

# 组装态 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 纳米材料的制备及其光催化性能研究

宋月红<sup>1</sup>, 代卫丽<sup>1</sup>, 周春生<sup>1</sup>, 赵杰<sup>1</sup>, 赵敬哲<sup>2\*</sup>

(1. 商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

2. 湖南大学化学化工学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**以硝酸铋、PEG 4000、NaCl、KI 和 NaOH 为原料, 通过简单的液相沉淀法制备出组装态  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料。通过 XRD、XPS、SEM、UV-Vis 等对所得产物进行测试和表征, 研究了不同 NaCl 和 KI 的添加量对  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的形成和光催化活性的影响, 并对光催化反应机理进行了探索。结果表明, NaCl 和 KI 的加入量分别为 45 mL 和 5 mL 时, 所得  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品光催化性能最好; 见光 2 h 后, 对罗丹明 B (RhB)、亚甲基蓝 (MB) 和环丙沙星 (CIP) 的光催化降解率分别为 92.53%、88.15%、42.33%。

**关键词:** 组装态;  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料; 液相沉淀法; 光催化; 降解机理

中图分类号: O6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)07-0100-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.07.021

## Synthesis of assembled $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ nanomaterial and study on its photocatalytic performance

SONG Yue-hong<sup>1</sup>, DAI Wei-li<sup>1</sup>, ZHOU Chun-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, ZHAO Jing-zhe<sup>2\*</sup>

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, College of

Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Assembled  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  nanomaterials are prepared by a simple liquid-phase precipitation method at 75°C through using bismuth nitrate, polyethylene glycol 4000 (PEG 4000), sodium chloride, potassium iodide and sodium hydroxide as raw materials. The products are characterized by X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscope (SEM) and ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-Vis). Effects of different adding amounts of NaCl and KI on the formation of  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  and its photocatalytic activity are studied, and the photocatalytic mechanism is explored. It is shown that the best photocatalytic performance can be obtained by the  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  sample prepared under the conditions that the dosages of NaCl and KI are 45 mL and 5 mL, respectively, over which the degradation rates of RhB, methylene blue and ciprofloxacin can reach 92.53%, 88.15%, 42.33%, respectively after 2 h of light irradiation.

**Key words:** assembled state;  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  nanomaterials; liquid-phase precipitation method; photocatalytic; degradation mechanism

近年来,以半导体及其复合材料为催化剂的光催化技术,因具有反应条件温和、无污染、操作简单、可持续且经济高效等优点,对降解水体中有机染料和抗生素等药物的应用引起广大科研工作者的关注<sup>[1-5]</sup>。其中,铋基半导体光催化剂已经逐渐成为研究的热点<sup>[6-8]</sup>。 $\text{BiOX}$  (X 为 Cl、Br 和 I) 纳米材料是由 1 个  $[\text{Bi}_2\text{O}_2]$  层与 2 个卤原子层通过静电作用交错形成的层状结构,这种特殊的层状结构在光催化过程中有利于电子-空穴对的分离,展现出优异的光催化性能<sup>[9]</sup>。理论计算表明,  $\text{BiOX}$  的价带主要是由  $\text{O}_{2p}$  和  $\text{X}_{5p}$  组成,导带是由  $\text{Bi}_{6p}$  轨道组成<sup>[10]</sup>。

目前,  $\text{BiOI}$ 、 $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$ 、 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  和  $\text{Bi}_7\text{O}_9\text{I}_3$  的合成已有报道<sup>[11-14]</sup>,且  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的光催化能力优于  $\text{BiOI}$ <sup>[15]</sup>。这主要是由于  $\text{BiOI}$  中 I 原子含量的减少可以增大能带间隙,改变价带和导带的位置,进而增强光催化过程中的还原能力。同时,  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料的形貌对降解性能也有很大的影响<sup>[16]</sup>。如 Ye 课题组<sup>[17]</sup>通过水热法和固相转化法分别合成了棒状和片状的  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ ,结果表明棒状  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  在降解染料方面表现出更好的性能。Zhao 课题组<sup>[18]</sup>报道了由纳米线组装的  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  相对于单分散的  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米线在降解有机污染物方面表现出更好的光催化活性。尽管有

