

Fe₃O₄/BiOBr光催化固氮性能研究

王小慧, 张语珈, 潘秋桐, 邵明慧, 孙海杰

郑州师范学院化学化工学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月21日; 录用日期: 2025年1月14日; 发布日期: 2025年1月21日

摘要

本文先以FeCl₃与FeSO₄·7H₂O为原料采用氨水为沉淀剂共沉淀制备了Fe₃O₄,再以Bi(NO₃)₃·5H₂O与KBr为原料加入Fe₃O₄采用水热法制备了不同含量Fe₃O₄复合BiOBr催化剂。并用X射线衍射仪、紫外-可见光谱漫反射仪和电化学工作站等仪器研究了催化剂的物相、吸光性能和阻抗,并考察了Fe₃O₄/BiOBr光催化固氮性能。结果表明,随着Fe₃O₄含量的增加,复合催化剂的吸光能力增强,带隙减小,阻抗减小,使光生电子移动速率加快,催化剂的平带电位减小,催化剂的还原能力增加,更易活化氮分子,更易与氢离子生成铵根离子,Fe₃O₄/BiOBr固氮性能越高。当反应时间为130 min, BiOBr与Fe₃O₄的物质的量之比为1:0.5,催化剂的质量为0.2 g时,Fe₃O₄/BiOBr光催化固氮性能最好,催化剂的效率为10.51 μg·g⁻¹·min⁻¹。

关键词

四氧化三铁, 溴氧化铋, 光催化, 固氮

Investigation on the Photocatalytic Performance of Fe₃O₄/BiOBr of Fixing Nitrogen

Xiaohui Wang, Yujia Zhang, Qiutong Pan, Minghui Shao, Haijie Sun

School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou Henan

Received: Dec. 21st, 2024; accepted: Jan. 14th, 2025; published: Jan. 21st, 2025

Abstract

In this paper, Fe₃O₄ was prepared by co-precipitation of FeCl₃ and FeSO₄·7H₂O with ammonia as the precipitant, and then Fe₃O₄ composite BiOBr catalysts with different contents of Fe₃O₄ were prepared by hydrothermal method with the addition of Fe₃O₄ from Bi(NO₃)₃·5H₂O and KBr as the raw materials. The physical phases, light-absorbing properties and impedance of the catalysts were also

文章引用: 王小慧, 张语珈, 潘秋桐, 邵明慧, 孙海杰. Fe₃O₄/BiOBr 光催化固氮性能研究[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(1): 48-57. DOI: 10.12677/amc.2025.131007

investigated by X-ray diffractometer, UV-visible spectral diffuse reflectometer and electrochemical workstation, and the photocatalytic nitrogen fixation performance of Fe_3O_4 composite BiOBr was examined. The results showed that with the increase of Fe_3O_4 content, the light-absorbing ability of the composite catalyst was enhanced, the band gap was reduced, the impedance was reduced, so that the rate of photogenerated electron movement was accelerated, the flat-carrying potential of the catalyst was reduced, the reducing ability of the catalyst was increased, it was easier to activate the nitrogen molecules, it was easier to generate ammonium root ions with the hydrogen ions, and the higher the nitrogen fixation performance of the Fe_3O_4 composite BiOBr was. The photocatalytic nitrogen fixation performance of Fe_3O_4 composite BiOBr was the best when the reaction time was 130 min, the ratio of the substance amounts of BiOBr to Fe_3O_4 was 1:0.5, and the mass of the catalyst was 0.2 g. The catalytic efficiency of Fe_3O_4 composite BiOBr was $10.51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$.

Keywords

Fe_3O_4 , BiOBr, Phtocatalysis, Nitrogen Fixation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氨(NH_3)是工农业生产中不能缺少的物质，在农业、化工等领域有重要地位。然而，传统合成氨方法 Haber-Bosch 法需要在高温高压的条件下完成，条件苛刻并且会消耗大量的能量，必然会产生大量的二氧化碳加剧温室效应[1]。近年来，探索出了一种新型的固氮技术，即光催化固氮法，该方法显著降低了能耗，并对环境展现出极高的友好性。光催化固氮技术以半导体材料为催化剂，利用太阳能作为驱动力[2]，反应条件温和且对环境污染较小，符合人类可持续发展的要求。光催化技术无疑是光催化固氮研究的核心[3]，它利用光能激发催化剂产生电子和空穴，进而驱动氮气分子的活化和转化。因此，本文研究了 Fe_3O_4 复合 BiOBr 光催化固氮性能，旨在开发一种高效光催化空气中氮气合成氨的催化剂。

