

## BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的制备及其光催化性能的研究

齐跃红, 马茜, 常宗崇, 马晓雨, 林双龙\*

石家庄市低碳能源材料重点实验室, 化工学院, 石家庄学院 河北石家庄

**【摘要】**本文采用简单的实验方法制备了 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷复合光催化剂;通过 XRD、SEM、紫外-可见漫反射等对其物质组成和结构形貌等进行表征测试, XRD 表征显示, BiVO<sub>4</sub>在 2θ 为 18°、28°、30°、50°处出现特征峰(对应晶面 101、112、004、220), 与标准卡片 PDF#83-1697 吻合; g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>在 2θ 为 13°、27°处出现典型特征峰, BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合物同时呈现两者特征峰, 证明复合成功; SEM 观察到 BiVO<sub>4</sub>为片状与不规则棒状结构, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>为不规则片状, 复合后 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>分散性提升, 形成不规则棒状结构, 表征结果均与预期效果一致; 将 BiVO<sub>4</sub>对 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>进行修饰, 制备不同比例的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合物, 并在可见光照射下降解一定浓度的 MB 溶液以探究其最佳修饰量, 结果表明 10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的降解效率最佳, 降解效率为 89.55%; 另外, 通过对四环素的降解实验证明 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>具有广泛的催化性能; 然后将 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>负载到多孔功能陶瓷的表面并探究最佳负载量, 最佳负载量为 15%, 降解效率为 67.31%; 最后结合各类表征和测试结果对复合光催化剂在降解过程中的电荷转移机制进行了初步探索。

**【关键词】**BiVO<sub>4</sub>; g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; 多孔功能陶瓷; 光催化; 降解

**【基金项目】**河北省高等学校科学研究项目(ZC2025049); 2025 年大学生创新创业训练计划项目(2SCXM0021)

**【收稿日期】**2026 年 1 月 2 日 **【出刊日期】**2026 年 5 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ncrm.20260001

### Preparation of BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-porous functional ceramics and their photocatalytic properties

Yuehong Qi, Qian Ma, Zongchong Chang, Xiaoyu Ma, Shuanglong Lin\*

Shijiazhuang Key Laboratory of Low Carbon Energy Materials, College of Chemical Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei

**【Abstract】** The BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/porous functional ceramic composite photocatalyst was prepared via a simple experimental method. Its chemical composition, structure and morphology were characterized by XRD, SEM and UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy. XRD characterization shows that BiVO<sub>4</sub> exhibits characteristic peaks at 18°, 28°, 30° and 50°(2θ), corresponding to the crystal planes (101), (112), (004) and (220), which match well with the standard card PDF#83-1697. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> presents typical characteristic peaks at 13° and 27°(2θ). The BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite shows characteristic peaks of both components, which proves successful compounding. SEM observations reveal that BiVO<sub>4</sub> has sheet and irregular rod-like structures, while g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> has an irregular sheet structure. After compounding, the dispersibility of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is improved, forming irregular rod-like structures, and all characterization results are consistent with the expected effects. BiVO<sub>4</sub> was used to modify g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for preparing BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites with different mass ratios. The optimal modification amount was investigated by degrading a certain concentration of MB solution under visible light irradiation. Results show that the 10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite achieves the highest degradation efficiency of 89.55%. In addition, the tetracycline degradation experiment proves that BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> has broad catalytic performance. Then, BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> was loaded onto the surface of porous functional ceramic to explore the optimal loading amount. The optimal loading amount is 15%, with a degradation efficiency of 67.31%. Finally, the charge transfer mechanism of the composite photocatalyst during degradation was

\*通讯作者: 林双龙

preliminarily explored based on various characterization and test results.

**【Keywords】** BiVO<sub>4</sub>; g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; Porous functional ceramics; Photocatalysis; Degradation

## 1 引言

社会经济发展的同时不可避免地对环境造成了伤害, 尤其是对水资源的污染, 已经到了亟待解决的地步。水污染包括各种农药废水、抗生素废水、化工生产过程中的废弃污水、工业试剂废水等等。随着科学技术的发展, 对水体污染的降解主要有以下几种方法: 生物法、物理法、Fenton 氧化技术、半导体光催化技术<sup>[1]</sup>。而半导体光催化材料可利用光能, 从而被激发产生光生电子-空穴对, 通过反应分解污染物, 应用前景广泛, 且对环境友好, 能耗低。类石墨相氮化碳 (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 具有对可见光响应高, 无毒无害且制作成本低等特点, 作为一种新型环保材料受到广泛关注。

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的禁带宽度在 2.7~2.8eV, 极大限制了材料的活性, 另外, 活性位点的数量、能带结构、电子-空穴对的复合率等等都会影响 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的光催化性能。因此, 提高 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光催化性能的途径主要也是从这几个方面入手<sup>[2]</sup>。形貌调控, 形貌的改变直接地改变了材料的表面积, 表面积变大, 活性位点自然也就更多, 材料的光催化活性自然更高。将不同的金属离子或非金属离子掺杂到半导体表面, 可以使电子-空穴对更好地分离, 从而提高材料的光响应能力以提高其光催化性能<sup>[3]</sup>。构建异质结可以改变材料的能带结构, 从而使其性能增强。g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 可以与贵金属构成肖特基异质结, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 是 p 型半导体, 也可以与部分 n 型半导体形成 p-n 结, 提高电子-空穴对的分离<sup>[4]</sup>。

