

# CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI复合纤维的可控制备及其光催化性能研究

郭丽莹, 卜焱, 胡铭琪, 刘美琳, 邹云伟, 周雪娇\*

哈尔滨师范大学光电带隙材料教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年9月5日; 录用日期: 2023年10月5日; 发布日期: 2023年10月12日

## 摘要

本文采用灵活的气固反应法, 将超薄g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>纳米层均匀组装在碳纳米纤维(CNFs)上, 在室温下通过连续原子层吸附法原位生长BiOI纳米片, 在CNFs上实现了g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI异质结构的组装和构筑。通过扫描电子显微镜和X射线衍射仪对合成样品的形貌及组成成分进行系统分析。利用模拟太阳光降解毒性Cr(VI)的水溶液对样品进行光催化活性分析。结果表明, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI复合纤维具有优异的光催化活性, 在重金属废水处理等领域可能会有重要的应用价值。

## 关键词

光催化, 静电纺丝, 异质结, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI, 还原Cr(VI)

# Controllable Preparation of CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI Composite Fibers and Their Photocatalytic Performance

Liying Guo, Yan Bu, Mingqi Hu, Meilin Liu, Yunwei Zou, Xuejiao Zhou\*

Key Laboratory for Photonic and Electronic Bandgap Materials, Ministry of Education, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Sep. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 5<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, an ultra-thin g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanolayer is uniformly assembled on carbon nanofibers (CNFs)

\*通讯作者。

文章引用: 郭丽莹, 卜焱, 胡铭琪, 刘美琳, 邹云伟, 周雪娇. CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维的可控制备及其光催化性能研究[J]. 材料科学, 2023, 13(10): 866-873. DOI: 10.12677/ms.2023.1310095

by a flexible gas-solid reaction method. BiOI nanosheets are grown *in situ* by continuous atomic layer adsorption at room temperature, and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI heterostructures are assembled and constructed on CNFs. The morphology and composition of the synthesized samples were systematically analyzed by scanning electron microscope and X-ray diffractometer. The photocatalytic activity of the samples was analyzed with an aqueous solution simulating the solar degradation toxicity of Cr(VI). The results show that CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI composite fiber has excellent photocatalytic activity, and may have important application value in heavy metal wastewater treatment and other fields.

## Keywords

Photocatalysis, Electrospinning, Heterojunction, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI, Cr(VI) Reduction

Copyright © 2023 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

重金属污染已经引起了越来越多的关注, 其中 Cr(VI) 基化合物广泛应用于电镀、冶金、颜料着色[1]等工业活动, 在排放前若不进一步处理, 将造成严重的环境污染。因此, 有必要利用新技术来缓解 Cr(VI) 污染。近几十年来, 用于去除 Cr(VI) 的技术包括光催化[2], 吸附, 化学沉淀和离子交换[3], 其中, 光催化是一种高效的污染物处理技术, 本文构建了一种高可见光响应、具有合适的带隙[4]和低光激发电荷复合率[5]的半导体光催化剂。

石墨相氮化碳(g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)是一种新型的无金属半导体光催化剂, 近年来广泛应用于有毒重金属离子的去除[6]。它具有合适的电子结构(2.7 eV), 较高的热稳定性和化学稳定性, 光学和光电化学性能优良[7]。然而, 纯 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光生电子 - 空穴对的重组率高, 且电荷迁移率低[8], 这影响了其光催化活性。因此, 通过构建 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与另一个具有合适带电位的半导体, 形成异质结[9], 可以减少光催化反应中光生电子 - 空穴对的重组[10], 提高光催化效率。

BiOI 可以与其他半导体混合, 构建具有增加光捕获、延长载流子寿命和增强催化性能的复合光催化剂材料[11]。BiOI 的带隙约 1.8 eV, 是最适合与 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 形成异质结的半导体之一。g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的异质结使 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光诱导电子由其强的内部电场迅速转移到 BiOI 的正导带(CB) [12]。这可以诱导光生电子 - 空穴对的有效分离, 以获得较高的光催化活性[13]。