到 1997 年，光催化固氮首次被报道[4]，在 TiO_2 半导体材料上实现光催化氮还原反应，但该技术合成氨产量较低。光催化固氮常见的催化剂有铋基催化剂、铁基催化剂、钌基催化剂等[5]。单一的 BiOBr 光催化剂存在被光激发后的光生载流子复合快、光响应的范围受能带隙影响等问题[6]。金属掺杂是提高催化剂活性与稳定性的一种方法。常将 Sn、Gd、Cu、Ti 等金属与卤氧化铋掺杂，光生电子-空穴的复合速率降低及比表面积增大[7]，光催化活性增强。利用贵金属(Pt, Ag 等)沉积可进一步增强催化的活性，林海莉等[8]研究出新型 AgBr/BiOBr 催化剂在光催化降解中表现出高于纯的 BiOBr 催化剂催化活性与稳定性。半导体复合也是提高催化剂活性常用的方法之一，王海涛[9]等用水热法制得 CdS/BiOCl 纳米片催化剂，它们之间形成异质结，提高了光催化降解的活性和稳定性。

BiOBr 作为新型的光催化剂有很大的应用潜力，然而粉末状的 BiOBr 在溶液中很不易被分离[10]，如何重复利用 BiOBr 催化剂一直是研究的重点。本课题将磁性材料 Fe_3O_4 与 BiOBr 复合一方面希望能够改善 BiOBr 存在的光催化缺陷，增强该催化剂的稳定性和光催化固氮性能。另一方面制得催化剂有磁性，可利用磁分离技术对催化剂进行回收利用。本研究首先制备 BiOX 催化剂探究 BiOX (Cl, Br, I) 催化剂的光催化固氮性能。用光催化固氮性能最好的 BiOX 与 Fe_3O_4 进行复合。并考察了不同含量的 Fe_3O_4 复合 BiOBr 的光催化固氮性能，用紫外漫反射、X 射线衍射和电化学分析等方法，对催化剂的吸光特性、物相结构和阻抗性能等进行了深入分析，揭示催化剂结构对固氮性能产生影响的本质原因。

2. 实验部分

2.1. 试剂及设备

主要试剂和设备见表 1 和表 2。

Table 1. County level planning schedule
表 1. 主要试剂

实验试剂	纯度	生产厂家
三氯化铁	分析纯	天津市风船化学试剂科技有限公司
七水合硫酸亚铁	分析纯	上海山海工学团实验二厂
氨水	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
五水合硝酸铋	分析纯	西陇科学股份有限公司
碘化钾	分析纯	天津市福晨化学试剂厂
溴化钾	分析纯	天津市东丽区天大化学试剂
氯化钾	分析纯	广东西陇化工厂
乙二醇	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
酒石酸钾钠	分析纯	上海麦克林生化科技有限公司
钠氏试剂	分析纯	上海源叶生物科技有限公司
无水乙醇	分析纯	洛阳化学试剂厂

Table 2. County level planning schedule
表 2. 主要设备

实验设备	型号	生产厂家
电子分析天平	AF224	上海恒平天平科学仪器有限公司
磁力搅拌器	ZNCL-GS130*70	郑州郑升仪器设备有限公司
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-9070A	上海精宏实验设备有限公司
循环水式多用真空泵	2XZ	上海星业真空设备厂
离心机	AXTG16G	盐城市安信实验有限公司
紫外可见分光光度计	Cary-5000	美国 ThermoNicolet 公司制造
大功率 LED 光源(氘灯)	GEL-LED100-WL	北京中教金源科技有限公司制造
X 射线衍射仪	Ultima IV	日本理学有限公司
紫外可见光谱仪	T6 新世纪	美国 ThermoNicolet 公司制造
电化学工作站	CHI-600E	上海辰华公司

2.2. Fe_3O_4 的制备

将 4.65 g 的 FeCl_3 和 2.36 g 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 100 mL 去离子水，在氮气保护下充分搅拌。快速加入 30 mL 的 25% 的氨水，水解生成 Fe_3O_4 纳米粒子。高速搅拌 15~20 min 后，水浴 70℃~80℃ 熟化 30 min。冷却至室温后，静置分层，随后进行减压过滤。使用蒸馏水和无水乙醇洗涤。随后，进行干燥处理，