收稿日期: 2019-09-10; 修回日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(21571057); 商洛学院科研项目资助(17SKY018); 陕西省教育厅重点实验室项目(19JS026); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-156)

作者简介: 宋月红(1986-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为光催化技术, s\_yh1009@163.com; 赵敬哲(1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向为功能纳米材料的合成及催化, zhaojz@hnu.edu.cn。

关  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料的研究工作已经做了很多,但对于其高效的制备、形貌控制以及光催化能力还有待进一步的探索。

笔者主要通过液相共沉淀法,采用廉价且对环境友好的反应原料,简单快速地制备出具有高效光催化性能的组装态  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料。通过添加不同量的 NaCl 和 KI 调控样品的组成结构和形貌,并对其进行 XRD、XPS、SEM 等表征,研究了组装态  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的光催化降解性能。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

硝酸铋  $[\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ 、聚乙二醇 4000 (PEG 4K)、NaCl、KI、RhB、MB 和 CIP,均为分析纯,没有经过特殊处理;水为自制的去离子水。荷兰 PANalytical 公司生产的 X'Pert PRO MRD 型 X-射线衍射仪;日本生产的 Hitachi S-4800 扫描电子显微镜;日本岛津 Kratos 公司生产的 AXIS SUPRA 型 X-射线光电子能谱;日本岛津公司生产的 UV-1800 分光光度计;上海比朗仪器制造有限公司生产的 BILON-GHX-V 型光化学反应仪,光源为 350 W 的氙灯。

### 1.2 $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ 纳米材料的制备

在  $75^\circ\text{C}$  恒温水浴条件下,先向三口瓶中加入 10 mL 1 mol/L 的  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  溶液(含 0.02 mol  $\text{HNO}_3$ ),搅拌 2 min 后,加入 50 mL 0.07 g 的 PEG 4K 溶液(质量分数为 3%),间隔 2 min,加入不同摩尔比 NaCl 和 KI 的量混合溶液 50 mL,浓度均为 0.2 mol/L,继续搅拌 10 min,最后加入 40 mL 2.5 mol/L NaOH 溶液,体系的 pH 为 12,反应 60 min 后停止实验,得到淡黄色沉淀。减压抽滤条件下将该淡黄色沉淀依次用去离子水和乙醇分别洗涤多次,然后置于  $60^\circ\text{C}$  烘箱中干燥,收集样品用于进一步的实验和表征。

### 1.3 光催化性能测试

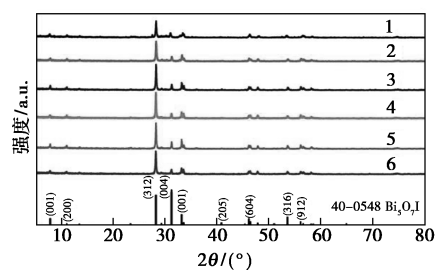
在光催化反应实验中,以 350 W 氙灯作为光源,RhB、MB 和 CIP 的初始质量浓度均为 10 mg/L,体积为 50 mL,催化剂质量为 20 mg。光照前,将含催化剂的悬浮液超声分散 3 min,然后在暗处搅拌 60 min 以达到表面吸附-脱附平衡。开灯后,间隔一定时间分别取 3 mL 溶液,离心去除其中的样品颗粒,用 UV-1800 紫外-可见分光光度计测定上清液的吸光度值。RhB、MB、CIP 的最大吸收波长分别为 554、664、270 nm,通过测定的吸光度值与原液的吸

光度值计算降解率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相分析

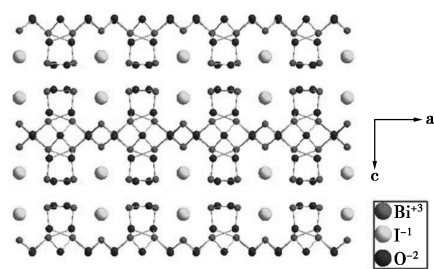
加入不同量 NaCl 和 KI 的混合液所合成样品的 XRD 谱图如图 1 所示。将 NaCl 和 KI 的摩尔比为 9:1、7:3、5:5、3:7、1:9 和 0:10 的样品分别标记为 10% KI、30% KI、50% KI、70% KI、90% KI 和 100% KI。从图 1 中可以看出,所合成的样品均为纯的  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ ,所有的衍射峰都对应于  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  标准卡片(JCPDS card no. 40-0548),没有其他杂质峰存在。6 个样品的衍射峰强度相近,结晶度均较好,说明不同 NaCl 和 KI 的添加量对样品的晶相和结晶度影响不大。



