

本文引用格式:顾杰,李双硕,崔天伊,等.生物质炭掺杂 BiOBr 的制备及其光催化性能研究[J].聊城大学学报(自然科学版),2025,38(1):68-75.

Citation format:GU Jie,LI Shuangshuo,CUI Tianyi,et al. Preparation of biomass charcoal doped BiOBr and its photocatalytic performance[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2025,38(1):68-75.

文章编号 1672-6634(2025)01-0068-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024060001

生物质炭掺杂 BiOBr 的制备及其光催化性能研究

顾杰,李双硕,崔天伊,颜菀旻,赵俭波,姜建辉

(新疆兵团南疆化工资源利用工程实验室,塔里木大学化学化工学院,新疆 阿拉尔 843300)

摘要 以棉浆废液为生物质炭源,采用水热法制备出生物质炭掺杂的 BiOBr(C-BiOBr)。利用 X 射线粉末衍射仪、X 射线光电子能谱仪、扫描电子显微镜、紫外可见分光光度计等对产物的构效关系进行分析。结果表明:C-BiOBr 对罗丹明 B 溶液的降解率达 98.56%,为 BiOBr 降解率的 2.8 倍;对盐酸四环素的光降解率达 90.4%,为 BiOBr 降解率的 1.6 倍。在循环实验中,5 次循环后 C-BiOBr 对罗丹明 B 的降解依旧能达到 88.3%。机理研究结果证明光生空穴和超氧自由基为光催化降解的主要活性物种。所制备的 C-BiOBr 具有良好的光催化活性和稳定性,在废水处理中有着潜在的应用前景。

关键词 BiOBr; 生物质炭; 光催化剂; 水热法

中图分类号 O643.36

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Preparation of Biomass Charcoal Doped BiOBr and Its Photocatalytic Performance

GU jie,LI Shuangshuo,CUI Tianyi,YAN Yumin,
ZHAO Jianbo,JIANG Jianhui

(Key Laboratory of Chemical Engineering in Southern Xinjiang, School of Chemistry and
Chemical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract Using cotton pulp waste liquid as a biomass charcoal source, a biomass charcoal doped BiOBr (C-BiOBr) was prepared by a hydrothermal method. The product was analyzed to clarify its structure-function relationship using X-ray powder diffractometer, X-ray photoelectron spectroscopy, scanning electron microscope, and ultraviolet-visible spectrophotometer. The results showed that the degradation rate of Rhodamine B solution by C-BiOBr could reach 98.56%, which is 2.8 times that of BiOBr. The photodegradation rate of tetracycline hydrochloride reached 90.4%, which is 1.6 times that of BiOBr. In the cyclic experiment, the degradation of Rhodamine B could still reach 88.3% after 5 cycles. Subsequent mechanism research results proved that photo-generated holes and superoxide radical were the main active substance for photocatalytic degradation. As-synthesized C-BiOBr exhibited good photocatalytic activity and stability, and has potential application prospects in wastewater treatment.

Key words BiOBr; biochar; photocatalyst; hydrothermal method

收稿日期:2024-06-04

基金项目:兵团财政科技计划项目(2022DB025);塔里木大学校长基金项目(TDZKCX202208)资助

通信作者:姜建辉,男,汉族,博士,教授,兵团青年英才,兵团强南科技人才,研究方向:功能材料,E-mail:xjjh78@163.com.

0 引言

随着科技与工业的快速发展,资源能源需求日益增大,全世界的环境污染问题日益严重^[1]。同时,有限且珍贵的水资源受到了污染,而污水处理又给工业生产带来沉重负担,影响人类的可持续发展。目前常用的污水处理主要有物理法、化学法和生化法等手段^[2],这些方法工艺较简单,操作较容易,对于大部分污染物的处理可以达到较好的效果,但对难降解的有机污染物处理效果一般,存在较大二次污染的风险^[3]。因此,探寻一种高效绿色的降解技术成为目前净化行业急需解决的问题。光催化技术的反应条件较便捷,适应范围较广,可充分利用现有资源,还具有绿色、高效和稳定性强等优点^[4]。因此,该技术的应用受到科研工作者的广泛关注^[5]。半导体光催化技术可以太阳光作为能量来源能使大多数有机物完全氧化分解,具有极好的应用前景^[6-10]。

卤氧化铋的特点是绿色、无污染和较好的光催化性能,在光催化研究领域备受青睐^[11]。这种化合物具有独特的层状结构,可以使光生电子和空穴发生有效分离,提高材料的光催化性能^[12]。卤氧化铋中除 BiOF 之外其余均为间接带隙半导体^[13]。BiOBr(禁带宽度为 2.6 eV)和 BiOI(禁带宽度为 1.6 eV)在可见光区和紫外光区均具有一定的吸收,而 BiOI 的稳定性较差,不具有较好的现实价值^[14]。BiOCl 具有稳定的化学性质和安全性能高的特点,在农药领域具有良好的应用前景。BiOCl 是由 $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$ 和双层 Cl^- 交替排列而成,通过范德华力作用堆叠在一起。但 BiOCl 的禁带宽度较大(3.10 eV),较难以激发^[13-16]。因此,BiOBr 在稳定性、禁带宽度和光催化性能等方面比其他卤氧化铋更为优越^[19]。通过对其进行合理的掺杂,可提高 BiOBr 的光催化效果,制备出光催化性能更好的光催化材料^[20]。把生物炭材料掺入 BiOBr 中,制备出的 C 掺杂 BiOBr,有望获得更高的吸附和光催化性能。