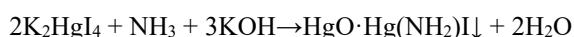
并将干燥后的物质研磨至粉末状。最终得到 Fe_3O_4 纳米粒子[11]。

2.3. 复合催化剂的制备

称取 0.970 g 的 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.238 g 的 KBr 和 0.138 g 的 Fe_3O_4 加入到盛有 22 mL 的乙二醇的烧杯中, 机械搅拌 30 min。将上述溶液转移至高压反应釜中, 反应温度设置为 180℃, 持续反应 6 h。反应结束后, 抽滤, 使用无水乙醇对物质进行洗涤。最后, 在 60℃ 环境下干燥 2 h。最后所得成品即 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 复合材料。上述制备过程中不加入 Fe_3O_4 , 其他条件同上, 即可制得纯的 BiOX (Cl , Br , I) 催化剂。

2.4. 氨氮浓度标准曲线

本文采用钠氏试剂紫外分光光度法, 当低浓度氨溶液与钠氏试剂混合, 会生成黄色胶体复合物。该生成物在 420 nm 处有强吸收, 且吸光度与氨浓度呈正比。反应式如下:



准确称取 0.3819 g 经真空干燥处理的氯化铵, 溶解于 0.1 mol·L⁻¹ 的 Na_2SO_4

溶液中, 定容至 100 mL。取上述溶液 1 mL 至另一 100 mL 容量瓶, 得到标准氯化铵溶液。在六个 50 mL 容量瓶中, 依次加入不同体积的标准液, 并用 Na_2SO_4 溶液定容, 加入酒石酸钾钠溶液和钠氏试剂, 静置几分钟。最后, 以去离子水为参比, 利用紫外分光光度计测量各溶液的吸光度, 得到标准曲线的拟合曲线如图 1 所示, 拟合公式为:

$$y = 0.37714x + 0.02286, R^2 = 0.998$$

式中 x ——为氨氮浓度($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$);

y ——为样品液吸光度;

R^2 ——为标准曲线的方差。

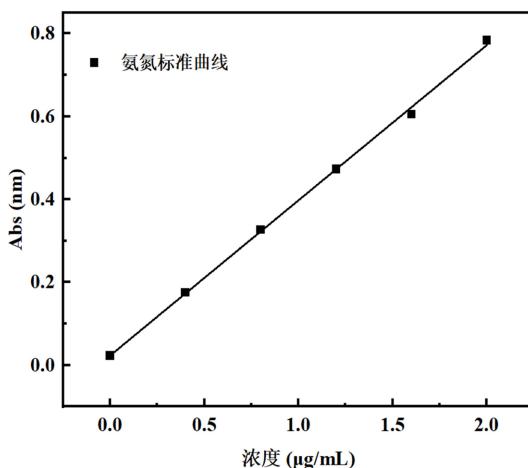


Figure 1. Standard curve of ammonia nitrogen concentration

图 1. 氨氮浓度标准曲线

2.5. 催化剂固氮性能测试

本次研究使用空气固氮[12]的方法来检验催化剂的光催化固氮性能。具体操作如下: 称取 0.2 g 的催化剂加入到 200 mL 的 0.789 g/L 乙醇水溶液中, 打开空气泵, 调节空气流速, 暗反应 30 min。暗反应结束, 取第一次样品液, 随后开启 LED 光源, 每隔 20 min 取样。将取样离心管放入离心机, 设定时间为 15

min, 转速为 12000 r/min。离心结束, 在样品液中加入酒石酸钾钠和钠氏试剂, 静置几分钟。使用紫外可见分光光度仪依次测量样品液的吸光度, 再依据氨氮浓度标准曲线计算样品液的铵根离子(NH_4^+)的浓度。

2.6. 催化剂表征

利用 ThermoNicolet 公司制造的 Cary-5000 型 UV-Vis 光度计对样品的吸光性能进行检测, 扫描波长范围设定在 200~800 nm。同时, 采用日本理学有限公司制造的 Ultima IV型 X 射线衍射仪进行 XRD 检测, 具体测试条件为: $\text{CuK}\alpha$ 射线源, 波长设定为 0.15418 nm, 管电压设置为 40 kV, 管电流为 40 mA, 扫描范围覆盖 2θ 为 10°~90°。此外, 电化学性能的分析则用上海辰华公司生产的型号为 CHI-600E 电化学工作站分析。

3. 结果与讨论

3.1. BiOX (Cl, Br, I)固氮性能

图 2 为 BiOX 催化剂的 XRD 图。从图可以看出, 2θ 为 24.5°、29.7°、45.5°和 55.3°处的衍射峰为 BiOI 的特征衍射峰[13]; 2θ 为 25.8°、33.4°和 46.6°处的衍射峰为 BiOCl 的特征衍射峰[14]; 2θ 为 25.1°、32.3°、46.3°和 57.2°处的衍射峰为 BiOBr 的特征衍射峰[15]。这说明我们成功合成了不同种类的卤氧化铋催化剂。

