

g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化材料的制备及性能研究

郭怡琳, 林双龙, 刘 磊, 周 娟, 次立杰, 周二鹏, 齐跃红*

石家庄学院化工学院, 石家庄市绿色装饰板材技术创新中心, 环境催化及清洁技术研究创新中心 河北石家庄

【摘要】选用水热法制备不同 g-C₃N₄ 修饰量的 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂, 借助扫描电子显微镜 (SEM) 对催化剂微观形貌进行表征; 以亚甲基蓝为模拟有机污染物, 在特定可见光光源条件下, 通过光催化降解实验测定催化剂的光催化活性, 并通过循环降解实验评价催化剂稳定性。由实验结果可知: g-C₃N₄ 是片状的, 可均匀的修饰在小颗粒状的 BiVO₄ 表面; 光催化活性测试表明, 当 g-C₃N₄ 修饰量为 20 % 时, 催化剂对亚甲基蓝的降解效果最好, 降解率可达 82 %。自由基淬灭实验证实, 光生空穴在光催化降解亚甲基蓝的过程中发挥主导作用。5 次循环降解实验后, g-C₃N₄/BiVO₄ 对亚甲基蓝降解率仍保持 36.01 %, 除去实验测量误差与催化剂流失因素, 证明该复合催化剂具备良好的循环稳定性。本研究制备的 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合材料在有机废水处理领域具备良好应用潜力, 可为有机污染物的光催化降解研究提供实验依据与理论参考。

【关键词】g-C₃N₄/BiVO₄; 水热法; 复合光催化剂; 亚甲基蓝

【基金项目】河北省高等学校科学研究项目 (ZC2025049)

【收稿日期】2026 年 5 月 6 日

【出刊日期】2026 年 6 月 8 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20260001

Preparation and performance study of g-C₃N₄/BiVO₄ composite photocatalytic materials

Yilin Guo, Shuanglong Lin, Lei Liu, Juan Zhou, Lijie Ci, Erpeng Zhou, Yuehong Qi*

School of Chemical Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang Green Decorative Board Technology Innovation Center, Environmental Catalysis and Clean Technology Research and Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】g-C₃N₄/BiVO₄ composite photocatalysts with different g-C₃N₄ modification amounts were prepared via hydrothermal method. The micromorphology of the as-prepared samples was characterized by scanning electron microscope (SEM). Taking methylene blue as the target pollutant, the composites were tested for photocatalytic performance under visible light. The reaction mechanism was investigated by radical quenching experiments, and catalyst stability was assessed via cyclic tests. Characterization shows that sheet-like g-C₃N₄ is uniformly dispersed on granular BiVO₄ surface. The 20% g-C₃N₄-modified g-C₃N₄/BiVO₄ composite achieves the highest methylene blue degradation efficiency of 82%. Free radical quenching experiments verify that photogenerated holes (h⁺) play a dominant role in the photocatalytic degradation process of methylene blue. After 5 cycles of degradation experiments, the degradation rate of methylene blue by the catalyst still remains 36.01%. Excluding experimental measurement errors and catalyst loss, it proves that the composite photocatalyst has favorable cycling stability. The prepared g-C₃N₄/BiVO₄ composite exhibits good application potential in organic wastewater treatment, and provides experimental and theoretical references for photocatalytic degradation of organic pollutants.

【Keywords】g-C₃N₄/BiVO₄; Hydrothermal method; Composite photocatalyst; Methylene blue

1 引言

随着社会经济的迅速发展, 能源稀缺的危机和过度开采资源的现象也越来越多, 对环境造成的压力越来越大。因此, 当今社会要开发新的能源和资源, 研发新的技术, 从而来解决社会的环境污染和能源稀缺等

