TB1/12 中两峰分别在 157.7 eV 和 163.0 eV 处, 这两个峰对应的结合能与 BiOBr 的相比均变小, 这可归因于 BiOBr 和 TiO₂ 结合后产生了强化学键, 形成异质结构^[25]。图 7(b) 为 O 1s 的高分辨 XPS 图谱, BiOBr 中结合能位于 529.4 eV 的特征峰归属于 [Bi₂O₂]²⁺ 层结构的 Bi—O 键^[26]; TB1/12 中 O 1s 结合能减小为 528.6 eV, 这可归因于 Ti—O 键和 Bi—O

材料的结晶度随着 TiO₂ 的加入而增加, 这可能是由晶粒尺寸增大且二维层状结构数量明显增加造成的。通过计算得知, 复合前 BiOBr (110) 晶面与 (102) 晶面衍射峰强度的比值为 1.047 4, 在复合后的样品 TB1/12 中, 该比值变为 1.128 7, (110) 晶面与 (102) 晶面衍射峰强度的比值增大, 表明 BiOBr 与 TiO₂ 复合后, BiOBr 晶体沿着 (110) 晶面产生优势生长^[22], 暴露更多的 BiOBr (110) 晶面, 有利于提高光生电子的还原能力、电子转移和光生电子-空穴的分离, 进而提高光催化活性^[23-24]。

2.4 SEM分析

TiO₂、BiOBr 及 TB1/12 的扫描电子显微镜图如图 6 所示。由图 6(a) 可以看出, TiO₂ 颗粒粒径为 5 ~ 20 μm, 分布不均匀, 形状为不规则颗粒状, 表面较光滑。由图 6(b) 可知, BiOBr 为由不规则的二维层状结构堆叠而成的球状颗粒, 并表现出一定程度的团聚。由图 6(c) 可知, TiO₂-BiOBr 与 BiOBr 相比, TiO₂ 粒子在层状结构上附着, 使结构向外生长, 且二维层状结构数量明显增加, 层与层之间空隙变小, 球状粒子体积也变大。以上结果表明, 通过微波法使 TiO₂ 和 BiOBr 成功复合。

键的形成, 进一步说明 TiO₂ 和 BiOBr 复合成功。图 7(c) 为 Ti 2p 的高分辨 XPS 图谱, 图中可以看到 TB1/12 样品在 458.5 eV 和 465.3 eV 处有两个特征峰, 分别属于自旋轨道 Ti 2p_{3/2} 和 Ti 2p_{1/2} 的裂解光电电子结合能, 且两峰之间结合能差值为 6.8 eV, 说明在复合催化剂中 Ti 以 Ti⁴⁺ 的形式存在^[27]。图 7(d) 中 Br 3d 在 67.7 eV 和 68.6 eV 处的特征峰分别归属于 Br 3d_{5/2} 和 Br 3d_{3/2}, 表明 Br 元素以 Br⁻ 的形式存在^[13], 而 TB1/12 中两峰分别在 66.7 eV 和 67.4 eV 处, 这两个峰对应的结合能与 BiOBr 的相比均变小, 这是因为 TiO₂ 与 BiOBr 之间发生了相互作用^[28]。