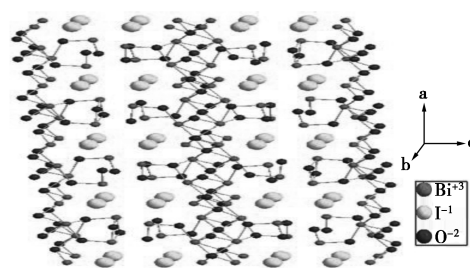
1—10% KI; 2—30% KI; 3—50% KI; 4—70% KI;  
5—90% KI; 6—100% KI

图 1 不同摩尔分数 KI 所得样品的 XRD 谱图

用 Diamond 3.2 软件画出的不同方向上  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的晶体结构如图 2 所示。从图 2 中可以看出,其为层状结构。



(a) 100 方向上  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的晶体图



(b) 111 方向上  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的晶体图

图 2  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的晶体结构图

为了进一步研究样品元素组成及化学价态,对 10% KI 样品进行了 XPS 测试,结果如图 3 所示。从图 3(a)中可以明显看到检测到 Bi、C、O 和 I 元素,与 XRD 的检测结果相一致。从图 3(b)中可以看出,158.9 eV 和 164.3 eV 分别对应着 Bi 4f<sub>7/2</sub> 和 Bi 4f<sub>5/2</sub> 两个轨道上的电子,表明 Bi<sup>3+</sup> 是材料中 Bi 元素存在的主要价态。从图 3(c)中可以看出,其峰分裂为 2 个峰,表明 O 原子存在 2 种不同的化学环境。530.3 eV 的峰对应于 [Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> 层中的 Bi—O 键,531.5 eV 的峰对应于 Bi—OH 键。从图 3(d)中可以看出,619.0 eV 和 630.5 eV 分别对应着 I 3d<sub>5/2</sub> 和 I 3d<sub>3/2</sub> 轨道上的一价碘离子。这些结果与文献[19-20]中报道的结果相一致。从图 3(e)中可以看出,197.9 eV 和 199.5 eV 分别对应 Cl 2p<sub>3/2</sub> 和 Cl 2p<sub>1/2</sub> 两个轨道上的电子,他们的峰强度相对弱一些,结合图 2 的 BiOI 晶体图可知,这主要是由于部分 Cl 原子取代了 [Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> 层中的 I 原子,说明 NaCl 的添加对形成的 Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I 晶体结构有较大的影响,进而会影响其性能。

