

复合光催化剂 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 的制备及其光催化性能研究

刘书松, 金星龙*

(天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要:合成了一系列不同质量比的 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合光催化剂,并通过 XRD、FT-IR、SEM 和 UV-Vis DRS 分别对其晶体结构、官能团、微观形貌和吸收光谱进行表征。利用模拟太阳光照射下罗丹明 B (RhB) 的降解速率评估所制备样品的光催化性能。结果表明,复合材料的光催化活性均高于纯 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 或 Ag_3PO_4 ;其中 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ -25% 的光降解能力更为显著,最佳条件下 RhB 仅需 50 min 即可完全降解,TOC 去除率高达 59.89%。捕获实验证实光催化过程中的主要活性物质是羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 和光生空穴 (h^+)。

关键词:光催化; $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$; Ag_3PO_4 ; 复合材料; 罗丹明 B

中图分类号: O643.36; O644.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)07-0127-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.07.027

Preparation of $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ composite photocatalyst and study on its photocatalytic performance

LIU Shu-song, JIN Xing-long

(School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A series of $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ composite photocatalysts with different mass ratios are synthesized, and their crystal structures, functional groups, morphology and absorption spectra are characterized by XRD, FT-IR, SEM and UV-Vis DRS, respectively. The degradation rate of rhodamine B (RhB) under simulated solar irradiation is used to evaluate the photocatalytic performance of the prepared samples. It is shown that the photocatalytic activity of all prepared composites is higher than that of pure $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ or Ag_3PO_4 . Among the composites, the photo-degradation ability of $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ -25% is the most remarkable, over which RhB can be degraded completely in 50 min under optimal conditions, and the removal rate of TOC reaches 59.89%. Trapping experiments confirm that hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) and photogenerated holes (h^+) are the main active substances in the photocatalytic process.

Key words: photocatalysis; $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$; Ag_3PO_4 ; composites; Rhodamine B

卤氧化铋 BiOX ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) 独特的层状结构和优异的光催化性能引起人们广泛关注^[1-2]。其中, BiOI 具有最窄的带隙、较大的光吸收范围、无毒性和良好的稳定性^[3-4]。密度泛函理论 (DFT) 中, 提高 BiOI 晶格中 Bi 元素含量有益于促使其导带 (CB) 位置向更负的方向移动^[5], 进而增强光生电子激活分子氧的能力。基于此, 人们成功合成了以 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 为代表的富铋型碘氧化铋。 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 是一种热稳定性较高的 n 型半导体^[6], 其合成方法简单、价格低廉且具有较高的 CB 位置^[7]。然而, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 具有中等光学带隙, 仅对紫外光具有良好的响应, 在可见光下很难被激发^[8]。除此之外, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 还存在比表面积小及电荷载体转移效率低等问题^[9]。复合适当半导体构建异质结结构有利于进一步改善

$\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 的光活性。与其他半导体相比, Ag_3PO_4 在波长超过 420 nm 时显示出更高的量子效率 (90%)^[10]。作为一种窄带隙 p 型半导体材料, Ag_3PO_4 具有较深的价带 (VB) 电位, 在太阳光下对有机污染物的降解具有很高的光氧化能力^[11]。因此, 引入少量 Ag_3PO_4 与 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 复合可在保证经济性的同时提高 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 对可见光的利用效率。

笔者成功制备了 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合光催化剂并对其进行了表征。通过在模拟太阳光照射下 RhB 的降解速率评估所合成样品的光催化性能。研究了催化剂质量比、反应温度和溶液初始 pH 3 个单因素对光催化降解过程的影响, 确定了最佳的反应条件。并初步探讨了 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 光催化作用机理。