本实验用钒酸铋 (BiVO<sub>4</sub>) 修饰 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 以提高光催化性能。钒酸铋无毒无害, 环境友好, 光催化活性比较稳定, 禁带宽度约为 2.4eV, 对可见光的吸收力强, 光催化性能显著, 是一种理想的半导体光催化材料<sup>[5]</sup>。现阶段钒酸铋 (BiVO<sub>4</sub>) 的制备方法主要有沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法等等。其中化学沉淀法制备工艺简单, 易于合成, 制备成本低, 但是粉体颗粒不均匀, 容易团聚, 效果不是很理想, 还需要更加深入的探究; 溶胶-凝胶法制备工艺复杂, 反应时间长, 制备成本比较高, 很难大规模应用; 水热法制备出的样品分散性好, 结晶性好, 纯度也比较高, 无需焙烧处理, 操作简便<sup>[6]</sup>。

但实际上, 催化剂在使用过程中, 有许多因素会影响其稳定性, 解决这种问题可以使用具有磁性的材料与其进行复合, 或者将其负载到其它比较稳定的材料表面, 比如成膜负载到平整材料的表面等。陶瓷产品化学性质稳定、耐高温、耐磨、不易腐蚀, 是一种理想的负载材料<sup>[7]</sup>。He 等人利用溶胶凝胶法将 TiO<sub>2</sub> 负载到 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 多孔陶瓷的表面, 使得材料易于回收利用, 相比于粉体, 负载到陶瓷表面的催化剂到降解后期仍具有较高的活性<sup>[8]</sup>。因此本实验将 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载到多孔功能陶瓷的表面。多孔功能陶瓷的制备方法主要有有机泡沫浸渍法、凝胶发泡法、造孔剂法等等。作为光催化材料的负载, 对多孔功能陶瓷的要求就是具有较多的孔洞结构, 有机泡沫浸渍法步骤简洁、制作成本低、孔隙率高、样品比表面积大, 较为理想。

将有机泡沫进行预处理, 去除表面吸附的杂质, 使其亲水性得到增强, 这样才能使浆料均匀地包裹泡沫。然后将其浸泡在一定比例的浆料里, 使其充分吸收陶瓷浆料, 控制好浸入到有机泡沫中陶瓷浆料的数量, 而后进行低温烘干, 使其定型, 最后高温烧结, 高温烧结的同时具有三维网状结构的泡沫会受热挥发, 在原来泡沫的位置留下孔洞, 形成多孔功能陶瓷<sup>[9]</sup>。

本文采用简单的实验方法制备 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷复合光催化剂; 通过 XRD、SEM、紫外-可见漫反射等对其物质组成和结构形貌等进行表征测试; 将 BiVO<sub>4</sub> 修饰到 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 表面, 制备不同比例的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合物, 并在可见光照射下降解一定浓度的亚甲基蓝 (MB) 溶液以探究其最佳修饰量; 另外, 通过对四环素的降解实验证明 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 具有广泛的催化性能; 然后将 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载到多孔功能陶瓷的表面并探究最佳负载量; 通过 5 次循环实验证明经过陶瓷负载后的稳定性明显大于未经过陶瓷负载的稳定性; 通过淬灭实验探究复合光催化剂在降解过程中的主要活性物种; 最后结合各类表征和测试结果对复合光催化剂在降解过程中的电荷转移机制进行了初步探索。该课题的研究对我国矿产资源充分开发利用以及解决能源、环境问题具有重要意义, 值得我们深

入研究。

## 2 研究内容

### 2.1 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的制备、表征与性能检测

#### 2.1.1 材料的制备

(1) BiVO<sub>4</sub>的制备: 称取 9.75g Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 和 2.35 g NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub>, 分别加入 20ml 蒸馏水, 搅拌溶解; 称取 1.6g NaOH 放入烧杯中, 加入 40ml 蒸馏水将其溶解, 待其冷却后加入到 NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> 溶液中, 等待 NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> 溶液变澄清透明后将溶液缓慢加入到 Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 溶液中, 并继续搅拌 30min。搅拌完成之后将其放入反应釜进行反应, 反应条件为 160°C、4h。待其反应结束后, 将溶液洗涤干燥后得到 BiVO<sub>4</sub> 样品。

(2) g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的制备: 将一定量三聚氰胺粉末放在坩埚中, 在马弗炉中逐渐升温至 550°C, 并持续煅烧 4h, 结束后在室温下冷却降温, 将所得到的黄色粉末研磨, 洗涤过滤干燥, 得到样品 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。

(3) 多孔功能陶瓷的制备: 浆料配比为氧化铝: 硅灰石: 沸石粉: PVB: 二氧化硅: 氧化钨=7000: 1500: 1500: 300: 66: 33, 混匀, 在磁力搅拌器上搅拌 4 小时。将海绵裁成规则形状, 先用自来水冲洗表面的灰尘, 而后使用 1mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 1mol/L NaOH 进行清洗, 最后, 用蒸馏水清洗以去除表面残留的酸碱。放入烘箱 100°C, 3 小时定型, 将定型完毕的材料与高温管式炉 1500°C 烧结 50min, 冷却到 200°C 后再随室温冷却, 得到多孔功能陶瓷。

