

# Fe 掺杂 BiOBr 空心花球光催化剂的制备及其降解刚果红性能研究<sup>①</sup>

葛健宇<sup>1</sup>, 陈冬生<sup>1</sup>, 李 军<sup>2</sup>, 许向阳<sup>1,3</sup>, 沈裕军<sup>4</sup>, 杨子航<sup>1</sup>

(1.中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 2.湖南柿竹园有色金属有限责任公司, 湖南 郴州 423000; 3.矿物材料及其应用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083; 4.长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 采用水热法合成了具有空心花球形貌的 BiOBr 光催化剂, 通过调整 Fe<sup>3+</sup>/Bi<sup>3+</sup> 物质的量比, 制备了不同 Fe 掺杂量的 BiOBr 光催化剂, 并对其晶体结构、形貌、光学及电化学性质进行了表征。以有机染料刚果红为污染底物, 在可见光照射下, 通过测试光催化剂对污染物的降解效果来评价其催化活性。结果表明, Fe 掺杂量为 7% 的光催化材料表现出较好的光催化性能, 5 W 发光二极管光源照射 180 min 时, 该光催化剂对刚果红的降解率为 89.66%, 远高于未掺杂 BiOBr 催化剂的降解率 (62.82%)。Fe 掺杂 BiOBr 光催化性能的提升归因于增强的光吸收能力及光生载流子的高效转移和分离。

**关键词:** 溴氧化铋; 铁掺杂; 空心花球; 光催化; 降解; 刚果红

中图分类号: TB383

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.035

文章编号: 0253-6099(2023)05-0154-05

## Preparation of Fe-doped BiOBr Hollow Microsphere for Efficient Degradation of Congo Red Under Visible Light

GE Jianyu<sup>1</sup>, CHEN Dongsheng<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, XU Xiangyang<sup>1,3</sup>, SHEN Yujun<sup>4</sup>, YANG Zihang<sup>1</sup>

(1.School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Hunan Shizhuyuan Nonferrous Metals Co Ltd, Chenzhou 423000, Hunan, China; 3.Key Laboratory of Mineral Materials and Application of Hunan Province, Changsha 410083, Hunan, China; 4.Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** Hollow microsphere BiOBr photocatalyst was synthesized using hydrothermal method. BiOBr photocatalyst doped with different content of Fe were prepared by regulating Fe<sup>3+</sup>/Bi<sup>3+</sup> molar ratio. The crystal structure, morphology, optical and electrochemical properties of Fe-doped BiOBr photocatalyst were characterized respectively. With organic dye Congo red (CR) as the pollutant, its photocatalysis was evaluated by testing the degradation effect of the photocatalyst on the pollutant under visible light irradiation. The results showed that the photocatalytic material with 7% Fe doping exhibited the optimal photocatalytic performance. The degradation efficiency of CR within 180 min of irradiation with 5 W light-emitting diode (LED) was 89.66%, which was much higher than that of undoped BiOBr (62.82%). It is found that the enhanced photocatalytic performance of Fe-doped BiOBr is attributed to the enhanced light absorption and the efficient transfer and separation of photogenerated carriers.

**Key words:** BiOBr; Fe<sup>3+</sup> doping; hollow microsphere; photocatalysis; degradation; Congo red (CR)

工业化、城镇化和农业快速发展产生的大量废水亟须及时处理<sup>[1-4]</sup>。传统水处理工艺往往只能去除水体中一些易降解的污染物, 导致大部分污染物未能得

到有效处理<sup>[5-6]</sup>。半导体光催化技术具有低成本、易操作、无二次污染等特点, 被认为是一种解决环境水体污染问题的潜在绿色技术<sup>[7-9]</sup>。溴氧化铋 (BiOBr) 因其

① 收稿日期: 2023-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2905105)