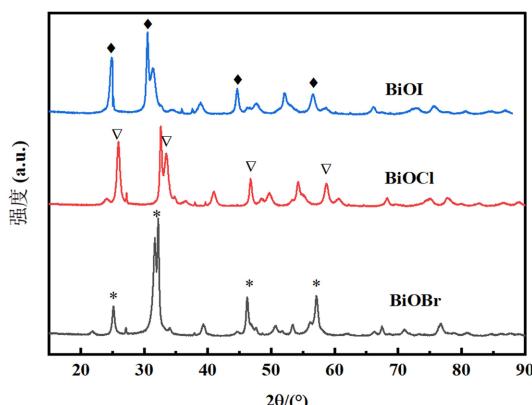


Figure 2. XRD pattern of BiOX (I, Br, Cl) catalyst
图 2. BiOX (I, Br, Cl) 催化剂的 XRD 图

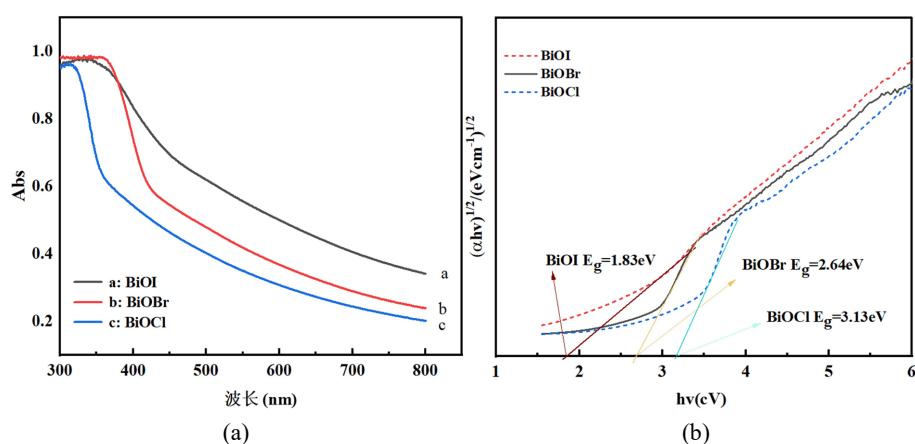


Figure 3. Uv diffuse reflection spectra (a) and band gap spectra (b) of BiOX (I, Br, Cl) catalysts
图 3. BiOX (I, Br, Cl) 催化剂的紫外漫反射光谱图(a)和能带间隙图(b)

图 3 为 BiOX 催化剂的紫外漫反射光谱图和能带间隙图。从图(a)可以看出, BiOI、BiOBr、BiOCl 催化剂的吸光度依次减小, BiOI 的吸光度最高, 并向长波方向移动。这说明 BiOI 的吸光性能最好, 且向可见光区移动, 对可见光的吸收范围增加。BiOI、BiOBr、BiOCl 的能带间隙依次增大, 分别为 1.83 eV、2.64 eV、3.13 eV, 说明 BiOBr 具有适中的带隙宽度。

图 4 为 BiOX 催化剂的固氮性能图。可以看出, 光催化性能最好为 BiOBr, BiOCl 次之, BiOI 的光催化活性最低。结合上述表征, BiOBr 具有适中的光吸收能力和带隙宽度, 从而有效提升了光催化固氮的效率。因此, BiOBr 催化剂的光催化固氮性能最佳。

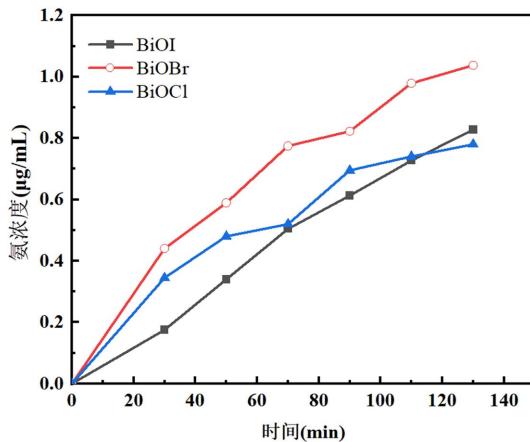


Figure 4. Photocatalytic nitrogen fixation performance of BiOX (I, Br, Cl) catalysts

