



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20210214

水铁矿/二硫化钼催化剂的可见光-类芬顿催化性能

常 达, 孙娟娟, 曾 明, 王 昶
(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 以二硫化钼为载体, 采用超声辅助的方法成功制备水铁矿/二硫化钼催化剂. 通过 SEM、XRD、UV-Vis 对材料的形貌、结构和光吸收性能进行表征. 以亚甲基蓝为目标降解物, 研究催化剂在可见光催化、类芬顿、可见光-类芬顿 3 种不同体系中对亚甲基蓝的降解效果. 实验结果表明: 在 3 种体系中, 光生电子和暴露的 Mo^{4+} 活性位点共同促进了 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的还原转化, 催化剂在可见光-类芬顿体系中具有更好的催化活性. 此外, 研究不同催化剂投加量以及光源功率对催化性能的影响, 结果表明: 在光源功率为 300 W、催化剂投加量为 0.4 g/L 时, 水铁矿/二硫化钼催化剂在催化反应 60 min 后对 50 mL 50 mg/L 亚甲基蓝溶液的脱色率高达 92%.

关键词: 光助类芬顿; 可见光; 二硫化钼; 水铁矿

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2022)03-0037-06

Photo-Fenton Activity of Ferrihydrite/ MoS_2 Catalyst under Visible Light

CHANG Da, SUN Juanjuan, ZENG Ming, WANG Chang

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In our study, the ferrihydrite was loaded on the MoS_2 to fabricate a novel ferrihydrite/ MoS_2 catalyst by the ultrasonic-assisted method. The morphology, microstructure, and light absorption performance of the prepared catalysts were characterized by SEM, XRD and UV-Vis. The catalytic activities of catalysts for the degradation of methylene blue were explored in three different systems, namely visible-light photocatalysis, Fenton-like, and visible-light/Fenton-like system. The experimental results showed that in the three systems the photogenerated electron and the exposed Mo^{4+} active site promoted the reduction transformation of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, so the catalyst had the best catalytic activity in the visible-light/Fenton-like system. Moreover, the effects of different dosage of catalyst and the power of light source on the catalytic performance were also studied. The results showed that when the power of light source was 300 W and the dosage was 0.4 g/L, the decolorization rate of 50 mL methylene blue solution (50 mg/L) over the ferrihydrite/ MoS_2 catalyst was up to 92% after 60 minutes of catalytic reaction.

Key words: photo-Fenton; visible light; MoS_2 ; ferrihydrite

随着世界人口的不断增长, 人们对纺织品的需求量越来越大, 大量合成染料的使用导致了高浓度有机染料废水的大量排放, 这些废水会污染土地和淡水资源^[1]. 因此, 有效地降低废水中的染料含量对保护水资源环境非常重要. 有机染料污染物在水中的可生化性差, 现有的生物处理方法难以将其矿化降解. 为了提高废水中有机物的降解率, 需要研究高效的化学处理方法. 高级氧化工艺是一类较为成熟的水处理

工艺, 反应过程中产生的活性氧物种 (ROS) 可以直接将有机污染物矿化或通过氧化提高其可生物降解性^[2]. 光催化氧化、电化学氧化和芬顿氧化都属于高级氧化工艺. 已有研究^[3-5]表明, 光催化氧化反应和芬顿反应均可以有效去除水中的有机染料. 传统的芬顿反应受 pH 限制较为明显, 且对 H_2O_2 的利用率低, 而类芬顿反应因其 pH 适用范围广且活性高, 近年来受到广泛关注^[6].

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2022-03-21

基金项目: 宁夏回族自治区科技厅资助项目 (2019BBE02024); 天津市科技计划资助项目 (20JCQNJC00670)