作者简介: 葛健宇(2002—), 男, 江苏兴化人, 主要研究方向为铋基光催化材料应用。

通信作者: 许向阳(1971—), 男, 湖南平江人, 博士, 副研究员, 主要从事超硬材料、矿物材料和复合材料研究。

特殊的层状结构、合适的禁带宽度、优异的光催化性能而受到广泛关注<sup>[10]</sup>,但较低的可见光利用率和较高的光生电子-空穴复合率严重限制了其实际应用<sup>[11]</sup>。国内外学者提出了形貌调控、异质元素掺杂和异质结构筑等多种改良策略<sup>[12-14]</sup>,其中,金属掺杂可拓宽光吸收范围、加速光生载流子的分离和转移,被认为是一种简单高效的改良手段<sup>[15]</sup>。本文以过渡金属 Fe 为掺杂元素,采用水热法合成了不同 Fe 掺杂比例的 BiOBr 空心花球光催化剂,并对其晶体结构、形貌、光学及电化学性质进行表征,基于其对刚果红(CR)染料的降解效果研究该材料的光催化性能。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

主要试剂有五水合硝酸铋( $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 99.0%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB,  $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{NBr}$ , 99.0%, 国药集团化学试剂有限公司)、九水合硝酸铁( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , 98.5%, 上海麦克林生化科技有限公司)、聚乙烯吡咯烷酮 K30(PVP,  $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$ , 45 000~55 000 da, 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司)、乙二醇(EG,  $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ , 99.5%, 上海泰坦科技股份有限公司)、刚果红(CR,  $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$ , 99.0%, 天津科密欧化学试剂有限公司)。实验用水为去离子水。

主要仪器有多通道光催化反应系统(PCX50C, 北京泊菲莱科技有限公司)、X射线衍射仪(TD-3500, 丹东通达科技有限公司)、扫描电子显微镜(KYKY-EM6200, 北京中科科仪股份有限公司)、紫外-可见分光光度计(Evolution 220, 赛默飞世尔科技公司)、电化学工作站(CHI760E, 上海辰华仪器有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 Fe 掺杂 BiOBr 空心花球的制备

称取 4 mmol  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,按 Fe 与 Bi 物质的量比分别为 0、0.03、0.05、0.07、0.10 加入  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,再分别加到 30 mL 乙二醇中搅拌 30 min,记为 A 溶液;称取 4 mmol CTAB 与 20 mg PVP,加到 30 mL 乙二醇中搅拌 30 min,记为 B 溶液;将 A 溶液以 2 mL/min 的速度缓慢滴加到 B 溶液中,继续搅拌 30 min,将混合溶液转移至 100 mL 不锈钢水热合成反应釜的聚四氟乙烯内胆中,密封后置于烘箱中,120 °C 下保温 12 h 后,取出冷却至室温。沉淀用去离子水和乙醇各离心洗涤 3 次,于 60 °C 下真空干燥 12 h,制得 Fe 掺杂 BiOBr 样品。所得样品按照 Fe 与 Bi 物质的量比不同分别记为

BiOBr、0.03FBOB、0.05FBOB、0.07FBOB、0.1FBOB。

#### 1.2.2 光催化性能测试

光催化实验在使用 5 W 发光二极管(白光,400~760 nm)作为可见光光源的多通道光催化反应系统中进行。每次测试时,将 25 mg 光催化剂样品分散到 50 mL 浓度为 50 mg/L 的 CR 水溶液中,在黑暗中搅拌 120 min 达到吸附-解吸平衡;然后打开光源,每隔 20 min 取 2 mL 溶液样品,使用紫外分光光度计在波长 498 nm 处测定离心后上清液中 CR 浓度。根据浓度随时间变化情况绘制光降解曲线,并采用一级动力学方程对实验数据进行拟合,绘制  $\ln(C_0/C_t)-t$  曲线,进一步研究光催化降解过程。其中  $C_0$  和  $C_t$ (mg/L)分别为吸附平衡时和光照时间  $t$ (min)时刻 CR 溶液浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

图 1 为不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品 XRD 图谱。图 1 中,  $2\theta$  角  $10.9^\circ$ 、 $25.2^\circ$ 、 $31.7^\circ$ 、 $32.3^\circ$ 、 $39.3^\circ$ 、 $46.3^\circ$  和  $57.2^\circ$  的衍射峰分别对应四方相 BiOBr(JCPDS 85-0862)的(001)、(101)、(102)、(110)、(112)、(200)和(212)面网。与 BiOBr 相比,Fe 掺杂 BiOBr 样品的衍射峰强度略微降低,说明原子排布有序性有所下降。同时,(102)面的衍射峰向高角度方向偏移,且随着 Fe 掺杂量增加,逐渐与(110)面网的衍射峰合并。这些变化可能是半径较小(0.079 nm)的  $\text{Fe}^{3+}$  取代晶格中半径较大(0.103 nm)的  $\text{Bi}^{3+}$  引起的,表明  $\text{Fe}^{3+}$  成功掺入了 BiOBr 的晶格中<sup>[16]</sup>。