本工作选取棉浆废液作为生物炭源,与其他炭源相比,具有价格低廉的优点。因此,选用该废液作为生物炭的原料去掺杂 BiOBr,不仅可制备出绿色、高效、环保和可循环利用的新型光催化剂,实现对水中有机污染物进行高效降解,还实现了棉浆废液的再利用。

1 材料与方法

1.1 试剂

五水合硝酸铋购自于山东佰仟化工试剂有限公司;罗丹明 B 购自于南京市大茂化学试剂厂;浓硫酸购自于上海吉至生化试剂有限公司;乙二醇、无水乙醇、盐酸四环素和溴化钾均购自于阿拉丁试剂(上海)有限公司。所有化学品均为分析纯,且无需进一步提纯直接使用。棉浆废液来源于阿拉尔市中泰纺织科技有限公司。

1.2 材料制备

(1) 生物炭的制备:取 400 mL 去离子水对 100 mL 棉浆废液进行稀释,用 98% 的硫酸将稀释后的棉浆废液调至 $\text{pH}=1$,溶液呈棕褐色。在转速为 5 000 r/min 离心 5 min 后,将得到的样品在 70 °C 烘箱中干燥 8 h。最后,将产物研磨后,在 350 °C 下煅烧 3 h,升温速率为 5 °C/min,得到的黑色固体粉末为生物炭。

(2) 炭掺杂 BiOBr 的制备:将 4.70 g 五水合硝酸铋加入 20 mL 乙二醇中,室温搅拌 30 min,记为 A 液;将 1.19 g 溴化钾和一定量生物炭加入到 20 mL 去离子水中,记为 B 液。将 B 液倒入 A 液中,超声 30 min 后,转入 100 mL 的聚四氟乙烯反应釜中,在 120 °C 下保温 12 h。待反应釜冷却后,用去离子水和乙醇将沉淀清洗 3 次。最后在 70 °C 下干燥 8 h,研磨后得到的白色粉末,记为 X% C-BiOBr($X=0.5, 1, 1.5$)。为了对比,不加入生物炭,在上述制备条件下制备了纯 BiOBr。

1.3 材料表征

用 D8 Advance 型 X 射线粉末衍射仪(XRD,德国 Bruker 公司)表征样品的物相组成,测试电压 40 kV,电流 40 mA,辐射源 Cu $\text{K}\alpha$ ($\lambda=0.154\ 184\ \text{nm}$),步长 0.02°。用 ESCALAB 250 Xi X 射线光电子能谱(XPS,美国赛默飞世尔科技公司)表征样品的表面化学状态和元素组成,单色 Al $\text{K}\alpha$ ($h\nu=1\ 486.6\ \text{eV}$),以 C 1s 结合能 284.8 eV 作能量校准。用 Tcnai G2 F20 场发射扫描电子显微镜(SEM,美国 FEI 公司)测试样品形貌。用 FLS980 全功能型稳态/瞬态荧光光谱仪(PL,英国爱丁堡公司)测试样品发射光谱。用 TU-

1901 紫外可见分光光度计(UV-vis,北京普析通用仪器有限责任公司)测试样品的吸光能力。用电化学工作站(上海辰华 CHI660E)测试光电流及电化学阻抗谱。

1.4 光催化实验

以 10 mg/L 罗丹明 B 和 20 mg/L 盐酸四环素(TC)的降解率来评价样品的光催化活性。在室温下,以 500 W 氙灯作为光源,光源与溶液表面距离约为 5 cm。取 40 mg 光催化剂分散于 40 mL 的罗丹明 B 或 TC 溶液中,催化剂浓度为 1.0 g/L。黑暗条件下室温剧烈搅拌 30 min 确保达到吸附-脱附平衡。打开氙灯进行光催化反应,每间隔 15 min 取 4 mL 悬浮液在离心机中以 5 000 r/min 离心 5 min,取上层清液,用 TU-1901 紫外可见分光光度计测定其吸光度,通过标准曲线方程将吸光度转换为浓度 C_t 。利用(1)式计算降解率

$$\rho_{\text{降解率}} = (C_0 - C_t) / C_0, \quad (1)$$

式中 C_0 为降解前初始浓度, C_t 为光照时间 t 后的浓度。

2 结果与分析

2.1 XRD 分析

为了获得 BiOBr 和 C-BiOBr 材料的晶体结构和相组成信息,进行了 XRD 测试。如图 1(a)所示,所有样品的 XRD 峰位与四方相 BiOBr(JCPDS No. 78-0348)相对应,峰形比较尖锐,没有其他衍射峰,说明所制备的样品结晶度好和相纯度高。从图 1(b)中看到,与纯 BiOBr 相比,在加入 C 元素后衍射峰的位置发生左移,这是由于 C 元素的加入后晶格常数增大,晶面间距也会随之增大,这也说明 C 原子已经掺杂进入了 BiOBr 晶格。另外, (102)和(110)峰的衍射强度有所增强,这意味着 C 掺杂可提高材料的结晶度。