然而, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的纳米结构异质结由于其较高的表面能, 在水中分散较差, 容易聚集, 这导致了其光催化活性的显著降低。为了解决光催化剂使用后分离的问题, 本文选择将 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的纳米结构异质结固定在适当的载体上。碳纳米纤维(CNFs)因其独特的结构性能被广泛用作催化剂载体。由于其具有高的比表面积, 良好的电荷运输性, 大的长径比, 活性位点多等优势可以提高材料的催化活性, 此外, 其一维纳米毡状结构便于自沉降提高催化材料的回收再利用性能[14], 减少回收成本, 提高了其实用性。

本研究采用简单的方法制备了 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合光催化剂。该催化剂对 Cr(VI) 水溶液的还原效率高达 76.8%, 光催化活性的增强是由于通过电荷转移对电子 - 空穴对的有效分离, 并提出了一种可能的光催化反应机理。

## 2. 实验部分

### 2.1. 化学试剂

聚丙烯腈, N,N-二甲基甲酰胺, 三聚氰胺, 碘化钾, 五水合硝酸铋, 重铬酸钾, 盐酸, 硫酸, 磷酸, 二苯卡巴肼。

### 2.2. CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的制备

#### 2.2.1. CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的制备

将 0.1 g 三聚氰胺粉末均匀铺满小瓷舟底部, 取 20 mg 碳纳米纤维置于扎满小孔的锡箔纸上, 其中, 锡箔纸起到支撑作用, 之后用锡箔纸密封放入管式炉。调控升温速度为 5°C/min 从室温升至 550°C 并保持 2 小时, 冷却降温后得到 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合纤维。

#### 2.2.2. CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的制备

用去离子水配制 0.25 mM 的 Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 水溶液和相同浓度的 KI 水溶液, 将 20 mg CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合纤维浸泡在 100 ml Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 水溶液五分钟, 期间慢慢搅动, 之后将 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合纤维放入 KI 水溶液浸泡搅动五分钟, 以上操作为一次反应循环。以这种方式循环 20 次, 最后用去离子水冲洗, 干燥后即得到 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维。

### 2.3. 表征

使用了扫描电子显微镜(SEM, SU70, Hitachi, Japan)观察样品的形貌, 使用了反射模式的 D/max2600 和 Cu-ka 辐射( $\lambda = 0.154056$  nm) (Rigaku、日本)的 X 射线衍射仪(XRD)对样品的晶相结构进行分析。使用 UV-vis 光谱仪(Perkin-Elmer, Lambda 850)对光催化剂的光催化性能进行分析。

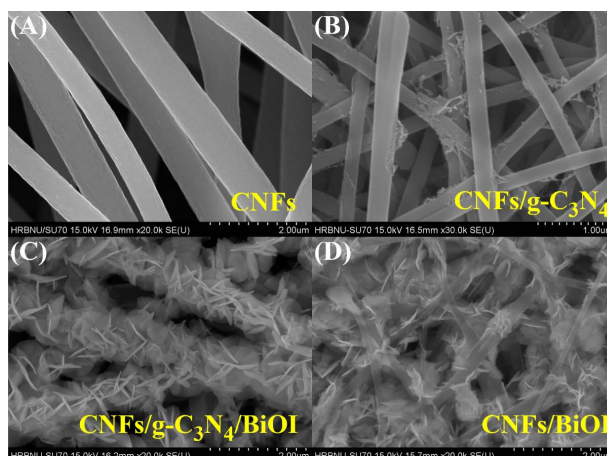
### 2.4. 光催化活性测试

通过分析样品还原 Cr(VI)的能力来评价其光催化活性。在模拟太阳光照射下, 检测所制备的光催化剂对重铬酸钾水溶液中有毒 Cr(VI)的光催化降解活性。取 30 mL 20 ppm 的重铬酸钾水溶液和 2.5  $\mu$ l 的盐酸倒入烧杯中, 调节 PH 值为 3。搅拌均匀后取出 2 mL 悬浮液, 随后加入 30 mg 光催化剂样品。在黑暗中吸附 30 分钟, 以实现吸附 - 解吸平衡。然后将悬浮液进行模拟太阳光照射(Xe 灯, 300 W, AM 1.5), 每半小时取出 2mL 悬浮液。反应后, 用二苯卡巴肼比色法测定溶液中未还原的 Cr(VI)的浓度。按照顺序依次取 40  $\mu$ L 的混合酸和 80  $\mu$ L 显色剂与每个样品混合稀释至 3 mL。在这一过程中, 六价铬在一定条件下与显色剂反应, 生成紫色的络合物, 其吸收峰位于 536 nm。用紫外 - 可见 - 近红外分光光度计(Perkin-Elmer, Lambda 850)测定混合溶液的紫外 - 可见吸收光谱, 在最大吸收波长(536 nm)处确定吸光度值。

## 3. 结果与讨论

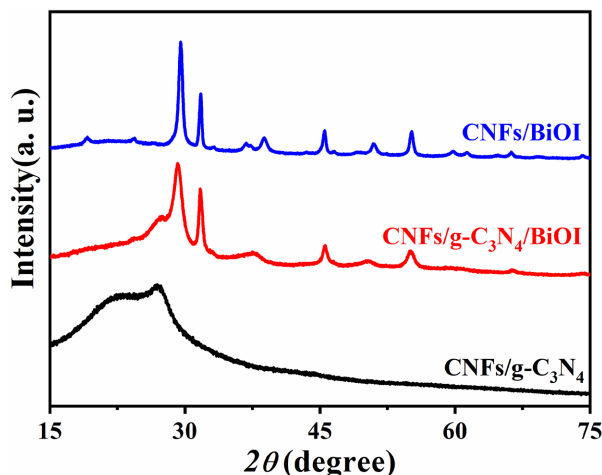
### 3.1. 样品形貌与结构表征

图 1 所示为复合纤维的 SEM 图像, 可以清晰观察到样品的形貌。碳纳米纤维(CNFs)表现出一维纳米结构, CNFs 表面十分的光滑, 纤维之间交织形成一个导电的三维微观结构(图 1(A))。CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合纤维同样表现出一维纳米结构, 无定形的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 没有形成严重的团聚(图 1(B))。对于 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维, 可以观察到 BiOI 纳米结构均匀地沉积在 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的表面(图 1(C)), 进一步证实了 BiOI 纳米片与 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 材料的紧密接触, 成功构建 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 异质结构。在图 1(D)中我们可以看到清晰的层状负载, 这说明 BiOI 纳米结构成功地紧密附着在 CNFs 上。



**Figure 1.** SEM images of (A) CNFs, (B) CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (C) CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI and (D) CNFs/BiOI  
**图 1.** (A) CNFs, (B) CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, (C) CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 和(D) CNFs/BiOI 的 SEM 图像

图 2 所示为复合纤维的 XRD 衍射图，用于表征样品的相结构和纯度。位于 27.5° 处是纯 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的特征峰，属于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的(002)衍射晶面，与 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 中共轭芳环的面内堆积相匹配。在图中也可以观察到 BiOI 纳米结构明显的衍射峰，这清楚地说明了 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 和 CNFs/BiOI 复合纤维具有良好的结晶度。在 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 和 CNFs/BiOI 复合纤维中，BiOI 纳米结构的衍射峰被完美地标记为四方 BiOI (JCPDS 73-2062)。XRD 的结果表明 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与 BiOI 成功负载在碳纳米纤维上。

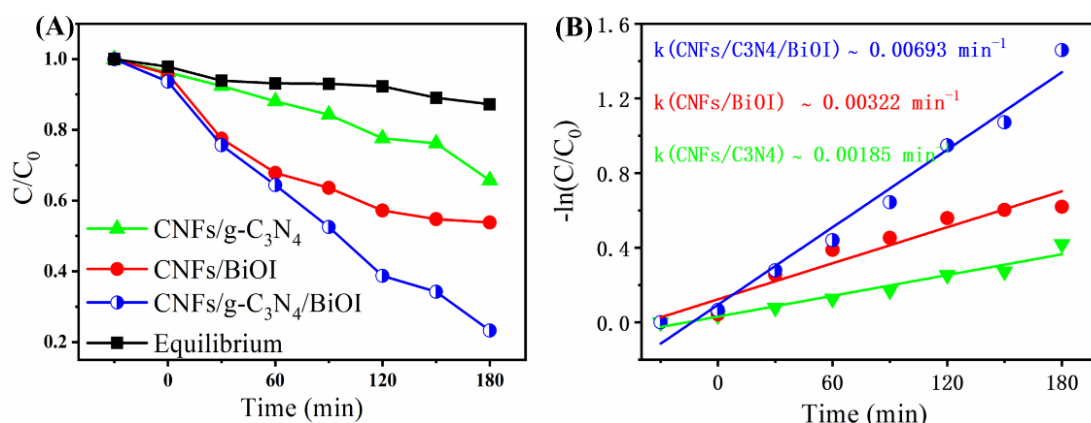


**Figure 2.** XRD patterns of the as-fabricated CNFs/BiOI, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI, and CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
**图 2.** CNFs/BiOI, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI, 和 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 XRD 图像

### 3.2. 光催化剂的活性

以 Cr(VI)水溶液作为目标污染物，研究所制得的复合光催化剂在模拟太阳光照射下的光催化还原 Cr(VI)性能，研究结果如图 3 所示。从图 3(A)可以看出含有光催化剂的悬浮液在黑暗条件下搅拌 30 min 后，光催化剂与 Cr(VI)水溶液之间达到吸附平衡。这种现象表明在模拟太阳光照射下 Cr(VI)浓度的降低仅与光催化还原过程有关，而与吸附无关。在光催化反应过程中，CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 在 180 min 内对 Cr(VI) 的去除率为 76.8%，CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在 180 min 内对 Cr(VI) 的去除率为 37.2%，CNFs/BiOI 在 180 min 内对 Cr(VI) 的去除率为 46.2%。由于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (E<sub>g</sub> = 2.82 eV)材料对可见光的吸收能力不强，因此与 CNFs/BiOI

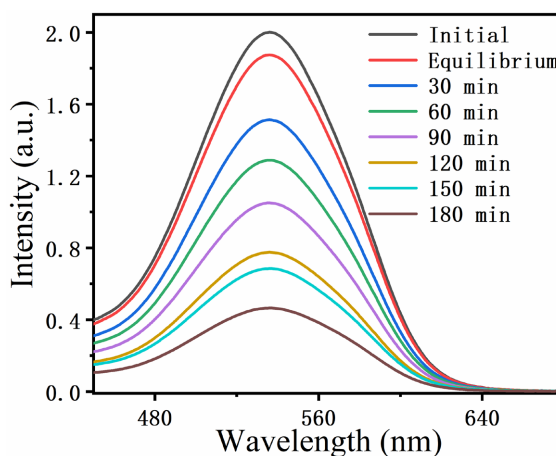
对比, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 显示出较低活性。对于 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维, 其光催化性能均有明显提升, 这主要是由于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与 BiOI 之间的高效电荷迁移。此外, 采用图 3(B) 中的伪一阶模型评价了所有样品的还原动力学, 据  $\ln(C/C_0)$  对时间  $t$  的变化曲线来计算各光催化剂的反应速率常数  $k$ ,  $C_0$  为初始时 Cr(VI) 浓度,  $C$  为时间  $t$  时 Cr(VI) 浓度。值得注意的是, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 光催化剂的  $k$  值最大, 为  $6.93 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维比 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 CNFs/BiOI 复合纤维对于去除 Cr(VI) 具有更高的光催化活性。因此, 在光催化还原 Cr(VI) 实验中, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiOI 的结合可以有效地抑制光生载流子的重组。



**Figure 3.** Under simulated sunlight irradiation: (A) Photocatalytic degradation of different samples and (B) Kinetic linear simulation curves of different samples

**图 3.** 在模拟太阳光照射下, (A) 所有样品光催化活性对比; (B) 所有样品光还原 Cr(VI) 的速率常数图

CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维还原 Cr(VI) 水溶液的紫外 - 可见吸收光谱如图 4 所示。本实验中, 在模拟太阳光照射下, Cr(VI) 被光催化剂还原为 Cr(III), 化学反应式为:  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 7\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ 。其中, 溶液中 Cr(VI) 的含量可以通过二苯卡巴肼显色剂进行标定。由于 Cr(III) 不与显色剂反应, 而 Cr(VI) 能够与二苯卡巴肼生成紫色的络合物, 其吸收峰位于 536 nm。通过紫外 - 可见 - 近红外分光光度计测定 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维还原 Cr(VI) 后溶液中的络合物浓度, 其在波长 536 nm 处有明显的吸收特征峰。吸光度值越大说明溶液中 Cr(VI) 含量越多, 由图可知, 在 536 nm 处的主峰强度随辐照时间的增加而减小, 在反应进行 180 min 时, 吸光度降至最低, 说明 Cr(VI) 几乎完全被还原为 Cr(III)。

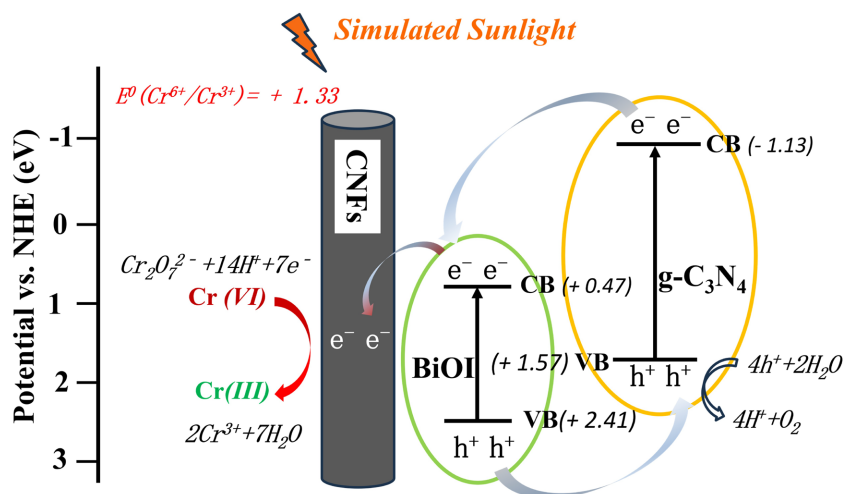


**Figure 4.** Variation of UV-vis absorption spectra for the photocatalytic reduction of Cr(VI) complex solution over the CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI

**图 4.** CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维光催化还原 Cr(VI) 络合物溶液的紫外 - 可见吸收光谱的变化

### 3.3. 光催化反应机理

对 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维在模拟太阳光照射下的光催化还原 Cr(VI)反应机理进行了推测,如图 5 所示。g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 CB 和 VB 值分别为 -1.13 eV 和 1.57 eV, BiOI 的 CB 和 VB 值分别为 0.47 eV 和 2.41 eV, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 CB 电位比 BiOI 的 CB 电位更负, 而 BiOI 的 VB 边缘比 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 VB 边缘更正。CNFs 的功函数高, 费米能级低, 电子更容易向该方向移动[15] [16] [17]。因此, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 的复合结构有利于光诱导电荷的界面转移, 从而延长了光诱导电子的使用寿命。在模拟太阳光照射下, 电子将被激发到 BiOI 和 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 CB 上, 将空穴留在相应的 VB 位置[18] [19] [20] [21]。对于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiOI 之间的传输机制, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>CB 中的电子转移至 BiOI 的 CB 上, 电子向功函数更高的 CNFs 转移, 在 CNFs 表面聚集大量电子, Cr(VI)在电子作用下被还原为无毒的 Cr(III)。



**Figure 5.** Schematic diagram of the photocatalytic reaction mechanism with CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI under simulated sunlight irradiation

**图 5.** CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 在模拟太阳光照射下的光催化反应机理示意图

## 4. 结论

综上所述, 本文成功制备的 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维与 CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 CNFs/BiOI 复合纤维相比, CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维在模拟太阳光照射下显著增强了有毒 Cr(VI)离子降解过程中的光催化活性。这归因于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiOI 之间的异质结界面的有效电荷转移和 CNFs 优异的导电能力。CNFs/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOI 复合纤维灵活的自支撑结构能最大限度地吸收太阳光进行光催化。该策略是一种很有前途的有效光催化处理重金属废水的工业生产工艺。

## 基金项目

本文由黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(项目批准号 UNPYSCT-2020126); 哈尔滨师范大学研究生创新项目(项目批准号 HSDSSCX2023-18); 黑龙江省大学生创新创业项目: Janus 型 ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@Ag 中空纤维的构筑; 国家自然科学基金(项目批准号 52102229)资助。

## 参考文献

- [1] Wang, Y., Su, H., Gu, Y., *et al.* (2017) Carcinogenicity of Chromium and Chemoprevention: A Brief Update. *Oncotargets and Therapy*, **10**, 4065-4079. <https://doi.org/10.2147/OTT.S139262>