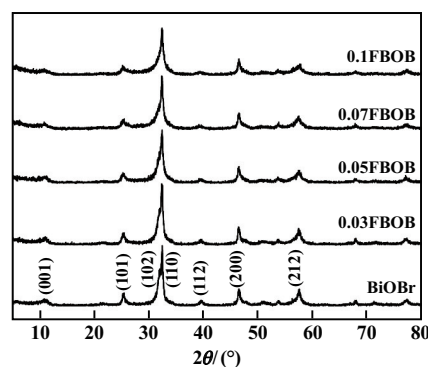
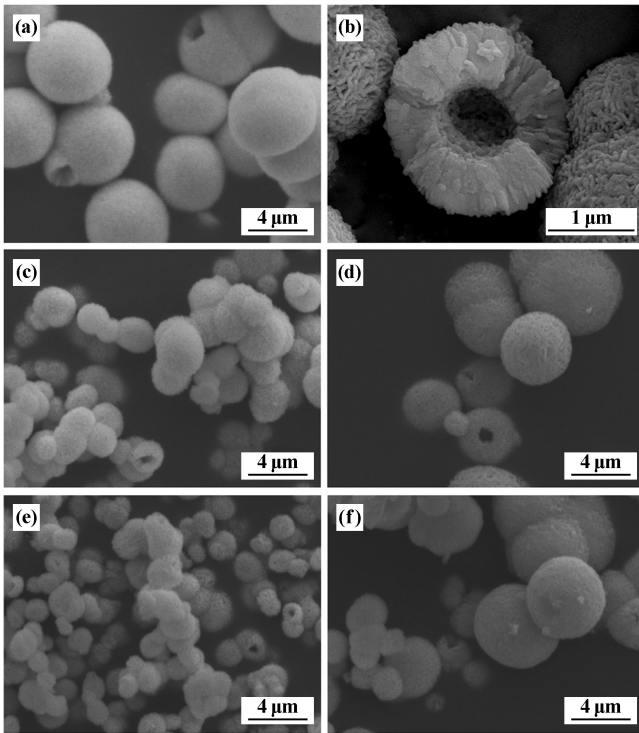


图 1 不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品 XRD 图谱

### 2.2 SEM 分析

不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品 SEM 照片如图 2 所示。由图 2 可知,未掺杂 Fe 时,BiOBr 片层呈花瓣状组合成空心花球形貌。不同 Fe 掺杂比例样品亦呈空心花球形貌,表明 Fe 掺杂不会明显改变 BiOBr 形貌。BiOBr 花球尺寸较为均一,直径在 2~4  $\mu\text{m}$  之间,