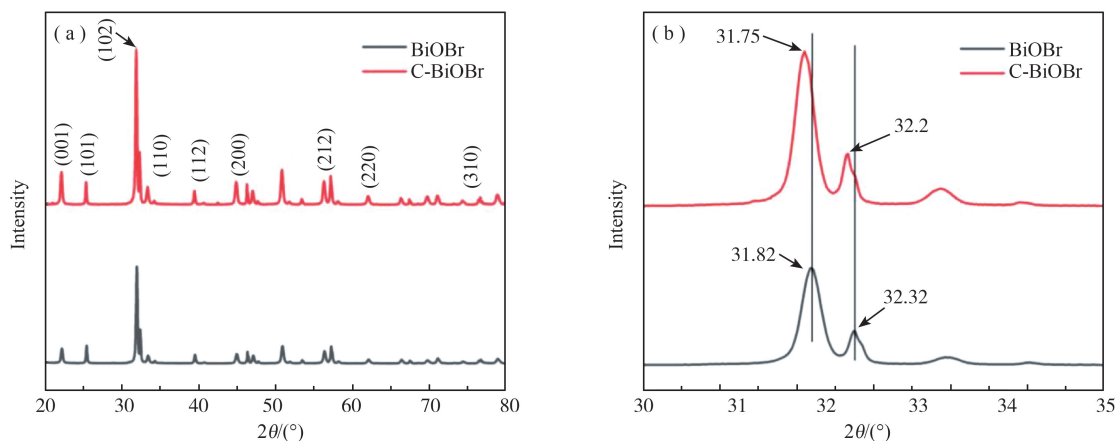


图 1 BiOBr 和 C-BiOBr 的(a) XRD 图谱和(b) 局部放大图

Fig. 1 (a) XRD patterns and (b) Local magnified patterns of BiOBr and C-BiOBr

2.2 形貌结构

通过 SEM 和能谱分析(EDS)对样品的貌结构以及元素分布进行了分析。图 2(a)是 BiOBr 的 SEM 图像,可以看到其具有片状结构。图 2(b)为 1% C-BiOBr 材料的 SEM 图像,可以看到在 C 元素掺杂进入 BiOBr 后,片状结构明显变小。由于 C-BiOBr 具有较小的薄片形貌,这有利于活性位点的暴露,减小电荷扩散距离,从而可以加速电荷转移,增强光催化活性^[21]。图 2(c~f)表明 C、O、Br 和 Bi 元素存在于 C-BiOBr 中。其中少量 C 元素的存在与前文中 XRD 表征结果相互印证,表明 C-BiOBr 催化剂被成功合成。

2.3 PL 光谱及电化学分析

PL 光谱可以用于分析光催化剂中光生电子和空穴的分离、迁移和复合,而 PL 光谱强度较弱的材料,表明较低电子-空穴对复合率,对应于更好的光催化性能^[22]。图 3(a)是 BiOBr 和 1% C-BiOBr 的 PL 光谱。从测试结果可以看出,1% C-BiOBr 的发射峰强度低于 BiOBr,这表明 1% C-BiOBr 中电子-空穴对的复合率较低。为了分析电子和空穴的分离行为,通过模拟太阳光照射 BiOBr 和 C-BiOBr 电极,测试了瞬态光电流-时间曲线,如图 3(b)所示。C-BiOBr 电极表现出更强的光电流响应。同时,结合图 3(c)的电化学阻抗谱,C-BiOBr 具有最小的阻抗,这表明电子-空穴对被有效地分离,它们的复合被显著抑制。光生电子在 C-

BiOBr 中的有效迁移可归结于生物炭的掺杂对光催化剂结构的影响,它可以通过 C—O—Bi 键接收和转移来自 BiOBr 导带的电子,从而达到抑制光生电子和空穴复合的效果^[23],增强了光催化性能。

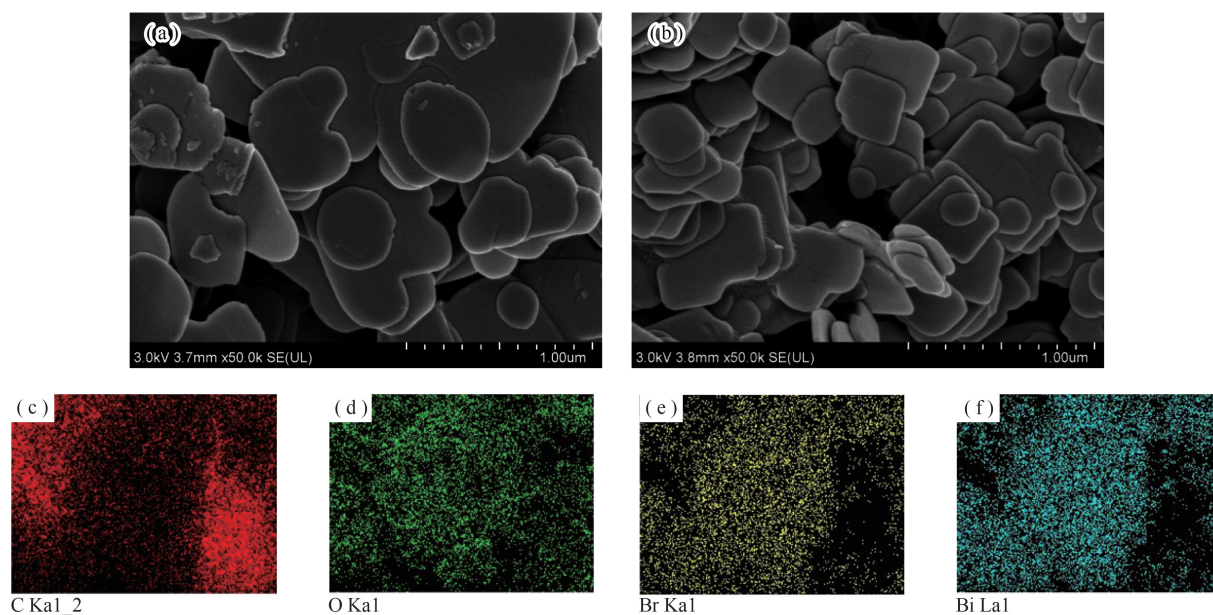


图 2 (a) BiOBr 和 (b) 1% C-BiOBr 的 SEM 图像; (c~f) 1% C-BiOBr 的 EDS 映射图

Fig. 2 SEM images of (a) BiOBr and (b) 1% C-BiOBr; (c~f) EDS mapping of 1% C-BiOBr

