

# 卤氧化铋材料应用于光催化降解领域的研究进展及前景

谢佳晋, 张艺凡, 周玉航, 张佳伟, 刘增乐, 王宇航\*

佳木斯大学药学院, 黑龙江 佳木斯

收稿日期: 2026年5月15日; 录用日期: 2026年6月14日; 发布日期: 2026年6月24日

## 摘要

卤氧化铋( $\text{BiOX}$ ,  $X = \text{Cl, Br, I}$ )因其独特的层状结构和优异的光催化活性而在环境和能源领域有着广泛的应用。为了更好地实现新型卤氧化铋基材料的构筑和光催化应用, 分别从晶体结构、能带结构、形貌特征、改性策略和应用领域五个维度展开分析, 并展望其在各领域实际应用的发展前景。

## 关键词

卤氧化铋, 光催化降解, 研究进展

# Research Progress and Prospect of Bismuth Oxyhalide Materials Applied in Photocatalytic Degradation

Jiajin Xie, Yifan Zhang, Yuhang Zhou, Jiawei Zhang, Zengle Liu, Yuhang Wang\*

College of Pharmacy, Jiamusi University, Jiamusi Heilongjiang

Received: May 15, 2026; accepted: June 14, 2026; published: June 24, 2026

## Abstract

Bismuth oxyhalide ( $\text{BiOX}$ ,  $X = \text{Cl, Br, I}$ ) was widely used in the fields of environment and energy because of its unique layered structure and excellent photocatalytic activity. In order to better realize the construction and photocatalytic application of new bismuth oxyhalide-based materials, the crystal structure, energy band structure, morphological characteristics, modification strategy and application fields were analyzed respectively, and the development prospect of its practical application in various fields was prospected.

\*通讯作者。

文章引用: 谢佳晋, 张艺凡, 周玉航, 张佳伟, 刘增乐, 王宇航. 卤氧化铋材料应用于光催化降解领域的研究进展及前景[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 97-106. DOI: 10.12677/ms.2026.166142

## Keywords

### Bismuth Oxyhalide, Photocatalytic Degradation, Research Progress

Copyright © 2026 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. 前言

随着工业化与城镇化进程加速,工业废水排放量持续攀升,污染物组成复杂且不易降解,传统处理工艺因效率低、成本高和易产生二次污染等局限难以满足需求[1]。光催化技术作为高级氧化工艺,凭借反应温和、环境友好以及可利用太阳能等优势,在难降解工业废水处理中展现出潜力。然而,光催化剂仍面临可见光利用率低和光生载流子易复合问题[2]。卤氧化铋(BiOX, X = Cl, Br, I)是一类典型的层状铋基半导体,其独特的层交替堆叠结构可形成内建电场,促进光生载流子高效分离,同时卤素原子可调控带隙并赋予可见光响应[3]。目前,形貌调控、缺陷工程、掺杂及异质结构建等策略已被广泛用于提升 BiOX 基光催化剂的活性。系统梳理 BiOX 基光催化材料在工业废水降解领域的研究进展,围绕其结构特性、光催化性能、改性策略和应用现状展开论述,以期为该类材料的理性设计与实际应用提供理论支撑。

## 2. 卤氧化铋材料的结构特征

### 2.1. 卤氧化铋的晶体结构

BiOX 作为典型的铋基半导体具有独特的层状晶体结构,为其优良的光催化活性提供了基本保证[4]。如图 1 (红色上下两层表示  $\text{Bi}^{3+}$ 、紫色代表  $\text{O}^{2-}$ 、中间分别代表  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$  和  $\text{I}^-$ ), BiOX 晶系一般属于四方晶系,组成晶格的带正电的  $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$  层与带负电的双卤素原子层沿 c 轴共角叠层排列形成层状结构[5][6]。这种层状结构中具有各向异性的电子排布,有利于暴露更多的活性位点,为光生电子空穴的定向转移提供了可能[7]。

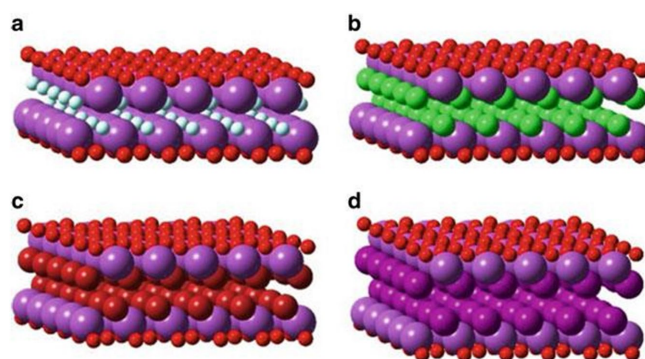


Figure 1. Schematic diagram of the layered structure of BiOX [5]

图 1. BiOX 的层状结构示意图[5]

由于  $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$  层和卤素层的静电相互作用存在差异,形成的内建电场会存在于 BiOX 晶体的内部,以至于对光生载流子造成了空间上的分离,进一步提升了光催化反应中载流子的利用效率[8][9]。相对于传统的均相半导体而言, BiOX 由于其自身的构造更具有载流子分离较方便的先天优势,也是 BiOX 在光催

化降解中应用受到大家关注研究的主要原因。

## 2.2. 卤氧化铋的能带结构

从吸收光谱来看,不同卤素组分的 BiOX 在带隙宽度与光响应范围上呈现显著差异。总体而言,随卤素原子序数的增大,材料带隙逐渐收窄,BiOX 的氧化还原电位和载流子分离情况也随之发生变化[10]。BiOX 光催化材料相对能带位置如图 2 所示。