Fe 掺杂 BiOBr 花球较 BiOBr 花球小,其中,0.7FBOB 花球最小(1~3  $\mu\text{m}$ )且大小较为均一。



(a),(b) BiOBr; (c) 0.03FBOB; (d) 0.05FBOB;  
(e) 0.07FBOB; (f) 0.1FBOB

图2 不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品 SEM 图像

### 2.3 UV-Vis DRS 分析

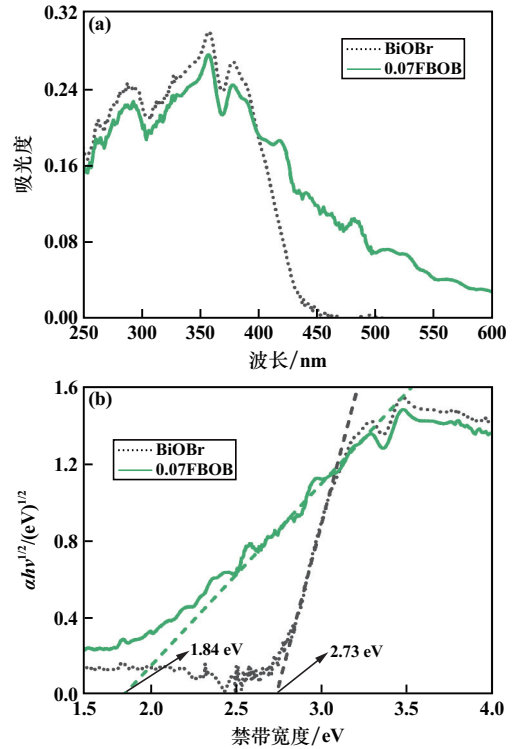
利用紫外-可见漫反射光谱测试了 BiOBr 和 0.07FBOB 样品的光响应能力,结果见图 3。BiOBr 和 0.07FBOB 光吸收边分别为 450 nm 和 673 nm,表明 Fe 掺杂显著拓宽了材料的光吸收范围。利用公式(1)计算样品的禁带宽度( $E_g$ ):

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

式中  $\alpha$  为吸光系数; $h\nu$  为光子能量; $A$  为常数; $E_g$  为禁带宽度;因为 BiOBr 和 Fe 掺杂 BiOBr 是间接带隙半导体, $n$  值取  $1/2$ <sup>[11]</sup>。经作图拟合计算得到 BiOBr 和 0.07FBOB 的禁带宽度分别为 2.73 eV 和 1.84 eV。0.07FBOB 具有更窄的禁带宽度,能够吸收更大波长范围的光,可见光利用率更高。

### 2.4 电化学性能分析

通过电化学阻抗谱(EIS)表征 BiOBr 和 0.07FBOB 光催化剂的光生电荷的分离和转移情况,结果见图 4。通常 EIS 奈奎斯特图的圆弧半径越小,光生电子和空穴分离/转移效率越高<sup>[17]</sup>。如图 4 所示,0.07FBOB 对应的圆弧半径小于 BiOBr,表明 0.07FBOB 光生电荷分离/转移效率更高。



(a) UV-vis DRS 光谱图; (b)  $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$  曲线

图3 BiOBr 和 0.07FBOB 样品光响应能力测试结果

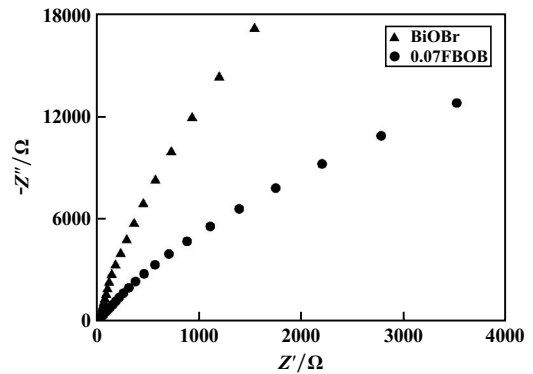


图4 BiOBr 和 0.07FBOB 的 EIS 谱图

### 2.5 光催化性能分析

BiOBr 和不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品对 CR 的吸附-光降解曲线见图 5。Fe 掺杂 BiOBr 的吸附-光催化性能均优于纯 BiOBr,其中 0.07FBOB 表现出较优的吸附和光催化性能,在 120 min 暗吸附条件下,对 CR 的吸附率达到了 49.81%,明显优于 BiOBr 的 30.87%。吸附性能的提升可归因于 0.07FBOB 空心花球尺寸更小、比表面积更大、可提供更多表面吸附位点。在光催化降解阶段,0.07FBOB 在光照 180 min 条件下对 CR 的降解率达到了 89.66%,BiOBr 对 CR 的去除率仅 62.82%。光催化性能的提升主要是因为 Fe 掺杂拓宽了材料的光吸收范围,提高了材料的可见光利用率。