图 4. BiOX (I, Br, Cl) 催化剂的光催化固氮性能图

3.2. 不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 固氮性能

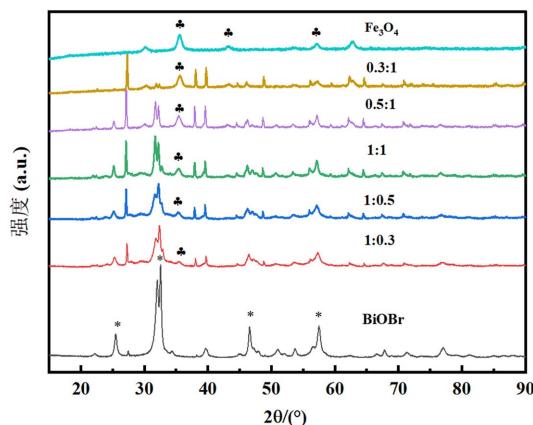


Figure 5. XRD pattern of Fe_3O_4 composite BiOBr catalyst with different content

图 5. 不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 催化剂的 XRD 图

图 5 为不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 含量催化剂的 XRD 图谱。从图中可以看出, $2\theta = 35.4^\circ$ 、 43.0° 和 56.9° 处表现出了 Fe_3O_4 的特征衍射峰[16], 2θ 为 25.1° 、 32.3° 、 46.3° 和 57.2° 处表现出了 BiOBr 的特征衍射峰。复合催化剂 Fe_3O_4 含量的不断增加, Fe_3O_4 的特征衍射峰强度逐渐增加, 说明我们成功合成了 Fe_3O_4 /BiOBr 光催化剂。

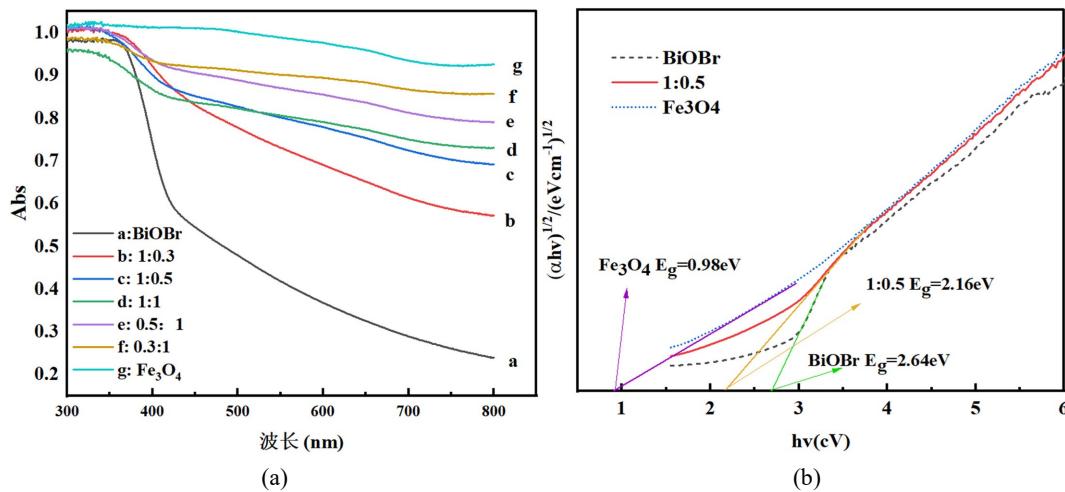


Figure 6. Uv diffuse reflection spectra (a) and band gap spectra (b) of Fe₃O₄ composite BiOBr catalysts with different content

图 6. 不同含量 Fe₃O₄ 复合 BiOBr 催化剂紫外漫反射光谱图(a)和能带间隙图(b)

图 6 为不同含量 Fe₃O₄ 复合 BiOBr 催化剂的紫外漫反射光谱图和能带间隙图。由图(a)可以看出, 黑色固体 Fe₃O₄ 对光的吸收性很强, 吸收可见光和近红外光的范围最宽。随着 Fe₃O₄ 含量的增大, 催化剂吸收光的波长逐渐向可见光区和近红外光区移动, 吸收光的强度也逐渐增强。由图(b)可以看出, 复合催化剂的能带间隙处于纯的 Fe₃O₄ 与纯的 BiOBr 之间, 具有适中的带隙宽度。