(4) BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的制备: 为了探究最佳的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 比例, 采用了简单的复合方法分别制备了不同比例的复合物。按照质量比计算出不同比例所需的 BiVO<sub>4</sub> 的质量, 并将 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 加入到 Bi(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O 溶液中, 其余步骤均与 BiVO<sub>4</sub> 制备步骤相同。按照此方法分别制备了 5%、7.5%、10%、12.5%、15% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 样品。BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的制备是采用原位生成的方法, 多孔功能陶瓷在使用前需要去除表面的杂质, 将多孔功能陶瓷置于稀硝酸溶液中, 水浴加热到 80°C 并保温 1h, 然后经过水洗以及醇洗, 烘干后便可将多孔功能陶瓷放入反应釜与 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 一起反应, 从而得到 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷。根据负载的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 量的不同制备了 5%、10%、15%、20%、25% 质量分数的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷。

#### 2.1.2 材料的表征

为了分析所制备材料的物质组成, 对其进行了 X 射线衍射分析, 控制衍射电压为 40KV, 采用 Cu 靶为实验靶材、10°-80°为扫描范围; 扫描电子显微镜分析微观形貌, 并进行能谱表面元素分析。能谱表面元素分析是激发样品表面的分子或者原子, 根据电子的特征能量对元素进行分析; 紫外-可见漫反射 (UV-vis) 分析其禁带宽度, 扫描范围为 300nm-600nm, 扫描速度为 1nm/s。

#### 2.1.3 材料的光催化性能

称取一定量的催化剂于烧杯中, 并向烧杯中加入 100ml 的 0.01 g/L 的 MB 溶液, 先进行暗反应 30min, 而后打开金卤灯并加入滤波片过滤可见光以外的光, 每隔 30min 取样, 离心分离后取上清液, 2h 结束反应。使用紫外-可见分光光度计进行光谱扫描, 利用公式计算降解率。

$$Degradation\ rate = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%$$

(1) 探究最佳 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合量: 分别取 0.1g 不同比例的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 样品进行反应, 以探究 BiVO<sub>4</sub> 在 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 中的最佳修饰量。

(2) 探究 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的最佳负载量: 因为是材料负载到多孔功能陶瓷上, 多孔功能陶瓷的质量占了大部分, 所以探究最佳负载量时使用 0.5g BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷, 以探究 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 不同添加量对光催化效率的影响。

(3) 探究不同活性物种对反应的影响: 在光催化过程中加入不同活性物种的淬灭剂, 本实验主要探究了 h<sup>+</sup>、·OH、O<sub>2</sub> 这三种活性物种对材料光催化活性的影响。

基于上述研究内容中确定的材料制备方案、表征方法及性能检测流程, 下面将对所制备的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合物、多孔功能陶瓷及 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷复合光催化剂的结构、形貌、光学特性及光催化性能测试结果展开详细分析, 验证材料制备的有效性及其性能优化效果。

## 3 结果分析

### 3.1 材料的 XRD 与形貌分析

#### 3.1.1 材料的 XRD 分析

图 1 是 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiVO<sub>4</sub> 的 XRD 图。由图可以看出 BiVO<sub>4</sub> 在 2θ 角为 18°、28°、30°、50° 等处出现了明显的特征峰, 其晶面为 (101)、

(112)、(004)、(220), 与 BiVO<sub>4</sub> 的标准卡片 PDF#83-1697 的特征衍射峰基本一致。而且峰形较窄, 证明其结晶度较好。从 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 XRD 图可以看到其在 2θ 角为 13° 和 27° 左右的位置的两个特征峰, 是 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的典型特征峰。当 BiVO<sub>4</sub> 修饰到 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 上后, 其 XRD 图表现出 BiVO<sub>4</sub> 和 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的特征峰, 说明成功制备出了 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合物。由于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的量较少, 而且其特征峰较矮, 所以其特征峰在复合物的特征峰中表现的不是很明显。

图 2 是 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷和多孔功能陶瓷的 XRD 图, 由图可以看出多孔功能陶瓷在 2θ 角为 32°、37°、44°、57° 等位置都有明显的衍射峰, 而在 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的 XRD 图上也均有体现, 只是由于多孔功能陶瓷的峰较矮导致其不是特别明显, 证明成功地制备出了

BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷。值得一提的是, 多孔功能陶瓷的加入并未使 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的晶型有较大变化, 这证明多孔功能陶瓷性质较为稳定, 没有参与 BiVO<sub>4</sub> 的合成反应。

### 3.1.2 材料的形貌分析

图 3 中 a、b 分别为 BiVO<sub>4</sub> 和 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的扫描电镜图, 从图中可以看出 BiVO<sub>4</sub> 呈片状结构且有不规则的棒状, 部分棒状晶体有的部分发生明显的团聚现象, 分散性不是很好; g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 则呈现不规则片状结构。c 和 d 是不同放大倍数下的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的扫描电镜的图片, 可以看出经过 BiVO<sub>4</sub> 的修饰, 片状的 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 得到了很好的分散, 大多已变成了不规则棒状, e 为 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的能谱图, 可以看到复合物中 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的五种元素, 再次证明了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与 BiVO<sub>4</sub> 的成功复合。