问题。所以迫切要把太阳能转换成所能使用的化学能, 其中转化过程中利用光催化氧化技术, 来达到治理环境污染的目的, 是目前国际上研究的热点。

近年来, 随着光催化技术的不断发展, 越来越多的人开始关注海洋生物的光解水制氢、污染物的降解以

*通讯作者: 齐跃红

及二氧化碳的还原这方面的研究。日本的东京大学于1972年第一次选用二氧化钛作半导体电极,在光条件下对海洋生物氢进行降解,除水分解以外,还可用于降解有机染料、重金属离子还原、污水净化等领域^[1,2]。但实际运用中存在着太阳能利用率低下等缺点,使其在实际中得不到推广。近年来,随着各种半导体材料的不断发展,其作用机制也逐渐被人们所了解,由于其能够处理各种污染物,因此在环境污染防治中显示出了巨大的发展潜力^[3]。二氧化钛是一种非常典型的半导体光催化材料,它的氧化性强,性质稳定,可以用于解决各种环境问题。但是,二氧化钛这种典型光催化材料,在光催化领域中的应用受限于二氧化钛的使用等多方面条件。因此,研制新的可见光催化剂已成为刻不容缓的研究热点。

近几年,光催化材料的开发与应用逐渐深入,人们也发现了目前所存在的一些缺陷和问题,例如:电子-空穴复合过程中的合成速率很高、大多数的催化剂只有接触到了紫外线的照射才能发生反应,这些都极大地制约了其在实际应用中的发展。因此,科学家们试图通过各种方式来改进催化剂,从而将其转化为更有效的催化剂^[4]。

g-C₃N₄具有优良的热稳定性、化学稳定性、适当的禁带宽度(2.7 eV)和负导带能级(-1.3 V)。王等^[7]在2009年发现了g-C₃N₄可以作为光催化产生氢气的方法,近年来,g-C₃N₄在催化方面得到了广泛的应用。之后还有关于g-C₃N₄用于CO₂的光催化还原的报导^[8]。制备g-C₃N₄是一种很容易得到的方法。其中,硫脲、二氰胺、三聚氰胺、三聚氰胺等,是目前应用最广泛的一种方法。由于受到晶界效应等因素的影响,g-C₃N₄的催化效率很低。g-C₃N₄的层状结构与石墨相似,可以用热刻蚀和酸碱工艺将g-C₃N₄分离成二维纳米薄片。在二维纳米材料中,载体可以迅速地向催化剂上迁移,使其具有良好的催化性能,并能有效地抑制载体的合成,提高催化效率。此外,已有报导将其与NaNbO₃、Ag₃PO₄等半导体材料进行复合,以改善其催化效能。

g-C₃N₄的制备关键有硬模板法、超低温固相法、有机溶剂热法、高温缩聚法等。现阶段使用最普遍的办法是高温缩聚,即热聚合,它是由单氰胺、双氰胺、三聚氰胺等有机前驱物直接加热而得到的。

g-C₃N₄对可见光的反应范围很窄(约460 nm),光生电子-空穴对复合反应速度较慢,从而限制了g-C₃N₄的广泛使用。为了改善其光催化性能,国内外学者开展了大量的工作,如复合改性、掺杂改性、微结构

调节等。复合修饰能有效地抑制e⁻-h⁺的复合,使电子和空穴得到更充分的利用,从而使其具有良好的氧化性能;通过改变碳的电子结构来进行掺杂修饰;微细结构的调节可以增加反应部位的数量。其中,物理化学复合改性的作用机制比较明显,对催化性能的提高也比较明显^[9]。

此外,近年来,利用C₃N₄型半导体材料,逐步建立能级匹配的C₃N₄型复合光触媒,可以有效地促进光生电子的分离,从而提高光量子效率。将g-C₃N₄与复合氧化物反应形成了以g-C₃N₄为基础的非均质结光催化剂。此外,通过混合,可以赋予催化剂某些性质,例如磁性,从而可以实现催化剂的回收。

Tian和Ge^[10]根据水热法、研磨煅烧法等方式制备出C₃N₄-Bi₂WO₆。电子能级配对的复合原材料有着较好的结构特征和光谱仪特点,复合后的异质结界面能合理造成自由电子分离出来高效率,进而推动C₃N₄-Bi₂WO₆的催化特性。在该催化剂中,最优的催化剂为0.5C₃N₄-0.5Bi₂WO₆。结果表明,在可见光降低条件下,脱甲基橙的作用比单纯C₃N₄、Bi₂WO₆高出3倍、155倍^[10]。在可见光区,C₃N₄-Bi₂WO₆的吸收带出现了较大的红移,显示出具有较稳定的吸收能力,而不具有发散能力。