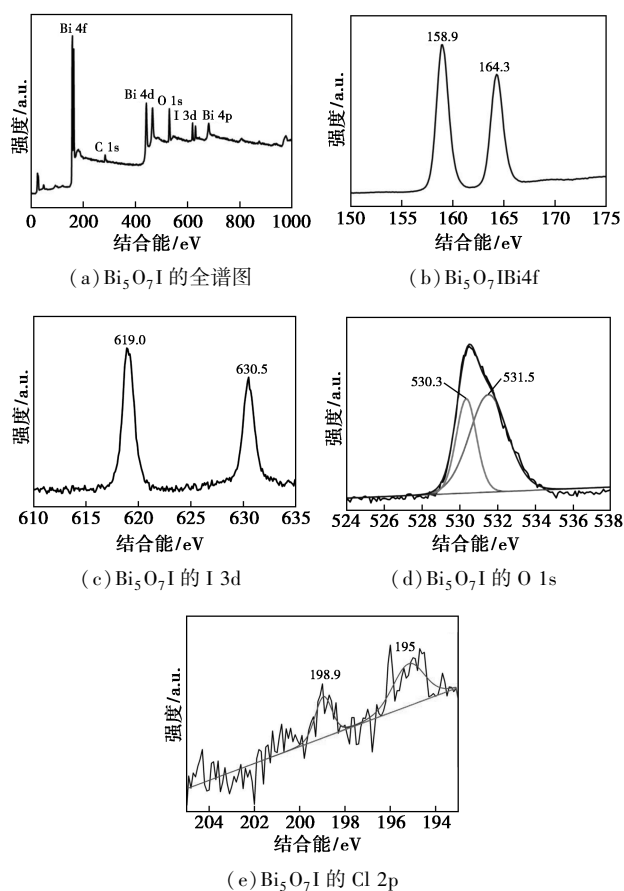


图 3 Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I 的 XPS 图

## 2.2 形貌表征与分析

所合成 Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I 的 SEM 照片如图 4 所示。从图

4(a)可以看出,10% KI 样品中既有单分散的纳米线也有由纳米线组装成的微米花,微米花的长度约为 8~24 μm,宽度约为 8 μm;纳米线的长度约为 2 μm,直径为 4~6 μm,并且他们之间交错较疏松,还有明显的空隙结构。这是由于 NaCl 的加入量较大,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 不但起分散作用,而且可以进入到样品晶体的结构内部,从而影响样品的形貌。从图 4(b)中可以看出,30% KI 样品也为花状结构,同样由数百条纳米线组装而成。纳米线的长度约为 2 μm,微米花长度为 7~15 μm,单分散的纳米线较 10% KI 的样品少。从图 4(c)和图 4(d)中可以看出,2 个样品的花状结构尺度明显变小,且纳米线交错更密实。微米花尺寸为 6~12 μm,纳米线的长度约为 5~8 μm,宽度约为 200~300 nm。从图 4(e)和图 4(f)中可以看出,随着 NaCl 的量减少和 KI 的量的增加,样品的花状结构组装的更为密实,微米花的尺寸逐渐减小,单分散的纳米线的数量也逐渐变少。其中纳米线的长度约为 4 μm,微米花的长度约为 8 μm。因此,不同 NaCl 和 KI 的添加量对样品的形貌也有较大的影响,NaCl 的添加量越多得到的微米花组装结构越疏松,不添加 NaCl 得到的 Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I 样品[如图 4(f)所示]纳米线交错成最致密的微米花。

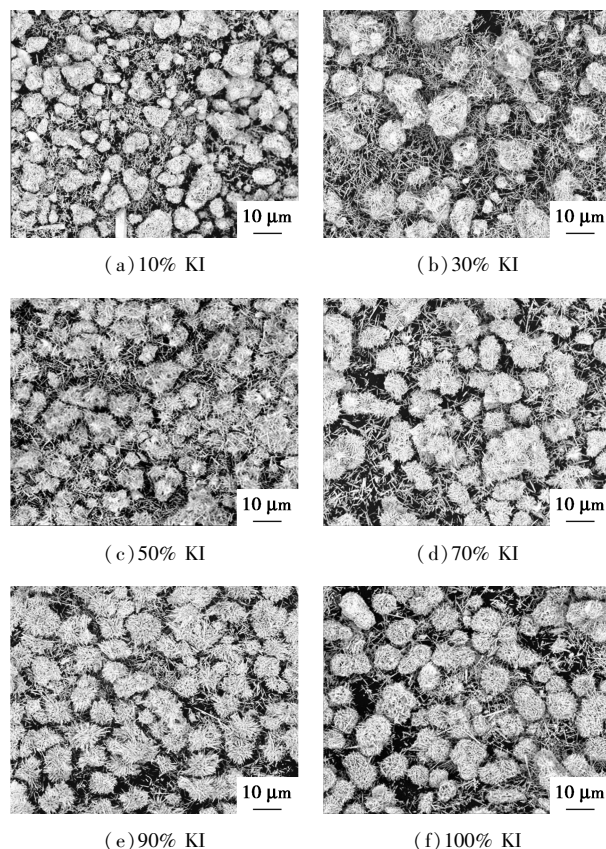


图 4 不同 KI 摩尔分数所得 Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I 样品的 SEM 图