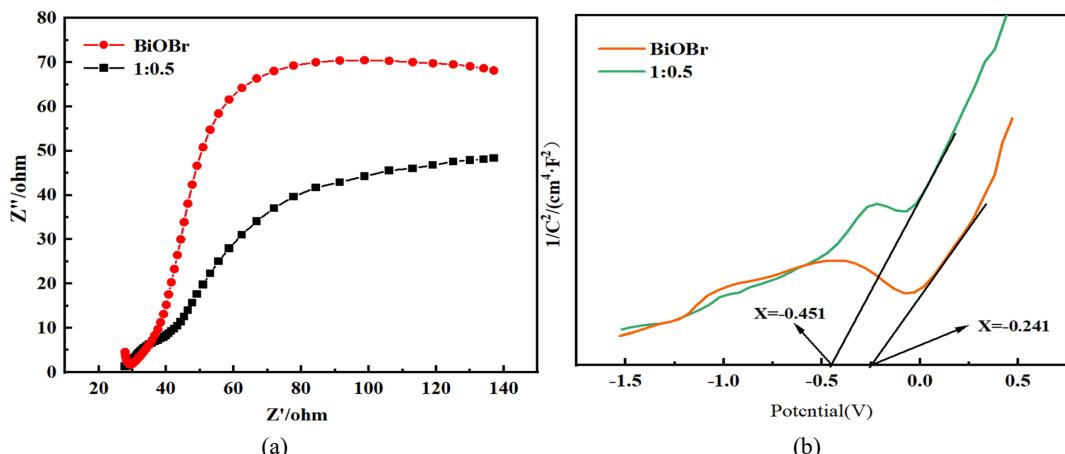


Figure 7. EIS (a) and Mott-Schottky Charts (b) of Fe₃O₄ composite BiOBr catalysts with different Contents

图 7. 不同含量 Fe₃O₄ 复合 BiOBr 催化剂的 EIS (a) 和莫特 - 肖特基图(b)

图 7 为复合催化剂的 EIS 图和莫特 - 肖特基图。由图(a)可以看出, 纯 BiOBr 催化剂的圆弧半径大于复合催化剂的半径, 表明 Fe₃O₄ 与 BiOBr 复合后催化剂的电阻减小, 光生电子和空穴较易分离, 光生电子的转移速率加快。由图(b)莫特 - 肖特基图分析得到纯 BiOBr 和复合催化剂的平带电位(EBF)分别是 -0.241 V、-0.451 V。复合催化剂的平带电位减小, 给出电子能力增加, 电子易填充到氮分子空的反键轨道中去, 氮分子更易被活化, 进而与水中的 H⁺ 反应生成氮的化合物, 促进了光催化固氮反应。

图 8 为 BiOBr 与 Fe₃O₄ 物质的量之比为 1:0.5 的复合催化剂和纯 BiOBr 催化剂的光致发光光谱图。从图中可以看出 Fe₃O₄/BiOBr 催化剂的峰强度明显低于 BiOBr, 这说明复合 Fe₃O₄ 后有效地抑制了 BiOBr 的

光致电子 - 空穴对复合, 为光催化固氮提供了更多的反应位点, 提高了光催化固氮效率。

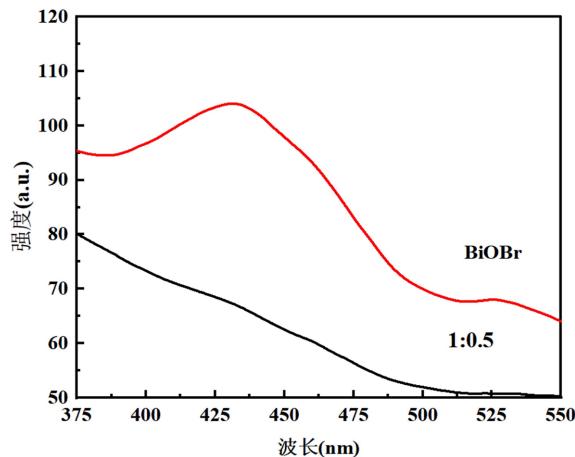


Figure 8. Photoemission spectra of Fe_3O_4 composite BiOBr catalysts with different content