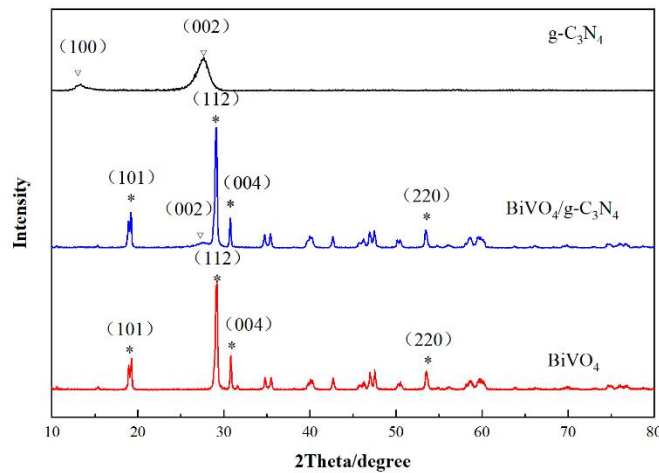


图 1 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (10%比例) 和 BiVO<sub>4</sub> 的 XRD 图 (测试条件: Cu 靶, 衍射电压 40KV, 扫描范围 10° -80° )

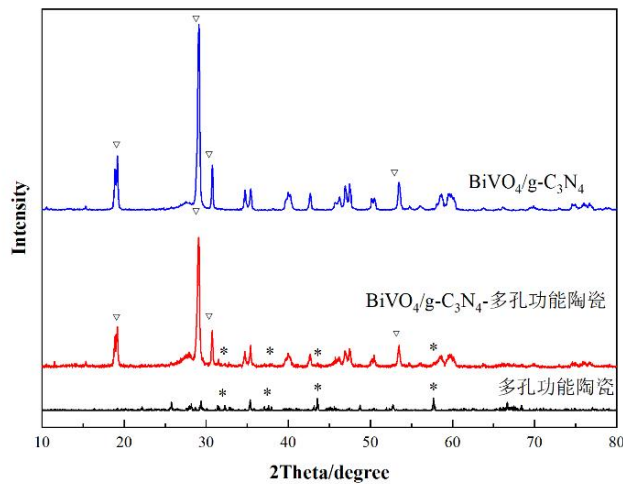


图 2 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷和多孔功能陶瓷的 XRD 图

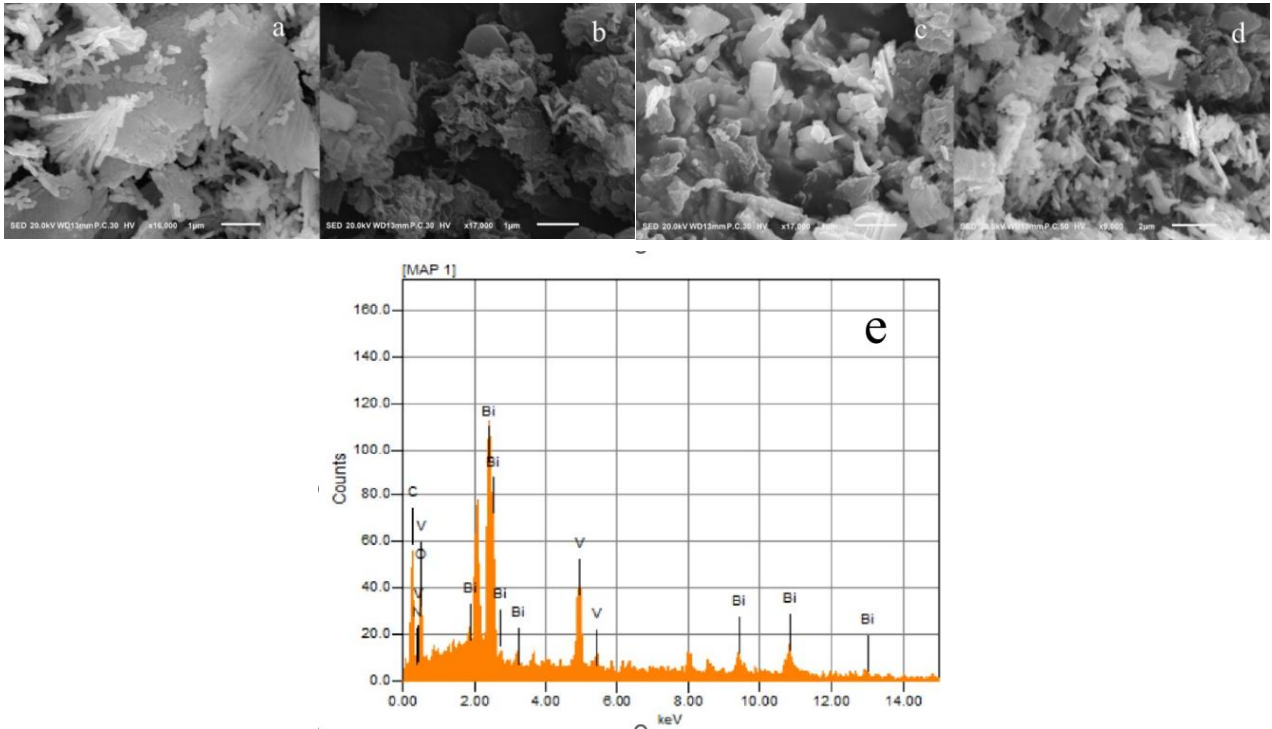


图3 BiVO<sub>4</sub>、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的扫描电镜图及能谱图