桂等采用有机溶剂热法制取了g-C₃N₄-BiOI复合原材料,通过实验数据得出复合催化剂对MO、MB、RhB的降解性能数值上高于纯BiOI的降解性能^[11]。结果表明,g-C₃N₄-BiOI的生成具备较高的空穴分离高效率,使其催化氧化性能较好。由此可以得出,与单体相比,复合后的光催化性能得到了显著的改善。

通过研究,发现BiVO₄是一种不易分解或与能其他物质发生化学反应的n类半导体材料,具有无毒、无污染等优点。BiVO₄有很多种不同的结构和形态类型^[12],其中BiVO₄的禁带宽度较窄,太阳的光谱中心也较窄,二者十分接近。也正是因为BiVO₄的禁带宽度接近太阳中心光谱,导致了BiVO₄能吸收包括很多种可见光,是一种对可见光有较好的光催化材料^[13]。目前,已能熟练生产出具有良好形态和稳定活性的BiVO₄^[14]。

传统合成钒酸铋的工艺有:高温固相法、沉淀法、溶胶-凝胶法、水热法等,这些方法在制作工艺上各方面条件要求各不相同,所以每种工艺各有利弊,导致所制成的钒酸铋光催化活性并不是很稳定。

一些学者对生物活性物质在BiVO₄的合成中的影响进行了探讨,其中最重要的一点是其生成形态各异

的 BiVO₄, 从而导致其光催化特性发生变化。杨等^[15]通过加入十二烷基磺酸钠作为表面活性剂, 通过调节水-热反应的温度, 可以获得不同形态的 BiVO₄。加入十二烷基磺酸钠后得到的 BiVO₄ 为不同形态的大块试样, 加入后得到的 BiVO₄ 是规则的多面体试样。此外, 该多面体 BiVO₄ 样品结晶成熟, 并以 355 μmol/h 的速率生成氧气。

目前, 高晓明等人使用的水热法处理 Ag-BiVO₄ 的吸收边带出现了显著的红移^[16], 扩大了它的吸光区, 并且在掺杂前后 BiVO₄ 晶体相未发生变化, 对含酚废水的脱除率超过 93%。Xu Lei 等通过一步溶剂热法制备 Ag/GR/BiVO₄, 发现 Ag/GR/BiVO₄ 的掺杂浓度为 3%, GR/BiVO₄ 的掺杂浓度为 5% 时, Ag/GR/BiVO₄ 对 RhB 的降解作用比 Ag/BiVO₄、GR/BiVO₄、BiVO₄ 的降解性能更好。H. Golmohjedeh 等^[17]通过化学沉淀法合成 La-BiVO₄, 当 La/Bi 的原子比为 0.05, La-BiVO₄ 对 2, 4, 6-三氯苯酚的光催化作用最佳, 而 La 的掺杂较高 (La/Bi=0.10) 会降低光催化能力。

在 BiVO₄ 的光催化改性研究中, Xu Hui 等人实验中使用了 Fe 和 Cu 这两种过渡金属来进行光催化作用, 得出晶体中掺杂金属离子可以改善 BiVO₄ 的降解性能。谢倩等人通过水热法和 BiVO₄ 复合法制备了一种新的钒酸铋。结果表明: BiVO₄ 与氧化石墨烯的界面上的电子传递速度较快, 而电子-空穴对复合速度的影响较小, BiVO₄ 这种光催化材料的催化性能得到了改善和提高^[18]。因此, 将 BiVO₄ 与半导体进行复合, 可以改善催化性能, 提高催化效率^[19]。

在深入了解 g-C₃N₄、BiVO₄ 的基础上, 本文对 g-C₃N₄/BiVO₄ 的合成及其活性进行了探讨。本文采用一种简便的方法在 BiVO₄ 上修饰了 g-C₃N₄, 这两种方法可以实现光生电子和空穴的双向迁移, 从而提高了光催化活性, 并通过改变 g-C₃N₄ 的修饰量来调节催化剂的表面活性。这一发现对扩大光敏反应、改善其光催化性能有一定的参考价值, 是一个值得进一步研究的课题。

本论文的主要工作包括: 首先制备出 g-C₃N₄, 然后在 BiVO₄ 的水热合成法中加入适量的 g-C₃N₄, 得到 g-C₃N₄/BiVO₄。采用 SEM 对其微观形态及颗粒大小进行了研究; 通过实验来降解亚甲基蓝溶液, 探究光催化性能; 通过增加或减少 g-C₃N₄/BiVO₄ 中 g-C₃N₄ 的含量, 开展几组平行的降解实验来确定 g-C₃N₄/BiVO₄ 中 g-C₃N₄ 的最佳修饰量; 选用不同的催化剂进行了控制变量光照和降解本体的对照实验, 进一步证实了 g-