图 8. 不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 催化剂的光致发光谱图

图 9 为不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 的光催化固氮性能。由图分析可知, 随着 Fe_3O_4 的含量逐渐增加, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 的光催化固氮性能逐渐升高。当 BiOBr 与 Fe_3O_4 的物质的量之比为 1:0.5 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 的光催化固氮性能最佳, 反应进行到 130 min 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 催化剂的催化效率为 $10.51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。然而, 再增加 Fe_3O_4 的含量, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 光催化固氮性能却有所降低。综合上述表征, 当 BiOBr 与 Fe_3O_4 的物质的量之比为 1:0.5 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 催化剂有了适中的吸光度和带隙宽度, 且电阻和平带电位均比纯 BiOBr 小。这不但使光生电子与空穴易分离, 光生电子的转移速率加快; 而且, 给出电子能力增加, 电子易填充到氮分子空的反键轨道中去, 氮分子更易被活化, 进而与水中的氢离子反应生成氮的化合物, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 固氮性能越好。然而, 当 Fe_3O_4 的含量进一步增加时, 催化剂的光催化固氮性能却有所下降, 这可能是因为复合催化剂的带隙宽度太小, 光生电子与空穴不易分离导致。同时, Fe_3O_4 含量太大, 易团聚, 复合催化剂的光催化固氮性能降低。

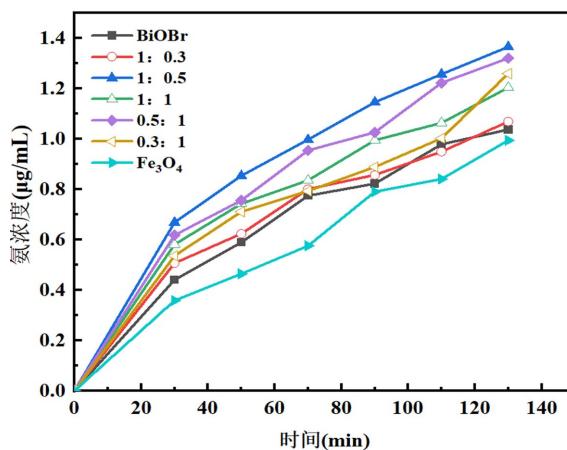


Figure 9. Photocatalytic nitrogen fixation performance of BiOBr catalyst with different Fe_3O_4 content

图 9. 不同含量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 催化剂的光催化固氮性能图

3.3. 催化剂投加量的固氮性能

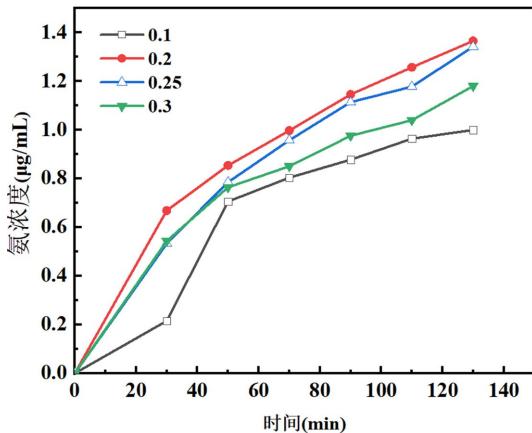


Figure 10. Photocatalytic nitrogen fixation performance of Fe_3O_4 composite BiOBr catalyst with different dosage

图 10. 不同用量 Fe_3O_4 复合 BiOBr 催化剂的光催化固氮性能图

图 10 中给出了不同用量 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 催化剂的光催化固氮性能。从图中可以看出，随着 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 催化剂用量的增加，光催化固氮性能逐渐升高。使用 0.2 g 催化剂时， $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 光催化剂的固氮性能最佳，光照反应进行 130 min 后，催化剂效率为 $10.51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。随着催化剂用量的增加，催化剂活性位越多，进而导致光催化固氮性能增强。但当催化剂的用量增加到 0.3 g 时，在相同条件下 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 催化剂的固氮性能反而降低了。这可能是因为催化剂的量过多使溶液过于浑浊，阻碍了光的有效吸收，导致光催化效率降低。

3.4. 催化剂磁性分析

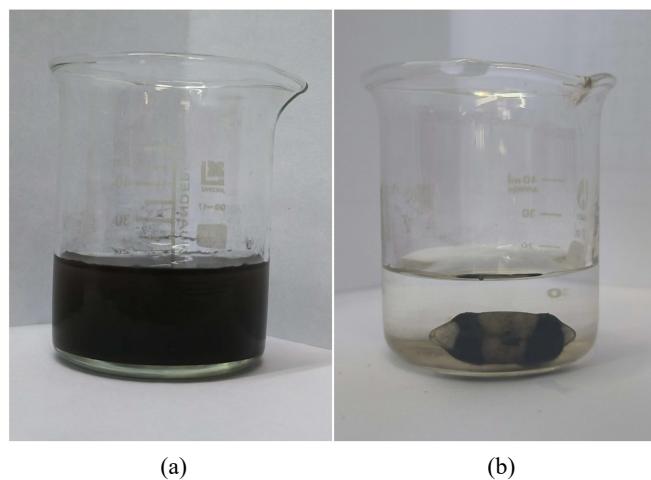


Figure 11. Magenton-free catalyst suspension (a) and Catalyst sample liquid with magnetons(b)