### 3.2 紫外-可见漫反射分析

图4为BiVO<sub>4</sub>、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的紫外-可见漫反射图,从图中可以看到材料对于不同波长的光的吸收程度,BiVO<sub>4</sub>对于不同波长的光的吸收都要高于g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,可见g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>在波长为450nm左右的吸收开始明显增加,而BiVO<sub>4</sub>在波长500nm左右就开始明显增加,g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>经过BiVO<sub>4</sub>修饰之后则在520nm左右就开始有明显上升,而且在可见光臂长范围内对于光的吸收也明显高于两个单体,这表明BiVO<sub>4</sub>修饰g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>后g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的光响应能力得到了明显的提高。

图5为BiVO<sub>4</sub>、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的UV-vis数据分析图,利用Tauc plot法对得到的UV-vis数据进行分析,公式为 $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{m}} = B(h\nu - E_g)$ ,式中 $\alpha$ 为吸收系数,B为常数, $h\nu$ 为光子能量,h为普朗克常数, $\nu$ 为入射光子频率, $E_g$ 表示半导体禁带宽度(带隙),直接带隙半导体 $m=1/2$ ,间接带隙半导体 $m=2$ 。从图中可以看出经过BiVO<sub>4</sub>修饰的g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的禁带宽度从2.85eV下降到2.45eV,BiVO<sub>4</sub>修饰降低了g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>禁带宽度,这样就可以使g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>可以吸收更多波长段的太阳光,加大对太阳光的利用,这样就可以提高材料的光催化性能。

### 3.3 不同反应条件的对照实验

图6为g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiVO<sub>4</sub>在不同条件下降解MB溶液的对照实验。在仅有光照的情况下MB溶液有少量的分解,加入一种催化剂后降解率有了明显的提升,加入BiVO<sub>4</sub>的一组降解率达到了73.9%,而加入g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的一组降解率达到了63.9%,加入BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合物的一组降解率有了更明显的提升,达到了89.6%,根据加入单一催化剂和加入g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiVO<sub>4</sub>复合物的降解情况可以看到,复合物的降解效率远远大于两个单体的降解率,这说明g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>与BiVO<sub>4</sub>的复合确实提高了BiVO<sub>4</sub>的光催化活性,改性g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的目的达到了。而仅仅加入复合物不加光照的一组对MB溶液的降解率仅为13.8%,这说明光照也是降解MB溶液的一个不可缺少的元素。

### 3.4 不同比例BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的复合物的降解实验

图7是不同比例g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>与g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>的复合物降解MB的对照实验,在5%到10%范围内BiVO<sub>4</sub>修饰量的增加导致复合物的光催化活性得到提升,原因可能是修饰量的增加使复合物中电子-空穴更好地分离。增加到10%以后,其降解效率反而降低,这可能是由于过高的修饰量使催化剂表面活性位点过多,部分活性位点无法得到充分利用,从而降低材料的光催化性能,证明10%是其最佳的修饰量。

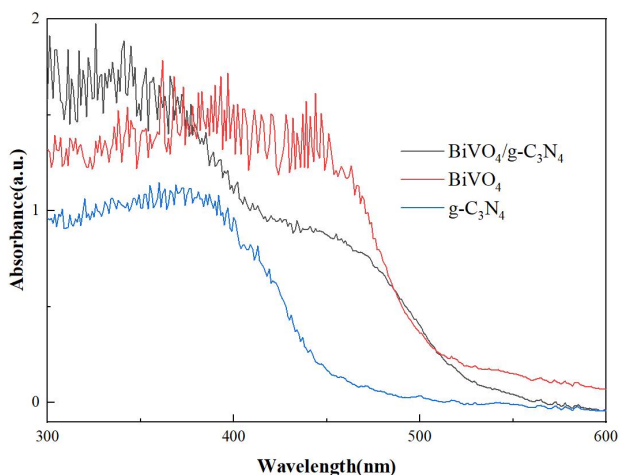


图 4 BiVO<sub>4</sub>、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的紫外-可见漫反射图

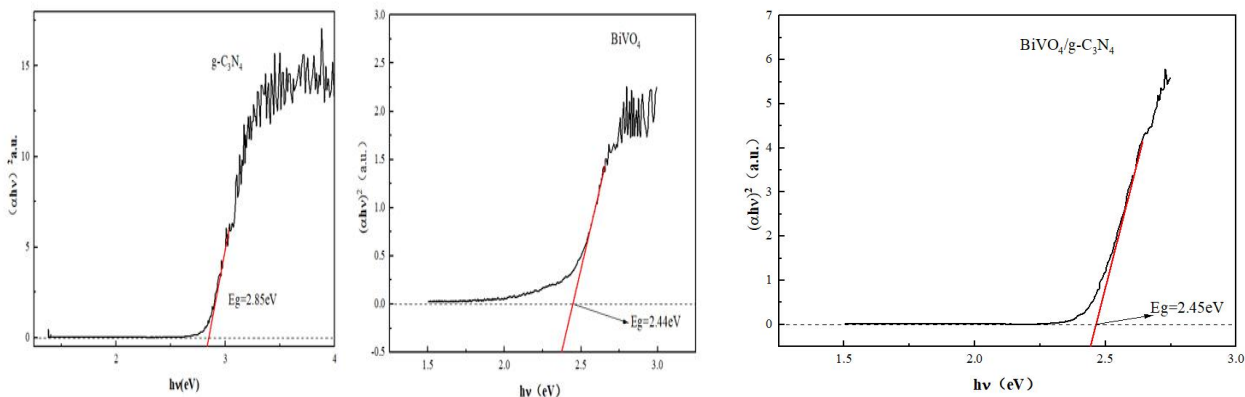


图 5 BiVO<sub>4</sub>、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的 UV-vis 数据分析图