2.6 紫外可见吸收光谱分析

图 8 为 TiO₂、BiOBr 和 TB1/12 光催化剂的紫外可见吸收光谱与样品禁带宽度图。

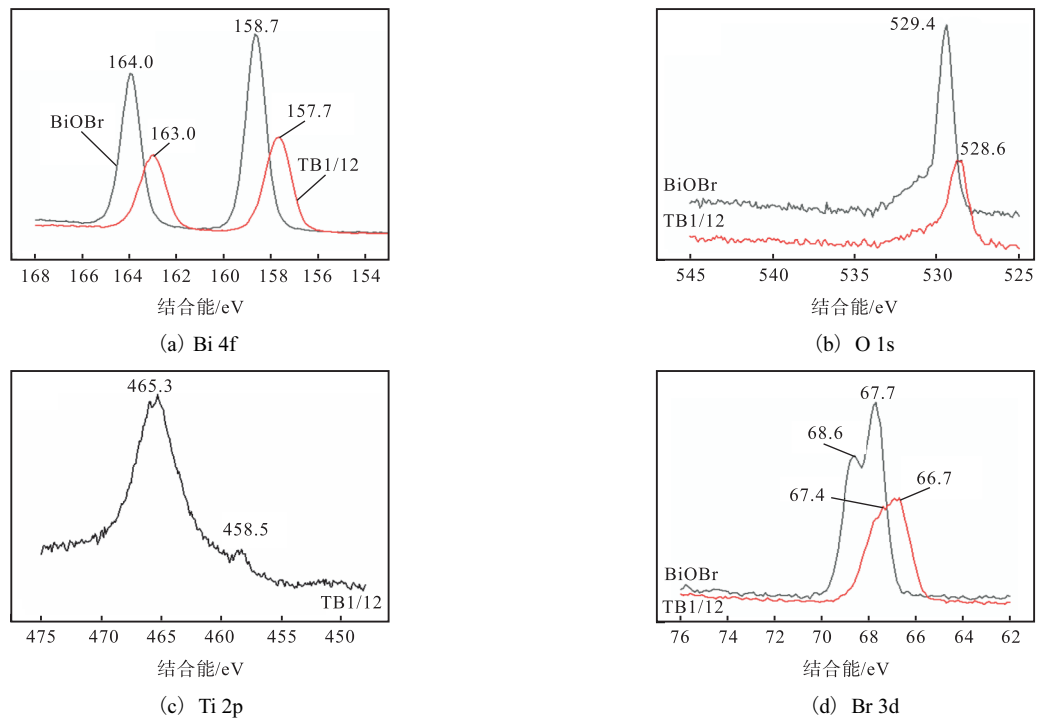


图 7 BiOBr 及 TB1/12 的 XPS 图谱
Fig. 7 XPS spectra BiOBr and TB1/12

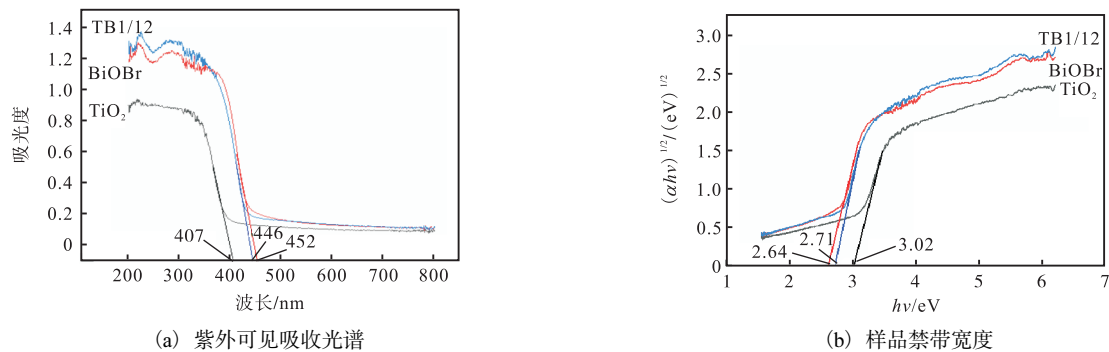


图 8 TiO₂、BiOBr 和 TB1/12 光催化剂的紫外可见吸收光谱与样品禁带宽度

Fig. 8 UV-visible absorption spectra and sample bandgap widths of TiO₂, BiOBr and TB1/12 photocatalysts

从图 8(a)中可以看出:与 TiO₂ 相比 TB1/12 的吸光度出现一定红移,扩大了其对可见光的吸收范围,使得其可见光响应能力有一定的增强;与 BiOBr 相比, TB1/12 的吸光度出现小范围蓝移,但这对 TB1/12 可见光吸收能力的影响可忽略不计, TB1/12 仍有较大的可见光响应能力。

以图 8(a)数据为基础,根据式(2)推导样品的能带隙(E_g)^[29]。

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; ν 为光频率; α 为光吸收系数; A 为测量吸光度; E_g 为带隙能; n 取决于半导体的自身特性(直接跃迁带隙半导体为 1,间接跃迁带隙半导体为 4),因为 BiOBr 为间接跃迁半导体,所以

$n = 4$ 。

由图(b)可知 TiO₂、BiOBr 和 TB1/12 的禁带宽度分别为 3.02 eV、2.64 eV 和 2.71 eV。

3 结 语

本研究通过微波法方便、快速地制备了不同物质的量比的 TiO₂-BiOBr 复合催化剂。在可见光下对有机染料罗丹明 B 的降解中, TiO₂-BiOBr 的光催化活性相比 TiO₂ 和 BiOBr 得到了很大的提高。当 TiO₂-BiOBr 物质的量比为 1 : 12 时,罗丹明 B 可见光光催化降解率最大,可以达到 98%。这是由于 TiO₂ 与 BiOBr 复合形成异质结构,并促进具有光催化活性的 BiOBr(110) 晶面产生优势生长,拥有更多暴露的

BiOBr(110)晶面,使复合催化剂光生电子和空穴的分离效率得到显著提高,有利于更多的活性粒子参与可见光催化降解反应的过程,进而使复合催化剂具有较好的可见光光催化性能。

参考文献:

- [1] 赵巾巾. 光催化技术在环境治理方面的研究概述[J]. 山西化工, 2020, 40(1): 24-25.
- [2] LOEB S K, ALVAREZ P J J, BRAME J A, et al. Technology horizon for photocatalytic water treatment: sunrise or sunset?[J]. Environmental science & technology, 2019, 53(6): 2937-2947.
- [3] DONG S Y, FENG J L, FAN M H, et al. Recent developments in heterogeneous photocatalytic water treatment using visible light-responsive photocatalysts: a review[J]. RSC Advances, 2015, 5(19): 14610-14630.
- [4] NOUREEN L, WANG Q, HUMAYUN M, et al. Recent advances in structural engineering of photocatalysts for environmental remediation[J]. Environmental research, 2023, 219: 115084.
- [5] 杨林. 溴氧化铋光催化剂的研究进展[J]. 广州化学, 2021, 46(5): 20-26.
- [6] CHEN X M, CHEN P Y, YANG S M, et al. Recent advances in bismuth oxyhalides photocatalysts and their applications[J]. Nanotechnology, 2023, 34: 052001.
- [7] 鲁莲. 溴氧化铋的光催化和光电催化性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [8] 张安琪. 二氧化钛光催化材料的制备及其性能研究进展[J]. 山西化工, 2023, 43(2): 31-33.
- [9] ARUN J, NACHIAPPAN S, RANGARAJAN G, et al. Synthesis and application of titanium dioxide photocatalysis for energy, decontamination and viral disinfection: a review[J]. Environmental chemistry letters, 2022, 21(1): 339-362.
- [10] 王建强, 黄菊梅, 马玉龙, 等. 改性二氧化钛光催化技术在水污染治理中的研究进展[J]. 现代盐化工, 2021, 48(6): 9-11.
- [11] 王钰. 高活性改性纳米二氧化钛的制备与性能[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [12] 谢桂香, 林霞晖, 张著森. BiOBr/TiO₂ 复合光催化材料的制备及其光催化性能的研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 28-33.
- [13] 刘霞, 邓德明, 熊丽丽. BiOBr/TiO₂ 异质结催化剂的制备及其可见光催化活性[J]. 武汉大学学报(理学版), 2019, 65(1): 57-65.
- [14] 肖舒宁, 霍梦佳, 程学健, 等. 微波法高效光催化材料合成研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(1): 82-93.
- [15] KRISHNAN R, SHIBU S N, POELMAN D, et al. Recent advances in microwave synthesis for photoluminescence and photocatalysis[J]. Materials today communications, 2022, 32: 103890.
- [16] 高占尧, 全攀瑞, 马敏敏. 溴氧化铋基光催化材料的制备及应用[J]. 广东化工, 2021, 48(1): 45-48.
- [17] GURUGUBELLI T R, RAVIKUMAR R, KOUTAVARAPU R. Enhanced photocatalytic activity of ZnO-CdS composite nanostructures towards the degradation of rhodamine B under solar light[J]. Catalysts, 2022, 12(1): 84.
- [18] 齐永娟. 微波法制备 MIL-53(Fe) 及其光催化性能研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2021.
- [19] LIANG L P, CHENG L B, ZHANG Y T, et al. Efficiency and mechanisms of rhodamine B degradation in Fenton-like systems based on zero-valent iron[J]. RSC Advances, 2020, 10(48): 28509-28515.
- [20] 龙泽清, 宋慧, 张光明. 卤氧化铋光催化剂改性及应用研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5067-5074.
- [21] 王方外. MOF-808 基复合材料的制备及其光催化降解性能的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- [22] 曲俊男. BiOBr 基光催化剂的制备、改性及性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
- [23] 徐健. 基于晶面的溴氧化铋光催化剂的合成及其光催化活性的增强[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2018.
- [24] LI R G, ZHANG F X, WANG D E, et al. Spatial separation of photogenerated electrons and holes among {010} and {110} crystal facets of BiVO₄[J]. Nature communications, 2013, 4(1): 1432.
- [25] 杨灵富. 溴氧化铋基异质结复合材料的制备及其光催化性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [26] 越楚遥. BiOBr/TiO₂ 纳米管阵列的制备及光催化降解水中微量双酚 A 的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [27] GUAN Z C, WANG H P, WANG X, et al. Fabrication of heterostructured β -Bi₂O₃-TiO₂ nanotube array composite film for photoelectrochemical cathodic protection applications[J]. Corrosion science, 2018, 136: 60-69.
- [28] 李红琴. BiOBr 基异质结复合光催化剂的制备及性能研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2023.
- [29] 何冰. F 对不同暴露面 BiOBr 光催化性能影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

责任编辑: 周建军