作者简介: 常 达 (1997—), 男, 河北定州人, 硕士研究生; 通信作者: 王 昶, 教授, wangc88@163.com

二元过渡金属硫化物如 MoS_2 、 WS_2 等纳米材料具有比表面积大、能带带隙小等优点,在类芬顿和光催化反应中被广泛应用^[7-8]。邢明阳团队在 MoS_2 的类芬顿反应方面进行了大量的研究工作^[9-11],证实了 MoS_2 可以作为一种具有高反应活性的类芬顿催化剂。作为典型的二维材料, MoS_2 是一种与 TiO_2 具有相似能带结构的半导体材料,在可见光照射下可对多种有机污染物(亚甲基蓝、甲基橙、苯酚等)表现出良好的光催化活性^[12-13]。 MoS_2 的层状结构使其具有较大的比表面积和较多的活性位点,又因其禁带宽度在 1.23 ~ 1.69 eV,使得 MoS_2 在可见光下能发挥出良好的光催化性能^[14]。此外,水铁矿(Fh)是一种高效的非均相芬顿催化剂,能激活 H_2O_2 产生高氧化能力的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),进而影响环境中有机/无机污染物的迁移转化,常用于环境污染的修复^[15];而且,Fh 在自然界大量存在,人为合成制备简单,性能优越。然而,与许多异相芬顿体系一样,Fh 体系也存在两个关键问题,即 Fe^{3+} 还原速率慢和 H_2O_2 有效利用率低。目前,已有研究人员将光催化材料如 BiVO_4 和 CeO_2 引入到 Fh 中,加速了 Fe^{2+} 在 Fh 上的再生,提高了 H_2O_2 的利用率;在相同条件下,相较于单纯的 Fh、 BiVO_4 以及 CeO_2 ,制备的复合材料对有机染料、抗生素等污染物的降解率均有较大提升^[16-17]。

将铁基催化剂和 MoS_2 结合设计成非均相类芬顿催化剂,可以将光催化反应和芬顿反应联合起来降解有机污染物,进而提高对有机污染物的降解效率。本文采用简单的超声辅助的方法将 Fh 和 MoS_2 结合在一起,研究光照条件、催化剂投加量对目标污染物降解效果的影响,探讨了催化剂的稳定性和可见光-类芬顿的催化机理。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

九水合硝酸铁、硫代乙酰胺、二水合钼酸钠、无水乙醇、叔丁醇(TBA)、2,2,6,6-四甲基哌啶(TEMP),分析纯,麦克林试剂公司;氢氧化钠,分析纯,阿拉丁试剂公司;盐酸,分析纯,天津风船化学试剂科技有限公司;亚甲基蓝、苯醌(BQ),分析纯,天津光复精细化工研究所;过氧化氢(体积分数 30%),分析纯,天津致远化学试剂有限公司。

XRD 6100 型 X 射线衍射仪、UV 3600 Plus 型紫外-可见分光光度计,日本岛津公司;TU-1810 型紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;

Apreo 型场发射扫描电子显微镜及配套能谱仪,美国赛默飞公司;NAI-GHY-DSGKW 型光化学反应仪,上海那艾实验仪器有限公司。

1.2 催化剂的制备

1.2.1 MoS_2 的制备

通过水热法合成块状 MoS_2 (BM)。将 4 mmol 二水合钼酸钠与 20 mmol 硫代乙酰胺溶于 60 mL 去离子水中,连续搅拌 30 min;将混合液置于 100 mL 聚四氟乙烯内衬不锈钢高压反应釜中,在 210 °C 烘箱中持续加热 24 h;待反应釜冷却至室温后,将所得沉淀物的悬浊液进行离心,并用去离子水和无水乙醇分别洗涤 3 次,真空抽滤;滤饼在 60 °C 条件下烘干后研磨,用 200 目筛网进行筛分。

1.2.2 Fh 的制备

在 2 线水铁矿的制备过程中,将 8.08 g 九水合硝酸铁加入 25 mL 超纯水中,得到硝酸铁溶液;将 2.4 g 氢氧化钠加入 20 mL 超纯水中,得到氢氧化钠溶液;在剧烈搅拌条件下,将两种溶液同时滴加到 25 mL 超纯水中,保持反应过程体系 pH 为 7.0 ± 0.1 ,连续搅拌 3 h。将得到的悬浊液进行离心,并用超纯水和无水乙醇分别洗涤 3 次,然后在 40 °C 下进行真空干燥,研磨并通过 200 目筛即得 Fh。

1.2.3 Fh/BM 的制备

在制备 Fh/BM 催化剂时,称取质量比为 1 : 9 的 Fh 和 BM,先将二者置于超纯水中超声分散 30 min,然后搅拌 1 h。将得到的悬浊液进行离心,并用超纯水和无水乙醇分别洗涤 3 次,真空抽滤;滤饼在 40 °C 下进行真空干燥,研磨并通过 200 目筛即得 Fh/BM。