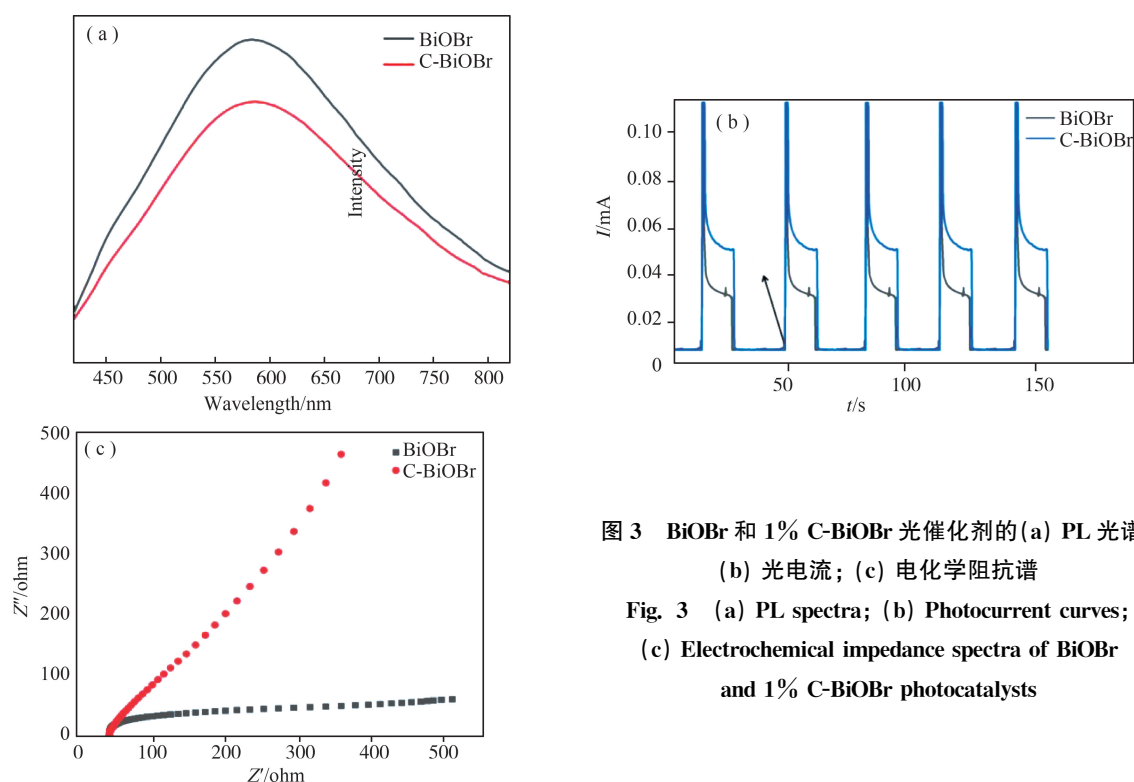


图 3 BiOBr 和 1% C-BiOBr 光催化剂的 (a) PL 光谱;

(b) 光电流; (c) 电化学阻抗谱

Fig. 3 (a) PL spectra; (b) Photocurrent curves;
(c) Electrochemical impedance spectra of BiOBr
and 1% C-BiOBr photocatalysts

2.4 UV-vis 光谱分析

图 4(a)为 BiOBr 和 1% C-BiOBr 的 UV-vis 曲线。由曲线可以看出,BiOBr 在 300~430 nm 光吸收能力较强,在可见光区域的吸收能力逐渐降低;1% C-BiOBr 材料在可见光区域具有与纯 BiOBr 差不多的吸光能力。如图 4(b)所示,以 $(\alpha h\nu)^2$ 为纵坐标,以 $h\nu$ 为横坐标,取切线与横坐标的交点为光催化剂的禁带宽度值。可以看出,C-BiOBr 的禁带宽度由于生物炭的掺杂有所下降,这可能由于生物炭的掺杂,在 BiOBr 价带边引入了附加的电子态,导致 C-BiOBr 的禁带宽度有所降低^[24]。1% C-BiOBr 催化剂禁带宽度更窄,说明