C₃N₄/BiVO₄ 的光催化降解特性; 用 g-C₃N₄/BiVO₄ 进行了循环试验, 考察了催化剂的降解性能的稳定性。开展淬灭实验来寻找复合光催化剂在降解过程中起作用的主要活性物质。

2 实验部分

2.1 催化剂的制备

g-C₃N₄ 的制备是将约 9 g 的三聚氰胺粉末放在 90 mL 的氧化铝坩埚中, 然后将其放在马弗炉中, 加热速度为 2 °C/min, 使其加热到 550 °C, 并在该温度下维持 4 h。然后将马弗炉自然降至室温, 将试样取出并进行研磨, 获得 g-C₃N₄ 淡黄色粉末。

将 0.01 mol 的 Bi(NO₃)₃·5H₂O 溶于适当的稀 HNO₃ 中, 再将 0.01 mol NH₄VO₃ 溶于适量的氨水中, 使两者充分溶解, 在磁力搅拌下混合, 再将 g-C₃N₄ 粉末按照复合比例加入一定数量的 g-C₃N₄ 粉末, 搅拌并移 80 mL 该溶液于聚四氟乙烯衬里, 在 140 °C 下进行 10 h 的反应, 在室温下冷却, 用蒸馏水和乙醇进行 3 次洗涤沉淀, 最终在 80 °C 烘箱下干燥, 获得 g-C₃N₄/BiVO₄ 粉体。

2.2 活性测试

(1) 量取 100 mL 的 10 mg/L 的亚甲基蓝溶液加入到干净烧杯中, 并取出 3 mL 液体到离心管中做空白在无光条件下磁力搅拌 30 min 以达到吸附-解吸平衡, 后放入 0.1 g 的 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂样品, 放到磁力搅拌器上进行搅拌 (30 min), 在小箱中模拟进行暗反应, 同样在反应结束后取 3 mL 的液体到离心管做对照; 上述反应完毕后安装卤钨灯, 继续进行搅拌, 且每隔 15 分钟取 3 mL 的上层清液, 共进行 2 小时, 取样结束后, 对 10 个样品进行高速离心操作, 使沉淀更好的分离出来, 测定吸光度, 从而计算其降解率。

(2) 称量按比例配置的复合物, 就是以 g-C₃N₄ 为主体, 各自按 10%、15%、20%、25%、30% 的比例混和 BiVO₄, 获得最后的复合物。取 5 份 100 mL 0.01 g/L 的亚甲基蓝溶液和不一样比例 (10%、15%、20%、25%、30%) 的化学物质, 暗反应 30 min 后取第一份样品。开启灯源, 在 300 W 卤钨灯 30 cm 的光照距离 (光照强度约为 100-150 W/cm²), 滤光片条件为紫外截止滤光片: λ ≥ 420 nm 直射下开展催化降解。

(3) 反应 2 h, 每隔 15 min 取一次样。离心式分离后, 取所得的样品的上清液, 精确测量其吸光度。记录数据信息制作吸光度曲线图, 得到 g-C₃N₄ 负载量为 20% 时降解率最高。

3 结果与讨论

3.1 光催化剂的结构和形貌

图 3.1 所示为样品的形貌特征。由图 3.1(a)可知, g-C₃N₄ 光催化剂为片层叠加形成的块状结构; 由从图 3.1(b)可以看出 BiVO₄ 是一种小颗粒形状, 其中一些颗粒呈聚集状态。随着片状 BiVO₄ 的表面尺寸增大,

其表面的活性越高, 其表面越大, 其表面的形态越有利于光催化的作用。图 3.1(c)和 3.1(d)显示了 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂的 SEM 图, 发现在复合光催化剂中 BiVO₄ 的形态仍呈颗粒状, 而 g-C₃N₄ 在超声波作用下通过超声波将 g-C₃N₄ 分解为一个或多个重叠的结构, 在复合后将其附着于片状 BiVO₄ 的表面。