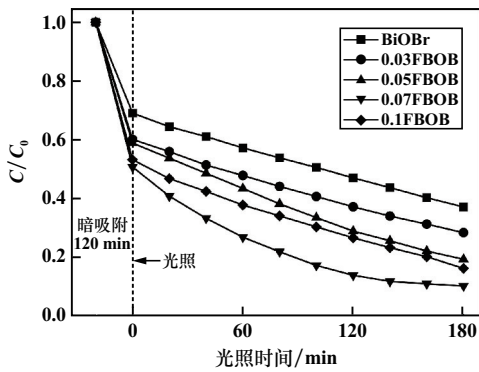


图5 不同 Fe 掺杂比例 BiOBr 样品对 CR 的吸附-光降解曲线

采用一级动力学方程对实验数据进行拟合,进一步研究光催化降解过程,结果见图6。拟合直线的斜率  $k$  为光催化降解速率常数,斜率越大表示光催化降解速率越快。BiOBr、0.03FBOB、0.05FBOB、0.07FBOB 和 0.1FBOB 的降解速率常数  $k$  值分别为 0.003 39、0.004 15、0.006 28、0.009 35 和 0.006 26  $\text{min}^{-1}$ ,其中 0.07FBOB 降解速率最快,其  $k$  值是 BiOBr 的 2.76 倍。光催化降解速率的提升主要归因于 Fe 掺杂 BiOBr 样品具有更高的光生电子-空穴分离和转移效率。

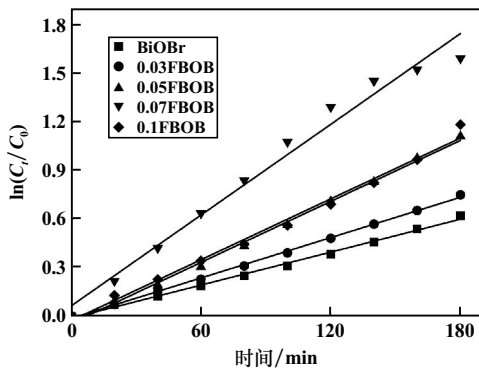


图6 吸附-光降解一级动力学方程拟合曲线

## 2.6 光催化机理研究

为研究 CR 光催化降解反应机理,确定降解过程中起主要作用的活性物种,选取叔丁醇(TBA)、对苯醌(p-BQ)和草酸铵(AOM)分别作为羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )、超氧自由基( $\cdot\text{O}_2^-$ )和光生空穴( $\text{h}^+$ )的捕获剂。引入不同捕获剂时,0.07FBOB 对 CR 的光催化降解结果如图7所示。TBA、p-BQ 和 AOM 作捕获剂时,0.07FBOB 对 CR 的去除率分别为 89.13%、63.29% 和 72.35%。捕获实验结果表明,反应体系中  $\cdot\text{O}_2^-$  和  $\text{h}^+$  是主要的活性物质, $\cdot\text{OH}$  几乎不起作用。

基于上述结果,提出了可见光下 Fe 掺杂 BiOBr 对 CR 的催化降解机理,如图8所示。Fe 掺杂 BiOBr 花球对 CR 具有良好的吸附性能,在暗吸附阶段能将 CR

分子吸附于催化材料表面,使污染物分子与催化剂能够充分接触,利于后续光催化降解反应的进行。Fe 掺杂可显著降低 BiOBr 的禁带宽度,0.07FBOB 的禁带宽度仅为 1.84 eV,具有更高的可见光利用率。可见光照下,Fe-BiOBr 的价带(VB)电子( $\text{e}^-$ )受激发跃迁到导带(CB),在价带位置产生空穴,形成电子-空穴对。根据捕获实验结果,价带的光生空穴  $\text{h}^+$  不能氧化  $\text{H}_2\text{O}$  或  $\text{OH}^-$ 。导带的光生电子  $\text{e}^-$  可与  $\text{O}_2$  发生反应产生  $\cdot\text{O}_2^-$ 。价带上的光生空穴  $\text{h}^+$  和  $\cdot\text{O}_2^-$  将 CR 氧化降解后去除。

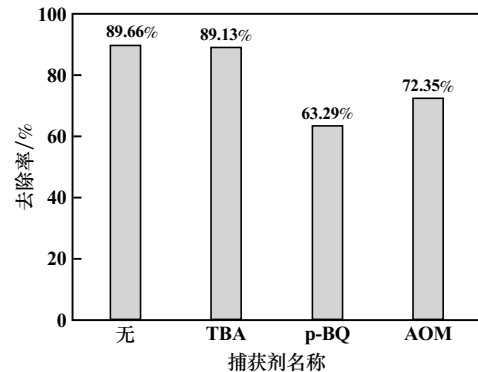


图7 不同捕获剂存在时 0.07FBOB 对 CR 的光催化降解性能

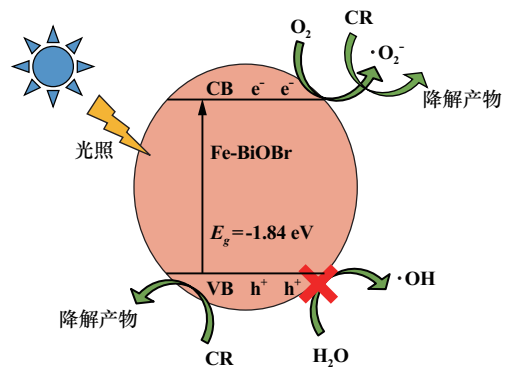


图8 Fe 掺杂 BiOBr 在可见光下对 CR 的催化降解机理

## 3 结 论

1) 采用水热法制备了不同 Fe 掺杂量的 BiOBr 光催化剂。XRD 分析结果表明,  $\text{Fe}^{3+}$  成功掺入了 BiOBr 晶格中。SEM 镜下观察可见,样品呈空心花球状形貌,Fe 掺杂未改变 BiOBr 原有形貌。

2) Fe 掺杂可拓宽 BiOBr 材料的光吸收范围,提高光生电子-空穴分离和转移效率,从而显著提升 BiOBr 的光催化性能。

3) 捕获实验结果表明,反应体系中  $\cdot\text{O}_2^-$  和  $\text{h}^+$  是主要的活性物质, $\cdot\text{OH}$  几乎不起作用。

### 参考文献:

- [1] Garcia-Segura S, Nienhauser A, Fajardo A, et al. Disparities between experimental and environmental conditions: Research steps toward

- making electrochemical water treatment a reality[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020,22:9-16.
- [2] Chandrabose G, Dey A, Gaur S, et al. Removal and degradation of mixed dye pollutants by integrated adsorption-photocatalysis technique using 2-D MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposite[J]. *Chemosphere*, 2021,279:130467.
- [3] TIAN Y, ZHANG J, WANG W, et al. Facile assembly and excellent elimination behavior of porous BiOBr-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunctions for organic pollutants[J]. *Environmental Research*, 2022,209:112889.
- [4] 周晓燕,汤洪波,周健. Ag-AgI/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> 光催化剂的制备及其光催化性能[J]. *矿冶工程*, 2022,42(1):152-155.
- [5] CHANG S, ZHANG Q, LU Y, et al. High-efficiency and selective adsorption of organic pollutants by magnetic CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/graphene oxide adsorbents: Experimental and molecular dynamics simulation study[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020,238:116400.
- [6] YAO Z, SUN H, XIAO S, et al. Synergetic piezo-photocatalytic effect in a Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/BiOBr composite for decomposing organic pollutants[J]. *Applied Surface Science*, 2021,560:150037.
- [7] WANG X, XU G, TU Y, et al. BiOBr/PBCD-B-D dual-function catalyst with oxygen vacancies for Acid Orange 7 removal: Evaluation of adsorption-photocatalysis performance and synergy mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021,411:128456.
- [8] ZHANG R, CAI L, CAI Y, et al. Lamellar insert SnS<sub>2</sub> anchored on BiOBr for enhanced photocatalytic degradation of organic pollutant under visible-light[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021,618:126444.
- [9] HUANG X, XU X, YANG R, et al. Synergetic adsorption and photocatalysis performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ce-doped MgAl-LDH in degradation of organic dye under LED visible light[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022,643:128738.
- [10] Kokilavani S, Alaraidh I, Okla M, et al. Efficient photocatalytic degradation of methyl orange and malachite green by Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> decorated BiOBr nanoflower under visible light: Performance evaluation, mechanism insights and toxicology of the by-products[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022,909:164703.
- [11] JIN Y, ZHANG J, WANG S, et al. Stress modulation on photodegradation of tetracycline by Sn-doped BiOBr[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022,10(3):107675.
- [12] Búrdos E, Múrta V, Baia L, et al. Hydrothermal crystallization of bismuth oxybromide (BiOBr) in the presence of different shape controlling agents[J]. *Applied Surface Science*, 2020,518:146184.
- [13] LI Y, YAO L, YIN Z, et al. Defect-induced abnormal enhanced up-conversion luminescence in BiOBr: Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup> ultrathin nanosheets and its influence on visible-NIR light photocatalysis[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2020,7(2):519-528.
- [14] ZHANG B, HU X, LIU E, et al. Novel S-scheme 2D/2D BiOBr/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterojunctions with enhanced photocatalytic activity[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2021,42(9):1519-1529.
- [15] 张一兵,黄英. 掺 Fe<sup>3+</sup> 锐钛型 TiO<sub>2</sub> 的制备及其紫外光照下催化降解苯胺[J]. *矿冶工程*, 2019,39(1):118-121.
- [16] JIANG G, WANG X, WEI Z, et al. Photocatalytic properties of hierarchical structures based on Fe-doped BiOBr hollow microspheres[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013,1(7):2406.
- [17] 胡寒梅,王韬,凌晓慧,等. BiOBr-OV/RGO 复合物的制备及其光催化 CO<sub>2</sub> 还原性能[J]. *无机化学学报*, 2023,39(2):234-244.