从实验合成过程中观察发现,  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  和 PEG 4K 加入后会有白色浑浊产生, 这主要是由于  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  水解生产  $\text{BiONO}_3$ 。NaCl 和 KI 混合液的加入, 随着 KI 的量的增加会生成从黄色到血红色的沉淀, 当加入 NaOH 之后沉淀都变成淡黄色,  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的形成机理如图 5 所示。

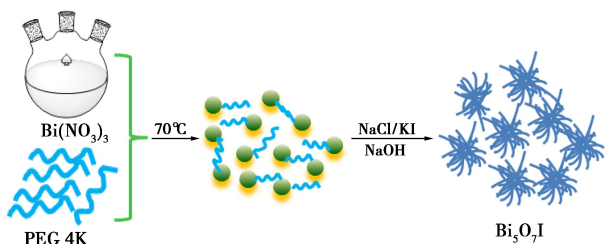
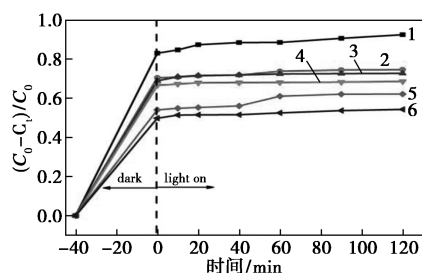


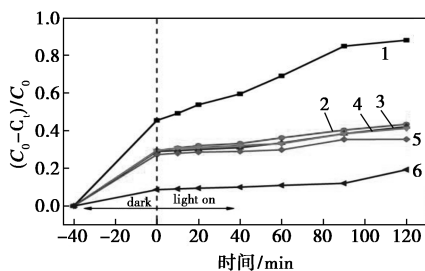
图 5  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的形成机理图

### 2.3 光催化性能与机理分析

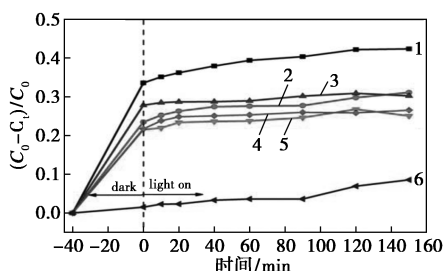
在 350 W 氙灯照射下, 以 RhB、MB 和 CIP 为模拟降解物评价所合成样品的的光催化活性, 结果如图 6 所示。在进行光催化降解实验之前, 先将溶液



(a)  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品对罗丹明 B 的降解图



(b)  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品对亚甲基蓝的降解图



(c)  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品对环丙沙星的降解图

1—10% KI; 2—30% KI; 3—50% KI; 4—70% KI;  
5—90% KI; 6—100% KI

图 6  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品的光催化降解效果图

置于暗室搅拌 40 min, 使  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  样品表面对 RhB、MB 和 CIP 达到吸脱平衡。从图 6(a) 中可以看出, 暗室 40 min 后, 10% KI~100% KI 样品吸附率逐渐降低。见光后 10% KI 样品降解率最好, 见光 2 h 后的降解率达到 92.53%, 30% KI~100% KI 的样品的降解率分别为 74.61%、72.71%、68.59%、62.16%、54.30%。从图 6(b) 中可以看, 10% KI 样品的吸附率最大, 光降解率最好。在光照 2 h 后, 10% KI~100% KI 的样品对 MB 的降解率分别为 88.15%、43.43%、42.11%、41.33%、35.43%、19.29%。从图 6(c) 中可以看出, 对 CIP 的降解规律和前面是一致的, 10% KI~100% KI 的样品暗室吸附率和光催化效率都是逐渐降低, 150 min 后其光催化效果分别为 42.33%、31.07%、30.21%、25.02%、26.52% 和 8.55%。从 6 个样品对 RhB、MB 和 CIP 的光催化降解结果来看, 合成过程中 NaCl 的加入量越多越有利于光降解效率的提升, 这主要是由于 NaCl 的添加影响到最终样品的晶体组成结构和形貌, 降低了电子-空穴对的复合机率。