1.3 表征测试

1.3.1 结构表征

利用粉末 X 射线衍射分析材料的晶体结构。Cu 靶, $K\alpha$ 射线,管电压 40 kV,管电流 30 mA,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$,扫描范围 2θ 为 $5^\circ \sim 80^\circ$ 。

采用紫外-可见分光光度计测定材料的紫外-可见漫反射光谱。

1.3.2 形貌表征

通过场发射扫描电子显微镜(SEM)观察所制备材料的表面形貌和微观结构,用能谱仪测定材料的颗粒结构和元素组成。

1.4 催化实验

1.4.1 光催化实验

用去离子水配制 50 mg/L 亚甲基蓝溶液,用 NaOH 溶液和 HCl 溶液调整溶液的初始 pH 为 6。按

照 0.4 g/L 的投加量将催化剂和 50 mL 亚甲基蓝溶液置于 100 mL 石英管中, 在无光条件下, 持续搅拌 30 min 以达到催化剂与亚甲基蓝的吸附-脱附平衡. 平衡后, 开启可见光光源 (300 W 氙灯) 开始反应; 持续搅拌, 每 10 min 取样一次, 将 1 mL 反应溶液稀释 10 倍, 并用 0.45 μm 滤膜过滤催化剂得到上清液. 通过分光光度计, 在 664 nm 波长下测定样品的吸光度.

1.4.2 类芬顿实验

类芬顿实验的催化剂投加量、亚甲基蓝质量浓度和体积与光催化实验均相同, 建立吸附-脱附平衡后, 在无光条件下, 加入 0.1 mL 体积分数为 30% 的 H_2O_2 溶液, 继续搅拌反应.

1.4.3 可见光-类芬顿实验

可见光-类芬顿实验的催化剂投加量、亚甲基蓝质量浓度和体积均与光催化实验相同, 建立吸附-脱附平衡后, 加入 0.1 mL 体积分数为 30% 的 H_2O_2 溶液, 开启可见光光源 (300 W 氙灯), 继续搅拌反应. 在催化剂稳定性实验中, 上述步骤完成后, 对催化剂进行离心清洗、干燥和研磨, 然后重复上述催化实验.

亚甲基蓝的脱色率用 $1 - (\rho/\rho_0)$ 表示, ρ 和 ρ_0 分别为反应一段时间后及初始时刻亚甲基蓝的质量浓度, 二者可通过吸光度计算得出.

2 结果与讨论

2.1 催化剂的表征

2.1.1 XRD 表征

BM、Fh 和 Fh/BM 的 XRD 谱图如图 1 所示.

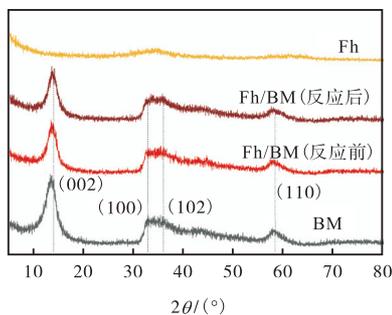


图 1 不同样品的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of different samples

图 1 中 2θ 为 14.12° 、 32.91° 、 35.97° 和 58.76° 处的衍射峰位置分别对应的是 BM 的 (002)、(100)、(102) 和 (110) 晶面^[18]. BM 的衍射峰强度高, 未发现

其他的衍射峰, 表明其纯度和结晶度良好. 由于 Fh 的衍射峰宽、强度弱, 所以在 Fh/BM 的衍射图中并未发现 Fh 的衍射峰. 但是, Fh 的引入使 BM 的衍射峰强度减弱, 表明 Fh 的加入影响了 BM 的结晶度, Fh 成功地黏附在 BM 表面.

2.1.2 扫描电子显微镜观察及能谱分析

BM、Fh 和 Fh/BM 的扫描电镜图以及 Fh/BM 的能谱仪 (EDS) 面扫描图如图 2 所示. 由图 2 可知: BM 呈现出典型的不规则块状形貌, Fh 整体显示为由微小纳米颗粒聚集成块. 与 BM 相比, 在 Fh/BM 催化剂上, 由于 Fh 的高表面积可以为催化剂提供更多的反应活性位点, 因此有助于提升催化剂的类芬顿反应活性. 通过 EDS 面扫描结果可知, 在 Fh/BM 催化表面, 各元素分布均匀, 表明 Fh 已经成功地分布在 BM 表面, 这有利于 Fh 和 BM 协同反应的进行. 此外, 表 1 详细给出了 O、Mo、S 和 Fe 的元素含量数据, 其中铁元素质量分数仅为 1.05%.