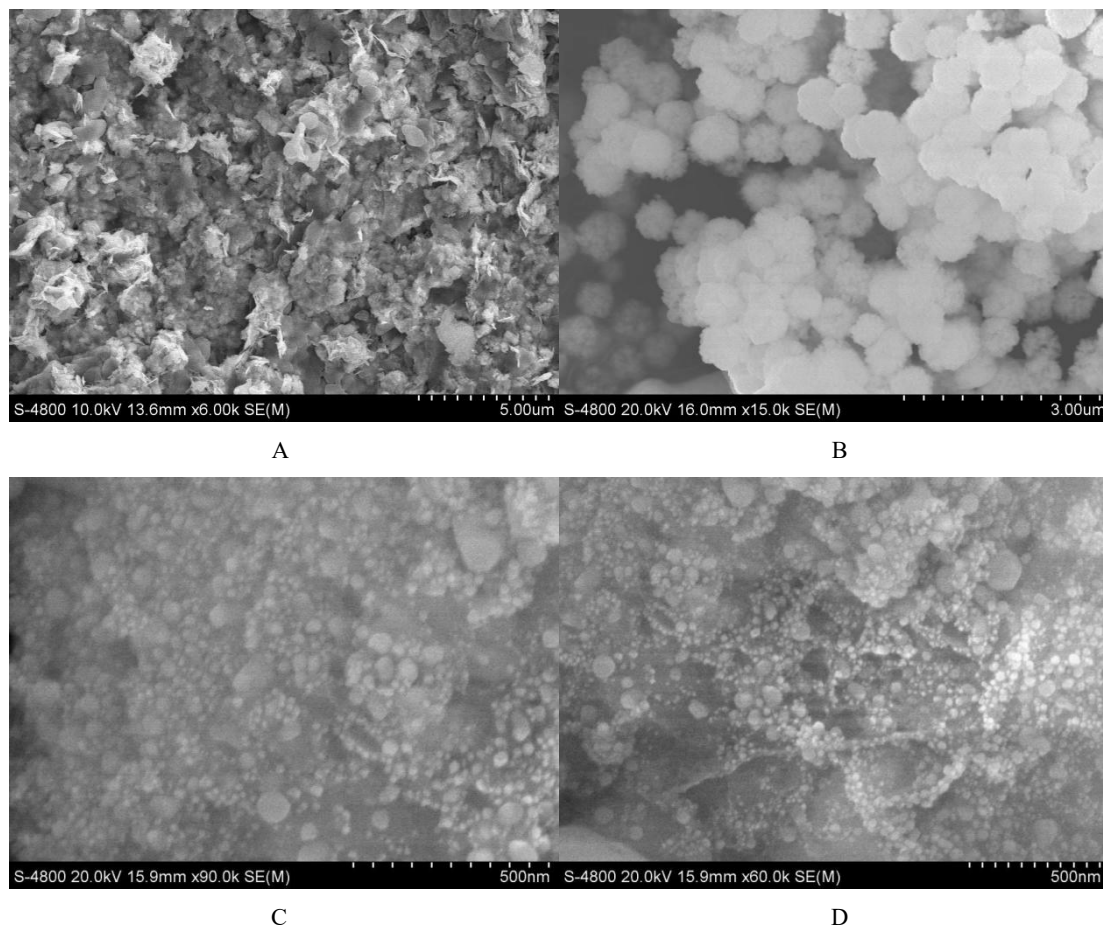


图 3.1 (a) 和 (b) g-C₃N₄ 和 BiVO₄ 的 SEM 图; (c) 和 (d) g-C₃N₄/BiVO₄ 的 SEM 图

3.2 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂的光催化性能

为了研究 g-C₃N₄/BiVO₄ 中 BiVO₄ 的最佳修饰量是多少, 如图 3.2 所示为 g-C₃N₄/BiVO₄ 中不同 g-C₃N₄ 修饰量的降解率图。g-C₃N₄/BiVO₄ 中 g-C₃N₄ 的修饰量分别是 10 %、15 %、20 %、25 %和 30 %。由图 3.2 可以看到不同 g-C₃N₄ 修饰量的 g-C₃N₄/BiVO₄ 对 MB 的降解率分别为 45 %、68 %、82 %、74 %和 54 %。研究发现, g-C₃N₄/BiVO₄ 的光催化降解效率随 g-C₃N₄ 修饰量的增加而持续上升, 这主要是因为 g-C₃N₄ 对光生电子-空穴的有效分离, 而在修饰量大于 20 %时, 其降解率下降, 这主要是由于 g-C₃N₄/BiVO₄ 中 g-C₃N₄ 含量的增大, 导致 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合催化剂表面形貌不均匀, 光生电