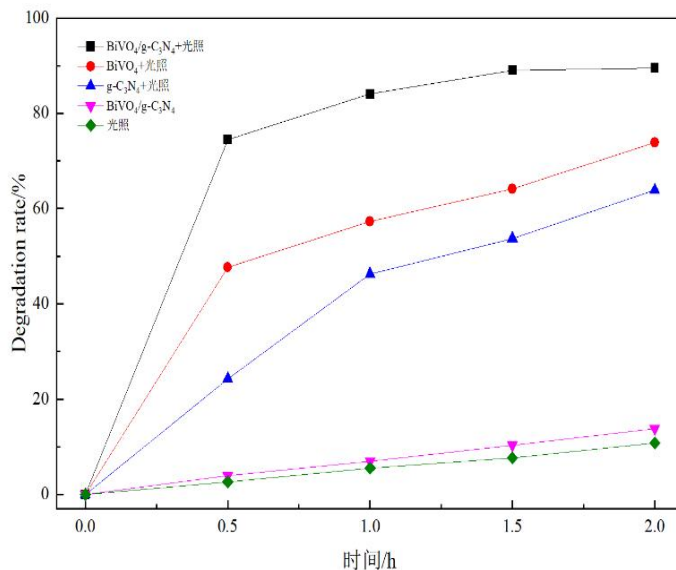
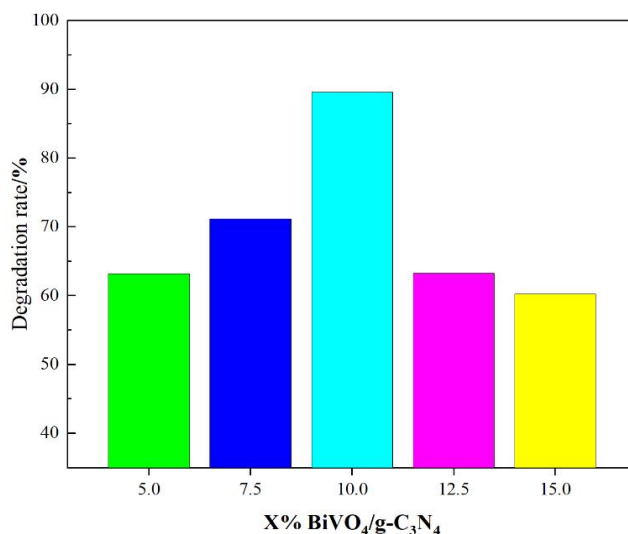


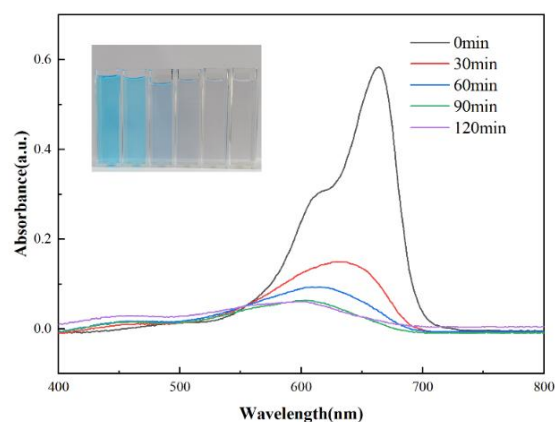
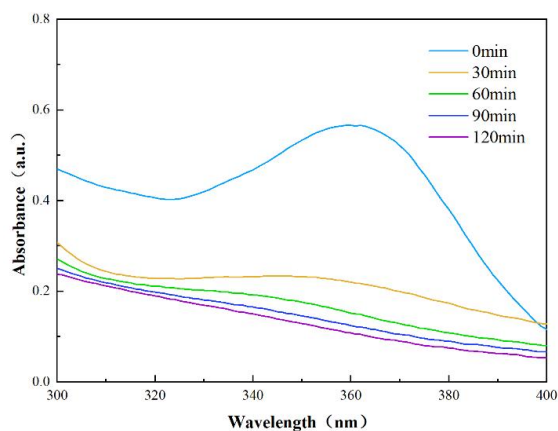
图 6 不同条件下 (仅光照、BiVO<sub>4</sub>催化、g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>催化、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>催化、仅 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>无光照) 降解 MB 溶液 (0.01g/L) 的对照实验结果 (在可见光照射下反应时间 2h)