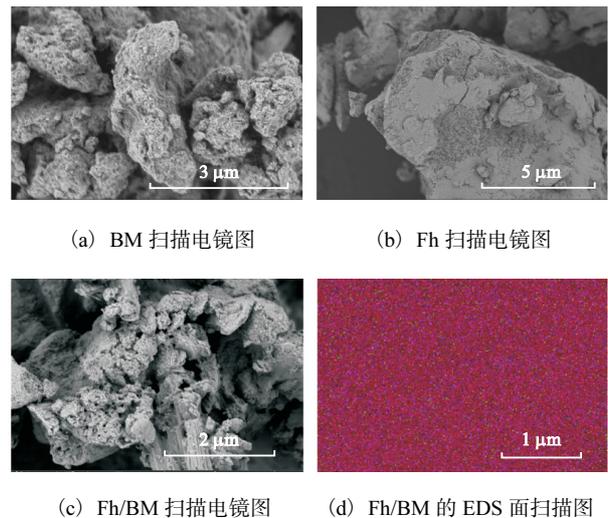


图 2 BM、Fh、Fh/BM 的扫描电镜图以及 Fh/BM 的 EDS 面扫描图

Fig. 2 SEM images of BM, Fh and Fh/BM and EDS mapping images of Fh/BM

表 1 Fh/BM 催化剂的元素含量

Tab. 1 Element content of Fh/BM catalyst

元素	质量分数/%
O	17.68
Mo	54.46
S	26.81
Fe	1.05

2.1.3 UV-Vis 漫反射表征

不同样品的紫外-可见漫反射光谱如图 3 所示. 由图 3 可知: 纯 BM 在全光谱范围内均具有良好的

吸收效果,纯 Fh 在波长小于 650 nm 时具有较强的吸收能力. 与纯 BM 相比,Fh/BM 的吸收有轻微的蓝移,但吸收强度在全谱范围内具有较大的提升. 这表明 Fh 的引入有助于增强 BM 的光吸收性能.

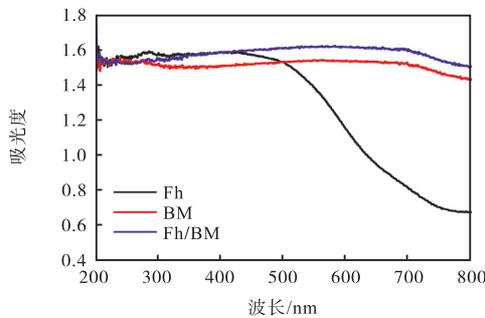


图3 紫外-可见漫反射光谱图
Fig. 3 UV-vis diffuse reflectance spectra

2.2 Fh/BM的催化性能

2.2.1 不同反应条件下的催化性能对比

为了探究 Fh/BM 在可见光辅助下的类芬顿催化活性,研究对比了 BM 和 Fh/BM 在不同条件下对亚甲基蓝的降解效果(催化剂投加量 0.4 g/L),结果如图 4 所示.

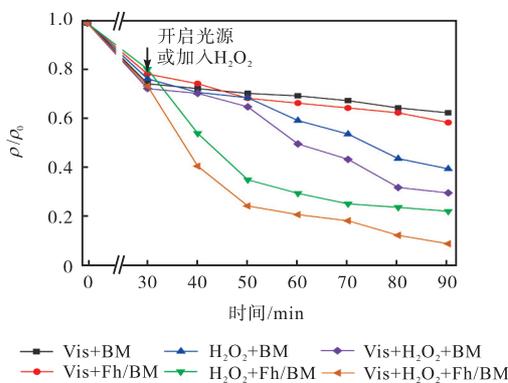


图4 不同反应条件对亚甲基蓝降解的影响

Fig. 4 Effects of different reaction conditions on degradation of MB

由图 4 可知:仅在可见光(300 W 氙灯光源)条件下,在 BM 和 Fh/BM 的光催化反应体系中,催化反应 60 min 后亚甲基蓝的脱色率分别为 33% 和 37%,其中约 25% 的亚甲基蓝去除归因于 Fh 和 Fh/BM 的吸附作用,可见它们的光催化性能一般. 在黑暗条件下,添加 0.1 mL H_2O_2 后,在 BM 和 Fh/BM 类芬顿反应体系中,催化反应 60 min 后亚甲基蓝的脱色率分别为 60% 和 78%. 开启 300 W 氙灯光源,同时添加 0.1 mL H_2O_2 后,BM 和 Fh/BM 在可见光-类芬顿反应体系中,催化反应 60 min 后亚甲基蓝的脱色率分

别为 70% 和 92%. 这些结果表明 Fh/BM 在可见光-类芬顿协同反应体系中对亚甲基蓝的脱色率优于单纯的光催化和类芬顿反应体系.