光吸收范围更宽,可以利用更多的光子,有助于 1% C-BiOBr 光催化性能的提高。

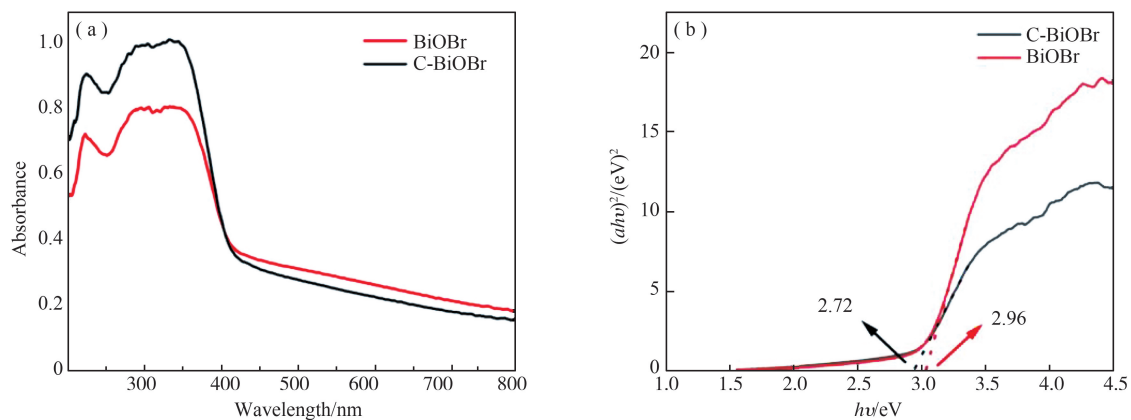


图 4 BiOBr 和 1% C-BiOBr 光催化剂的(a)UV-vis 光谱与对应的(b) $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的关系曲线

Fig. 4 (a) UV-vis spectra of BiOBr and 1% C-BiOBr photocatalysts and their corresponding (b) $(\alpha h\nu)^2$ and $h\nu$ relationship curves

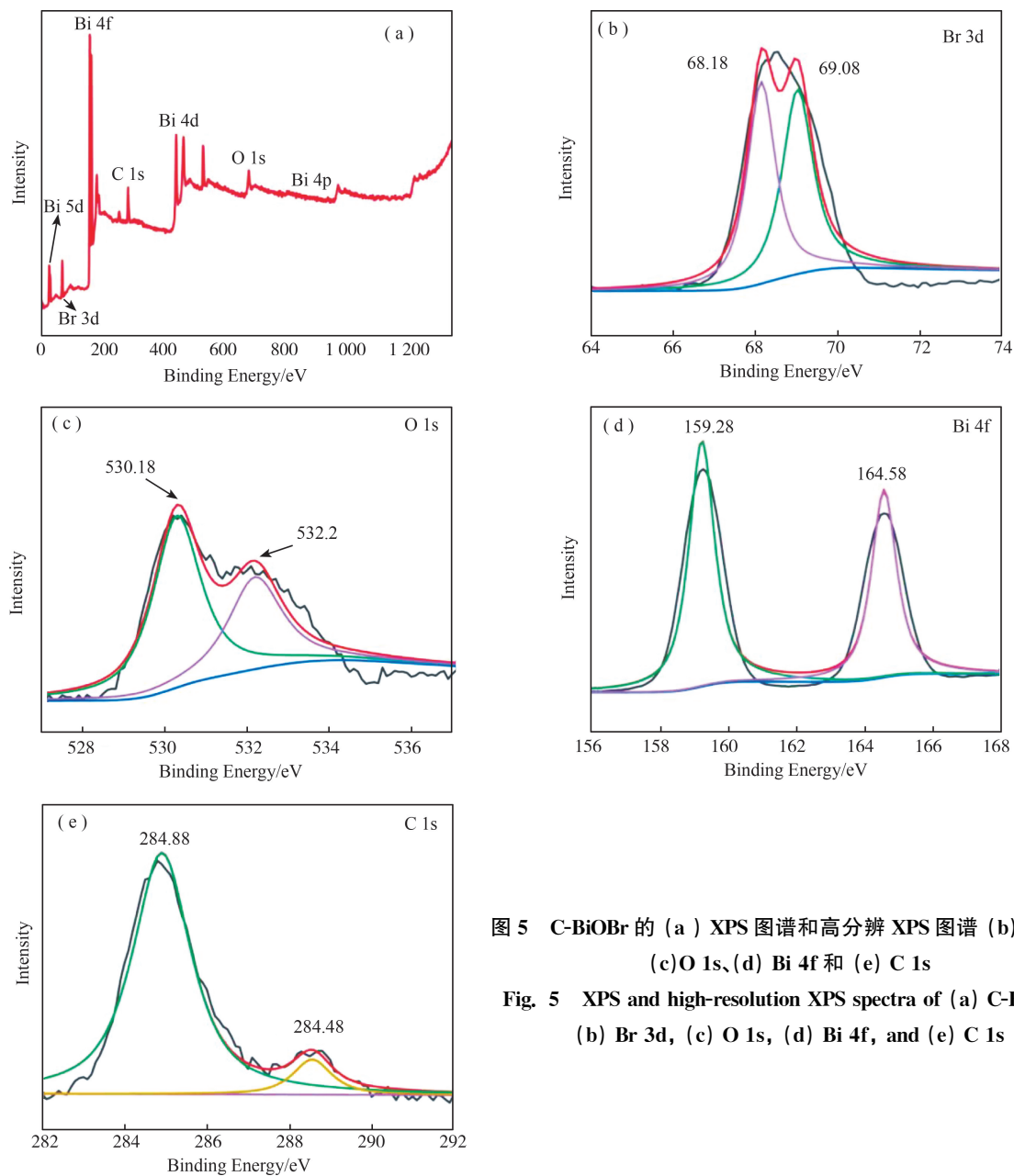


图 5 C-BiOBr 的 (a) XPS 图谱和高分辨 XPS 图谱 (b) Br 3d、(c) O 1s、(d) Bi 4f 和 (e) C 1s

Fig. 5 XPS and high-resolution XPS spectra of (a) C-BiOBr, (b) Br 3d, (c) O 1s, (d) Bi 4f, and (e) C 1s

2.5 XPS 分析

采用 XPS 对 C-BiOBr 样品的表面化学状态和元素组成进行了分析。XPS 全谱[图 5(a)]显示有 Bi 4f、O 1s、Br 3d 和 C 1s 特征峰的存在,表明成功合成了预期化学成分的光催化剂。图 5(b)中 69.08 和 68.18 eV 峰分别对应于 Br 3d_{3/2} 和 Br 3d_{5/2},这表明了 Br 元素以 Br⁻ 存在。在相应的 O 1s 光谱[图 5(c)]中,530.18 和 532.2 eV 处的峰分别对应于 Bi—O 键和 C—O 键。图 5(d)中的 Bi 4f 光谱在 159.28 和 164.58 eV 处显示两个峰,分别归因于 Bi 4f_{7/2} 和 Bi 4f_{5/2},来自于 BiOBr 中的 Bi³⁺。图 5(e)中的 C 1s 的 XPS 光谱在 284.88 和 288.48 eV 附近显示两个峰,分别对应着 C—O 和 C—C 键。因此,XPS 结果有力证明了 C-BiOBr 的成功制备。

2.6 光催化性能分析

图 6(a)为不同催化剂对 10 mg/L 罗丹明 B 的光催化降解曲线图。实验结果表明,C-BiOBr 的光催化性能明显优于 BiOBr。1%C-BiOBr 具有最优的光催化性能。经过 45 min 的降解,1%C-BiOBr 对罗丹明 B 的降解达到 98.7%,而 BiOBr 的降解效果仅为 78.3%。图 6(b)为不同的样品依据光催化数据做出的动力学曲线,由拟合结果可以看出,1%C-BiOBr 的降解速率是 BiOBr 的 2.8 倍。数据分布与拟合曲线相对吻合,表明该材料在光催化过程中符合动力学模型。拟合结果满足一级速率方程

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)=kt。 \quad (2)$$

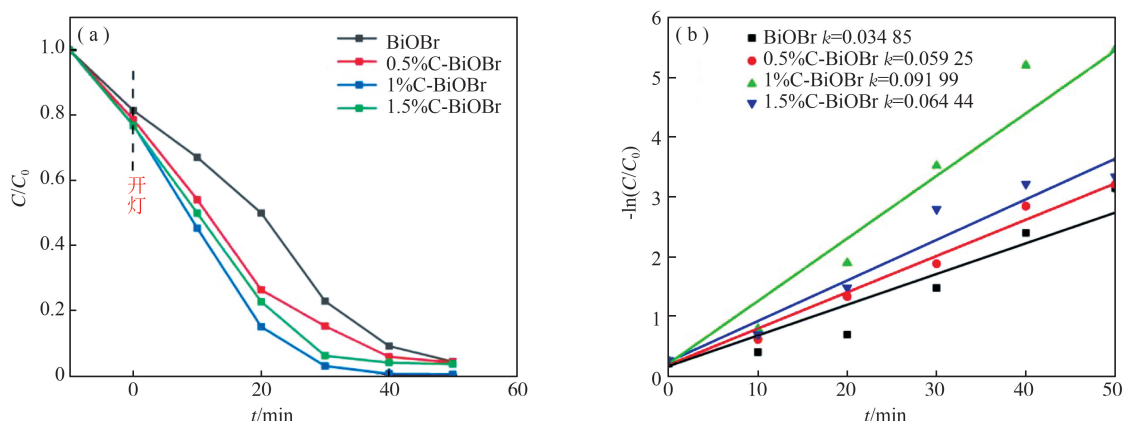


图 6 BiOBr 和 C-BiOBr 光催化剂对罗丹明 B 的 (a) 降解效果和 (b) 对应动力学曲线

Fig. 6 (a) The Rhodamine B degradation performances of BiOBr and C-BiOBr photocatalysts and (b) kinetic curves

图 7 是 C-BiOBr 和 BiOBr 降解 TC(10 mg/L) 的光催化降解曲线图。由图可得出,BiOBr 的降解率仅有 56.7%,1%C-BiOBr 在 60 min 的降解效率达到 90.4%。这是因为炭的引入改变了 BiOBr 的形貌,增大了 C-BiOBr 的比表面积,增加了活性位点,从而提高其吸附能力,大幅提高了光催化性能。另外,由于 C 原子的掺杂提高了材料的导电性,优化了能带结构,从而提高了电子-空穴对的分离程度。1%C-BiOBr 与 BiOBr 相关可见光光催化剂的性能对比见表 1,可以看出,本工作所制备的 C-BiOBr 具有优异的光催化性能。因此,C 掺杂对 BiOBr 光催化性能的提升有着良好的作用,有较大的实际应用价值。

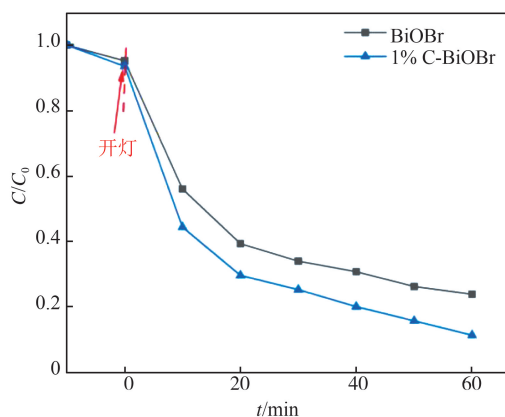


图 7 BiOBr 和 1%C-BiOBr 光催化剂对 TC 的降解

Fig. 7 Photodegradation of TC by BiOBr and 1% C-BiOBr photocatalysts

表 1 1%C-BiOBr 与 BiOBr 相关可见光光催化剂对罗丹明 B(10 mg/L)的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of visible light photocatalysts related to 1% C-BiOBr and BiOBr for Rhodamine B (10 mg/L)

Sample	Dosage of photocatalyst/(g·L ⁻¹)	Time/min	Photodegradation rate(%)	Ref
Bi ₂ WO ₆ /BiOBr	1	150	98.9	[25]
HO ₂ O ₃ /BiOBr	1	80	95.6	[26]
WO ₃ /BiOBr	1	100	98.5	[27]
NaNbO ₃ /BiOBr	1.5	50	87.5	[28]
BiOBr/CdS	1	100	81.2	[29]
ZnO/BiOBr	1	90	97.0	[30]
C-BiOBr	1	40	98.7	本工作

图 8 是以炭掺杂比例为 1% 的 C-BiOBr 为研究对象,得到自由基猝灭实验降解曲线图,以探究该 C 掺杂 BiOBr 的光催化机理。当光照射在半导体粒子上时,价带中的电子会被激发跃迁到导带上,而在价带上留下空穴,从而形成电子-空穴对。加入叔丁醇、对苯醌和乙二胺四乙酸二钠,分别是羟基自由基、超氧自由基和空穴的猝灭剂。由图 8 可得知加入乙二胺四乙酸二钠和对苯醌后,对罗丹明 B 的降解效果仅有 20% 和 30% 左右,故空穴和超氧自由基在 C-BiOBr 光催化反应中起到主要的作用。

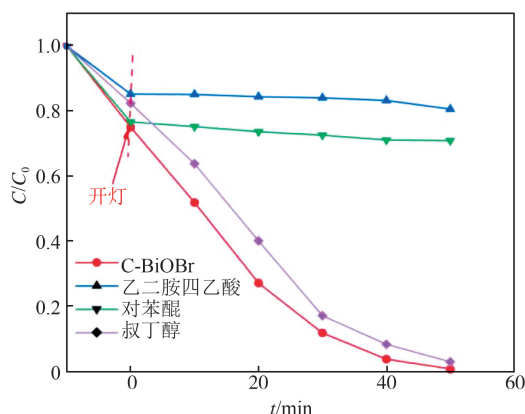


图 8 1%C-BiOBr 光催化剂自由基捕获实验结果

Fig. 8 Free radical trapping experimental results of 1%C-BiOBr

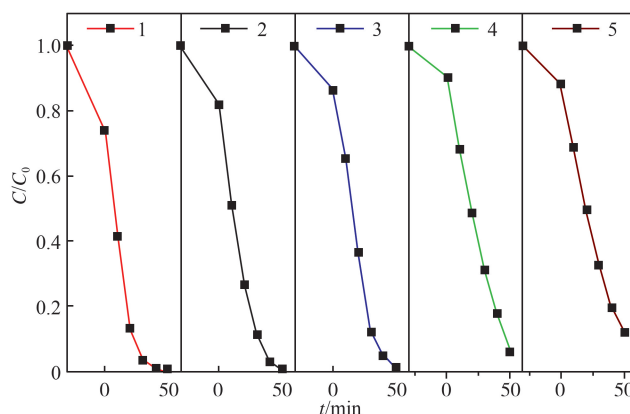


图 9 1%C-BiOBr 光催化剂的循环降解曲线

Fig. 9 Cyclic degradation curves of 1% C-BiOBr photocatalyst

图 9 是以掺杂比例为 1% 的 C 掺杂 BiOBr 材料对罗丹明 B 进行 5 次重复实验的光催化性能曲线。由实验数据可以看出,该材料在重复第五次时的降解率还有 88.3%,没有观察到光催化剂的明显失活,说明其在可见光照射下具有优异的稳定性。因此,经过重复 5 次的循环实验表明该材料具有良好的稳定性,可以多次重复使用。光催化性能的降低可能是由于降解过程中产生的一些小分子中间体吸附在表面,占据活性位点,抑制了光催化反应。

3 结论

本工作以成本低廉且易获取的新疆阿拉尔中泰棉纺厂的棉浆废液为生物炭源,采用水热法将生物质炭对 BiOBr 进行掺杂,成功制备出了性能良好的 C-BiOB 光催化材料。当生物炭的掺杂质量比例为 1% 时,1%C-BiOBr 材料在光照 40 min,对罗丹明 B 的降解效果达到 98.7%;在光照 60 min 内,对四环素的降解达到 90.4%。分析表明,C 掺杂不仅提高了比表面积,增加了活性位点,还拓宽了材料的光吸收范围,降低了电荷的复合率,从而提高了材料的光催化性能。另外,空穴和超氧自由基是 C 掺杂材料光催化的主要活性物种,C-BiOBr 光催化材料具有良好的稳定性,具有较好的实际应用前景。

参 考 文 献

- [1] 《环境保护》编辑部. 积极应对气候变化努力实现新达峰目标与碳中和愿景[J]. 环境保护, 2020, 48(20): 2.
- [2] 林珈羽, 童仕唐. 生物质炭的制备及其性能研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 54-58.
- [3] 张顾平, 王贝贝, 周舟, 等. 半导体材料在光催化低浓度氮氧化物的研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(1): 259-275.
- [4] 管美画. 金属原子改性 BiOBr 光催化材料的第一性原理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [5] YIN H B, CHEN X F, HOU R J, et al. Ag/BiOBr film in a rotating-disk reactor containing long-afterglow phosphor for round-the-clock photocatalysis[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(36): 20076-20082.
- [6] 张清哲, 辛言君, 马东, 等. 无机离子对石墨烯/TiO₂ 纳米管阵列光电光催化性能影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4239-4243.
- [7] SALARI H, YAGHMAEI H. Z-Scheme 3D Bi₂WO₆/MnO₂ heterojunction for increased photoinduced charge separation and enhanced photocatalytic activity[J]. Applied Surface Science, 2020, 532: 147413.
- [8] DI J, XIONG J, LI H, et al. Ultrathin 2D photocatalysts: electronic-structure tailoring, hybridization, and applications[J]. Advanced Materials, 2018, 30(1): 1704548.
- [9] ZENG D, YU C, FAN Q, et al. Theoretical and experimental research of novel fluorine doped hierarchical Sn₃O₄ microspheres with excellent photocatalytic performance for removal of Cr(VI) and organic pollutants[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 391: 123607.
- [10] LIU R, JI Z, XIE S, et al. Fabrication of {001}-facet enriched anatase TiO₂/TiOF₂ heterostructures with controllable morphology for enhanced photocatalytic activity[J]. Materials Today Communications, 2021, 6: 102060.
- [11] ZENG D, YANG K, YU C, et al. Phase transformation and microwave hydrothermal guided a novel double Z-scheme ternary vanadate heterojunction with highly efficient photocatalytic performance[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 237: 449-463.
- [12] 林珈羽, 张越, 刘沅, 等. 控制热分解条件下制备生物质炭及其表征[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 80-86.
- [13] 林立, 黄毅, 徐玲, 等. 卤氧化铋漂浮型光催化剂研究的新进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(7): 205-213.
- [14] CHOWDHURY A P, ANANTHARAJU K S, UMARE, S S, et al. Facile fabrication of binary BiOCl-Cu₂CoSnS₄ and ternary BiOCl-Cu₂CoSnS₄-TiO₂ heterojunction nano photocatalyst for efficient sunlight-driven removal of direct blue 71 in an aqueous medium[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 652: 129-841.
- [15] ZENG R, LUO Z, SU L, et al. Palindromic molecular beacon based Z-Scheme BiOCl-Au-CdS photoelectrochemical biodetection[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(3): 2447-2454.
- [16] LI S, CAI M, WANG C, et al. Rationally designed Ta₃N₅/BiOCl S-scheme heterojunction with oxygen vacancies for elimination of tetracycline antibiotic and Cr(VI): performance, toxicity evaluation and mechanism insight[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 123: 177-190.
- [17] HOU W, XU H, CAI Y, et al. Precisely control interface OV's concentration for enhance 0D/2D Bi₂O₂CO₃/BiOCl photocatalytic performance[J]. Applied Surface Science, 2020, 530: 147218.
- [18] LI R, LUAN Q, DONG C, et al. Light-facilitated structure reconstruction on self-optimized photocatalyst TiO₂@BiOCl for selectively efficient conversion of CO₂ to CH₄[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 286: 119832.
- [19] 闫双娇. 制备条件对秸秆生物质炭理化性质和稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [20] 张用芳, 陈爱菊, 米玉伟, 等. 光催化剂钨酸铋的形貌对罗丹明 B 吸附行为的热力学研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(6): 87-95.
- [21] LAN M, ZGANG N, DONG X L, et al. One-step in-situ synthesis of Bi-decorate BiOBr microspheres with abundant oxygen vacancies for enhanced photocatalytic nitrogen fixation properties[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 623: 126-744.
- [22] 刘超, 刘骏阳, 李玉佩, 等. 离子液体辅助合成 BiOBr 微球和纳米片及其光催化性能[J]. 材料导报, 2016, 30(8): 29-32+50.
- [23] CHEN X, ZHANG X, LI Y H, et al. Transition metal doping BiOBr nanosheets with oxygen vacancy and exposed {102} facets for visible light nitrogen fixation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 281: 119516.
- [24] 胡明玥, 王玉如, 范家慧, 等. 纳米零价铁活化过硫酸盐降解新兴污染物咖啡因[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 100-107.
- [25] 吴为, 葛建华, 郑旭阳, 等. Bi₂WO₆/BiOBr 复合光催化剂的制备及其降解性能[J]. 安徽科技学院学报, 2022, 36(6): 88-96.
- [26] 康巧梅, 王慧珍. H₂O₃/BiOBr 复合光催化剂的制备及光催化性能[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2021, 30(3): 219-223.
- [27] 王之睿, 郑楠, 王宇, 等. WO₃/BiOBr 复合光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 大连工业大学学报, 2022, 41(6): 402-407.
- [28] 樊国栋, 李楠, 潘谦宏, 等. BiOBr/NaNbO₃ 复合光催化剂的制备及其性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(5): 97-104.
- [29] 王乐, 樊国栋, 王露平, 等. BiOBr/CdS 复合光催化剂的制备及光催化性能[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(2): 331-339.
- [30] 康巧梅, 蔡菁莹, 刘小琳. ZnO/BiOBr 复合光催化剂的制备及光催化性能[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2020, 32(2): 126-132.

(责任编辑:蒲锡鹏)