图7 不同比例 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的复合物降解 MB 的对照实验

### 3.4.1 最佳修饰量的光谱扫描图

图8为最佳复合量10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>降解MB的光谱扫描图,图中可以看出MB的最大吸收波长有偏移,所以不宜采用MB最大吸收波长664nm来测量,而应采用光谱扫描的方式取其峰值来计算。由图可以看出两个峰值明显下降的区域,分别是暗反应和光反应前半小时,这大概是光反应前期MB溶液浓度高,催化剂产生的活性物质可以很快的被反应掉,而随着这一反应的进行,溶液中MB越来越少,所以反应速率也有所减慢<sup>[10]</sup>。在90min时,几乎已经达到了降解的终点,最后30min基本上没怎么降解,90min降解率达到89%,材料的光催化性能良好。

图9为10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>降解四环素的光谱扫描图,在120min内材料降解四环素的降解率达到了72.2%,四环素是一种广泛使用的抗生素,它在畜牧业和家禽养殖中被广泛使用。四环素的过量使用会导致环境中四环素的积累,从而对生态系统造成破坏。催化剂可以将四环素降解为无毒的物质,从而减轻环境污染的程度。这说明催化剂在畜牧业和家禽养殖中具有重要的应用前景。证明BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>复合材料不只能降解MB溶液,对四环素等其它污染物也有良好的降解效果,具有广泛的催化活性和适用性,可以在不同的环境中对多种不同类型的污染物进行有效的降解,是一种非常有效的催化剂。

图8 10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 降解 MB 的光谱扫描图图9 10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 降解四环素的光谱扫描图

### 3.5 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的最佳负载量

图 10 为 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的最佳负载量的柱状图, 由图可以看出 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 最佳负载量 15%, BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载量过高或者过低都会影响材料的性能。这可能是因为 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载量的增加可能会堵塞多孔功能陶瓷的孔洞, 从而降低多孔功能陶瓷的透光性, 降低了光线的利用率, 导致光催化效果变差, BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的最佳负载量在 15% 左右。

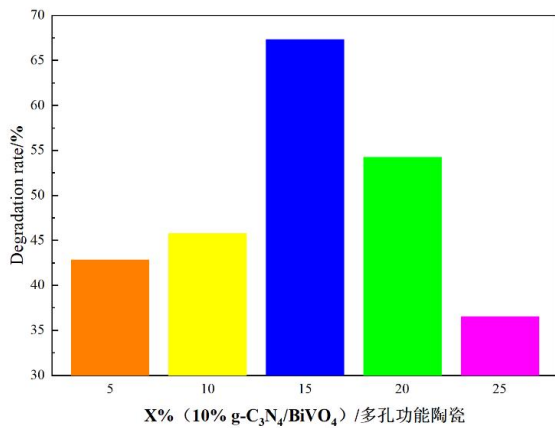


图 10 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的最佳负载量

### 3.6 可见光下降解 MB 的淬灭实验

为了探究 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 在降解反应中的主要活性物质, 用 EDTA-2Na 捕获 h<sup>+</sup>、异丙醇捕获·OH、抗坏血酸捕获·O<sub>2</sub><sup>-</sup>进行实验。由图 11 中可以看出加入异丙醇和 EDTA-2Na 对材料的光催化性能影响较小, 抗坏血酸使 2h 的降解率下降到 38%, 表明·O<sub>2</sub><sup>-</sup>是参与反应的主要活性物种, h<sup>+</sup>和·OH的作用则较小。

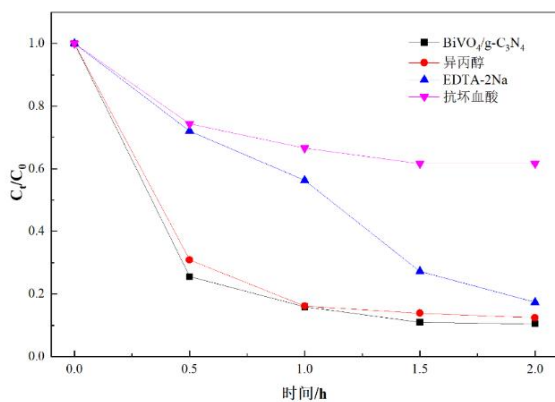


图 11 淬灭实验

### 3.7 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光催化反应机理

在依据上述测试结果以及相关文献的基础上, 探讨了该催化剂降解 MB 溶液时 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiVO<sub>4</sub> 的协同机制。图 12 是 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 降解过程中电荷转移以及降解机理图, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BiVO<sub>4</sub> 都可以被可见光激发形成光生电子和空穴但是由于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的价带值比 BiVO<sub>4</sub> 的价带值更负, 使 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 上的电子可以迁移到 BiVO<sub>4</sub> 上, BiVO<sub>4</sub> 上的电子在其表面与 O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 结合生成羟基自由基和超氧自由基, 从而进行氧化还原反应, 空穴则是转移到了 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的表面, 进行氧化还原反应。经过 BiVO<sub>4</sub> 的修饰有效促进了电子-空穴对的分离, 使 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的电荷传输能力增强, 提高了材料的光催化性能。且根据能带结构可知, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的导带电位 (约 -1.1eV) 高于 BiVO<sub>4</sub> 的导带电位 (约 0.3eV), 光生电子可从 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 导带迁移至 BiVO<sub>4</sub> 导带。而 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的价带电位 (约 1.75eV) 低于 BiVO<sub>4</sub> 的价带电位 (约 2.74eV), 光生空穴从 BiVO<sub>4</sub> 价带迁移至 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 价带, 有效促进电子-空穴对分离。