2.2.2 Fh/BM 投加量对催化效果的影响

在氙灯光源功率为 300 W、pH = 6、 H_2O_2 投加量为 0.1 mL 条件下,Fh/BM 的投加量对亚甲基蓝降解的影响如图 5 所示. 由图 5 可知:当 Fh/BM 投加量分别为 0.2、0.4、0.8、1.6 g/L 时,催化反应 60 min 后亚甲基蓝的脱色率分别为 59%、92%、95%、99%. 在投加量为 1.6 g/L 时,在打开光源并加入 H_2O_2 后 10 min 内,亚甲基蓝脱色率就已经接近 98%. 由此可见,亚甲基蓝的脱色率随着 Fh/BM 投加量的增加而升高,这是因为 Fh/BM 投加量的增加会导致更多的羟基自由基的产生. 为了在最经济的条件下更好地控制反应,在此选择投加量为 0.4 g/L 作为最优条件进行后续实验.

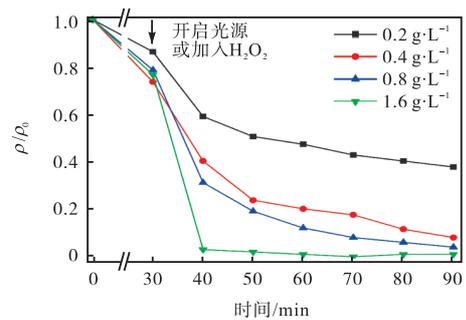


图5 Fh/BM的投加量对亚甲基蓝降解的影响

Fig. 5 Effect of Fh/BM dosage on degradation of MB

2.2.3 光源功率对催化性能的影响

在 Fh/BM 的投加量为 0.4 g/L、pH = 6、 H_2O_2 投加量为 0.1 mL 条件下,氙灯光源功率对亚甲基蓝降解效果的影响如图 6 所示.

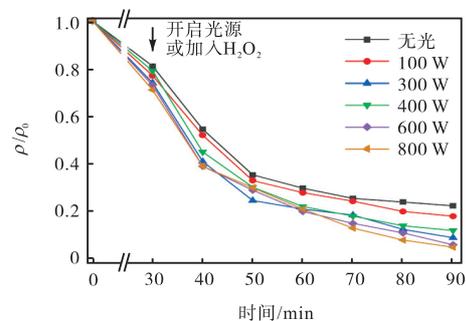


图6 光源功率对亚甲基蓝降解的影响

Fig. 6 Effect of light source power on degradation of MB

由图 6 可知:在光照时间为 60 min,光照条件为无光以及 100、300、400、600、800 W 的氙灯时,催化

剂的可见光-类芬顿反应对亚甲基蓝的脱色率分别为 78%、82%、92%、88%、93%、94%。在可见光-类芬顿的反应体系中,随着光源功率的增大,Fh/BM 对亚甲基蓝的脱色率有一定的提升,这表明光源功率对催化剂发挥催化性能有一定的积极影响。但是,当光源功率大于 300 W 时,对亚甲基蓝脱色率的提升影响不大,所以光源功率选择为 300 W。

2.3 Fh/BM 催化剂的稳定性

为了分析 Fh/BM 的稳定性,在 Fh/BM 的投加量为 0.4 g/L、pH = 6、H₂O₂ 投加量为 0.1 mL、氙灯光源功率为 300 W 的条件下进行催化剂循环利用实验,结果如图 7 所示。图 7 结果表明,经过 6 次循环实验后,亚甲基蓝的脱色率保持在 78% 以上。此外,通过图 1 的 XRD 谱图也可以清楚地看到使用前和使用后的 Fh/BM 的衍射峰强度没有明显差别,表明反应后的 Fh/BM 的性质并未发生变化。脱色率的下降主要是因为每次反应过程中,亚甲基蓝分子都会吸附在催化剂表面,随着反应次数的增加,过量染料分子覆盖了 Fh/BM 的活性位点,后续使用可利用紫外光照射催化剂一段时间,去除表面的碳沉积^[9]。综上所述,Fh/BM 具有良好的催化活性且性质稳定,这些优点将使其在实际应用中具有广泛的应用前景。