为进一步研究  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的光催化机理, 选取 10% KI 的样品进行了捕获实验, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 当异丙醇加入到光催化反应体系后, RhB 的降解率几乎没有什么变化, 表明  $\cdot\text{OH}$  在光催化降解过程中没起作用。当抗坏血酸加入到光催化反应体系后, RhB 的降解率从 92.53% 下降到 51.76%, 表明  $\cdot\text{O}^{2-}$  在  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  对 RhB 的光催化降解过程中起重要作用。当加入  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  到光催化反应体系后, RhB 的降解率下降到 56.53%, 表明光生  $\text{h}^+$  在光催化过程中也起到重要作用。综合上述,  $\cdot\text{O}^{2-}$  和  $\text{h}^+$  在光催化降解过程中起主要作用。

表 1 加入不同捕获剂时  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的降解数据

捕获剂	无	异丙醇	抗坏血酸	$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$
降解率/%	92.52	92.38	51.76	56.53

### 3 结论

通过简单的液相沉淀法合成了组装态  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料, 并对其进行了 XRD、XPS、SEM 等表征, 同时对 RhB、MB 和 CIP 的光催化性能进行了研究。实验结果表明,  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  的光催化活性与 NaCl 的加入量有关, 其中 45 mL NaCl 和 5 mL KI 混合液 (10% KI 样品) 所合成的  $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$  纳米材料光催化性能最好, 见光 2 h 后, 对 RhB、MB 和 CIP 的降解率分别达