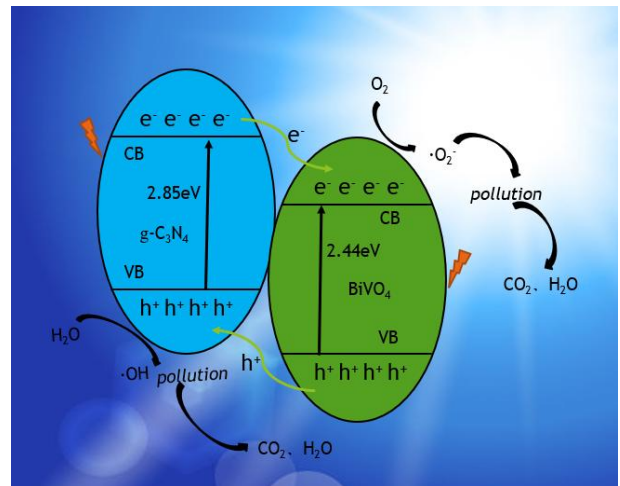


图 12 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 降解过程中电荷转移以及降解机理图

### 3.8 稳定性实验

图 13 为 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷降解循环实验, 由图可见 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的降解率比 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷的降解率高, 这是因为 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉体在溶液中的分散性好, 从而可以更加充分的利用光, 更好的接触氧气。而陶瓷材料密度大, 会沉在下半部分, 不能很好的与氧气进行接触反应, 这就导致同等质量的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 粉体与负载到多孔功能陶瓷表面的降解率有差异。但是多孔功能陶瓷易于回收, 便于多次重复利

用, 稳定性较好, 五次循环之后与第一次的降解率相比只下降了 34.3%, 而 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 未负载则下降了 42.2%。

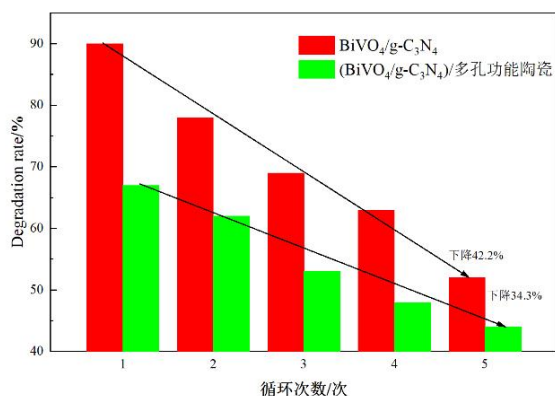


图 13 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷 (15% 负载量) 降解 MB 溶液的循环实验结果 (循环次数 5 次, 可见光照射, 每次反应时间 2h)

#### 4 结论

本文采用简单的实验方法制备了 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-多孔功能陶瓷复合光催化剂; 将 BiVO<sub>4</sub> 对 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 进行修饰, 制备不同比例的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合物, 并在可见光照射下降解一定浓度的 MB 溶液以探究其最佳修饰量, 结果表明 10% BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的降解效率最佳, 降解效率为 89.55%, 远远高于两个单体相同条件的降解率; 另外, 通过对四环素的降解实验证明 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 具有广泛的催化性能; 然后将 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 负载到多孔功能陶瓷的表面并探究最佳负载量, 最佳负载量为 15%, 降解效率为 67.31%; 通过 5 次循环实验证明经过陶瓷负载后的稳定性明显大于未经过陶瓷负载的稳定性; 通过淬灭实验探究复合光催化剂在降解过程中的主要活性物种, 结果表明主要活性物种为超氧自由基; 最后结合各类表征和测试结果对复合光催化剂在降解过程中的电荷转移机制进行了初步探索。

#### 参考文献

- [1] 宋小伟. 有机污染物降解方法研究[J]. 山西化工, 2022, 42(03):356-357.
- [2] 韩泽叶. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 基复合材料的制备工艺及光催化应用[D]. 西安工业大学, 2022.000630.
- [3] 丰义兵. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 基微纳米复合材料的制备及其性能研究[D]. 齐鲁工业大学, 2019.
- [4] 党明月. 极化电荷调控的 BiVO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 异质结及光催化性能研究[D]. 陕西科技大学, 2021.
- [5] Zhang F, Wang W N, Cong H P, et al. Facile synthesis of upconverting nanoparticles/Zinc oxide core - shell nanostructures with large lattice mismatch for infrared triggered photocatalysis[J]. Particle, 2017, 34(2): 1600222
- [6] Regmi C, Kshetri Y, PANDey P R, et al. Understanding the multifunctionality in Cu-doped BiVO<sub>4</sub> semiconductor photocatalyst[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 75(01):84-97.
- [7] 李金叶, 马爱琼, 张电, 等. 仿生模板辅助水热法构建 Z 型 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/m-BiVO<sub>4</sub> 材料及其光催化性能[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(03):423-429.
- [8] 何秀兰, 郭英奎, 王春艳, 等. 多孔陶瓷负载 TiO<sub>2</sub> 光催化降解甲基橙溶液的研究[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(02): 503-508.
- [9] 吴成. 多孔陶瓷负载 N 掺杂 TiO<sub>2</sub> 的设计制备及光催化性能研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [10] 李家科, 李文涛, 刘欣. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiVO<sub>4</sub> 复合光催化剂制备及其光催化性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(06):6067-6071.

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