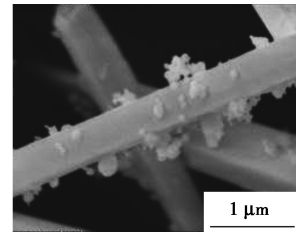
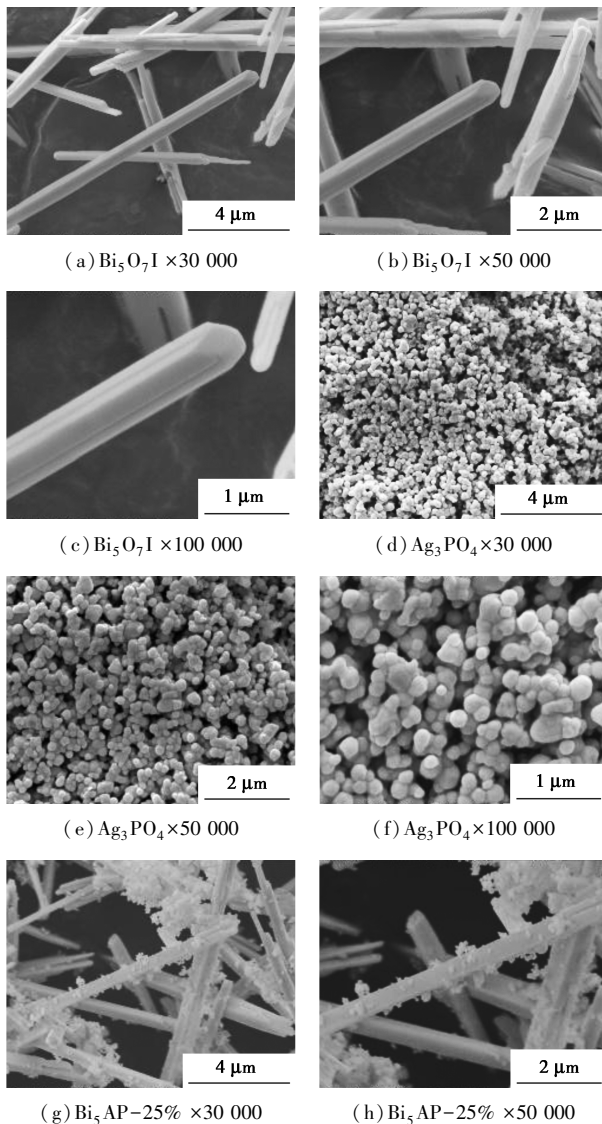
收稿日期: 2019-09-13; 修回日期: 2020-05-10

基金项目: 天津市技术创新引导专项项目 (16YDLJF00030)

作者简介: 刘书松 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境污染分析与控制, liushusong_zr@163.com; 金星龙 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向为环境污染分析与控制及环境安全评价, 通讯联系人, xljin7911@126.com。

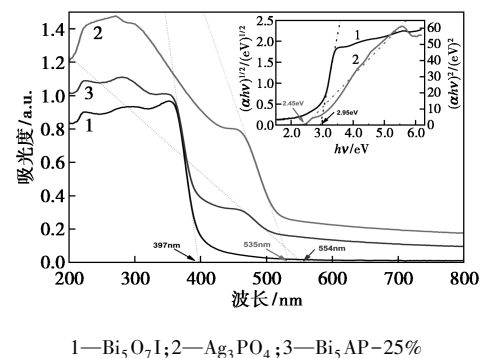
由图2中可以看出,在 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 的光谱中,位于 500 、 620 cm^{-1} 和 $1\ 383\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带分别属于 $\text{Bi}-\text{O}$ 键和 $\text{I}-\text{O}$ 键的拉伸振动^[12,16-18]。此外, $1\ 633\text{ cm}^{-1}$ 处的窄峰和 $3\ 460\text{ cm}^{-1}$ 附近的宽带区域来自表面物理吸附水中 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 的拉伸振动和 $\text{O}-\text{H}$ 弯曲振动^[12,17]。 Ag_3PO_4 的光谱中,位于 558 cm^{-1} 和 $1\ 010\text{ cm}^{-1}$ 附近的强吸收带与 PO_4^{3-} 中的 $\text{P}-\text{O}$ 拉伸振动有关^[10-11,19]。在 $1\ 382\text{ cm}^{-1}$ 附近观察到的另一条谱带归因于双键氧 ($\text{P}=\text{O}$) 的拉伸振动和谐波^[20-22]。与 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 类似,在 $2\ 800\sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 处的2个明显吸收带代表了物理吸附水分子的固有 $\text{O}-\text{H}$ 弯曲振动和 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 拉伸振动^[10,19-22]。复合样品 $\text{Bi}_5\text{AP}-x\%$ 的所有吸收带均可清晰地对应到 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的光谱中,证实了二者的成功复合。