子和空穴复合率升高, 导致催化剂活性下降。研究发现, 当 g-C₃N₄ 浓度为 20 %时, 对 MB 的光催化降解。

如图 3.3 所示, 在不同的光催化条件下, 亚甲基蓝的光催化降解过程是比较在有光 and 没有光的情况下, 用 g-C₃N₄/BiVO₄ 的光催化降解速度曲线可以得出这样的结论, 只有在光照的情况下, 光催化降解反应可以得到较好的催化效果。另外, 再通过比较在有光条件下 g-C₃N₄、BiVO₄、g-C₃N₄/BiVO₄ 的降解亚甲基蓝溶液速率的对照曲线, 发现像 g-C₃N₄、BiVO₄ 这两种单体的降解效率非常低, 尤其是 g-C₃N₄, 但当与 BiVO₄ 复合后, 降解效率得到了明显升高, 由图可得, 复合光催化剂的在可见光条件下的催化效率明显高于单体催化剂。

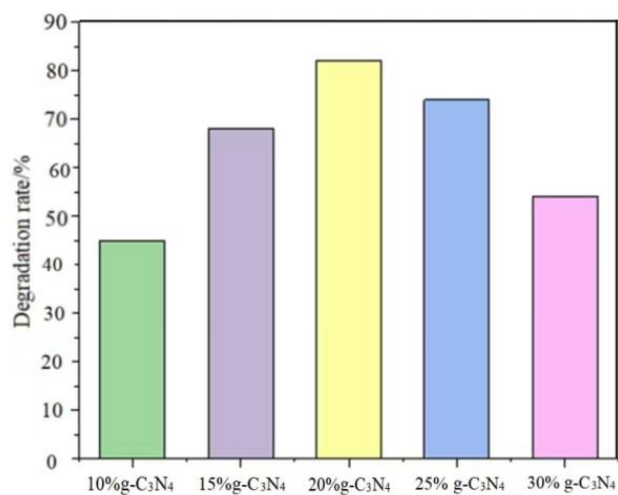
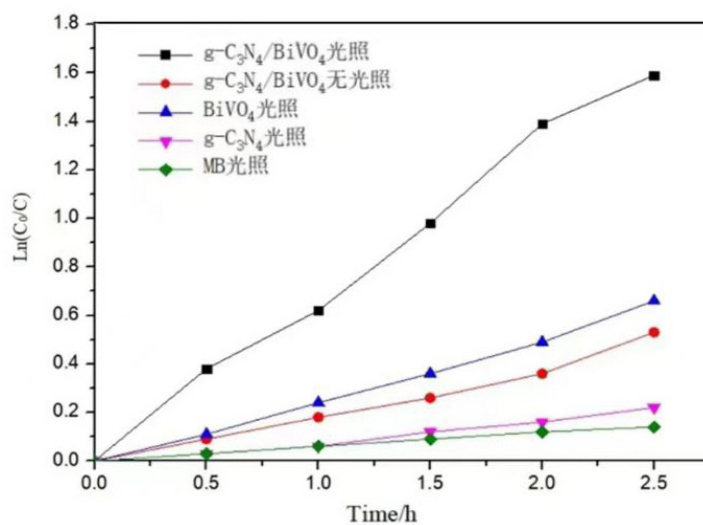
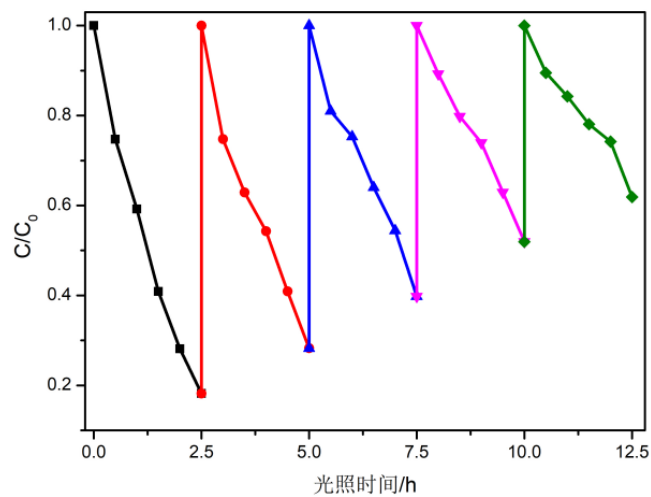
图 3.2 不同 g-C₃N₄ 修饰量的催化剂降解率图