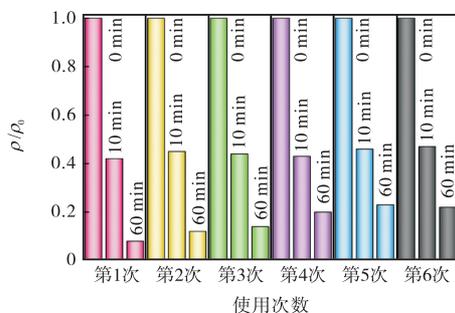


图 7 Fh/BM 催化剂的稳定性
Fig. 7 Stability of Fh/BM catalyst

2.4 Fh/BM 可见光-类芬顿催化机理推测

光催化和类芬顿反应都属于高级氧化反应,而二者都是通过产生活性氧物种达到降解有机污染物的目的^[20]。为了鉴别催化反应中的活性氧物种,分别利用 TBA、BQ、TEMP 来淬灭·OH、·O₂⁻、¹O₂,保持上述最佳反应条件不变,分别添加 2 mL TBA、15 mg BQ、200 μL TEMP 后的实验结果如图 8 所示。由图 8 可知:TBA 和 BQ 的加入对催化反应的结果影响较小,然而在加入 TEMP 并催化反应 60 min 后,亚甲基蓝的脱色率仅为 54%,这表明在 pH = 6 的缓冲溶液中,¹O₂ 是 Fh/BM 可见光-类芬顿体系中的主要活性

物种。

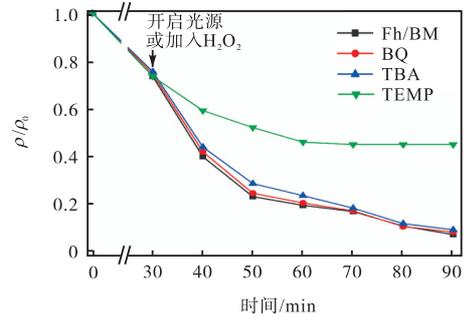


图 8 亚甲基蓝在不同自由基清除剂存在条件下的降解效果
Fig. 8 Degradation effect of MB in the presence of different free radical scavengers

对催化剂在 Vis + H₂O₂ + Fh/BM 反应体系中的催化机理进行推测,如图 9 所示。

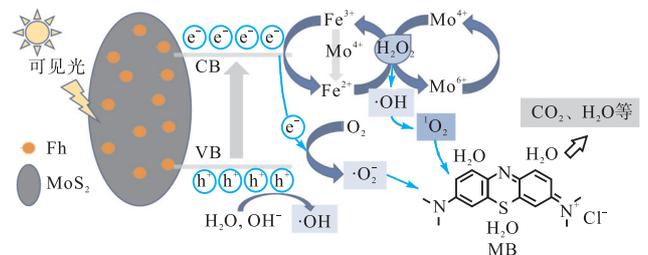


图 9 Vis + H₂O₂ + Fh/BM 体系中可见光-类芬顿催化机理图
Fig. 9 Visible light-Fenton-like catalytic mechanism in the Vis + H₂O₂ + Fh/BM system

在可见光照射下,BM 被激发使得电子从价带跃迁到导带。一方面,Fe³⁺捕获光生电子生成 Fe²⁺,Fe²⁺与 H₂O₂ 反应生成·OH,空穴(h⁺)将 H₂O 和水中的 OH⁻ 转化为·OH;另一方面,体系中还存在活性 Mo⁴⁺与 H₂O₂ 反应生成·OH 的类芬顿反应,而且活性 Mo⁴⁺同时还可协同光生电子将 Fe³⁺还原为 Fe²⁺,促进了 Fe³⁺/Fe²⁺ 的有效转化,进而促进生成了更多的·OH。由于·OH 的寿命较短,且迁移距离有限,因此很容易分解为 ¹O₂,见式(1)。最后,整个可见光-类芬顿体系以 ¹O₂ 为主导实现了对有机污染物的高效降解。



3 结 语

本研究通过简单的超声辅助法制备了 Fh/BM 可见光-类芬顿催化剂,利用不同表征手段证明了 Fh 紧密地负载在 BM 表面。在可见光光源功率为 300 W、Fh/BM 投加量为 0.4 g/L 的条件下,Fh/BM 相