利用 FESEM 观测样品的微观形貌,结果如图3所示。

(i) $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ $\times 100\ 000$ 图3 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 、 Ag_3PO_4 和 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 的 SEM 图像

由图3中可以看出, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 呈现出长 $6\sim 12\ \mu\text{m}$ 、直径约 $0.5\ \mu\text{m}$ 的棒状结构,表面光滑。 Ag_3PO_4 为不规则类立方体状,粒径较小,仅为 $100\sim 300\text{ nm}$ 。在 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 的 SEM 图中, Ag_3PO_4 颗粒紧密地附着在 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 的棒状表面,且复合后二者的晶体形态几乎没有发生改变,这与 XRD 和 FT-IR 的结果一致。

催化剂的吸收光谱和带隙能如图4所示。

图4 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 、 Ag_3PO_4 和 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 的 UV-Vis DRS 光谱

(插图为 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的带隙能图)

由图4中可以看出, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 的光吸收边缘为 397 nm , 仅能被紫外光激发。 Ag_3PO_4 的光吸收边缘为 535 nm , 具有较强的可见光吸收能力。复合光催化剂 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 的光吸收边缘较 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 发生了明显的红移 (554 nm), 光吸收能力显著增强。 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的带隙能 (E_g) 由 Kubelka-Munk 方程计算^[23]:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{n/2} \quad (1)$$

式中: α 、 $h\nu$ 、 E_g 和 A 分别为光学吸收系数、光子能量、带隙能和比例常数; n 值取决于半导体材料光学跃迁的类型^[24]: 直接跃迁, $n = 1$; 间接跃迁, $n = 4$ 。据文献^[12-25]中报道, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 属于间接带隙半导体 ($n = 4$), 而 Ag_3PO_4 是直接带隙半导体 ($n = 1$)^[26]。根据 $(\alpha h\nu)^{2/n} - h\nu$ 曲线计算出 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的 E_g 分别为 2.95 eV 和 2.45 eV 。半导体的能带结构的计算式分别为^[15]:

$$E_{VB} = X - E_0 + 0.5E_g \quad (2)$$

$$E_{CB} = E_{VB} - E_g \quad (3)$$

式中： E_{VB} 、 E_{CB} 、 E_g 、 X 和 E_0 分别指价带 (VB) 边缘、导带 (CB) 边缘、带隙能、半导体的绝对电负性和氢尺度上自由电子的能量 (约 4.5 eV)。据文献 [12-15] 中报道, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的 X 值分别为 6.23 eV

和 6.20 eV。根据以上分析计算得出： $E_{VB}(\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}) = 3.21 \text{ eV}$, $E_{CB}(\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}) = 0.26 \text{ eV}$, $E_{VB}(\text{Ag}_3\text{PO}_4) = 2.92 \text{ eV}$, $E_{CB}(\text{Ag}_3\text{PO}_4) = 0.47 \text{ eV}$ 。