图 11. 无磁子的催化剂悬浮液(a); 有磁子的催化剂样品液(b)

图 11 显示了催化剂的磁性。从图中可以看出，当有磁性的磁子靠近时，催化剂被吸引。这个现象表明催化剂具有磁性。

4. 结论

- 1) BiOBr 具有适中的光吸收能力和带隙宽度, 在一定程度上抑制光生电子与空穴复合程度, 提升了光催化固氮的性能。
- 2) 当 BiOBr 与 Fe_3O_4 的物质的量之比为 1:0.5 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 光催化剂具有适中的吸光度和能带间隙, 电阻较纯的 BiOBr 小且还原性强, 光生电子转移速率快且不易与空穴发生复合, 氮分子易被活化, 固氮性能越好。BiOBr 与 Fe_3O_4 的物质的量之比为 1:0.5 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 光催化剂用量为 0.2 g, 反应 130 min 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}$ 光催化剂的催化效率为 $10.51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。该复合催化剂具有较好的磁分离性能。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202412949003), 郑州师范学院大学生创新创业训练计划项目(DCZ2023007)。

参考文献

- [1] 高鑫椿, 李佳昕, 宋沐遥, 等. ZnO 的改性及其在能源催化领域中的应用新进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(9): 65-69.
- [2] 温福山, 黄晓栗, 李亚杰, 等. 2D/3D MoS_2/HTCN 异质结制备及光催化固氮综合实验[J]. 实验技与管理, 2024, 41(1): 44-51.
- [3] 张龙, 葛建华, 徐静, 等. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ 纳米复合光催化剂的制备及其光催化固氮性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(5): 5097-5104.
- [4] 叶金胜, 郝秋凤. 光催化固氮合成氨催化剂专利技术综述[J]. 化工管理, 2022(18): 74-77.
- [5] 毛成梁, 张礼知. 基于表面氧空位的光催化固氮材料[J]. 中国材料进展, 2019, 38(2): 83-90.
- [6] 葛建华, 李佳, 丁修龙, 等. P 掺杂 BiOBr 的制备及其光催化固氮性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(11): 11163-11169.
- [7] 葛建华, 张万, 李佳, 等. S 掺杂 BiOBr 的制备及其光催化固氮性能研究[J]. 分子催化, 2022, 36(3): 245-252.
- [8] 林海莉, 曹静, 罗邦德, 等. 新型 AgBr/BiOBr 光催化剂的沉积-沉淀法制备、活性与机理[J]. 科学通报, 2012, 57(15): 1309-1316.
- [9] 王海涛, 施宝旭, 赵晓旭, 等. 高效降解盐酸四环素的 CdS/BiOCl 复合光催化剂的制备及性能[J]. 材料导报, 2024, 38(6): 123-130.
- [10] 铁伟伟, 邱帅彪, 王红霞, 等. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-BiOBr/Graphene}$ 磁性气凝胶的构筑与 Cr(VI) 污水净化[J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 1987-1996.
- [11] 朱脉勇, 陈齐, 童文杰, 等. 四氧化三铁纳米材料的制备与应用[J]. 化学进展, 2017, 29(11): 1366-1394.
- [12] 王辉, 李士君, 王梅, 等. 载银 $\text{g-C}_3\text{N}_4(\text{I})/\text{g-C}_3\text{N}_4(\text{II})$ 同素异质结催化剂的制备及光催化固氮产氨性能[J]. 材料导报, 2018, 32(20): 3496-3503.
- [13] 黄宜强, 聂耳. TiO_2/BiOI 的制备及其可见光催化性能[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(10): 1090-1097.
- [14] 孙天奇, 陈勇号, 巫衡, 等. $\text{BiOCl/g-C}_3\text{N}_4\text{-Br}$ 光催化降解罗丹明 B[J]. 化工环保, 2024, 44(2): 196-204.
- [15] 唐佳华, 成先雄, 连军锋, 等. 卤氧化铋光催化剂改性的研究进展[J]. 石油化工, 2023, 52(9): 1268-1275.
- [16] 刘家豪, 张梦朝, 文斯捷, 等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{BiOBr}/\text{BiOI}$ 的制备及降解 2,4-D 的性能研究[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 47-52.