到 92.53%、88.15%、42.33%，表现出良好的光催化活性和稳定性。

### 参考文献

- [1] Jansanthea P, Chomkitichai W. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue by using Au-TiO<sub>2</sub> [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2019, 886: 107–113.
- [2] Noua A, Farh H, Guemini R, *et al.* Photocatalytic degradation of methylene blue by NiO thin films under solar light irradiation [J]. *Journal of Nano Research*, 2019, 56: 152–157.
- [3] Zheng Y J, Cao L Y, Xing G X, *et al.* Microscale flower-like magnesium oxide for highly efficient photocatalytic degradation of organic dyes in aqueous solution [J]. *RSC Advances*, 2019, 9: 7338–7348.
- [4] Pattnaik S P, Behera A, Martha S, *et al.* Facile synthesis of exfoliated graphitic carbon nitride for photocatalytic degradation of ciprofloxacin under solar irradiation [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54: 5726–5742.
- [5] Sabouni R, Gomaa H. Photocatalytic degradation of pharmaceutical micro-pollutants using ZnO [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 5372–5380.
- [6] Cao Q W, Cui X, Zheng Y F, *et al.* A novel CdWO<sub>4</sub>/BiOBr p-n heterojunction as visible light photocatalyst [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 670: 12–17.
- [7] Li X W, Xu H F, Wang L, *et al.* Spinel NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles decorated BiOBr nanosheets for improving the photocatalytic degradation of organic dye pollutants [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, 85: 257–264.
- [8] Hu H M, Xu J J, Deng C H, *et al.* 3D multilayered Bi<sub>4</sub>O<sub>5</sub>Br<sub>2</sub> nanoshells displaying excellent visible light photocatalytic degradation behaviour for resorcinol [J]. *Micro & Nano Letters*, 2018, 13: 1–5.
- [9] Jia H M, He W W, Zhang B B, *et al.* Facile synthesis of bismuth oxyhalide nanosheet films with distinct conduction type and photo-induced charge carrier behavior [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 441: 832–840.
- [10] Zhang D, Wang F, Cao S Z, *et al.* Investigation on enhanced photocatalytic degradation of bisphenol A with bismuth oxyiodide catalyst using response surface methodology [J]. *RSC Advances*, 2018, 8: 5967–5975.
- [11] Wu G J, Zhao Y, Li Y W, *et al.* pH-dependent synthesis of iodine-deficient bismuth oxyiodide microstructures; Visible-light photocatalytic activity [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 510: 228–236.
- [12] Bai Y, Chen T, Wang P Q, *et al.* Bismuth-rich Bi<sub>4</sub>O<sub>5</sub>X<sub>2</sub> (X = Br, and I) nanosheets with dominant {101} facets exposure for photocatalytic H<sub>2</sub> evolution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 304: 454–460.
- [13] Hou J, Wei R, Wu X, *et al.* Investigation on enhanced photocatalytic degradation of bisphenol A with bismuth oxyiodide catalyst using response surface methodology [J]. *Dalton Transactions*, 2018, 47: 6692–6701.
- [14] Yan Q S, Zhao Y L, Xu M M. Enhanced visible-light photocatalytic performance of various bismuth oxyiodide with 3D hierarchical microspheres architecture [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2016, 16: 7731–7737.
- [15] Han J L, Zhu G Q, Hojamberdiev M, *et al.* Temperature effect on phase transition and morphological transformation of BiOI microspheres to Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I microstructures [J]. *Materials Letters*, 2016, 169: 122–125.
- [16] Zhang Y F, Zhu G Q, Hojamberdiev M, *et al.* Superior-performance spherical-like Eu-doped Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I photocatalysts for the removal of organic pollutants under visible light irradiation [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28: 11034–11045.
- [17] Su Y R, Wang H, Ye L Q, *et al.* Shape-dependent photocatalytic activity of Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I caused by facets synergetic and internal electric field effects [J]. *RSC Advances*, 2014, 4: 65056–65064.
- [18] Wu G J, Zhao Y, Li Y W, *et al.* Assembled and isolated Bi<sub>5</sub>O<sub>7</sub>I nanowires with good photocatalytic activities [J]. *CrystEngComm*, 2017, 19: 2113–2125.
- [19] Han J L, Zhu G Q, Hojamberdiev M, *et al.* Rapid adsorption and photocatalytic activity for Rhodamine B and Cr(VI) by ultrathin BiOI nanosheets with highly exposed {001} facets [J]. *New Journal of Chemistry*, 2015, 39: 1874–1882.
- [20] Liu X F, Xiong X Y, Ding S P, *et al.* Bi metal-modified Bi<sub>4</sub>O<sub>5</sub>I<sub>2</sub> hierarchical microspheres with oxygen vacancies for improved photocatalytic performance and mechanism insights [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2017, 7: 3580–3590. ■
- (上接第 99 页)
- [11] Zhao D, Gao X, Wu C, *et al.* Facile preparation of amino functionalized graphene oxide decorated with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for the adsorption of Cr(VI) [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 384: 1–9.
- [12] Yu L, Chen J D, Liang Z, *et al.* Degradation of phenol using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-GO nanocomposite as a heterogeneous photo-Fenton catalyst [J]. *Separation & Purification Technology*, 2016, 171: 80–87.
- [13] Chang F, Xie Y, Li C, *et al.* A facile modification of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> with enhanced photocatalytic activity for degradation of methylene blue [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280(8): 967–974.
- [14] 王涛, 司玉军. 层状石墨相 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 氮化碳的简易制备和表征 [J]. *材料导报*, 2012, (s1): 36–38.
- [15] Hou L, Hui Z, Xue X. Ultrasound enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate by magnetite catalyst for the degradation of tetracycline in water [J]. *Separation & Purification Technology*, 2012, 84(2): 147–152.
- [16] 王艳, 杨硕, 张米雪, 等. ZnFe/BC 活化过硫酸盐降解金橙 II [J]. *环境化学*, 2018, 37(12): 2630–2637.
- [17] Dulova N, Kattel E, Trapido M. Degradation of naproxen by ferrous ion-activated hydrogen peroxide, persulfate and combined hydrogen peroxide/persulfate processes; The effect of citric acid addition [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 318: 254–263.
- [18] Zulfikarm A, Afrita S, Wahyuningrum D, *et al.* Preparation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-chitosan hybrid nano-particles used for humic acid adsorption [J]. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 2016, 6: 64–75.
- [19] Leng Y, Guo W, Shi X, *et al.* Polyhydroquinone-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocatalyst for degradation of rhodamine B based on sulfate radicals [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(38): 13607–13612.
- [20] 王艳, 李春华, 龚畏, 等. 四氧化三铁活化过硫酸盐降解活性黑 5 [J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(8): 861–863. ■