2.2 光催化性能

通过光催化降解 RhB 评估样品的光催化性能, 结果如图 5 所示。

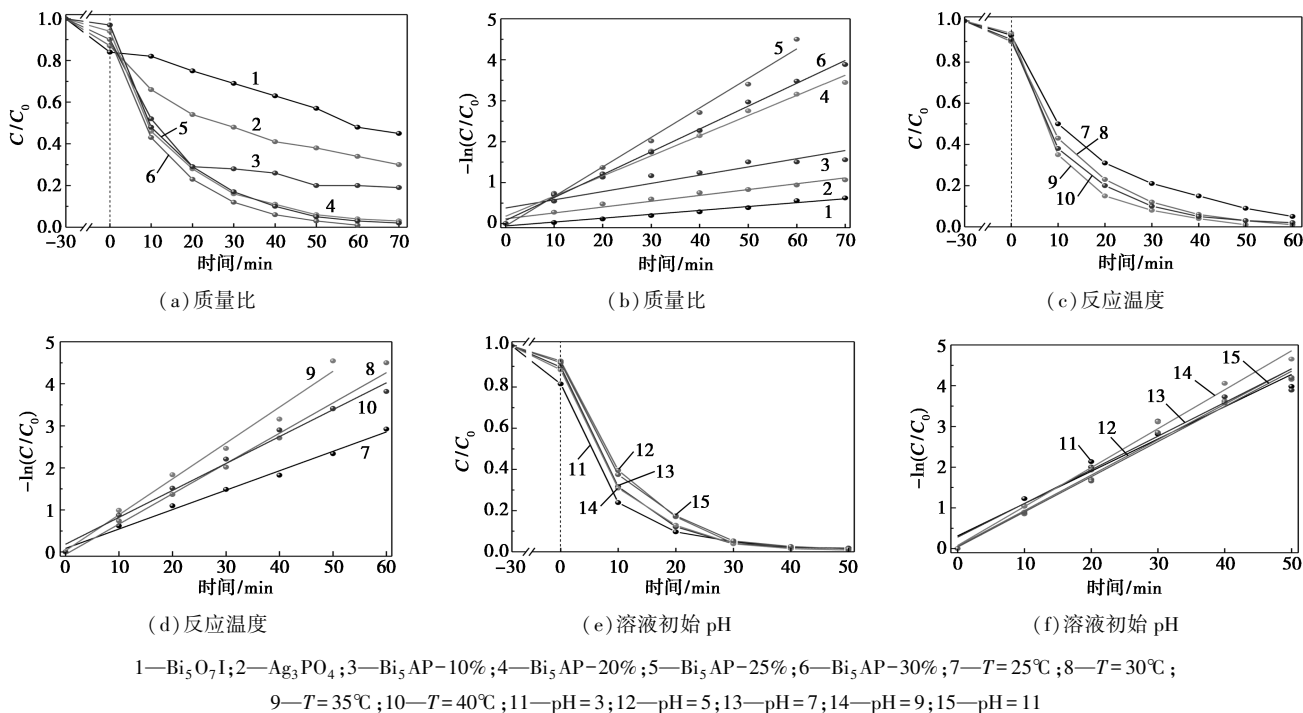


图 5 不同条件下 RhB 的浓度变化情况及相应的伪一级动力学模型

反应过程中 RhB 的浓度变化符合伪一级动力学模型:

$$\ln(C_t/C_0) = -kt \quad (4)$$

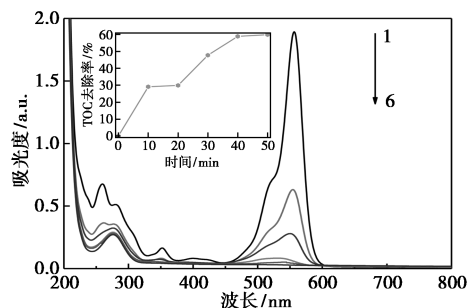
式中： t 、 C_t 、 C_0 和 k 分别为反应时间、 t 时刻 RhB 的残留浓度、黑暗条件下吸附/解吸平衡时 RhB 的浓度和表观伪一级速率常数。

由图 5 (a) 和图 5 (b) 中可以看出, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 均能在模拟太阳光下降解 RhB, 但降解效果并不理想, 照射 70 min 后 RhB 的降解率仅为 55% 和 70%。二者复合后, 样品的光催化能力显著提升, RhB 的降解速率明显加快。其中, $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 样品表现出最强的光催化性能, 60 min 实现完全降解。

确定最佳催化剂是 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 后, 考察反应温度对降解过程的影响, 结果如图 5 (c) 和图 5 (d) 所示。由图 5 (c) 和图 5 (d) 中可以看出, 当反应温度较低时, 升高温度对反应有促进作用, 在 35°C 时 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 的光催化性能达到最强 (50 min, 99%); 继续升高温度则降解过程受到抑制, 光催化活性的丧失归结于高温条件对活性物质的破坏。

以 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 为目标催化剂, 控制反应温度在 35°C , 考察 RhB 溶液初始 pH 对降解过程的影响, 结果图 5 (e) 和图 5 (f) 所示。由图 5 (e) 和图 5 (f) 可以发现, 溶液的初始 pH 对降解速率的影响微乎其微, 仅当初始 $\text{pH}=9$ 时降解速率稍快一些。

在 $T=35^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH}=9$ 和 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 存在时, 光催化过程中 RhB 溶液的紫外-可见吸收光谱和 TOC 去除率变化情况如图 6 所示。



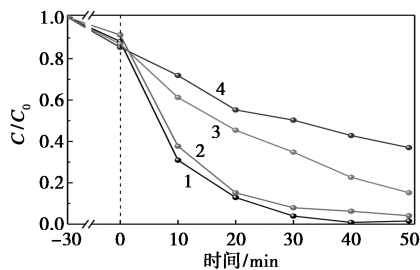
1—0 min; 2—10 min; 3—20 min; 4—30 min; 5—40 min; 6—50 min

图 6 不同照射时间 RhB 溶液的紫外-可见吸收光谱和 TOC 去除率

由图6中可以看出, RhB在波长为554 nm处产生最大吸收, 随着照射时间的延长, 最大吸收峰显著降低且伴随有轻微的蓝移, 表明RhB的结构在反应过程中逐渐被破坏。TOC去除率在在一定程度上反映了光催化剂对污染物的矿化情况。随着反应进行, TOC去除率逐渐升高, 在50 min时达到59.89%, 表明 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 对RhB溶液具有较强的矿化能力。

2.3 光催化机理

在 $T=35^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH}=9$ 和 $\text{Bi}_5\text{AP}-25\%$ 存在时, 通过向反应体系中加入牺牲剂来探究各活性物质对光催化过程的影响, 结果如图7所示。



1—无牺牲剂; 2—BQ; 3—EDTA-2Na; 4—TBA

图7 加入不同牺牲剂后RhB浓度的变化情况

由图7中可以看出, 本实验中苯醌(BQ)、叔丁醇(TBA)和乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA-2Na)分别用作超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和光生空穴(h^+)的牺牲剂。在体系中加入BQ几乎不会对光催化过程产生影响, 而加入TBA或EDTA-2Na后, RhB的降解速度明显降低, 特别是加入TBA后抑制作用最明显。结果表明, $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 在光催化降解RhB的过程中起主要作用, 其中 $\cdot\text{OH}$ 更加重要, $\cdot\text{O}_2^-$ 不是主要活性物质。

根据以上分析, 提出一种Z-型光催化反应机理, 结果如图8所示。

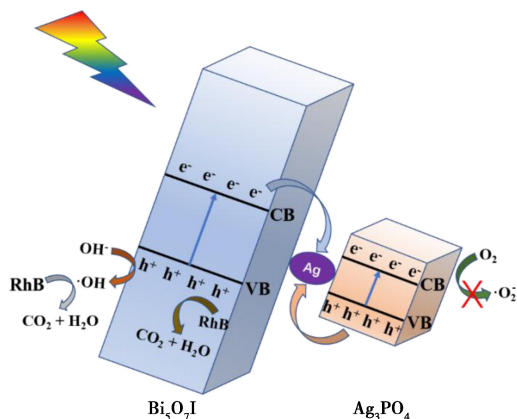


图8 光催化过程机理图

由图8中可以看出, 在模拟太阳光照射下, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 被激发, 位于VB上的电子跃迁到半导体的CB端并留下相应数量的空穴; 同时, Ag_3PO_4 由于光腐蚀现象产生少量的银单质, 这些银单质附着在 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 和 Ag_3PO_4 的表面成为电荷传输的“桥梁”; 位于 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ CB端的电子与位于 Ag_3PO_4 VB端的空穴转移到银单质表面并复合, 余下 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ VB端的空穴和 Ag_3PO_4 CB端的电子在相当长的时间内保持自由; 随后, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ VB端的大部分空穴倾向于氧化 OH^- 以形成 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{OH}$ 是一种氧化性极强的自由基, 能有效降解污染物, 剩下的小部分空穴则可以直接与RhB分子反应。

3 结论

成功合成了 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合光催化剂, 并对其进行了一系列表征。通过在模拟太阳光照射下RhB的降解速率来评估所合成催化剂的光催化性能, 并对光催化反应条件进行了优化。主要结论如下:

(1) 在 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合材料中, Ag_3PO_4 颗粒均匀地附着在 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 的棒状光滑表面, 提升了复合材料的光吸收能力, 进而导致光催化性能的增强。

(2) 在所合成的样品中, $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Ag}_3\text{PO}_4-25\%$ 表现出最令人满意的光催化活性。光催化反应的最佳温度和初始pH分别为 35°C 和9。在最佳条件下, 照射50 min后RhB溶液的TOC去除率可达59.89%。

(3) 增强的光催化性能主要得益于光生电子-空穴对的有效分离, 银单质的“桥梁”作用使得 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ VB端的 h^+ 相对自由, 为 $\cdot\text{OH}$ 的产生提供了条件。

参考文献

- [1] Li G, Qin F, Wang R, et al. BiOX ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) nanostructures: Mannitol-mediated microwave synthesis, visible light photocatalytic performance, and $\text{Cr}(\text{VI})$ removal capacity [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2013, 409: 43-51.
- [2] Yang Y, Zhang C, Lai C, et al. BiOX ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) photocatalytic nanomaterials: Applications for fuels and environmental management [J]. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2018, 254: 76-93.
- [3] Ke X, Zhang J, Zhu G, et al. Construction of direct Z-scheme $\text{WO}_3(\text{H}_2\text{O})_{0.333}/\text{BiOI}$ heterostructure with enhanced visible light photocatalytic performance [J]. *Materials Letters*, 2019, 245: 57-60.
- [4] Feng S, Du H, Xie T, et al. Preparation and photocatalytic activity of $\text{BiOI}/\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetic photocatalyst [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(8): 10468-10474.
- [5] Di J, Xia J, Li H, et al. Bismuth oxyhalide layered materials for en-

- ergy and environmental applications [J]. *Nano Energy*, 2017, 41: 172–192.
- [6] Huang H, Xiao K, Zhang T, *et al.* Rational design on 3D hierarchical bismuth oxyiodides via in situ self-template phase transformation and phase-junction construction for optimizing photocatalysis against diverse contaminants [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 203: 879–888.
- [7] Yang J, Xu L, Liu C, *et al.* Preparation and photocatalytic activity of porous Bi₅O₇I nanosheets [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 319: 265–271.
- [8] Chen R, Chen Z, Ji M, *et al.* Enhanced reactive oxygen species activation for building carbon quantum dots modified Bi₅O₇I nanorod composites and optimized visible-light-response photocatalytic performance [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2018, 532: 727–737.
- [9] Chen Y, Zhu G, Hojamberdiev M, *et al.* Three-dimensional Ag₂O/Bi₅O₇I p-n heterojunction photocatalyst harnessing UV-Vis-NIR broad spectrum for photodegradation of organic pollutants [J]. *J Hazard Mater*, 2018, 344: 42–54.
- [10] Shao B, Liu X, Liu Z, *et al.* A novel double Z-scheme photocatalyst Ag₃PO₄/Bi₂S₃/Bi₂O₃ with enhanced visible-light photocatalytic performance for antibiotic degradation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 368: 730–745.
- [11] Liu J, Xie F, Li R, *et al.* TiO_{2-x}/Ag₃PO₄ photocatalyst: Oxygen vacancy dependent visible light photocatalytic performance and BPA degradative pathway [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019, 97: 1–10.
- [12] Cheng H, Wu J, Tian F, *et al.* Visible-light photocatalytic oxidation of gas-phase Hg⁰ by colored TiO₂ nanoparticle-sensitized Bi₅O₇I nanorods: Enhanced interfacial charge transfer based on heterojunction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 360: 951–963.
- [13] Li X, Chen T, Lin H, *et al.* Intensive photocatalytic activity enhancement of Bi₅O₇I via coupling with band structure and content adjustable BiOBr_xI_{1-x} [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(4): 219–227.
- [14] Huang S, Xu Y, Zhou T, *et al.* Constructing magnetic catalysts with in-situ solid-liquid interfacial photo-Fenton-like reaction over Ag₃PO₄@NiFe₂O₄ composites [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018, 225: 40–50.
- [15] Zhang N, Zhang X, Gan C, *et al.* Heterostructural Ag₃PO₄/UiO-66 composite for highly efficient visible-light photocatalysts with long-term stability [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, 376: 305–315.
- [16] Wang Y, Deng K, Zhang L. Visible light photocatalysis of BiOI and its photocatalytic activity enhancement by in situ ionic liquid modification [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(29): 14300–14308.
- [17] Zhao Z, Wang M, Yang T, *et al.* In situ co-precipitation for the synthesis of an Ag/AgBr/Bi₅O₇I heterojunction for enhanced visible-light photocatalysis [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2016, 424: 8–16.
- [18] Feng Z, Zeng L, Zhang Q, *et al.* In situ preparation of g-C₃N₄/Bi₄O₅I₂ complex and its elevated photoactivity in Methyl Orange degradation under visible light [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 87: 149–162.
- [19] Liu L, Qi Y, Lu J, *et al.* A stable Ag₃PO₄@g-C₃N₄ hybrid core@shell composite with enhanced visible light photocatalytic degradation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, 183: 133–141.
- [20] Idris A M, Shinger M I, Barkaoui S, *et al.* Fabrication of RGO-Fe₃O₄ hybrid functionalized with Ag₃PO₄ as photocatalyst for degradation of rhodamine B under visible light irradiation [J]. *Materials Research Bulletin*, 2018, 102: 100–107.
- [21] Panthi G, Ranjit R, Kim H Y, *et al.* Size dependent optical and antibacterial properties of Ag₃PO₄ synthesized by facile precipitation and colloidal approach in aqueous solution [J]. *Optik*, 2018, 156: 60–68.
- [22] Liu R, Li H, Duan L, *et al.* The synergistic effect of graphene oxide and silver vacancy in Ag₃PO₄-based photocatalysts for rhodamine B degradation under visible light [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 462: 263–269.
- [23] Fu F, Shen H, Sun X, *et al.* Synergistic effect of surface oxygen vacancies and interfacial charge transfer on Fe(III)/Bi₂MoO₆ for efficient photocatalysis [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 247: 150–162.
- [24] Zhang G, Chen D, Li N, *et al.* Fabrication of Bi₂MoO₆/ZnO hierarchical heterostructures with enhanced visible-light photocatalytic activity [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 250: 313–324.
- [25] Liu C, Huang H, Du X, *et al.* In Situ Co-crystallization for fabrication of g-C₃N₄/Bi₅O₇I heterojunction for enhanced visible-light photocatalysis [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(30): 17156–17165.
- [26] Wang H, Lei Z, Li L, *et al.* Holey g-C₃N₄ nanosheet wrapped Ag₃PO₄ photocatalyst and its visible-light photocatalytic performance [J]. *Solar Energy*, 2019, 191: 70–77. ■

(上接第 126 页)

- [17] Prins R, De Beer V H J, Somorjai G A. Structure and function of the catalyst and the promoter in Co-Mo hydrodesulfurization catalysts [J]. *Catalysis Reviews-Science and Engineering*, 1989, 31(1–2): 1–41.
- [18] Ahmed S M, Gerischer H. Influence of crystal surface orientation on redox reactions at semiconducting MoS₂ [J]. *Electrochimica Acta*, 1979, 24(6): 705–711.
- [19] Hinnemann B, Moses P G, Bonde J, *et al.* Biomimetic hydrogen evolution; MoS₂ nanoparticles as catalyst for hydrogen evolution [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(15): 5308–5309.
- [20] Li T, Galli G. Electronic properties of MoS₂ nanoparticles [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(44): 16192–16196.
- [21] Lee H, Lee E, Lee C H, *et al.* Degradation of chlorotetracycline and bacterial disinfection in livestock wastewater by ozone-based advanced oxidation [J]. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 2011, 17(3): 468–473. ■