较于单纯的 BM 具有更好的催化性能,在催化反应 60 min 内可将亚甲基蓝脱色率从 70% 提升至 92%。推测 Fh/BM 具有较高可见光-类芬顿催化性能的原因可能为:(1)Fh 的引入使得表面反应活性位点增多;(2)在可见光照射下,激发的光生电子协同活性 Mo^{4+} 共同促进了 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的还原转化,有效利用了 H_2O_2 , 进而产生更多的活性氧物种。

参考文献:

- [1] 国泛函. 工业染料废水处理工艺研究进展综述[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(11): 94-96.
- [2] 赵军胜, 潘昊, 潘俊鸥, 等. 基于·OH 的高级氧化技术及其组合技术的研究进展[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(8): 12-14.
- [3] 余少彬, 张铭泰, 李希成, 等. 新型复合纳米材料用于光催化降解染料废水的研究进展[J/OL]. 材料工程: 1-11 [2022-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20210603.1521.004.html>.
- [4] 徐晓燕, 王黎明, 符娇娇, 等. La/Nd 掺杂花状纳米 ZnO 的制备及对活性染料的光催化降解[J]. 印染, 2021, 47(7): 47-51.
- [5] 宋思扬, 吴丹, 赵焕新, 等. Co-FeOOH/g-C₃N₄ 的制备及其在非均相光芬顿反应中的催化性能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(12): 3262-3269.
- [6] 厉鹏远, 邱立平, 孙绍芳, 等. 强化传统芬顿/类芬顿氧化效能的研究进展[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 34-40.
- [7] 张四维, 郭俊宏. 化学气相沉积法制备二硫化钼薄膜及其光催化降解亚甲基蓝性能[J]. 化工环保, 2021, 41(5): 647-650.
- [8] 李珺煜. WS₂/TiO₂ 纳米复合材料制备及光生载流子输运特性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [9] YAN Q Y, LIAN C, HUANG K, et al. Constructing an acidic microenvironment by MoS₂ in heterogeneous Fenton reaction for pollutant control[J]. Angewandte chemie, 2021, 133(31): 17292-17300.
- [10] ZHU L L, JI J H, LIU J, et al. Designing 3D-MoS₂ sponge as excellent cocatalysts in advanced oxidation processes for pollutant control[J]. Angewandte chemie, 2020, 132(33): 14072-14080.
- [11] XING M Y, XU W J, DONG C C, et al. Metal sulfides as excellent co-catalysts for H₂O₂ decomposition in advanced oxidation processes[J]. Chem, 2018, 4(6): 1359-1372.
- [12] 陶喜洋, 武占省, 杨任鹏, 等. 活性炭/ZnO/MoS₂ 的制备及其超声辅助降解甲基橙[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(4): 28-35.
- [13] 王芳, 王雪芹, 程凯, 等. MoS₂ 负载量对 MoS₂/TiO₂ 光催化降解苯酚效率的影响及其作用机理研究[J]. 燃料化学学报, 2017, 45(8): 1001-1008.
- [14] 张亮. 基于二硫化钼改性的复合光催化剂的制备及性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [15] 马杰, 马玉玲, 钱晓燕, 等. 水铁矿对磷的吸附及胶体态磷迁移能力预测[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 85-93.
- [16] HUANG X X, ZHU N W, MAO F L, et al. Enhanced heterogeneous photo-Fenton catalytic degradation of tetracycline over $\gamma\text{CeO}_2/\text{Fh}$ composites: performance, degradation pathways, Fe^{2+} regeneration and mechanism[J]. Chemical engineering journal, 2020, 392: 123636.
- [17] XU T Y, ZHU R L, ZHU G Q, et al. Mechanisms for the enhanced photo-Fenton activity of ferrihydrite modified with BiVO₄ at neutral pH[J]. Applied catalysis B: environmental, 2017, 212: 50-58.
- [18] GAO X Q, QI J, WAN S H, et al. Conductive molybdenum sulfide for efficient electrocatalytic hydrogen evolution[J]. Small, 2018, 14(48): 1803361.
- [19] 杨婷婷, 陈星, 陈长斌, 等. CeO₂/g-C₃N₄ 光催化-芬顿高效降解盐酸强力霉素[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2576-2587.

责任编辑: 周建军