引用本文: 葛健宇,陈冬生,李军,等. Fe 掺杂 BiOBr 空心花球光催化剂的制备及其降解刚果红性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(5):154-158.

(上接第 153 页)

2) 高温保温较短时间时,合金晶界析出少量 S 相, *UIE* 值较高,断裂韧性较好;随着保温时间延长, S 相数量增加且尺寸增大,裂纹易产生并沿晶界迅速扩展, *UIE* 值减小,断裂韧性降低。

3) 低温保温较短时间时,合金晶界析出大量 η 相, *UIE* 值较低,断裂韧性较差;随着保温时间延长,晶界-晶内强度差减小,变形均匀性提高,合金塑性增加, *UIE* 值增加,断裂韧性提高。

#### 参考文献:

- [1] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials in Engineering*, 2014,56:862-871.
- [2] 潘志军,黎文献. 高强铝合金断裂韧性的研究现状及展望[J]. *材料导报*, 2002,16(7):14-17.
- [3] 刘文辉,张新明. 固溶处理对 7A55 铝合金断裂韧性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2007,38(1):41-45.
- [4] 陈高红,李国爱,陈军洲,等. 轧制组织特征对 7B50-T7751 铝合金厚板断裂韧性的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2018,46(6):29-33.
- [5] HAN N M, ZHANG X M, LIU S D, et al. Effect of solution treatment on the strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011,509(10):4138-4145.
- [6] LI B, WANG X, CHEN H, et al. Influence of heat treatment on the strength and fracture toughness of 7N01 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016,678:160-166.
- [7] Kamp N, Sinclair I, Starink M J. Toughness-strength relations in the overaged 7449 Al-based alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002,33:1125-1136.
- [8] Fink W L, Willey L A. Quenching of 75S aluminum alloy[J]. *Transactions of American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1948,175:414-427.
- [9] ZHANG Y, Milkereit B, Kessler O, et al. Development of continuous cooling precipitation diagrams for aluminium alloys AA7150 and AA7020[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014,584:581-589.
- [10] TANG J G, ZHANG Y, LIU S D, et al. Quench sensitivity of AA7136 alloy: contribution of grain structure and dispersoids[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019,50(10):4900-4912.
- [11] 林亮华,刘志义,韩向楠. 过时效态 Al-Zn-Mg-Cu 合金断裂韧性与显微组织分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2020,51(2):301-308.
- [12] XIE P, CHEN K, CHEN S, et al. Study on quenching sensitivity of 7097 aluminum alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019,7(1):1-14.
- [13] Minoda T, Yoshida H. Effect of grain boundary characteristics on intergranular corrosion resistance of 6061 aluminium alloy extrusion[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002,33(9):2891-2898.

引用本文: 林立健,张勇,郑许,等. 分级淬火对 7N65 铝合金微观组织和断裂韧性的影响[J]. *矿冶工程*, 2023,43(5):149-153.