图 3.3 不同条件下光催化降解亚甲基蓝溶液的对照实验

图 3.4 g-C₃N₄/BiVO₄ 在可见光下降解 MB 的循环实验

通过光催化循环降解 g-C₃N₄/BiVO₄, 研究其光催化稳定性。第一次光催化 g-C₃N₄/BiVO₄ 反应试验结束后, 将反应剩余的光催化剂进行收集并净化, 然后进行第二次、第三次、第四次、第五次光催化试验。如图 3.4 所示, g-C₃N₄/BiVO₄ 对亚甲基蓝进行降解, 循环 5 次, 其降解率为: 57.37 %、50.69 %、44.72 %、38.41 %、36.01 %。每次再收集之后, g-C₃N₄/BiVO₄

的降解作用会降低。这是因为, 在每个周期中, g-C₃N₄/BiVO₄ 都有损失, 不能完全回收, 从而降低了 g-C₃N₄/BiVO₄ 的降解能力。同时, 在反复的反复试验中, 光催化降解过程中, 蓝色物质会被 g-C₃N₄/BiVO₄ 所吸收, 不能彻底清除, 并且会影响到下次的光催化降解。通过对试验结果的分析, 发现 g-C₃N₄/BiVO₄ 在降解过程中的稳定性较好。

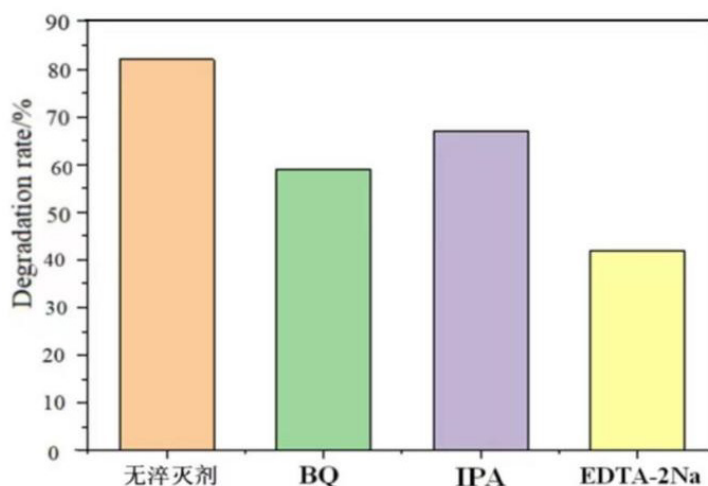


图 3.5 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合物在可见光下降解 MB 的淬灭实验

采用不同活性物质的捕获剂, 测定不同活性物质对光催化降解的影响。依据参考文献, EDTA-2Na 是空穴 (h⁺) 淬灭剂, IPA 是羟基自由基淬灭剂, BQ 是氧自由基淬灭剂。为了更好地明确, 平行开展四组实验, 添加不一样的收集剂进行淬灭实验。实验结果如图 3.5 所显示。不用淬灭剂时, 催化剂的降解率为 82 %, 加入 BQ 后为 57.04 %, 加入异丙醇后为 66.24 %, 加入乙二胺四乙酸二钠后为 43.08 %。由此可见, 空穴 (h⁺) 在复合型光催化剂降解亚甲基蓝中起关键作用。羟基自由基 (·OH) 和超氧自由基 (·O₂⁻) 也减慢了复合型光催化剂的降解速度, 因而在催化反应降解全过程中也发挥了一定的作用。