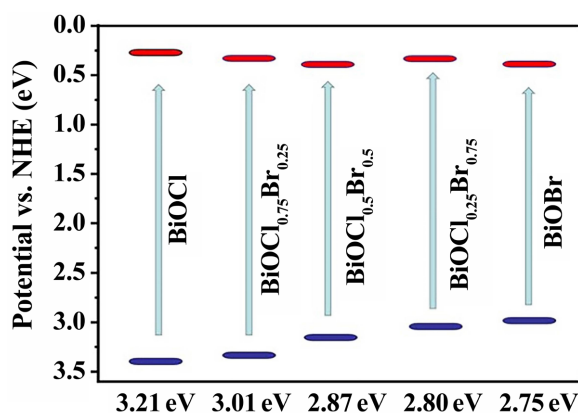


Figure 2. Schematic diagram of the band structure of bismuth oxyhalide [11]

图 2. 卤氧化铋能带结构示意图[11]

BiOCl 的禁带宽度较宽,介于 3.2 eV 左右,只能吸收紫外波段的光。光生空穴具有较高的氧化电位,对于一些有机污染物具有比较好的氧化降解能力。BiOCl 层间结构致密,层次性高,稳定性、耐腐蚀性较好,但由于其在可见光的利用率不佳而受到限制[12]。

BiOBr 的禁带宽度在 2.6~2.9 eV 之间,具有一定的可见光响应能力和较为适中的能带位置。BiOBr 是目前 BiOX 体系中比较综合的一类半导体材料,一方面它吸收了部分可见光,有利于利用太阳能,另一方面价带和导带位置也较为适中,具有一定的氧化还原能力。因此,对于活性氧物种的产生以及污染物的降解,BiOBr 具有较为综合的催化能力[13]。

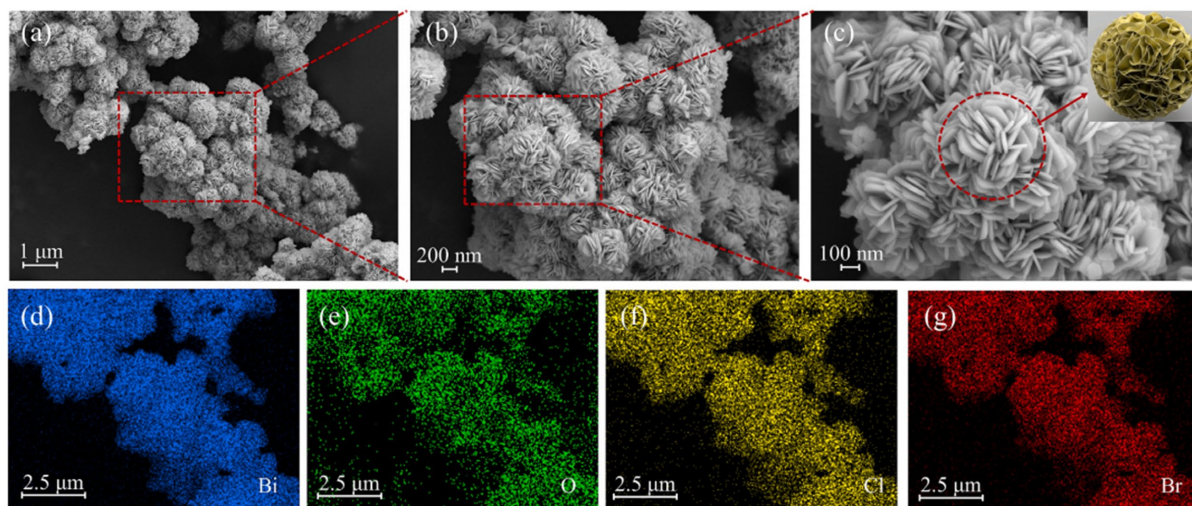
BiOI 的禁带宽度最小,一般在 1.7~1.9 eV 范围内,对可见光的吸收性能和太阳光的利用率较高,但是带隙窄导致光生电子-空穴的复合率较大,单一体系下的催化效率不高。BiOI 本身稳定性较 BiOCl 和 BiOBr 差,在复杂的反应体系中长时间使用时的稳定性有待提高[14]。

为进一步扩展卤氧化铋基光催化材料的可见光吸收范围和活性位点,可以通过调节卤离子比例改变卤氧化铋的层间距,尤其 BiOCl 中掺杂溴能引入晶体缺陷,从而有效提升光谱吸收能力与光催化效率[15][16]。因此,具有合适能带结构的卤氧化铋材料会在光照下产生更多难以复合的电子-空穴对,与水及溶解氧反应生成活性氧物种(ROS),包括空穴( $h^+$ )、羟基自由基( $\cdot OH$ )和超氧自由基( $\cdot O_2^-$ ),这些活性物种可与材料表面污染物发生氧化还原反应,从而实现污染物降解目标[17]。

## 2.3. 卤氧化铋形貌特征

卤氧化铋的微观形貌对其光催化性能具有显著影响,其中有两类典型结构备受关注。一类是由纳米片组装而成的花状微球,此类形貌源于 BiOX 固有的层状晶体结构 $[Bi_2O_2]^{2+}$ 层与双卤素原子层交替堆叠,沿方向优先生长为二维纳米片。在水热或溶剂热合成中,通过调控表面活性剂、pH 值或反应温度,纳米片倾向于以中心核为起点向外辐射生长,自组装形成规整的纳米花球,如图 3 所示[18]。该结构具有高比

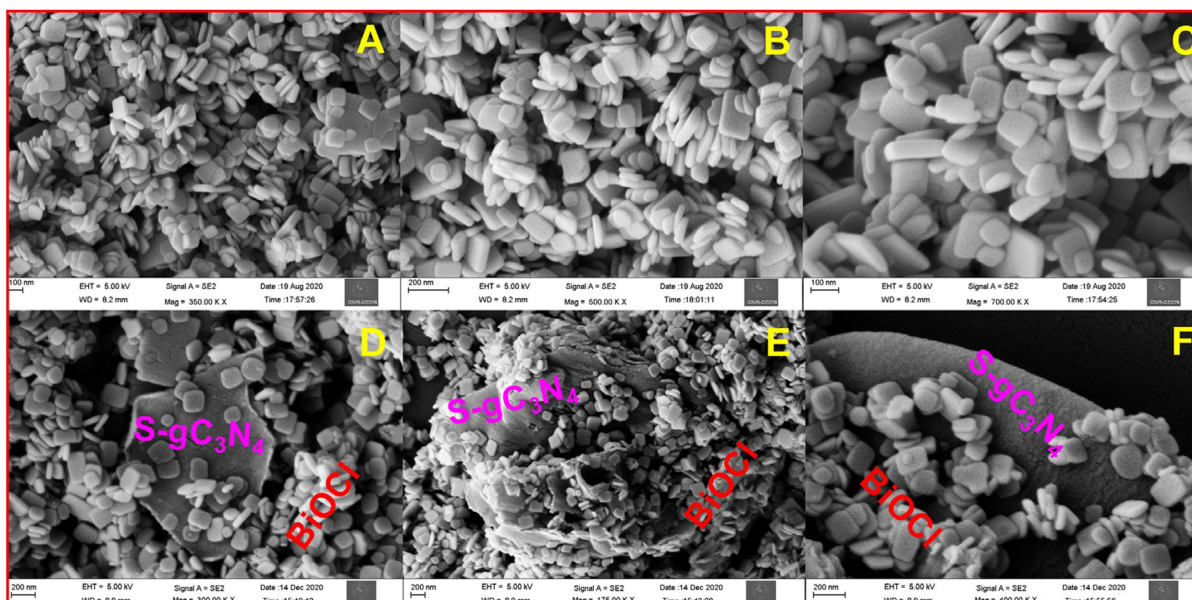
表面积和丰富的孔隙通道，有利于光吸收与传质；片层间的交错堆叠还能抑制片层自身的紧密团聚，并暴露出大量高活性的晶面。



**Figure 3.** (a)~(c) Scanning electron microscopy images of BiOClBr-OV; (d)~(g) elemental distribution maps of Bi, O, Cl and Br [18]

**图 3.** (a)~(c) BiOClBr-OV 的扫描电镜图像; (d)~(g) Bi、O、Cl 和 Br 的元素分布图[18]

另一类为不规则的小尺寸碎块状颗粒。此类形貌通常在快速成核或低表面能调控条件下形成，BiOX 晶体沿各晶向的生长速率差异较小，难以发育为完整片状，最终呈现为数十至数百纳米的块状或颗粒状聚集体。碎块表面常伴有棱角和配位位点，这些缺陷结构可作为活性中心提升反应物吸附能力，如图 4 所示[19]。然而，碎块状形貌的比表面积相对较低，且缺乏有序的二维通道，在光生载流子分离效率上往往逊于纳米花结构。



**Figure 4.** (A)~(C) Scanning electron microscopy images of BiOCl and (D)~(F) Co-9% S-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOCl [19]

**图 4.** (A)~(C) BiOCl 和 (D)~(F) Co-9% S-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOCl 的扫描电镜图像[19]

### 3. 卤氧化铋催化材料的改性策略

#### 3.1. 元素掺杂

元素掺杂改性是 BiOX 光催化性能改性研究最为常见的一种[20]。通常是向 BiOX 基质中掺杂外源原子, 用来修饰基质晶型结构、能带电子排布、表面化学态等, 从而达到协同增强材料可见光吸收、促进光生载流子分离、提高表面反应活性等效果[21]。虽然 BiOX 材料具有独特的层状结构和优异的光催化活性, 但同时存在可见利用不充分、光生载流子复合速度快和表面光生载流子反应活性位点不足的弊端[22]。合理的元素掺杂改性有利于其在光催化降解反应中活性增强, 依据元素掺杂元素的类型, 可将 BiOX 的元素掺杂改性类别划分为金属掺杂和非金属掺杂两类[23]。

金属掺杂一方面可以为窄带隙半导体提供合适的杂质能级, 拓宽光响应范围并利于可见光的吸收; 另一方面, 掺杂的金属离子也可以作为电子捕获剂, 加速光生电子 - 空穴的快速分离, 缓解电荷复合[24]。BiOX 的金属掺杂是通过部分替换 Bi 位点或以表面修饰的形式将过渡金属、稀土或主族金属离子引入到 BiOX 中, 如过渡金属 Fe、Mn、Ti、Zn 和 Ag, 以及稀土 La、Ce 的掺杂, 会不同程度地改变 BiOX 的光响应范围和界面活性位点, 从而影响 BiOX 的局域电子环境和带隙[25]。然而, 金属掺杂不是越多越好, 过多的金属嵌入可能会加剧晶格畸变或产生更多的电荷复合位点, 不利于光催化活性的提高, 因此金属掺杂需要对掺杂物种类、氧化态和掺杂量协同控制[26]。

非金属掺杂主要通过 N、C、S、P、B 等非金属元素来调控 BiOX 价带结构和表面电子性质[27]。相较于金属元素掺杂, 一般更利于收集光的吸收边, 对晶体结构有一定的稳定性作用。例如, N 掺杂可以和 BiOX 中的  $O_{2p}$  轨道耦合, 将价带移进入窄禁带, 增强可见光响应[28]。非金属掺杂和氧空位沉积等一般会存在某种协同效应, 加强 BiOX 对染料、抗生素、酚类等污染物的降解作用[29]。无论是金属掺杂还是非金属掺杂, 其实质都是在调控微观电子结构层面上提高 BiOX 光催化活性。未来研究应进一步基于理论计算与原位表征技术的结合, 探究不同掺杂元素对 BiOX 的能带调控、载流子传输及污染物降解机理的影响, 为实现 BiOX 基光催化材料的工业废水的高效处理奠定理论基础。

#### 3.2. 异质结构筑

异质结构筑是行之有效的 BiOX 光催化性能改善策略。其精髓是将 BiOX 与其他半导体材料进行复合, 构筑具有能带匹配关系的异质结界面, 促进光生电子 - 空穴对的定向转移与分离, 同时拓宽光响应范围并提高表面氧化还原电位[30]。BiOX 材料虽然有层状构型和内建电场等优势, 但是仅作为单一材料存在时, 仍然存在光生载流子复合速率较高、量子效率较低以及界面附近反应活性有限等诸多缺陷, 因此构筑异质结成为了 BiOX 基光催化材料结构改性的主要手段[31]。

I 型异质结典型特征为一种半导体的导带底和价带顶分别高于和低于另一种半导体的相应能级。在 BiOX 基 I 型异质结中, 光激发产生的电子与空穴在热力学驱动下将同时迁移并富集于具有较窄带隙的半导体组分一侧。这一过程在空间上实现了电子与空穴的同步限域, 能够在一定程度上抑制载流子复合。II 型异质结呈现交错式能带排列, 即两种半导体材料的导带底和价带顶位置相互错开。在与 BiOX 构筑的 II 型结构中, 光照激发后, 光生电子将自发从具有较高导带能级的半导体迁移至较低导带能级的半导体, 而光生空穴则逆向迁移至具有较高价带能级的半导体侧[32]。这一独特的空间矢量分离机制能够将还原性电子与氧化性空穴物理隔离于不同物相之中, 从而显著降低载流子的非辐射复合速率, 并延长光生电荷的寿命[33]。总体来说, 当一种半导体材料的导带与价带均位于另一种半导体材料的禁带内时, 构成 I 型异质结; 而当两种半导体材料的禁带完全交错时, 则形成 II 型异质结, 如图 5 所示[34]。相较于 BiOX 复合材料来说, II 型异质结通过内建电场的辅助驱动, 大幅提升了光生载流子的分离动力学与表面反应

通量, 对于抗生素、酚类及有机染料的降解表现出更优的活性氧物种产率与矿化率[35]。

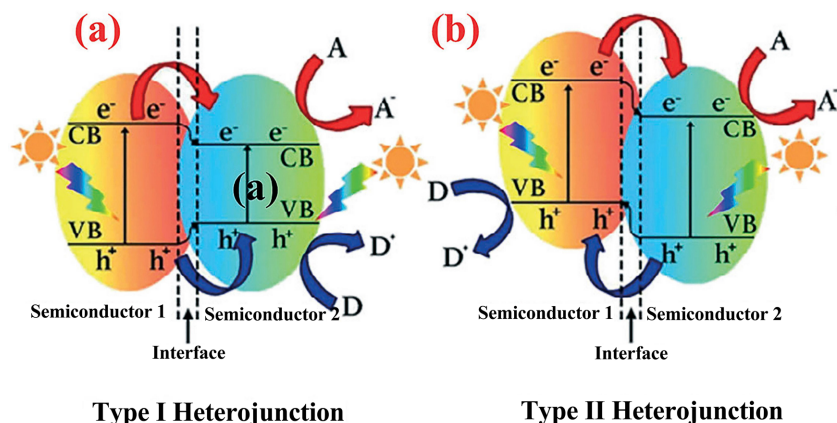


Figure 5. (a) Electron transfer in type I and (b) type II heterojunctions [34]  
图 5. (a) I 型和(b) II 型异质结的电子转移[34]

例如, II 型异质结复合体系研究较多的是 BiOX/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 作为一种非金属聚合物半导体, 具有成本低、制备简单、化学稳定性和可见光响应性良好等优点, 将 BiOX 和 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合构建异质结在染料、抗生素和酚类有机废水的处理中都具有较高的光催化活性。BiOX/TiO<sub>2</sub> 异质结同样具有典型性, 当 BiOX 和 TiO<sub>2</sub> 形成复合材料后, BiOX 弥补 TiO<sub>2</sub> 禁带宽度大的不足, 增加对可见光的利用[36], TiO<sub>2</sub> 能够提高 BiOX 整体稳定性和反应耐久性, 合理的界面设计使得 BiOX/TiO<sub>2</sub> 复合材料达到更快的电荷分离和更宽的光谱, 应用于降解工业污水中有机污染物, 具有更好的催化能力和循环利用能力。因此, 异质结构筑界面协同效应很好地弥补 BiOX 的局限性, 解决了单一 BiOX 光催化降解工业废水的条件限制, 进一步研究异质界面的电子跃迁过程以及异质结构筑的稳定性, 能够更好地将 BiOX 复合材料从实验室研究基础走向广泛应用。

### 3.3. 形貌调控与缺陷工程

形貌调控和缺陷工程是用来增强 BiOX 的光催化性能的有效手段[37]。其主要是形貌调控和缺陷的形成来提升 BiOX 的光吸收、载流子分离、表面反应活性等性能[38]。由于 BiOX 的光催化也存在一定的缺陷和不足, 如 BiOX 的光催化具有比表面积小、活性位点少、内建电场等缺陷, 因此 BiOX 的形貌调控和缺陷工程也是近年来 BiOX 基光催化材料改进的重点领域。在形貌设计中, 二维纳米片的使用不仅缩短了光生载体的扩散距离, 而且降低了载流子的复合概率, 还可以为表面提供更多反应和吸附的位置, 促进更多的污染物分子结合到片上并发生界面反应。另外, 除了纳米片和花球形貌的设计, 缺陷工程可以从结构和电子层面对 BiOX 光催化活性进行系统调控, 其中缺陷氧空位可以调控电子结构且对表面活性具有十分重要的作用。

氧空位是 BiOX 缺陷工程中引入最广泛的缺陷类型。适量氧空位的引入可在基底中形成局域缺陷态, 改变材料的电子结构和能带结构, 进而扩大光响应范围至可见光区[39]。同时氧空位可充当电子陷阱促进光激发电子-空穴对的分离与传递, 抑制其复合。此外, 表面的氧空位可促进对 O<sub>2</sub> 和污染物分子的活化, 促进产生活性氧物种以提升对污染物的降解效率[40]。但氧空位并非越多越好, 过多的氧缺陷同样会成为反应的复合位点, 不利于光催化性能的提升, 因此氧缺陷的精确调控显得尤为重要。未来可以关注不同缺陷形成过程和形貌结构效应的系统研究, 从而实现 BiOX 基材料光催化性的科学设计和开发。

### 3.4. 多种改性策略的协同效应

单一的改性形式并不足以完全突破 BiOX 性能瓶颈，所以元素掺杂、构筑异质结构、打造缺陷工程等多手段成为了改性方向研究的前沿，这三种改性方向的耦合在微观电子结构与界面电荷演化动力学上发挥着高度协同作用[41]。

具体而言，BiOX 基异质结界面处，元素渗入掺杂可以有效调节界面费米能级位置，诱导更强的界面能带弯曲以提升内建电场，加快光生载流子的界面跨区域定向移动，使其空间分离；同时界面位置的氧空洞等缺陷还可以充当电子陷阱，从而延长光生载流子寿命。不仅如此，它也可以作为一个电荷转移的“高速通道”，降低基于晶格失配的界面势垒[42]。三位一体之下，渗入的掺杂原子的局域配位环境改变还可以稳定界面缺陷，使其免于在催化过程中被氧化修复。这一多向共同作用策略同时兼顾热力学及动力学，进而改善了电荷传输路径及表面活性位点，为实现污染物的高效矿化提供了严谨可靠的理论基础[43]。

## 4. 卤氧化铋材料在光催化降解领域的应用与展望

### 4.1. 卤氧化铋材料在光催化降解领域的应用

#### 4.1.1. 实验室光催化降解废水污染物的应用

BiOX 基材料以其独特的层状结构、能带结构可调、适合的可见光响应范围性质，在降解处理难处理的工业废水上表现出广阔的应用潜能，主要集中在染料、抗生素和农药等有机污染物的降解应用[44]。对于染料废水处理，BiOX 材料对罗丹明 B、刚果红和亚甲基蓝等染料展现了很好的光催化活性，通过光产生的电子空穴对和·OH、 $h^+$ 和·O<sub>2</sub>等活性氧化物种将染料中的偶氮键和芳香环进行有效破坏，完成脱色并矿化[45]；对于制药废水处理，BiOX 基光催化体系通过破坏抗生素分子结构的芳环、酰胺键、杂环的结构，实现了四环素、左氧氟沙星和环丙沙星等污染物的有效去除[46]；此外，在处理农药废水领域具有重要意义，通过氧化磷酸酯键、氯代芳环等结构可将高毒性有机物氧化，磷酸酯键逐渐降解为小分子低毒或无毒物质，使废水可降解性得到改善[47]。

#### 4.1.2. 模拟工业废水体系中光催化降解的应用

相比较单一污染物的实验室研究，实际工业废弃水的 BiOX 基材料的研究更有工程实用意义[48]。近些年，BiOX 基复合材料在模拟工业废水体系中的研究从单一污染物的降解逐渐转向了模拟的工厂废水和实际废水，研究者们通过复配的染料、抗生素和无机盐等各类组分进行配置，以获得相对接近实际水体质量的复配水。BiOX 基材料虽在该体系下的催化面临竞争吸附和光屏蔽效应等各种问题，但也能发挥其脱色、矿化、抑菌和降解有机物等的各种催化活性[49]。然而，距离实际的工业化应用还有一段距离，模拟工业废水体系的长期稳定性、重复性、可循环性和光反应器运行效率等方面还需做更进一步的探讨。

### 4.2. 卤氧化铋材料在光催化降解领域的前景展望

#### 4.2.1. 高性能和多功能材料的研发

对于未来 BiOX 基复合材料的开发，需要基于扩大可见光响应、提高稳定性及设计多功能协同催化剂等角度进行探究及优化[50]。首先，通过掺杂及缺陷调控、异质结构构建等策略优化材料的能带结构以及将太阳光吸收范围拓宽，实现光能的高利用率；其次，对于复杂体系下催化剂的光腐蚀问题和催化活性失活需要整体调控；最后，设计集光催化降解、CO<sub>2</sub>还原、抗菌和检测等于一体的多功能催化剂体系，以满足复杂工业应用的实际需求。

#### 4.2.2. 工业化应用路径的推进

BiOX 复合材料的工业化实际应用，迫切需在工业中解决材料的回收再利用、光反应器工艺设计和成

本优化等方面的问题[51]。一方面,需要使催化剂进一步的固载化,把催化剂负载在包括玻璃纤维、陶瓷等多孔承载材料上,解决粉末催化反应后无法回收利用易产生二次污染物的现状;另一方面,根据不同工业应用的特点设计合适的光反应器,进一步地提高光的转化效率,保证反应的连续运作时间等问题。除此之外,反应原料及运行成本的节约也需要进一步研究优化,致力于 BiOX 基复合材料能够走出实验室走上生产实践线[52]。

## 5. 卤氧化铋材料在光催化降解领域的挑战与未来发展方向

卤氧化铋(BiOX, X = Cl, Br, I)材料因其具备的特殊层状结构、可调带隙和优异的可见光催化活性等优势,在工业废水光催化处理方面具有广阔的研究前景和应用价值,并且在光催化性能方面可以通过元素掺杂、异质结构建和缺陷工程来进一步提高光催化活性。目前,BiOX 基复合材料材料在实验室降解染料、抗生素和工业废水样品等方面具有较深的研究,但如何更好地适应实际复杂的水环境,实现催化剂的回收再利用以及材料的成本等实际应用问题,需要进一步完善机制、联系实际,使 BiOX 基光催化材料在光催化领域更高效、稳定和实用。

## 基金项目

黑龙江省大学生创新训练项目: BiOCl<sub>x</sub>Br<sub>(1-x)</sub>材料开发及降解工业废水的应用研究(S202410222149)。

## 参考文献

- [1] Crini, G. and Lichtfouse, E. (2019) Advantages and Disadvantages of Techniques Used for Wastewater Treatment. *Environmental Chemistry Letters*, **17**, 145-155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- [2] Malato, S., Blanco, J., Vidal, A. and Richter, C. (2002) Photocatalysis with Solar Energy at a Pilot-Plant Scale: An Overview. *Applied Catalysis B: Environmental*, **37**, 1-15. [https://doi.org/10.1016/s0926-3373\(01\)00315-0](https://doi.org/10.1016/s0926-3373(01)00315-0)
- [3] Li, J., Yu, Y. and Zhang, L. (2014) Bismuth Oxyhalide Nanomaterials: Layered Structures Meet Photocatalysis. *Nanoscale*, **6**, 8473-8488. <https://doi.org/10.1039/c4nr02553a>
- [4] Cheng, H., Huang, B. and Dai, Y. (2014) Engineering BiOX (X = Cl, Br, I) Nanostructures for Highly Efficient Photocatalytic Applications. *Nanoscale*, **6**, 2009-2026. <https://doi.org/10.1039/c3nr05529a>
- [5] 江茂坤. 卤氧化铋基光催化材料的制备及其光催化降解性能研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.
- [6] Sharma, I.D., Tripathi, G.K., Sharma, V.K., Tripathi, S.N., Kurchania, R., Kant, C., *et al.* (2015) One-pot Synthesis of Three Bismuth Oxyhalides (BiOCl, BiOBr, BiOI) and Their Photocatalytic Properties in Three Different Exposure Conditions. *Cogent Chemistry*, **1**, Article 1076371. <https://doi.org/10.1080/23312009.2015.1076371>
- [7] 肖力光, 李奇明, 朱飞帆, 等. 改性 BiOBr 光催化材料的研究进展[J/OL]. 化工新型材料, 2026: 1-6. <https://link.cnki.net/doi/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.10.006>, 2026-01-26.
- [8] Ali, Z., Ma, J., Hong, M. and Sun, R. (2023) Review: Applications of the Functional Photocatalysts BiOX (X = Cl, Br, I) for Clean Energy, the Environment, and Future Photobiorefineries. *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 3297-3314. <https://doi.org/10.1039/d2ta09877f>
- [9] Luo, Z., Ye, X., Zhang, S., Xue, S., Yang, C., Hou, Y., *et al.* (2022) Unveiling the Charge Transfer Dynamics Steered by Built-In Electric Fields in BiOBr Photocatalysts. *Nature Communications*, **13**, Article No. 2230. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29825-0>
- [10] Seema, H., Fouzia, K. and Yaseen, M. (2026) Controllable Growth and Application of BiOX Photocatalysis. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 89-115. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00006-7>
- [11] Qiu, X., Lin, S., Li, J. and Guo, L. (2022) One-step Coprecipitation Synthesis of BiOCl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub> Photocatalysts Decorated with QDs at Room Temperature with Enhanced Visible-Light Response. *Inorganic Chemistry*, **61**, 10999-11010. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01747>
- [12] Zhang, K.L., Liu, C.M., Huang, F.Q., Zheng, C. and Wang, W. (2006) Study of the Electronic Structure and Photocatalytic Activity of the BiOCl Photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, **68**, 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.08.002>

- [13] Huang, S., Xu, Y., Liu, Q., Zhou, T., Zhao, Y., Jing, L., *et al.* (2017) Enhancing Reactive Oxygen Species Generation and Photocatalytic Performance via Adding Oxygen Reduction Reaction Catalysts into the Photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **218**, 174-185. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.030>
- [14] Yu, H. and Han, Q. (2021) Effect of Reaction Mediums on Photocatalytic Performance of BiOX (X = Cl, Br, I). *Optical Materials*, **119**, Article 111399. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111399>
- [15] Ai, L., Zhang, X., Guo, N., Xu, M., Jia, D., Wang, L., *et al.* (2023) Br-Doped BiOCl Nanosheet Exposed (001) Facet: Surface Oxygen Vacancy and Directed Electron Flow Boosting the Photocatalytic Performance. *Langmuir*, **39**, 18073-18081. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c02876>
- [16] Thi, L.N., Tran Huu, H., Ngoc, T.N., Viswanath, N.S.M., Le, H.T.T., Phan, T.T.T., *et al.* (2023) BiOCl<sub>1-x</sub>Br<sub>x</sub> Solid Solution—Novel Synthesis, Highly-Efficient Visible-Light-Driven Photocatalyst, and DFT Study. *Journal of Alloys and Compounds*, **960**, Article 170503. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170503>
- [17] Wei, X., Akbar, M.U., Raza, A. and Li, G. (2021) A Review on Bismuth Oxyhalide Based Materials for Photocatalysis. *Nanoscale Advances*, **3**, 3353-3372. <https://doi.org/10.1039/d1na00223f>
- [18] Fang, R., Yang, Z., Wang, Z., He, J., Qiu, J., Ran, J., *et al.* (2024) Double Defects Cooperatively Mediated BiOClBr-Ov for Efficient Round-the-Clock Photocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction. *Fuel*, **367**, Article 131514. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131514>
- [19] 宋桂贤, 许宁侠. BiOX 光催化剂及改性材料研究进展[J]. 精细石油化工, 2023, 40(1): 78-82.
- [20] Singh, V. (2025) A Review: Bismuth Oxy Halide Based Materials (BiOX: X = Cl, Br and I) Heterostructures Nanofiber's and Photo Catalytic Activity. *International Journal of New Chemistry*, **12**, 2645-7236.
- [21] Jia, X., Cao, J., Lin, H., Zhang, M., Guo, X. and Chen, S. (2017) Transforming Type-I to Type-II Heterostructure Photocatalyst via Energy Band Engineering: A Case Study of I-BiOCl/I-BiOBr. *Applied Catalysis B: Environmental*, **204**, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.11.061>
- [22] Hussain, A., Hou, J., Tahir, M., Ali, S.S., Rehman, Z.U., Bilal, M., *et al.* (2024) Recent Advances in BiOX-Based Photocatalysts to Enhanced Efficiency for Energy and Environment Applications. *Catalysis Reviews*, **66**, 119-173. <https://doi.org/10.1080/01614940.2022.2041836>
- [23] Badawi, A.K. and Ismail, B. (2026) Recent Progress in BiOX Materials for Efficient air Pollutant Degradation. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 505-516. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00031-6>
- [24] Hamouda, M.A. and Ahmed, M.E. (2026) State-of-the-Art Technologies Utilizing BiOX for Photocatalytic Degradation of Contaminants. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 375-389. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00024-9>
- [25] Xiong, J., Song, P., Di, J. and Li, H. (2020) Bismuth-Rich Bismuth Oxyhalides: A New Opportunity to Trigger High-Efficiency Photocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 21434-21454. <https://doi.org/10.1039/d0ta06044e>
- [26] Wang, G., Luo, X., Huang, Y., Kuang, A., Yuan, H. and Chen, H. (2016) BiOX/BiOY (X, Y = F, Cl, Br, I) Superlattices for Visible Light Photocatalysis Applications. *RSC Advances*, **6**, 91508-91516. <https://doi.org/10.1039/c6ra14915d>
- [27] Lv, J., Hu, Q., Cao, C. and Zhao, Y. (2018) Modulation of Valence Band Maximum Edge and Photocatalytic Activity of BiOX by Incorporation of Halides. *Chemosphere*, **191**, 427-437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.149>
- [28] Zhang, X. and Zhang, L. (2010) Electronic and Band Structure Tuning of Ternary Semiconductor Photocatalysts by Self Doping: The Case of BiOI. *The Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 18198-18206. <https://doi.org/10.1021/jp105118m>
- [29] Zhou, R., Liu, Z., Yao, S., Li, Y. and Fu, Y. (2025) Harnessing Oxygen Vacancy-Enriched and Carbon-Doped Steric Hindrance of BiOBr-OVs for Superior Photocatalytic Pollutant Degradation. *Surfaces and Interfaces*, **59**, Article 105927. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.105927>
- [30] Gao, B., Zhang, J., Chen, L., Guo, J., Shen, S., Au, C., *et al.* (2019) Density Functional Theory Calculation on Two-Dimensional MoS<sub>2</sub>/BiOX (X = Cl, Br, I) Van Der Waals Heterostructures for Photocatalytic Action. *Applied Surface Science*, **492**, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.201>
- [31] Ikram, M. and Bari, M.A. (2024) Bismuth Oxyhalides. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-5934-4>
- [32] Wang, H., Zhang, L., Chen, Z., Hu, J., Li, S., Wang, Z., *et al.* (2014) Semiconductor Heterojunction Photocatalysts: Design, Construction, and Photocatalytic Performances. *Chemical Society Reviews*, **43**, 5234-5244. <https://doi.org/10.1039/c4cs00126e>
- [33] Balapure, A., Ray Dutta, J. and Ganesan, R. (2024) Recent Advances in Semiconductor Heterojunctions: A Detailed Review of the Fundamentals of Photocatalysis, Charge Transfer Mechanism and Materials. *RSC Applied Interfaces*, **1**, 43-69. <https://doi.org/10.1039/d3f00126a>
- [34] Zhong, Y., Peng, C., He, Z., Chen, D., Jia, H., Zhang, J., *et al.* (2021) Interface Engineering of Heterojunction Photocatalysts Based on 1D Nanomaterials. *Catalysis Science & Technology*, **11**, 27-42. <https://doi.org/10.1039/d0cy01847c>

- [35] Che, L., Pan, J., Cai, K., Cong, Y. and Lv, S. (2023) The Construction of P-N Heterojunction for Enhancing Photocatalytic Performance in Environmental Application: A Review. *Separation and Purification Technology*, **315**, Article 123708. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123708>
- [36] Singh, A. and Soundappan, T. (2026) Multifaceted Advances in TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalysts for PFAS Degradation: A Critical Review of Mechanisms, Modifications, and Challenges. *Materials Advances*, **7**, 3101-3146. <https://doi.org/10.1039/d5ma01247c>
- [37] Wilczewska, P., Bielicka-Gieldoń, A., Szczodrowski, K., Malankowska, A., Ryl, J., Tabaka, K., *et al.* (2021) Morphology Regulation Mechanism and Enhancement of Photocatalytic Performance of BiOX (X = Cl, Br, I) via Mannitol-Assisted Synthesis. *Catalysts*, **11**, Article 312. <https://doi.org/10.3390/catal11030312>
- [38] Gembo, R.O., Ratshiedana, R., Madikizela, L.M., Kamika, I., King'ondo, C.K., Kuvarega, A.T., *et al.* (2024) Enhancing Light-Driven Photocatalytic Reactions through Solid Solutions of Bismuth Oxyhalide/Bismuth Rich Photocatalysts: A Systematic Review. *Catalysis Science & Technology*, **14**, 6466-6495. <https://doi.org/10.1039/d4cy00820k>
- [39] Kaur, B., Poonia, K., Singh, P., Thakur, S., Nguyen, V., Singh, A., *et al.* (2026) Tailoring Oxygen Vacancies in Bismuth-Based Photocatalysts for Enhanced Nox Removal Efficiency. *Emergent Materials*, **9**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1007/s42247-026-01294-x>
- [40] Yang, D., Liu, X., Liu, X., Zhu, Z., Shang, Y., Zhang, L., *et al.* (2025) Surface Oxygen Vacancy Trigger Chlorite Activation with BiOI for Sulfamethoxazole Degradation. *Journal of Industrial Safety*, **2**, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2025.06.002>
- [41] Guan, C., Hou, T., Nie, W., Zhang, Q., Duan, L. and Zhao, X. (2022) Sn<sup>4+</sup> Doping Enhanced Inner Electric Field for Photocatalytic Performance Promotion of BiOCl Based Nanoflowers. *Applied Surface Science*, **604**, Article 154498. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154498>
- [42] Bera, S., Ghosh, S., Maiyalagan, T. and Basu, R.N. (2022) Band Edge Engineering of BiOX/CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Heterostructures for Efficient Water Splitting. *ACS Applied Energy Materials*, **5**, 3821-3833. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c00296>
- [43] Yuan, Q., Wei, S., Hu, T., Ye, Y., Cai, Y., Liu, J., *et al.* (2021) Defect-Modified Ultrathin BiOX (X = Cl, Br) Nanosheets via a Top-Down Approach with Effective Visible-Light Photocatalytic Degradation. *The Journal of Physical Chemistry C*, **125**, 18630-18639. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02950>
- [44] Gajbe, V., Gupta, J., Pai, N. and Das, R. (2026) Recent Advancements in the Application of Bismuth Oxyhalide (BiOX) Based Photocatalysts for Textile Wastewater Treatment. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 391-406. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00025-0>
- [45] Yadav, M., Garg, S., Chandra, A. and Hernadi, K. (2019) Immobilization of Green BiOX (X= Cl, Br and I) Photocatalysts on Ceramic Fibers for Enhanced Photocatalytic Degradation of Recalcitrant Organic Pollutants and Efficient Regeneration Process. *Ceramics International*, **45**, 17715-17722. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.340>
- [46] Li, Y., Jiang, H., Wang, X., Hong, X. and Liang, B. (2021) Recent Advances in Bismuth Oxyhalide Photocatalysts for Degradation of Organic Pollutants in Wastewater. *RSC Advances*, **11**, 26855-26875. <https://doi.org/10.1039/d1ra05796k>
- [47] Castillo-Cabrera, G.X., Espinoza-Montero, P.J., Alulema-Pullupaxi, P., Mora, J.R. and Villacís-García, M.H. (2022) Bismuth Oxyhalide-Based Materials (BiOX: X = Cl, Br, I) and Their Application in Photoelectrocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water: A Review. *Frontiers in Chemistry*, **10**, Article ID: 900622. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.900622>
- [48] Ashraf, M., Guo, J., Yan, K. and Zhang, J. (2026) Bismuth-Based Materials as Solar-Driven Photo(Electro)Catalysts for Environmental Remediation. *Materials*, **19**, Article 728. <https://doi.org/10.3390/ma19040728>
- [49] Pu, S., Wang, D., Luo, X., Ding, Y., Guo, J., Li, Y., *et al.* (2025) Enhanced Photocatalytic Degradation of Antibiotics and Dye Using Flower-Like Biobrx11-X Solid Solutions Formed from Self-Assembled Nanosheets. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, **10**, Article 101051. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.101051>
- [50] Salman, M., Subhan, F., Rahman, A.U., Khan, K. and Yaseen, M. (2026) Photocatalytic Properties of Biox: A Comprehensive Outlook. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 19-36. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00002-x>
- [51] Chen, L., Guan, B., Guo, J., Chen, Y., Ma, Z., Chen, J., *et al.* (2023) Review on the Preparation and Performance Improvement Methods of Bismuth Photocatalyst Materials. *Catalysis Science & Technology*, **13**, 5478-5529. <https://doi.org/10.1039/d3cy00760j>
- [52] Balakrishnan, A. and Chinthala, M. (2026) Application of BiOX-Based Catalysts for Photocatalytic Nitrogen Fixation. In: Kurniawan, T.A. and Chew, K.W., Eds., *BiOX-Based Photocatalysts for Dual Applications*, Elsevier, 267-280. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23861-1.00016-x>