- [2] Xie, Y., Lin, J., Liang, J., *et al.* (2019) Hypercrosslinked Mesoporous Poly(Ionic Liquid)s with High Density of Ion Pairs: Efficient Adsorbents for Cr(VI) Removal via Ion-Exchange. *Chemical Engineering Journal*, **378**, Article ID: 122107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122107>
- [3] He, P.Y., Zhang, Y.J., Chen, H., *et al.* (2020) Low-Cost and Facile Synthesis of Geopolymer-Zeolite Composite Membrane for Chromium(VI) Separation from Aqueous Solution. *Journal of Hazardous Materials*, **392**, Article ID: 122359. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122359>
- [4] Yu, G., Fu, F., Ye, C., *et al.* (2020) Behaviors and Fate of Adsorbed Cr(VI) during Fe(II)-Induced Transformation of Ferrihydrite-Humic Acid Co-Precipitates. *Journal of Hazardous Materials*, **392**, Article ID: 122272. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122272>
- [5] Yang, X., Liu, L., Zhang, M., *et al.* (2019) Improved Removal Capacity of Magnetite for Cr(VI) by Electrochemical Reduction. *Journal of Hazardous Materials*, **374**, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.008>
- [6] Wang, J., Tang, L., Zeng, G., *et al.* (2017) Plasmonic Bi Metal Deposition and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Coating on Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> Microspheres for Efficient Visible-Light Photocatalysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 1062-1072. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02351>
- [7] Ma, L., Fan, H., Fu, K., Lei, S., *et al.* (2017) Protonation of Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) for an Electrostatically Self-Assembling Carbon@ g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Core-Shell Nanostructure toward High Hydrogen Evolution. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **5**, 7093-7103. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01312>
- [8] Zhou, X., Shao, C., Li, X., *et al.* (2018) Three Dimensional Hierarchical Heterostructures of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanosheets/TiO<sub>2</sub> Nanofibers: Controllable Growth via Gas-Solid Reaction and Enhanced Photocatalytic Activity under Visible Light. *Journal of Hazardous Materials*, **344**, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.006>
- [9] Asadzadeh-Khaneghah, S. and Habibi-Yangjeh, A. (2020) g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Carbon Dot-Based Nanocomposites Serve as Efficacious Photocatalysts for Environmental Purification and Energy Generation: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **276**, Article ID: 124319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124319>
- [10] Akhundi, A., Badiel, A., Ziarani, G.M., *et al.* (2020) Graphitic Carbon Nitride-Based Photocatalysts: Toward Efficient Organic Transformation for Value-Added Chemicals Production. *Molecular Catalysis*, **488**, Article ID: 110902. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.110902>
- [11] Zhang, X., An, D., Feng, D., *et al.* (2019) *In Situ* Surfactant-Free Synthesis of Ultrathin BiOCl/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanosheets for Enhanced Visible-Light Photodegradation of Rhodamine B. *Applied Surface Science*, **476**, 706-715. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.147>
- [12] Shan, W., Hu, Y., Bai, Z., *et al.* (2016) *In Situ* Preparation of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bismuth-Based Oxide Nanocomposites with Enhanced Photocatalytic Activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, **188**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.01.058>
- [13] Liu, W., Qiao, L., Zhu, A., *et al.* (2017) Constructing 2D BiOCl/C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Layered Composite with Large Contact Surface for Visible-Light-Driven Photocatalytic Degradation. *Applied Surface Science*, **426**, 897-905. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.225>
- [14] 母静波. 电纺碳纳米纤维/金属氧化物复合材料的制备及在光催化和超级电容器方面的性质研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [15] Zarezadeh, S., Habibi-Yangjeh, A., Mousavi, M., *et al.* (2020) Synthesis of Novel p-n-p BiOBr/ZnO/BiOI Heterostructures and Their Efficient Photocatalytic Performances in Removals of Dye Pollutants under Visible Light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **389**, Article ID: 112247. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112247>
- [16] Yang, X., Chen, Z., Zhao, W., *et al.* (2021) Construction of Porous-Hydrangea BiOBr/BiOI n-n Heterojunction with Enhanced Photodegradation of Tetracycline Hydrochloride under Visible Light. *Journal of Alloys and Compounds*, **864**, Article ID: 158784. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158784>
- [17] Tang, G., Zhang, F., Huo, P., *et al.* (2019) Constructing Novel Visible-Light-Driven Ternary Photocatalyst of AgBr Nanoparticles Decorated 2D/2D Heterojunction of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr Nanosheets with Remarkably Enhanced Photocatalytic Activity for Water-Treatment. *Ceramics International*, **45**, 19197-19205. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.167>
- [18] Jing, H., Ou, R., Yu, H., *et al.* (2021) Engineering of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanoparticles/WO<sub>3</sub> Hollow Microspheres Photocatalyst with Z-Scheme Heterostructure for Boosting Tetracycline Hydrochloride Degradation. *Separation and Purification Technology*, **255**, Article ID: 117646. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117646>
- [19] Hao, Q., Huang, Y., Chen, D., *et al.* (2020) Accelerated Separation of Photogenerated Charge Carriers and Enhanced Photocatalytic Performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Nanoparticles. *Chinese Journal of Catalysis*, **41**, 249-258. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63450-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63450-9)

- 
- [20] Shi, Z., Zhang, Y., Shen, X., *et al.* (2020) Fabrication of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr Heterojunctions on Carbon Fibers as Weaveable Photocatalyst for Degrading Tetracycline Hydrochloride under Visible Light. *Chemical Engineering Journal*, **386**, Article ID: 124010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124010>
- [21] Jia, T., Wu, J., Song, J., *et al.* (2020) *In Situ* Self-Growing 3D Hierarchical BiOBr/BiOIO<sub>3</sub> Z-Scheme Heterojunction with Rich Oxygen Vacancies and Iodine Ions as Carriers Transfer Dual-Channels for Enhanced Photocatalytic Activity. *Chemical Engineering Journal*, **396**, Article ID: 125258. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125258>