4 结论

综上所述, 本研究成功合成了 g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂, 并进行了亚甲基蓝在可见光条件下的降解试验, 分别在 10 %、15 %、20 %、25 % 和 30 % 的 g-C₃N₄ 条件下, 试验结果表明, 在 20 % 的 g-C₃N₄ 负载量下, 光催化的效果最佳, 在反应 120 min 时降解率为 57.37%, 延长至 180 min 最高可达 82%, 其降解效率要高于 g-C₃N₄ 和 BiVO₄。结果表明: g-C₃N₄ 与 BiVO₄ 复合后, 其光吸收明显增加, 从而抑制了电子空穴的合成, 从而使其降解能力得到了提高。通过 5 次循环试

验的开展, 证实了该材料的稳定性, 经过 5 次循环试验之后, 亚甲基蓝的降解率仍然达到 36.61 %, 表明该化合物在催化过程中表现出了良好的稳定性, 具有很高的应用价值。以上分析结果表明: g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂的催化活性高、稳定性好, 在废水降解领域的方向有较大发展空间。

参考文献

- [1] 蔡伟民, 龙明策. 环境光催化材料与光催化净化技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [2] CHENG H, HUANG B, QIN X, et al. A controlled anion exchange strategy to synthesize Bi₂S₃ nanocrystals/ BiOCl hybrid architectures with efficient visible light photoactivity[J]. Chemical Communications. 2012, 48(1): 97-99.
- [3] CAO J, XU B, LIN H, et al. Chemical etching preparation of BiOCl/BiOBr heterostructures with enhanced photocatalytic properties for organic dye removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 185: 91-99.
- [4] HOFFMANN M R, MARTIN S T, CHOI W Y, et al. Environmental applications of semiconductor photocatalysis[J]. Chemical Reviews, 1995, 95: 69-96.

- [5] 龙明策,蔡俊,蔡伟民等.设计新型可见光响应的半导体光催化剂[J].化学进展,2006,18(9):1065-1075.
- [6] TONG H, Bi Y P, et al. Nano-photocatalytic materials: possibilities and challenges[J].Advanced Materials, 2012, 24(2): 229-251.
- [7] 楚增勇,原博,颜廷楠.G-C₃N₄ 光催化性能的研究进展[J].无机材料学报,2014,29(8):785-794.
- [8] 桂明生,王鹏飞,袁东,等.Bi₂WO₆/g-C₃N₄ 复合型催化剂的制备及其可见光光催化性能[J].无机化学学报.2013, 29(10):2057-2064.
- [9] DIJ, XIA J,YIN S,et al. Preparation of sphere-like g-C₃N₄/BiOI photocatalysts via a reactable ionic liquid for visible-light-driven photocatalytic degradation of pollutants[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(15): 5340-5351.
- [10] CHANG C, ZHU L, WANG S, et al. Novel mesoporous graphite carbon nitride/BiOI heterojunction for enhancing photocatalytic performance under visible-light irradiation[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6(7): 5083-5093.
- [11] 于会满,李阁.钒酸铋系光催化材料专利发展概述[J].数码设计(下)2018,(8):159-160.
- [12] 吴春红,黄应平,赵萍,周薇等.钒酸铋催化剂的制备与其光催化性能研究进展[J].应用化工,2015,44(11):2100-2106.
- [13] 王伟华,叶红齐,覃涛,等.含铋光催化材料的研究进展[J].化工进展,2014,33(6):1475-1485.
- [14] 蒋海燕,戴洪兴,孟雪,等.单斜 BiVO₄ 可见光催化降解甲基橙的形貌效应[J].催化学报, 2011,32(6).
- [15] 高晓明,付峰吕磊,等.掺杂型光催化剂 Ag-BiVO₄ 的制备及其光催化降解含酚废水的研究[J].精细石油化工,2012,1:30-34.
- [16] HUI XU, HUA MING Li, et al. Preparation, characterization and photocatalytic activity of transition metal-loaded BiVO₄[J]. Materials Science and Engineering: B, 2008, 147(1):52-56.
- [17] 谢倩,邓爱霞,滕谋勇,等.BiVO₄/GO 复合光催化剂的制备及光催化性能研究[J].青岛科技大学学报:自然科学版,2013,34(4):347-351.
- [18] 张琴,张凤丽,段芳.g-C₃N₄/BiVO₄ 复合光催化剂的制备与光催化性能研究[J].应用化工,2015,44(6):1000-1003.
- [19] 段芳,张琴,魏取福,等.铋系半导体光催化剂的光催化性能调控[J].化学进展,2013,26(01):30-40.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS